

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FABIANO MARCARINI

MONOGRAFIA
PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
UTILIZANDO PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

VIÇOSA-MG

2012

FABIANO MARCARINI

**PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
UTILIZANDO PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO**

Monografia apresentada ao Departamento de Eng. Elétrica do Centro de Ciências Exatas e tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa para a obtenção de créditos referentes à disciplina ELT-490 Monografia e Seminário e o cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Tarcísio de Resende

VIÇOSA-MG

2012

FABIANO MARCARINI

**PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
UTILIZANDO PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica no dia 20 de julho de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende

Examinador: Prof. Mauro de Oliveira Prates

Examinador: Prof. José Carlos Costa Campos

"O único lugar onde o
sucesso vem antes do trabalho é no
dicionário."

Albert Einstein

Dedico este trabalho a minha família que sempre em qualquer hora estava me apoiando, e aos meus amigos e professores que sempre estiveram à pronta disposição para me ajudar.

AGRADECIMENTOS

A meus pais por me dar essa oportunidade de estudar e ser alguém diferenciado no mundo de hoje.

Aos meus irmãos que sempre me apoiaram nas piores horas.

Aos meus amigos que me ajudaram quando houve complicações no trabalho.

A DEUS por tudo.

RESUMO

Este trabalho faz um estudo sobre os para-raios utilizados em sistemas elétricos de potência.

Primeiramente é feito uma análise das características construtivas e do funcionamento do mesmo.

São abordadas as sobretensões provenientes de descargas atmosféricas, principal causa de aplicações de para-raios, mostrando a maneira correta de atuação de um para-raios.

É realizada uma abordagem resumida da importância de um aterramento bem feito e como o aterramento influencia diretamente no desempenho de um para-raios.

Finalmente, para complementar o estudo e validar o trabalho é feita uma simulação digital utilizando o programa ATP (*alternative transients program*) para simular a proteção de uma subestação contra sobretensões oriundas de descargas atmosféricas utilizando o para-raios de óxido de zinco e nesta simulação a resistência de aterramento é variada para verificar sua influencia sobre a proteção.

Palavra chave: para-raios, sobretensões, impedâncias de aterramento e software ATP.

ABSTRACT

This work is a study of the lightning rod used in electric power systems.

First an analysis is made of the constructive characteristics and functioning.

Addressed are power surges from lightning strikes, the main cause for the application-rays, showing the proper way to work a lightning rod.

It's made an approach addressed the importance of grounding and how well done the grounding influence directly the performance of a lightning rod.

Finally, to complement the study and validate the work is done using a digital simulation program ATP (alternative transients program) to simulate a substation protection against surges coming from lightning using the lightning rod of zinc oxide and in this simulation and the grounding resistance is varied to determine their influence on the protection.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS	13
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E A PROPAGAÇÃO DE SURTO	16
1.2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (QUEDA DIRETA)	17
1.3. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (QUEDA INDIRETA)	18
1.3.1. <i>Descarga em Torre</i>	18
1.3.2. <i>Descarga em Cabos Para-Raios</i>	19
1.4. PARA-RAIOS	20
1.4.1. <i>Evolução dos Para-Raios</i>	22
1.4.2. <i>Para-Raios Tipo Óxido de Zinco (ZnO)</i>	25
1.4.3. <i>Detalhe Construtivo do Para-Raios de ZnO</i>	26
1.5. SISTEMA DE ATERRAMENTO	30
1.5.1. <i>Formas de Aterramento</i>	31
1.5.2. <i>Técnicas de Melhoria para Aterramento</i>	34
2. OBJETIVOS	36
2.1. OBJETIVO GERAL	36
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1. SOFTWARE ATP	37
3.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5. CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	45

Lista de Figuras

Figura 1 - Centelhador Separado a Ar	14
Figura 2 - Descarga Atmosférica.....	15
Figura 3 - Descarga Direta no Condutor e Ondas Trafegantes.....	16
Figura 4 - Modelo Idealizado de Impulso Atmosférico	17
Figura 5 - Modelo de Linha de Transmissão.....	18
Figura 6 - Descarga Atmosférica na Torre de Transmissão	19
Figura 7 - Para-Raios Residencial	20
Figura 8 - Modelo Ideal de Para-Raios.....	21
Figura 9 - Curva V x I	22
Figura 10 - Centelhador Tipo Chifre	23
Figura 11 - Característica do Elemento ZnO e SiC	26
Figura 12 - Curva V x I dos Para-Raios	26
Figura 13 - Modelo Básico de Para-Raios.....	27
Figura 14 - Para-Raios com Invólucro de Porcelana.....	28
Figura 15 - Para-Raios com Invólucro de Polimérico com Interior de Ar	29
Figura 16 - Para-Raios com Invólucro de Polimérico sem Interior de Ar.....	29
Figura 17 - Relação Resistência por Numero de Hastes	34
Figura 18 - – Efeito de Profundidade de Hastes	35
Figura 19 - Modelo da Subestação no ATP.....	39
Figura 20 - Dados da Curva V x I do Para-Raios no ATP	40
Figura 21 - Pulso Atmosférico	41
Figura 22 - Tensão no Transformador	42
Figura 23 - Tensão no Transformador	43

Lista de Tabelas

Tabela 1- Resistências para cada Tipo de Solo	31
Tabela 2 - Aterramento com uma Haste Vertical	31
Tabela 3 - Aterramento com Três Hastes Verticais	32
Tabela 4 - Aterramento com Fio em Forma de Malha Quadrada.....	32
Tabela 5 - Aterramento com Hastes Verticais Alinhadas.....	32
Tabela 6 - Aterramento com Hastes Verticais no Contorno de um Quadrado	32
Tabela 7 - Aterramento com Hastes Verticais em Forma de Malha Quadrada.....	33
Tabela 8 - Aterramento com Fios Horizontais e Hastes Verticais em Malha Quadrada.....	33

1. INTRODUÇÃO

As redes elétricas de uma forma geral estão sujeitas a dois tipos de sobretensão, as de origem interna, que são as provenientes de manobras, por exemplo, entrada de um grande bloco de banco de capacitores no sistema, e as de origem externa, que são as geradas por descargas atmosféricas e são as mais perigosas que causam danos a dispositivos, equipamentos e seres vivos.

O equipamento que protege a rede elétrica contra sobretensões de origem atmosférica é o para-raios e para que a proteção seja segura e confiável o para-raios deve ser bem instalado envolvendo diversos fatores como resistência de aterramento, eletrodos de aterramento e no caso de torres de linha de transmissão, as características geométricas das torres, linha, etc.

Em épocas remotas, a proteção de redes elétricas era feita apenas com centelhadores utilizando a suportabilidade dielétrica do ar. Quando a tensão entre as pontas do centelhador superar a suportabilidade dielétrica do ar, ocorre uma ruptura, com a passagem da corrente para a terra. Segue o modelo de centelhador mostrado na Figura 1.

Um dispositivo dessa natureza pode ocasionar os seguintes inconvenientes:

- Com o estabelecimento da corrente ocorre um curto-circuito na rede e o arco elétrico somente se dissipará quando o disjuntor atuar, assim parando o fornecimento de energia.
- O ajuste do centelhador não é simples, pois existe uma imprecisão devido as variáveis como condições atmosféricas, pressão, chuva, umidade e do formato do centelhador.

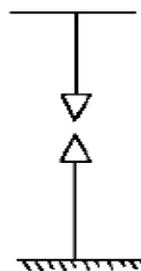


Figura 1 - Centelhador Separado a Ar

Com o avanço da tecnologia chegou-se aos para-raios, que é um centelhador em série com resistores não lineares. Nesse caso a tensão de disparo passou a ser mais bem controlada com o emprego de centelhadores selados, menor sensibilidade aos fatores atmosféricos e melhor capacidade de desenvolver tensão contribuindo para a redução e extinção da corrente, sem a necessidade de atuação dos disjuntores.

O centelhador selado é um novo modelo no qual ao invés de ser usado o ar como dielétrico foi usado material dielétrico específico para cada tipo de projeto, além de todo o aparelho estar selado em um meio isolado de ambiente externo. Assim, os agentes como umidade, chuva, poeira, etc. não agem de modo a interferir nas características do centelhador.

Essa família de para-raios apresentou um sofisticado centelhador com resistores não lineares de carboneto de silício.

No final da década de 70 foi aperfeiçoada uma nova geração de para-raios, constituídos de óxido metálicos na composição do resistor não linear. Esses para-raios de óxido metálico também são conhecidos como óxido de zinco (ZnO), devido à preponderância desse óxido na sua composição. [2]

As características excepcionais de não linearidade desse para-raios permitiu a eliminação do centelhador, tornando o equipamento mais robusto e simples.

Todo esse esforço em proteger o sistema de rede elétrica se deve a ação de um fenômeno da natureza, a descarga atmosférica. Este fenômeno tem a característica de formar um canal ionizante devido à diferença de potencial entre a nuvem e a terra.

Quando essa diferença alcança o valor de ruptura de isolamento, a descarga atmosférica é formada podendo sair da terra e ir para a nuvem ou vice-versa, a Figura 2 mostra o comportamento da descarga atmosférica.

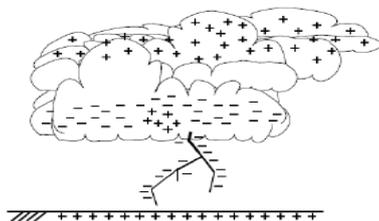


Figura 2 - Descarga Atmosférica

1.1. Descargas Atmosféricas e a Propagação de Surto

Quando uma descarga atmosférica atinge um sistema elétrico de potência, uma elevada sobretensão é aplicada aos componentes da rede, equipamentos, dispositivo de proteção e na isolação das linhas. Se essa tensão exceder a suportabilidade da isolação, ocorrerá uma descarga. Quando isso acontecer haverá como consequência a formação de um arco de potência que será mantido pela tensão do sistema, tornando necessária a atuação do sistema de proteção. Essa descarga através do ar ou dos isoladores da linha normalmente não causa nenhum dano ao sistema, porém se essas descargas atingirem geradores, transformadores, motores, ou outros equipamentos e dispositivos, os danos causados são significativos e irreversíveis. [1]

Quando uma dessas descargas atinge uma linha de transmissão, provoca o aparecimento de ondas trafegantes pelo sistema, com reflexões e refrações nos pontos onde há mudanças de impedância característica.

Primeiramente considera-se uma descarga no condutor, que dá início à propagação de ondas trafegantes a uma velocidade aproximadamente igual à velocidade da luz (300.000 km/s) e em ambas as direções no seu ponto de incidência.

Uma descarga atmosférica incidindo sobre um condutor e as ondas trafegantes geradas por ela é mostrada na Figura 3.

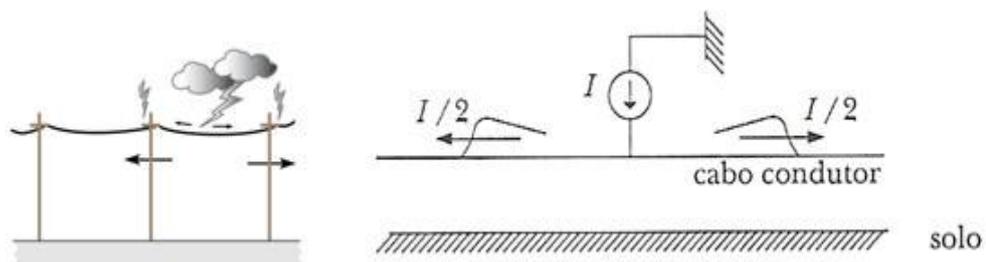


Figura 3 - Descarga Direta no Condutor e Ondas Trafegantes

Desta forma quando uma descarga atmosférica atinge um determinado ponto do condutor, ela é dividida em duas frentes de ondas que se propagam pelos meios. [3]

A descarga atmosférica também conhecida como frente de onda rápida tem a característica de um pulso de corrente que gira em torno de 50us (microsegundos), sendo que o tempo inicial de amplitude zero até o pico, conhecido como tempo de crista (tf), tem a duração de 1,2us e do instante de pico da corrente até o zero é conhecido como tempo de queda (td) e varia em torno de 50us.

Seguindo as características de uma descarga atmosférica temos a Figura 4 como modelo de descarga atmosférica adotada como referencia para este trabalho.

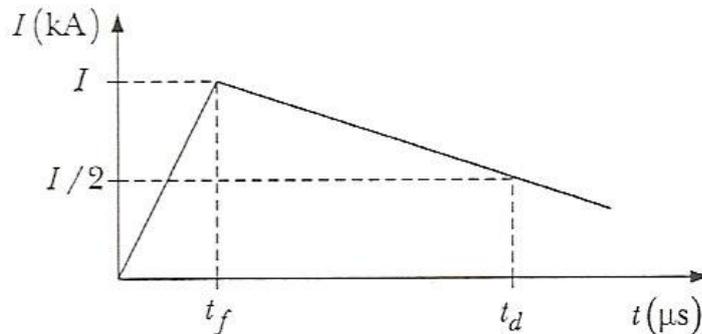


Figura 4 - Modelo Idealizado de Impulso Atmosférico

- Tempo de Crista de 1,2 μs (t_f)
- Tempo de Calda de 50 μs (t_d)
- Pico de Corrente de 20kA (I)

1.2. Descargas Atmosféricas (queda direta)

Uma descarga atmosférica incidindo diretamente sobre o condutor de fase desenvolve uma elevada sobretensão no qual muito provavelmente poderá provocar falha na isolação.

Esta descarga trafega aproximadamente na velocidade da luz e atinge pontos onde podem estar localizados os equipamentos e dispositivos que se a sobretensão ultrapassar o valor de isolamento trará grandes prejuízos e interrupção de energia.

Desta forma, as sobretensões devem ser limitadas a valores muito menores, o que é conseguido com o uso de cabos para-raios de forma a blindar os equipamentos e circuitos contra as descargas diretas.

Os cabos para-raios são cabos que ficam sobre os condutores em uma linha de transmissão e estão ligados na torre e aterrados. Assim caso uma descarga atmosférica venha atingir a linha de transmissão cerca de 90% dessas descargas atinge o cabo para-raios e é escoado pelo sistema de aterramento não gerando uma sobretensão considerável no sistema.

[1] [2] [3].

O modelo de torre de linha de transmissão é mostrado na Figura 5.

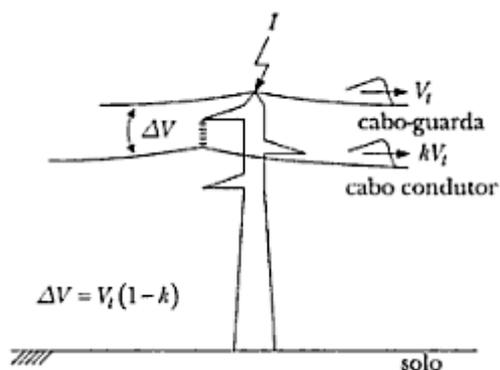


Figura 5 - Modelo de Linha de Transmissão

A linha de transmissão é composta de uma torre onde na parte superior está o cabo para-raios aterrado e fazendo uma blindagem caso uma descarga atmosférica aconteça no sentido da nuvem para o solo, fazendo uma proteção contra a descarga direta nos cabos condutores. Logo abaixo dos cabos para-raios estão os cabos condutores e são responsáveis por levar a energia utilizada, sendo que ele é ligado na torre por um isolador ou para-raios.

1.3. Descargas Atmosféricas (queda indireta)

A incidência de uma descarga atmosférica nos para-raios, ou nas torres de uma linha de transmissão pode ocasionar o seu desligamento, devido ao rápido crescimento da tensão no ponto de incidência das descargas. Ao contrário da queda direta, a ocorrência de desligamento em consequência desse fenômeno é dificilmente eliminada.

Entretanto, esses efeitos podem ser minimizados através de um projeto otimizado de aterramento das estruturas e um ajuste dos elementos de projeto da cabeça da torre. [1] [2] [3].

1.3.1. Descarga em Torre

Quando um raio atinge uma das torres de uma linha de transmissão, é estabelecido um processo de propagação de ondas de tensão e corrente nos cabos para-raios, nas torres próximas e no sistema de aterramento, com reflexões conforme impedância característica envolvida.

A Figura 6 mostra a representação de uma torre, no qual a impedância da torre é sempre de valor fixo e a resistência de aterramento depende do projeto do aterramento, quanto mais eficiente for este projeto, menor será a resistência de aterramento e melhor será o escoamento do pulso de corrente para o terra. Isso gera uma menor tensão no ponto onde a descarga atmosférica atingiu, transformando as chances de acontecer algum tipo de rompimento de isolamento no sistema menor. [1]

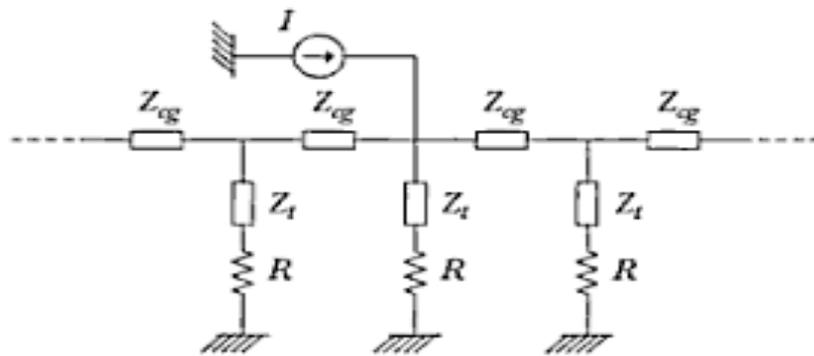


Figura 6 - Descarga Atmosférica na Torre de Transmissão

1.3.2. Descarga em Cabos Para-Raios

A incidência de um raio nos cabos para-raios apresenta uma característica de tensão muito maior do que quando o raio atinge a torre.

Esta tensão será maior quanto maior for a distância entre o raio e a torre, sendo, portanto, a metade do vão entre duas torres o ponto de maior tensão. Esse fato pode ser mais bem entendido se consideramos que a impedância de surto vista do ponto de incidência é muito maior neste caso do que em caso de descargas em torres, pois quando o raio atinge a torre um grande valor é diretamente descarregado para o terra, gerando assim um baixo valor de onda refletiva pelas torres adjacentes. Caso esse que não ocorre quando o raio cai diretamente na linha. [1]

1.4. Para-Raios

O atrito produzido pelo vento e pelas gotas de chuva caindo provoca transferência de carga entre massa de ar e nuvens, criando intensos campos elétricos na atmosfera. Durante uma tempestade a rigidez dielétrica do ar é reduzida em virtude da umidade, facilitando a existência de raios descarregando as nuvens e massas de ar.

Existem raios de cima para baixo, de baixo para cima e também de nuvem para nuvem.

O para-raios é uma ponta metálica localizada o mais alto possível e ligada a terra por um eletrodo bem aterrado. Esse aterramento é necessário, pois ele é o caminho por onde as cargas sobem até ficarem mais próximas da nuvem, criando campos mais elevados que vão romper a rigidez dielétrica. Durante a descarga, o aterramento permite o escoamento do raio, conforme ilustra a Figura 7, o fio de descida que liga o para-raios ao aterramento deve ser suficientemente grosso (cerca de 8 mm²) para suportar a corrente na ordem de 10kA produzida pelo raio.

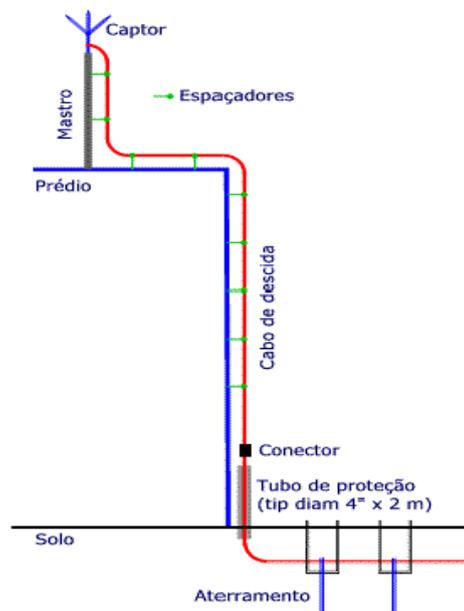


Figura 7 - Para-Raios Residencial

É claro que esse valor de diâmetro não é encontrado nas tabelas de fios, somente em tabelas de cabos. O raio embora tenha uma alta corrente, sua duração é um intervalo de tempo muito pequeno, o que reduz o aquecimento gerado pelo transporte da corrente.

É muito importante observar o perigo de uma instalação feita com fio fino. Enquanto a nuvem carregada se forma, as cargas de sinal oposto sobem lentamente por esse fio e o raio será atraído, se o fio não suportar a descarga atmosférica, o fio irá se romper pelo efeito joule e como não haverá um caminho para que o raio seja escoado, toda a energia do raio causará uma explosão local.

A utilização de para-raios permite a redução dos níveis de isolamento de diversos equipamentos em sistemas de transmissão, distribuição, subestações, etc.

Resumidamente, os para-raios são formados por blocos de resistores não lineares, podem ter ou não ‘gaps’ em série, que dissipam a energia da descarga atmosférica quando o nível de tensão nos seus terminais excede determinado valor. [2]

De modo ideal os para-raios deveriam operar da seguinte maneira:

- Conduzir somente a partir de uma tensão superior sua tensão nominal;
- Manter esta tensão com pequenas variações, durante todo o tempo que permanecer o surto de tensão;
- Parar de conduzir em uma tensão bem próxima daquela que começou a conduzir.

A Figura 8 mostra o modelo ideal de um para-raios descrito acima.

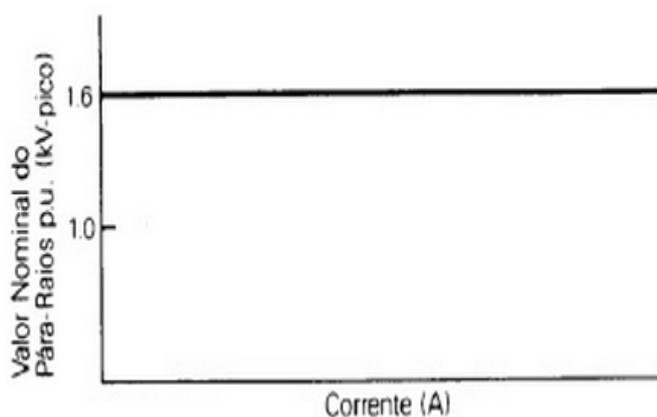


Figura 8 - Modelo Ideal de Para-Raios

No entanto, tal fato não ocorre, uma vez que a característica $V \times I$ não é perfeita, mesmo no caso dos para-raios de óxido de zinco (que mais se aproximam do ideal), conforme mostrado na Figura 9.

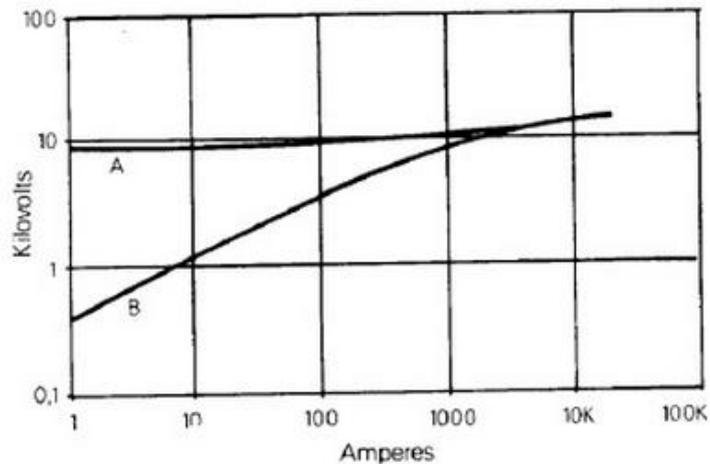


Figura 9 - Curva V x I

Nesta figura temos a curva A referente ao para-raios de óxido de zinco e a curva B referente ao para-raios de carboneto de silício.

Os dispositivos de proteção devem ser escolhidos conforme alguns critérios, como a importância do equipamento a ser protegido e as consequências de uma interrupção na operação, sendo a sua tensão de descarga influenciada pela inclinação do surto de tensão incidente. [6]

1.4.1. Evolução dos Para-Raios

1.4.1.1. Centelhadores Separados a Ar

A utilização dos para-raios fabricados nos dias de hoje somente foi possível após um longo processo e aperfeiçoamento desses equipamentos.

Inicialmente foram utilizados como para-raios os centelhadores separados a ar, muito usado como dispositivo de proteção dos equipamentos de uma subestação. Quando uma sobretensão alcança o centelhador há o disparo, limitando a sobretensão nos equipamentos protegidos por aquele dispositivo.

O centelhador apresenta como grande desvantagem o fato das variáveis climáticas como umidade, pressão poeira e desgaste natural do material livre ao ambiente afetarem seu ponto de operação, fazendo com isso variar o nível de operação e assim diminuindo a confiabilidade do equipamento, além de que quando em operação é necessário para a eliminação do curto-circuito a atuação da proteção do sistema. [08].

A Figura 10 mostra um modelo do centelhador descrito acima.

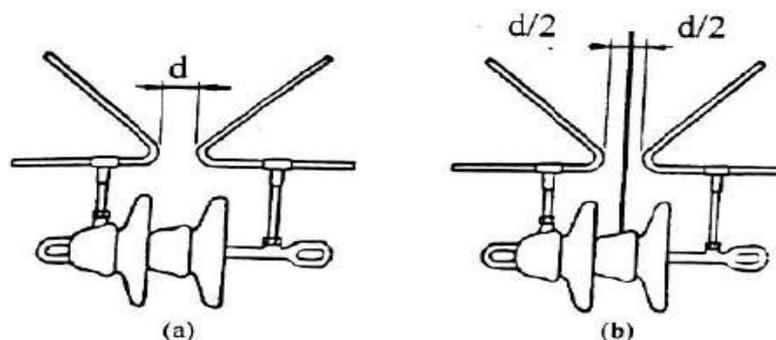


Figura 10 - Centelhador Tipo Chifre

1.4.1.2. Para-Raios tipo Expulsão

Devido às desvantagens encontradas com o uso de centelhadores a ar, surgiram por volta de 1920, os primeiros para-raios do tipo expulsão. Estes eram constituídos basicamente por dois centelhadores montados em um tubo isolante e conectados em série.

Uma vez que os dois centelhadores possuíam diferentes espaçamentos e eram constituídos por diferentes materiais dielétricos, não existia uma distribuição uniforme de tensão entre esses e o início da disrupção era sempre determinado pelo centelhador montado na parte superior do para-raios.

Com a disrupção do centelhador superior, toda a tensão passava a ser aplicada sobre o centelhador inferior, que iniciava o processo de formação do arco no seu dielétrico, constituída por um material fibroso com a propriedade básica de gerar gases que provocavam a deionização do arco, provocando a interrupção da corrente de frequência fundamental de forma natural quando da passagem da corrente pelo zero.

A sua principal desvantagem era a pequena vida útil, limitada à durabilidade do material utilizado para a deionização do arco elétrico, [09].

1.4.1.3. Para-Raios tipo Carboneto de Silício

Os para-raios do tipo expulsão tiveram uma vida muito curta, sendo substituídos pelos para-raios formados basicamente por centelhadores montados em série com resistores não lineares. Vários tipos de materiais foram inicialmente empregados para a confecção dos resistores não lineares, tais como Hidróxido de Alumínio, Óxido de Ferro e Sulfeto de Chumbo.

Posteriormente, foram desenvolvidos resistores não lineares de Carboneto de Silício (SiC) formados a partir dos cristais de Carboneto de Silício. Estes para-raios, ainda hoje utilizados nos sistemas elétricos, apresentam um conjunto de centelhadores montados em série com os elementos de resistores não lineares de SiC.

Neste tipo de para-raios os centelhadores apresentam duas funções:

- "Isolar" o para-raios do sistema sob condições de regime permanente, uma vez que sem a presença dos centelhadores, os elementos de SiC apresentariam, sob condições normais de operação, uma elevada amplitude de corrente de frequência fundamental que provocaria perdas apreciáveis e um aquecimento excessivo nos resistores não lineares de SiC, que ocasionaria a sua falha em poucos ciclos.
- Auxiliar na extinção da corrente subsequente que flui através dos elementos não lineares, quando da proximidade do zero ou da sua passagem pelo zero, dependendo do projeto construtivo do centelhador.

Até os dias atuais esse tipo de para-raios se encontra nos sistema elétrico brasileiro, mas em processo de migração para os para-raios oxido metálicos. [07]

1.4.1.4. Para-Raios tipo Óxido de Zinco

Os primeiros para-raios de ZnO desenvolvidos para sistemas de potência foram apresentados ao mercado no final de década de 70 pela *Meidensha Electric Manufacturing Company*. Na década de 80 diversas empresas japonesas, europeias e americanas, desenvolveram e produziram para-raios de ZnO para aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão.

A ausência dos centelhadores, elementos indispensáveis na montagem dos para-raios de SiC, neste tipo de para-raios deve-se a elevada não linearidade na característica “tensão x corrente” dos elementos de ZnO, associadas a sua estabilidade térmica e a sua elevada capacidade de absorção de energia para sobretensões temporárias e transitórias.

A não utilização dos centelhadores torna os projetos de para-raios de ZnO mais simplificados, além de oferecer muitas vantagens em suas características de proteção e de operação.

Para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) vêm sendo largamente utilizados na proteção dos sistemas elétricos. Em alguns países, como por exemplo, o Japão, praticamente a totalidade dos para-raios instalados em seu sistema elétrico são do tipo ZnO. No Brasil, empresas concessionárias de energia e grandes consumidores industriais vêm adquirindo para-raios de ZnO, seja na substituição dos para-raios convencionais de SiC ou em novos projetos.

Aqui será dada uma ênfase maior a este tipo de para-raios.

1.4.2. Para-Raios Tipo Óxido de Zinco (ZnO)

Atualmente há diferentes tipos de para-raios disponíveis no mercado como, por exemplo, para-raios convencionais de carboneto de silício (SiC) com centelhador, para-raios óxidos metálicos com ou sem centelhador.

Atualmente, no mercado um tipo de para-raios está se destacando em relação aos demais, este para-raios é o para-raios de Óxido de Zinco sem centelhador.

Formado pela ligação em série de resistências não lineares, ele pode ser encontrado de forma simples com variações de invólucro, forma essa vista no mercado, com invólucro de porcelana ou polimérico.

Devido sua alta não linearidade, ele pode operar como se possuísse um centelhador interno quando submetido à sobretensões, ou seja, é como se seus resistores internos tivesse um mecanismo interno de disparo.

O elevado grau de não linearidade na sua característica “tensão x corrente”, proporciona aos elementos de ZnO baixos valores de corrente na região de operação, associados a uma boa estabilidade, quando continuamente solicitados pela tensão normal de operação. Esse elevado grau de não linearidade pode ser observado na Figura 11, que apresenta a característica “tensão x corrente” dos elementos ZnO e SiC.

A curva do para-raios de SiC também é indicada para comparação. Pode-se observar que os elementos de ZnO apresentam, contrariamente aos de SiC, uma dependência da temperatura para os baixos valores de corrente. [10] [11].

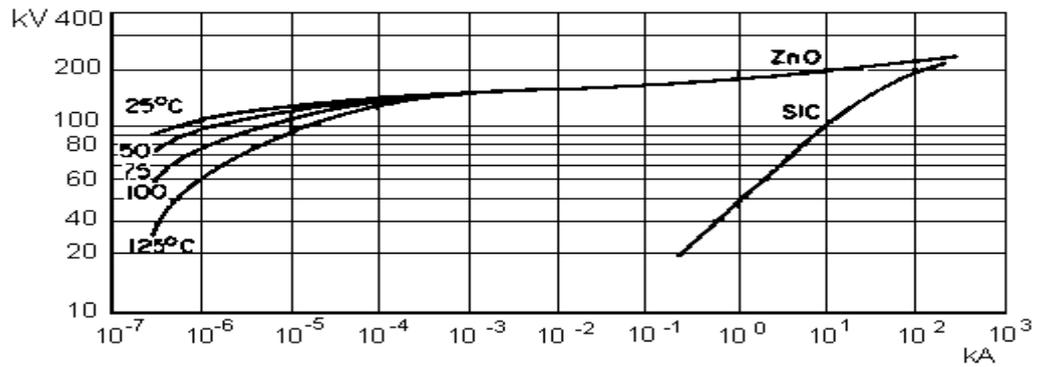


Figura 11 - Característica do Elemento ZnO e SiC

A Figura 12 mostra a curva V x I dos para-raios de ZnO e SiC, onde a característica dos materiais predomina, sendo muito similar com a curva das características dos elementos mostrado na Figura 11.

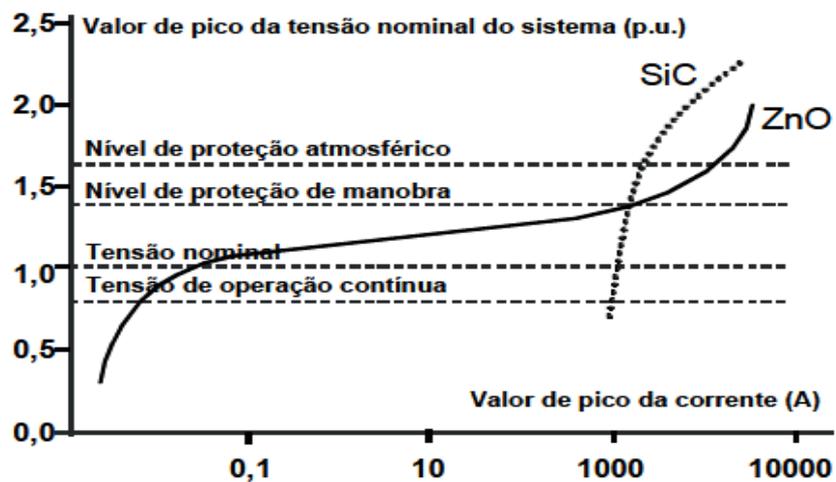


Figura 12 - Curva V x I dos Para-Raios

1.4.3. Detalhe Construtivo do Para-Raios de ZnO

O para-raios de óxido de zinco tem a característica construtiva de ter um ou mais resistores não lineares ligados em série. Esses resistores são como pastilhas empilhadas formando um cano de resistência não linear, lembrando que na maioria deles não há o centelhador.

O modelo de para-raios de óxido de zinco é muito similar ao de carboneto de silício, porem não há o centelhador e os resistores de ZnO tem a dimensão menor que os resistores de SiC. [10]

Podemos analisar um modelo básico de para-raios de ZnO conforme mostra a Figura 13, sendo que o invólucro pode ser de porcelana ou polimérico.

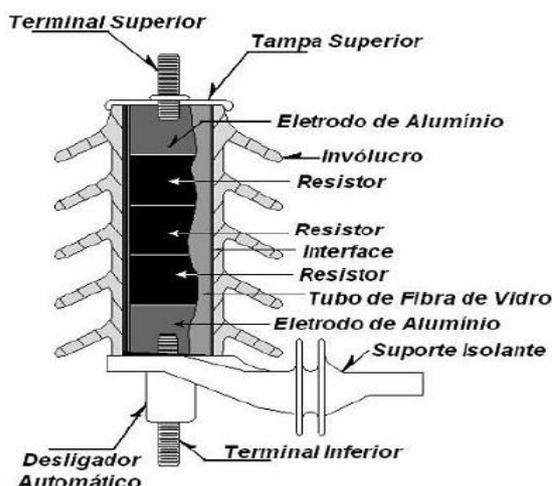


Figura 13 - Modelo Básico de Para-Raios

Para-Raios com Invólucro de Porcelana

De um modo geral, o processo de montagem dos para-raios de porcelana deve ser tal que os elementos de ZnO se mantenham localizados preferencialmente de forma concêntrica, dentro do invólucro de porcelana.

Mecanismos de alívio de sobrepessão devem ser incorporados dentro dos flanges terminais. Este dispositivo tem por finalidade impedir que o para-raios seja danificado de forma explosiva quando houver uma sollicitação superior àquela para a qual foi especificado. Isto evita a danificação de outros equipamentos e elimina a possibilidade de risco para o pessoal que esteja situado nas suas proximidades na hora da ocorrência. A finalidade principal do dispositivo de alívio de pressão está na transferência para o exterior dos gases quentes, originados por uma excessiva sollicitação do para-raios, impedindo a sua explosão.

Devido ao alinhamento dos pontos de exaustão e alívio de pressão, é facilitada a formação de um arco externo, como mostra a Figura 14.

Entretanto esse tipo de invólucro se mostra em queda pelo fato da alta taxa de falha anual devido à penetração de umidade por perda de estanqueidade do invólucro, e em seu lugar esta crescendo a utilização do para-raios de invólucro polimérico. [07] [09].

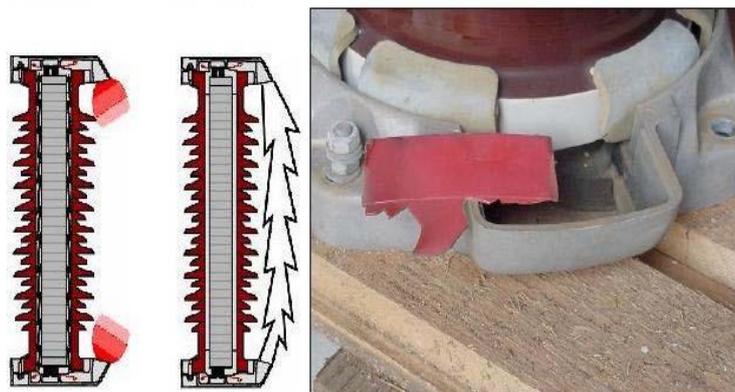


Figura 14 - Para-Raios com Invólucro de Porcelana

Para-Raios com Invólucro Polimérico

Uma evolução tecnológica bastante significativa para os para-raios de ZnO sem centelhadores surgiu em meados da década de 80 com o desenvolvimento de materiais poliméricos, este novo sistema melhora a resistência às condições climáticas e as características mecânicas, com grande resistência à tração e torção, além da alta resistência à radiação UV, e às condições climáticas em geral, este tipo de invólucro é especialmente recomendado para áreas altamente poluídas pois tem um excelente rendimento.

O para-raios com invólucro polimérico pode ser encontrado de duas maneiras, uma com espaço interno de ar e outra com espaço interno sem ar, [07] [09].

O para-raios com espaçamento a ar tem as pastilhas de ZnO envolvidas por um tubo de fibra de vidro de alta resistência mecânica sobre o qual o polímero é injetado, Este tipo de projeto apresenta um espaçamento interno de ar entre a parte interna do polímero e os blocos de ZnO, sendo necessária a utilização de dispositivos de alívio de sobrepressão. Nesse caso o para-raios tem uma espécie de diafragma que quando sobre altas pressões interna abre uma válvula de escape e alívio de pressão.

A Figura 15 demonstra o modelo de para-raios com invólucro polimérico com interior a ar e seu esquema de funcionamento.

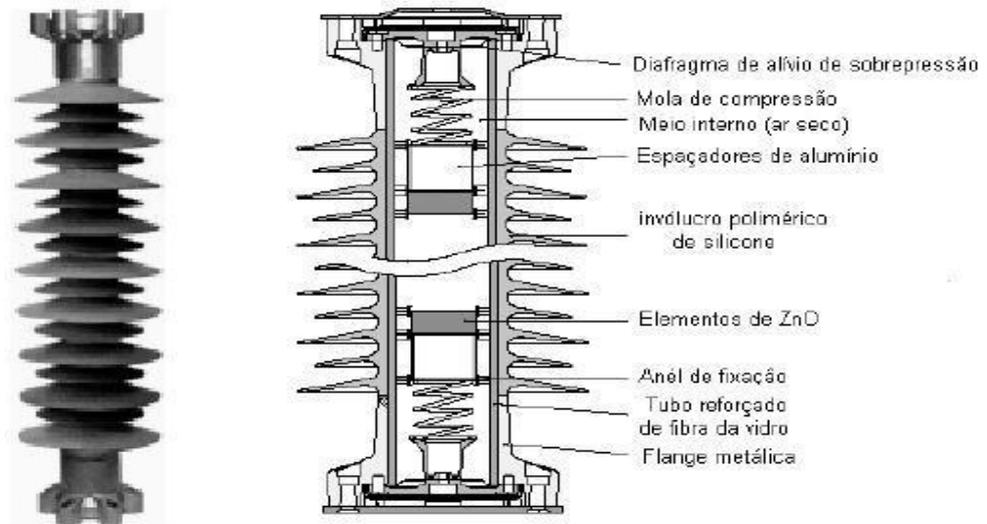


Figura 15 - Para-Raios com Invólucro de Polimérico com Interior de Ar

Nos para-raios sem espaçamento a ar, as pastilhas de ZnO são envolvidas por um tubo de fibra de vidro de alta resistência mecânica, porém, ao invés de ficar fixo e com ar em torno, este modelo é preenchido por uma borracha na qual impede a criação de pressão devido a aquecimento do ar. Um cuidado que se deve ter é no momento de fazer o preenchimento do invólucro, bolhas devido ao mau preenchimento pode causar descargas parciais. Uma grande vantagem desse método é que ele dificulta ainda mais a entrada de umidade no interior do para-raios.

A Figura 16 mostra um para-raios com invólucro sem ar com corte vertical para uma melhor visualização.

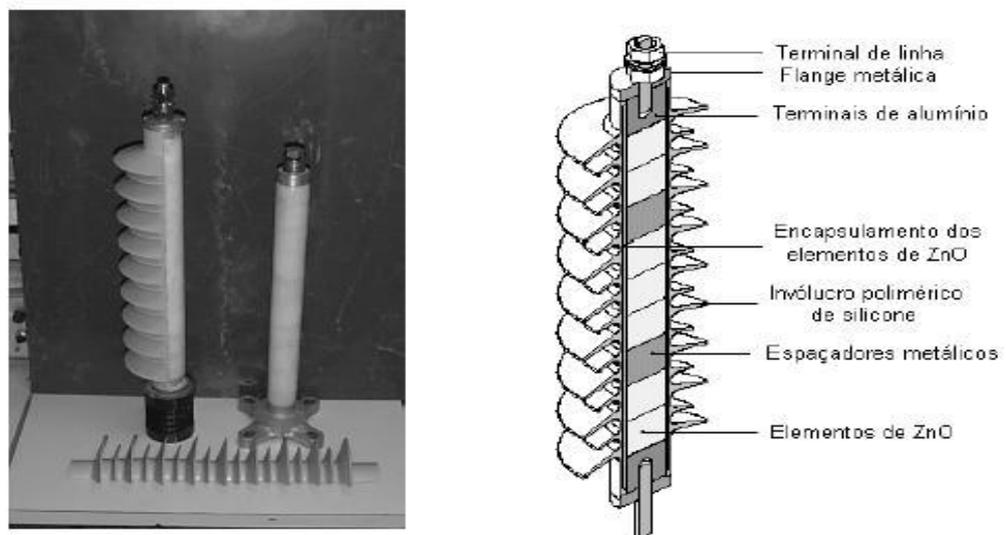


Figura 16 - Para-Raios com Invólucro de Polimérico sem Interior de Ar

1.5. Sistema de Aterramento

Um sistema de aterramento bem projetado e montado é um dos requisitos fundamentais para o bom funcionamento de um sistema elétrico, principalmente no que diz respeito à confiabilidade e a segurança.

Suas funções principais são:

- Fazer com que a resistência de terra tenha o menor valor possível, facilitando o escoamento das correntes de falta a terra;
- Fazer com que os potenciais produzidos pela passagem da corrente de falta fiquem dentro dos limites de segurança, evitando danos a pessoas e os animais;
- Tornar os equipamentos de proteção mais sensíveis, fazendo com que as correntes de fuga a terra sejam isoladas rapidamente;
- Permitir um escoamento seguro das correntes de descarga atmosférica;
- Eliminar as cargas de origem estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Para iniciarmos o estudo de elaboração do projeto de um sistema de aterramento precisamos conhecer a resistividade do solo, bem como suas características principais no que diz respeito ao tipo ou tipos de solo, sua estratificação em camadas, teor de umidade, temperatura etc., [05].

A resistividade do solo varia significativamente com a elevação da umidade. A quantidade maior de água faz com que os sais presentes no solo, se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente iônica.

A partir destas considerações já podemos concluir que os aterramentos melhoram suas características nos períodos de chuva e pioram nos períodos de seca.

A temperatura também influencia na variação de resistividade do solo. Verifica-se no que se refere somente à temperatura, que o valor da resistividade não varia muito entre as temperaturas de 10 a 60°C, porém, aumenta seu valor significativamente quando esta temperatura chega próxima a 100°C, onde o estado de vaporização deixa o solo mais seco, com formação de bolhas internas, dificultando a condução de corrente. Essa resistividade aumenta também bruscamente e de maneira significativa quando a temperatura fica abaixo de

zero, tendo em vista que com o gelo ocorre uma mudança brusca no estado de ligação entre os grânulos que formam a concentração eletrolítica, tornado o solo mais seco.

No que diz respeito ao tipo de solo e à sua estratificação, sabemos que na sua grande maioria os solos não são homogêneos, mas sim formados por diversas camadas de resistividade e profundidade diferentes. Essas camadas, devido à formação geológica, são normalmente horizontais e paralelas à superfície do solo. Esta variação da resistividade nas diversas camadas do solo provoca variação na dispersão da corrente de defeito ou de descarga, e deve ser levada em consideração no projeto do sistema de aterramento.

Segue a Tabela 1 que mostra os tipos de solo e seus valores médios resistivos, [12].

Tabela 1- Resistências para cada Tipo de Solo

Areia: de 250 a 500 Ω m	Limo: de 20 a 100 Ω m
Argila: de 20 a 60 Ω m	Húmus: de 10 a 150 Ω m
Argila e areia: de 80 a 200 Ω m	Turfa: de 150 a 300 Ω m
Lama: de 5 a 100 Ω m	Rocha: > 1000 Ω m

1.5.1. Formas de Aterramento

Existem algumas formas de aterramento que serão abordadas agora, elas podem ser feitas como hastes verticais, cabos ou os dois em um conjunto.

Cada modelo a seguir representa uma forma de aterramento que é usado dependendo do tipo de instalação e do valor de resistência que se deseja alcançar, [13].

As tabelas de 2 a 8 mostram as formas de aterramento.

Tabela 2 - Aterramento com uma Haste Vertical

	<p>É um dos meios mais simples de aterramento. Entretanto, com apenas uma haste, nem sempre será possível obter resultados baixos de resistência. Em geral, este tipo de aterramento é usado em solos de baixa resistividade.</p>
---	---

Tabela 3 - Aterramento com Três Hastes Verticais

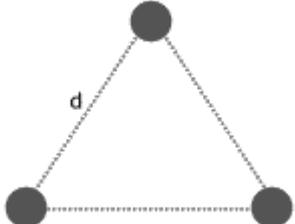
 <p>Diagrama de aterramento com três hastes verticais dispostas nos vértices de um triângulo equilátero de lado d.</p>	<p>Aqui é suposto que as três hastes estão nos vértices de um triângulo equilátero de lado d. Muito usado para aterramento de residências ou comércios.</p>
--	--

Tabela 4 - Aterramento com Fio em Forma de Malha Quadrada

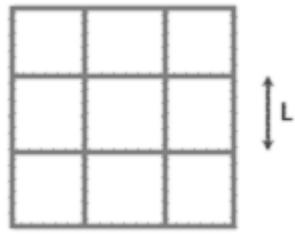
 <p>Diagrama de aterramento com fio em forma de malha quadrada de tamanho 3×3, com profundidade P e comprimento L.</p>	<p>Considera-se uma malha plana e quadrada de fios de cobre enterrados a uma profundidade P. Na figura, exemplo de uma malha de tamanho 3×3. Usado em subestações ou terra geral de usinas.</p>
---	--

Tabela 5 - Aterramento com Hastes Verticais Alinhadas

 <p>Diagrama de aterramento com quatro hastes verticais alinhadas horizontalmente, espaçadas por uma distância d.</p>	<p>É suposto que as hastes sejam igualmente espaçadas por uma distância d. Na figura, exemplo para 4 hastes.</p>
---	---

Tabela 6 - Aterramento com Hastes Verticais no Contorno de um Quadrado

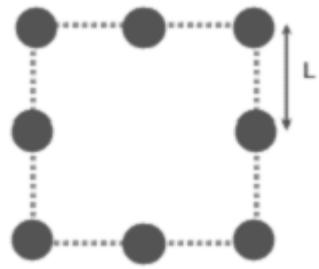
 <p>Diagrama de aterramento com oito hastes verticais dispostas no contorno de um quadrado, com comprimento L.</p>	<p>Consideram-se somente os arranjos simétricos, ou seja, a distância entre hastes adjacentes é constante (L). Na figura, exemplo para 8 hastes.</p>
--	---

Tabela 7 - Aterramento com Hastes Verticais em Forma de Malha Quadrada

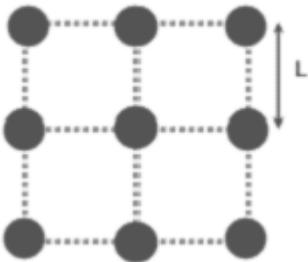
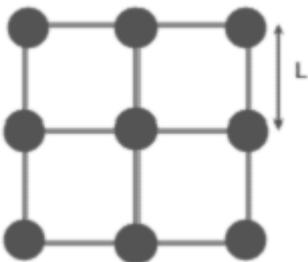
	<p>Na figura, exemplo para 9 hastes ou malha 2 x 2.</p> <p>O número de hastes é sempre um quadrado perfeito e é dado por $(1+n)^2$, onde n é o tamanho da malha.</p>
---	---

Tabela 8 - Aterramento com Fios Horizontais e Hastes Verticais em Malha Quadrada

	<p>Este arranjo é igual ao anterior, com a inclusão da malha formada pelos cabos de interligação.</p> <p>Em geral, nos aterramentos com hastes verticais interligadas, suas extremidades superiores ficam próximas da superfície, de forma que é desprezível a contribuição dos cabos de interligação. Se o conjunto for aprofundado, essa parcela pode ser considerada.</p>
--	--

As tabelas dois até oito mostram as formas de se montar um sistema de aterramento, cabendo ao projetista definir a melhor estrutura para o seu trabalho.

Em cada projeto a ser executado, existe um valor de resistência de aterramento a ser alcançado, essas formas de aterramento fornecem um valor de resistência, os quais demandam hastes ou cabos para a fabricação do aterramento e cada modelo necessita de uma área que depende do local onde será feito o aterramento.

Lembrando que um sistema de aterramento ruim além de não fornecer o melhor caminho para o fluxo da descarga pode comprometer o funcionamento de outros equipamentos como, por exemplo, o para-raios.

1.5.2. Técnicas de Melhoria para Aterramento

Muitas vezes após a instalação de um aterramento, observa-se através de medições que o valor da resistência ficou superior ao desejado. Nesses casos empregam-se algumas técnicas capazes de melhorar o valor de resistência de terra.

Essas técnicas atuam, basicamente, modificando a resistência do solo nas proximidades do eletrodo, ou alterando as condições dos eletrodos de aterramento, ou ainda, fazendo aplicação dessas duas possibilidades simultaneamente, [12] [5].

Segue os tipos de melhorias:

- Aumento do Numero de Eletrodos em Paralelo
- Aprofundamento dos Eletrodos
- Tratamento Químico do Solo
- Tratamento Físico do Solo

Aumento do Numero de Eletrodos em Paralelo

Pode-se conseguir por este meio diminuir bastante a resistência. Contudo deve lembrar que os eletrodos devem estar suficientemente afastados para minimizar os efeitos da resistência mutua. A partir de certo numero de eletrodos em paralelo a resistência passa a diminuir pouco para a colocação de mais eletrodos, então a técnica deixa de ser eficaz nesse ponto, [12] [5].

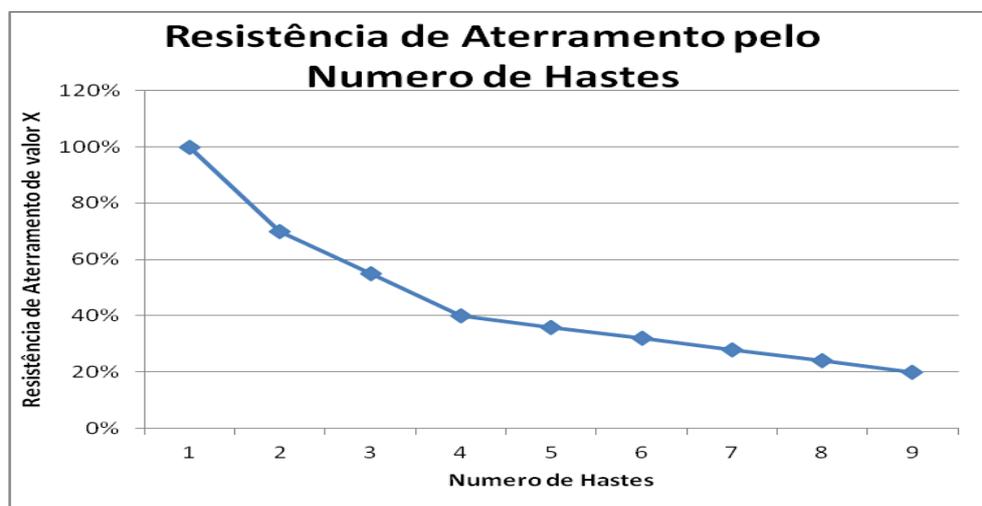


Figura 17 - Relação Resistência por Numero de Hastes

Aprofundamento dos Eletrodos

O processo pode ser eficiente e se mostra particularmente viável na aplicação de hastes verticais. A Figura 18 mostra o comportamento da resistência de terra de uma haste vertical à medida que sua profundidade é aumentada pela emenda de outras hastes, [12] [5].



Figura 18 – Efeito de Profundidade de Hastes

Tratamento Químico do Solo

O tratamento do solo com algum tipo de produto químico tem a finalidade de diminuir a resistência de aterramento de uma malha, com a alteração da resistividade do solo. Este tipo de procedimento não deve ser realizado de maneira indiscriminada, mas deve somente ser aplicado em sistemas onde não se atingiu o valor da resistência desejada.

O produto a ser utilizado neste tipo de tratamento deve atender a algumas recomendações importantes, como a de não causar danos à natureza, não ser tóxico, além de ser quimicamente estável, possuir baixa resistividade elétrica, não causar corrosão nos elementos do aterramento, não ser consumido com a chuva, porém ter a capacidade de reter umidade, [12] [5].

Tratamento Físico do Solo

Consiste em envolver o eletrodo com material condutor, fazendo como que uma ampliação de sua superfície de contato com a terra. Os materiais mais empregados são a sucata e o carvão, [12] [5].

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

- Fazer o estudo sobre o para-raios analisando sua forma de atuação e construção física do equipamento.
- Analisar a relação entre a resistência de aterramento e o funcionamento do para-raios.
- Desenvolver uma simulação que possa ser usada como referencia para o estudo sobre os para-raios.

2.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um programa no ATP, o mais real possível, que seja capaz de simular uma pequena subestação, onde será estudada a proteção contra descarga atmosférica com uso de para-raios.
- Estudar o efeito limitar de tensão dos para-raios, quando sobre efeito de sobretensão.
- Verificar o efeito da resistência de aterramento no desempenho do para-raios, a fim de fazer uma análise de otimização da proteção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Software ATP

A área de transitórios eletromagnéticos envolve uma ampla gama de fenômenos, provocados por variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos, inicialmente em estado de regime permanente na grande maioria dos casos. Essas variações súbitas de tensão e corrente são provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores, dentre outros.

Um estudo de transitórios tanto pode levar à especificação dos dispositivos de proteção dos equipamentos de um sistema elétrico quanto pode permitir a determinação dos motivos que provocam uma perturbação no sistema.

O estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos pode ser realizado através de modelos em escala reduzida, de simuladores analógicos, de simuladores digitais ou de simuladores híbridos. Todas estas ferramentas apresentam resultados satisfatórios, desde que os responsáveis pela execução das simulações tenham conhecimento suficiente sobre o assunto e das potencialidades do simulador em utilização.

Os modelos em escala reduzida tem aplicação limitada, dada às dificuldades de realização física de miniaturas dos equipamentos do sistema elétrico.

O simulador analógico tem sido tradicionalmente utilizado para a simulação de transitórios em redes elétricas. Ele não deve ser confundido com os modelos em escala reduzida porque todos os seus componentes são baseados em equivalentes elétricos, e não em modelos reduzidos dos componentes reais.

Os simuladores digitais têm alcançado notáveis progressos, tendo em vista a evolução apresentada na velocidade de processamento e nas configurações dos computadores atuais. Pode-se afirmar que não ha grandes limitações para a modelagem de qualquer componente do sistema elétrico em programas digitais. Qualquer equivalente elétrico, ou desenvolvimento teórico, baseado em características elétricas conhecidas, ou possíveis de serem determinadas por ensaios, pode ser representado por um conjunto de instruções e acoplado num programa digital para o calculo de transitórios.

A combinação de facilidades analógicas e digitais pode ser extremamente proveitosa e, em termos mais realísticos, os dois métodos podem ser encarados como

complementares em vez de competitivos. Nos dias de hoje, esta técnica tem sido amplamente utilizada como, por exemplo, nos estudos desenvolvidos para o sistema de Itaipu. [14]

3.2. Simulação Computacional

Para o enriquecimento deste trabalho aqui proposto, será feita uma simulação computacional dos para-raios de óxido de zinco utilizando um programa apropriado, que é o ATP (*alternative transients program*). O objetivo dessa simulação é obter resultados sobre tensão limitada por um para-raios em uma subestação e modificar a resistência de aterramento do para-raios, assim analisando o desempenho do para-raios com valores diferentes de resistência de aterramento. [15]

Inicialmente considerou a descarga atmosférica como definida pela Figura 4.

- Tempo de Crista de 1,2us (tf)
- Tempo de Calda de 50us (td)
- Pico de Corrente de 20kA (I)

É escolhida uma subestação de modelo simples, levando em consideração que acessórios como transformador de potencial (TPs) e transformador de corrente (TCs) quando modelado para o simulador analógico teria o comportamento de um capacitor de valor muito alto e assim seria visto no sistema como um circuito aberto. Logo os componentes da subestação que faz parte da simulação são: transformadores, chave seccionadora, cabos de força, para-raios e resistência de aterramento.

De acordo com a referência [02], os dados dos componentes como transformador, chave seccionadora e cabo de força tem os seguintes valores:

- Transformador – 5uF
- Chave Seccionadora – 3uF
- Cabos de Força - $320\Omega + 0,3\text{mH}$

O modelo da subestação simulado neste trabalho é mostrado na Figura 19.

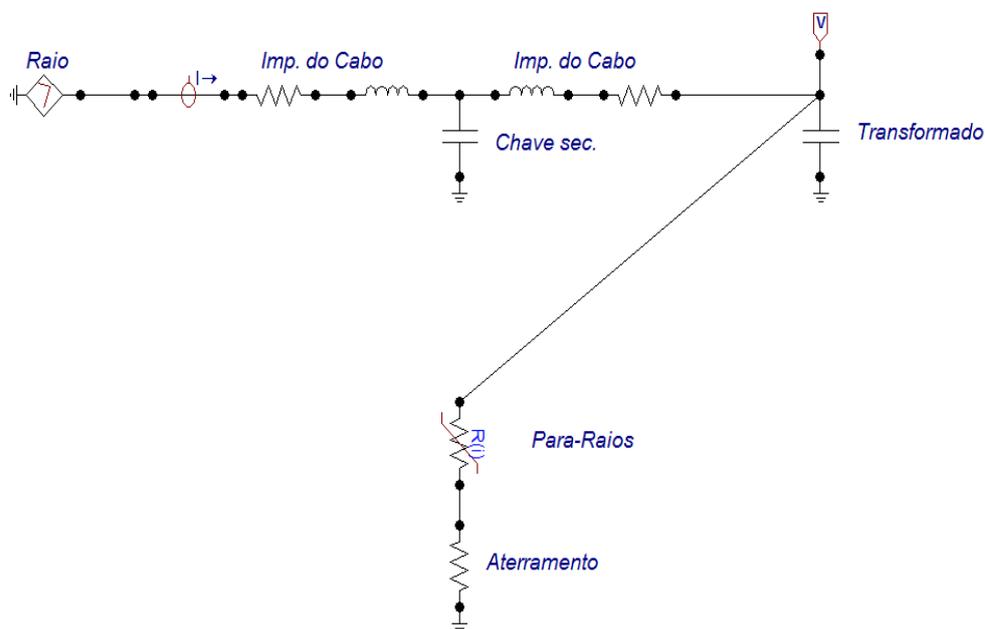


Figura 19 - Modelo da Subestação no ATP

Seguindo o modelo da Figura 19, foi feita a simulação utilizando como resistência de aterramento os seguintes valores:

Simulação 1: resistência de aterramento com 10 Ω .

Simulação 2: resistência de aterramento com 35 Ω .

O programa ATP permite a modelagem do para-raios de óxido de zinco através da função *Characteristic* do componente *Nlinres*.

Nlinres é um componente não linear onde pode ser modelado o tipo necessário de material não linear através da relação *time x resistance* ou pela relação *current x tension*.

Characteristic é uma função do componente *Nlinres*, no qual abre uma janela onde se coloca os valores da curva do para-raios e assim modelamos o comportamento do para-raios de óxido de zinco usando referencias reais do aparelho.

Neste caso usaremos como referencia para a obtenção dos valores da curva V x I do para-raios de óxido de zinco a Figura 12.

Lembrando que o sistema em simulação é uma subestação com valor no primário de 138kV.

Na Figura 12 o valor da tensão esta em p.u. então usando 1p.u. igual a 138KV, chegamos aos valores da curva especifica do para-raios de óxido de zinco que será utilizado no ATP, [14] [15] [16].

A Figura 20 mostra os dados da curva V x I do para-raios de ZnO.

I [A]	U [V]
1	145000
10	155000
1000	190000
5000	204000
8000	210000
10000	216000
10500	220000

Figura 20 - Dados da Curva V x I do Para-Raios no ATP

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 21 é mostrada a descarga atmosférica que atinge um condutor fase.

Devido ao efeito das ondas trafegantes, metade da corrente flui por um lado do condutor e a outra metade pelo outro lado, como verificado na Figura 3, considerando que a descarga atmosférica que atingiu o condutor fase tenha uma amplitude de 20kA, o pulso de corrente real que chega à subestação terá 10KA de pico de onda.

Eixo Y é a corrente em (A) e o eixo X é o tempo em (s).

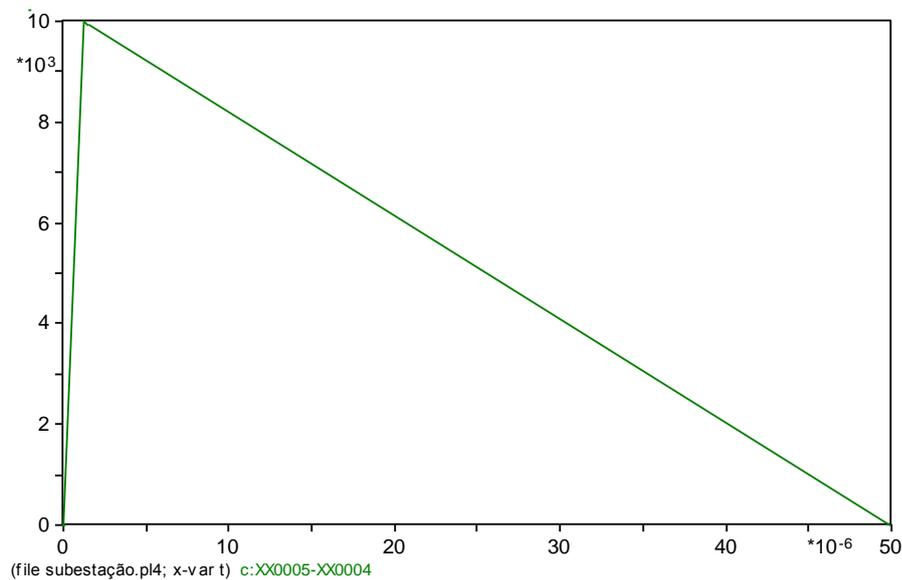


Figura 21 - Pulso Atmosférico

De acordo com as normas técnicas disponíveis na literatura, o valor de resistência deve estar abaixo de 10Ω , NBR 5419 - Proteção de Estruturas Contrás Descargas Atmosféricas, portanto o valor da resistência de aterramento esta de acordo com a norma. [17]

Também seguindo as normas técnicas disponíveis na literatura, o valor de isolamento suportável para um transformador de 138kV (tensão no primário) é de 550kV para pulsos atmosféricos, NBR 6939 - Coordenação de Isolamento. Sendo assim o valor da tensão no transformador não pode ultrapassar o valor de 550kV quando uma descarga atmosférica atingir a rede. [18]

Simulação 1

A Figura 22 mostra o resultado da simulação, que é a curva de tensão limitada pelo para-raios de óxido de zinco, com o valor de resistência de aterramento em 10Ω . Como observado na figura, a amplitude máxima de tensão que chega ao transformador após uma descarga atmosférica atingir o condutor fase é de pouco menos de 350kv.

Esse valor de tensão não supera o valor de isolamento para uma onda de frente rápida como é a descarga atmosférica, valor esse que é de 550kv. Sendo assim o transformador está seguro e não ocorrerá o rompimento dos isoladores devido a uma sobretensão oriunda de uma descarga atmosférica.

Eixo Y é a tensão em (V) e o eixo X é o tempo em (s).

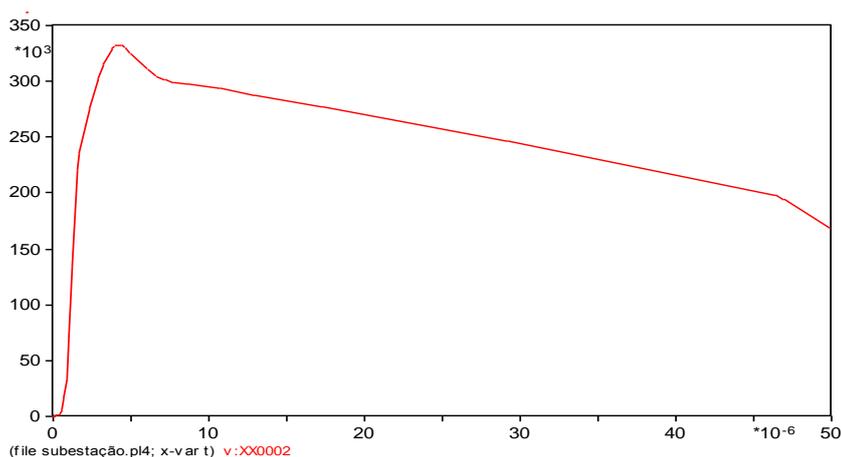


Figura 22 - Tensão no Transformador

O valor da resistência de aterramento dentro das normas técnicas gerou um desempenho do para-raios de óxido de zinco dentro do esperado, assim suportando e limitando o valor da tensão, cumprindo o seu principal objetivo que é a proteção dos equipamentos.

Simulação 2

A Figura 23 mostra o resultado da simulação, que é a curva de tensão limitada pelo para-raios de óxido de zinco, com o valor de resistência de aterramento em 35Ω . Como observado na figura, a amplitude máxima de tensão que chega ao transformador após uma descarga atmosférica atingir o condutor fase é quase 600kv.

Esse valor de tensão supera o valor de isolamento para uma onda de frente rápida como é a descarga atmosférica, valor esse que é de 550kv. Sendo assim o transformador não está seguro e ocorrerá o rompimento dos isoladores devido a uma sobretensão oriunda de uma descarga atmosférica.

Eixo Y é a tensão em (V) e o eixo X é o tempo em (s).

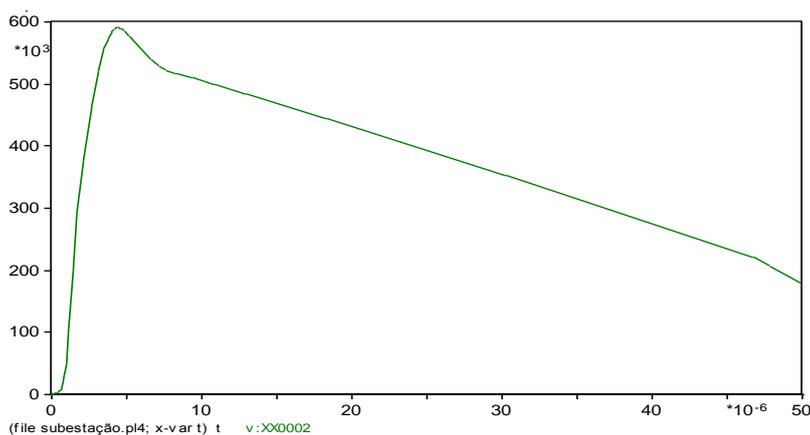


Figura 23 - Tensão no Transformador

Como foi verificado, o alto valor de resistência de aterramento dificulta a absorção da energia gerada pelo pulso de corrente, isso faz com que o para-raios perca em desempenho e não esteja sendo usado de maneira 100% eficiente, além de fazer perder em confiabilidade podendo causar a queima de um equipamento.

Daí a importância de um sistema de para-raios bem instalados. E para uma boa atuação do para-raios é necessário um bom dimensionamento da resistência de aterramento.

5. CONCLUSÃO

Os para-raios ZnO tem uma grande responsabilidade na proteção do sistema elétrico de potência, de forma a limitar um nível de tensão quando uma descarga atmosférica atingir o cabo condutor, para que a tensão não ultrapasse os valores de isolamento dos equipamentos protegidos.

O aterramento tem uma importância fundamental para o para-raios, sendo ele o terminal por onde passará o fluxo de energia proveniente da descarga atmosférica, foi verificado na simulação que quanto maior o valor da resistência de aterramento, menor será a desempenho de atuação na proteção de equipamentos pelo para-raios. Portanto um bom projeto de proteção usando para-raios deverá ter um bom projeto de aterramento para se obter resultados significativos na proteção.

O tempo pode causar desgaste nos equipamentos de segurança, uma manutenção apropriada deve ser feita em intervalos de tempo periódicos, assim fazendo com que seu desempenho não cai abruptamente.

Historicamente, está ocorrendo uma grande evolução desses equipamentos, pesquisa sobre materiais não lineares e invólucro não param, desde 1920 muitos tipos de para-raios apareceram se sempre foram substituídos por outros melhores.

Atualmente ocorrem mais descargas atmosféricas nas linhas de transmissão, onde a proteção da própria linha é responsável por descarregar essa energia do sistema elétrico de potência, do que a atuação da proteção em uma subestação como estudado nesse trabalho, portanto uma melhoria para este trabalho seria um estudo do sistema de proteção contra descargas atmosféricas em linhas de transmissão e a incorporação desse estudo neste trabalho, assim fazendo uma simulação ainda mais real da proteção contra descargas atmosférica no sistema elétricos de potência.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[01] PEREIRA, M. P.(1987). Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento, Rio de Janeiro, FURNAS, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMININSE.

[02] ZANETTA, L.C.(2003). Transitórios Eletromagnéticos em Sistema de Potência, São Paulo, Editora Universidade de São Paulo.

[03] SANTOS, M. R. - Evolução de Para-Raios em Estudos de Sobretensões, Coordenação de isolamento, São Paulo, UNIVERDADE DE SÃO PAULO.

[04] RINDAT. (2009). Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas. Disponível em: <http://www.rindat.com.br/>. Acesso em maio de 2009.

[05] Pagina da internet atualizada no dia 9 de julho de 2010:
<http://www.engenheirosassociados.com.br/organizacao.html>

[06] FERREIRA, P.A.G. Avaliação da Distância de Proteção em Instalações de Para-raios: Descargas Atmosféricas em Subestações Elétricas.

[07] BRITTO, T. M. (2006). Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada a Para-Raios de Alta Tensão. Florianópolis, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.

[08] PEREIRA, M. P. – Considerações Básicas Sobre Para-raios, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A, Rio de Janeiro.

[09] DINIZ, A. M. M. (2011). Ensaio e Avaliação elétrica de um Novo Projeto de Para-Raios para Sistema de Distribuição em Alta Tensão. Itajubá, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBA.

[10] ARAÚJO, M. A. (2010). Projeto de um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas para uma Linha de Transmissão de 69KV, São Paulo, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO.

[11] MAIA, M. J. A. – Monitoramento e Diagnóstico de Para-Raios a ZnO. Paraíba, UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

[12] SILVÉRIO, V. F. (1997). Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofia de Aterramento. Belo Horizonte, Minas Gerais, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.

[13] Pagina da internet atualizada em dezembro de 2007:
<http://www.mspc.eng.br/tecdiv/para-raios-210.shtml>

[14] FILHO, J. A. (1996). Curso Básico Sobre a Utilização do ATP, CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP.

[15] PRIKLER, L. (1998). ATPDraw, User Manual, version 1.0.

[16] MEISTER, A. (2005). Modelagem de Varistores de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento. Brasília, UNIVERSIDADE FEDERAL DE BRASÍLIA.

[17] NBR 5419 (2001). Proteção de Estruturas Contrás Descargas Atmosféricas.

[18] NBR 6939 (2000). Coordenação de Isolamento.