

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDA COELHO TREVISOL

SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM
SUBESTAÇÕES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

PORTO ALEGRE

2018

FERNANDA COELHO TREVISOL

SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM
SUBESTAÇÕES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetida ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do título de Engenheira
Eletricista.

Orientador: Prof. MSc. Igor Pasa Wiltuschnig

PORTO ALEGRE

2018

FERNANDA COELHO TREVISOL

SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM
SUBESTAÇÕES DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

Este trabalho de conclusão de curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de bacharelado em engenharia elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. MSc. Eng. Igor Pasa Wiltuschnig

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Aprovado em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA:

Fís. Guido de Camargo Potier – PUCRS

Prof. Dr. Eng. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – UFRGS

PORTO ALEGRE

2018

AGRADECIMENTOS

A todos os professores que dedicam seu tempo e experiência, em especial os que foram meus docentes nesta jornada.

Ao Prof. MSc. Eng. Igor Pasa Wiltuschnig, pela orientação, suporte e correções.

Ao Professor Físico Guido de Camargo Potier por todo auxílio e conhecimento ao trabalho realizado.

Ao Engenheiro Guilherme Rambor Cruz, pela colaboração com dados para melhora do trabalho.

Aos colegas de curso, companheiros de trabalho e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação.

Aos meus pais por todo suporte, por acreditarem em mim e por todo incentivo e compreensão nos dias ausentes.

Ao Boris por toda tranquilidade que transmitiu.

A Deus por tudo.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O presente trabalho possui o objetivo de mostrar os efeitos de descargas atmosféricas nos desempenhos de para-raios subestações de alta e média tensão, assim como demonstrar que os modelos de para-raios poliméricos de Óxido de Zinco são mais aconselháveis para serem utilizados nos projetos em comparação com os para-raios de Carbetto de Silício. Realizaram-se três estudos de caso, o primeiro estudo de uma subestação abrigada de média tensão de 20kV com potência de 387kW localizada em Porto Alegre, RS, com dados fornecidos pelo engenheiro responsável pelo projeto e obra, o segundo estudo fez referência à média tensão de uma clínica médica particular de 20kV e potência de 366,66kW em poste simples, ambos os casos foram dados de projeto retirados de Rambor (2014). O terceiro estudo de caso foi analisado a partir de uma tese de pós-graduação de Pereira (2014), trata-se de uma subestação de alta tensão de 230kV de Vila do Conde no Pará. Através desse estudo foi possível verificar as consequências da incidência de raios, dentre elas os surtos diretos e indiretos nas linhas de transmissão e nas subestações e demonstrar o melhor modelo de para-raios a ser utilizado. O objetivo da seleção de subestações nos extremos do país foi poder abranger localidades distantes com índices cerâmicos distintos, ambientes opostos e conseguir validar a metodologia de escolha de para-raios. Assim como, demonstrar que indiferente da localização e das condições de contorno é possível afirmar, através de simulação de software, que a utilização de para-raios em conjunto com um bom aterramento, se faz necessário.

Palavras-chave: Para-Raios. Índice Cerâmico. Alta Tensão. Óxido de Zinco.

ABSTRACT

The objective of this work is to show the effects of atmospheric discharges on the performances of high and medium voltage substations, as well as to demonstrate that Zinc oxide polymer lightning arrester models are more advisable to be used in the projects in comparison with the Silicon Carbide arresters. Three case studies were carried out, the first study of a 20kV medium voltage sheltered substation with a power of 387kW located in Porto Alegre, RS, with data provided by the engineer responsible for the project and work, the second study referred to the average voltage of a private medical clinic of 20kV and power of 366.66kW in single pole, both cases were project data taken from Rambor (2014). The third case study was analyzed from a Pereira graduate thesis (2014), it is a 230 kV high-voltage substation of Vila do Conde in Pará. Through this study it was possible to verify the consequences of the incidence such as direct and indirect surges in transmission lines and substations, and to demonstrate the best lightning arrester model to be used. The objective of the selection of substations in the extreme of the country was to be able to cover distant localities with distinct ceramics, opposite environments and to be able to validate the methodology of choice of lightning rods. As well as demonstrating that regardless of location and boundary conditions, it is possible to state, through software simulation, that the use of lightning rods together with a good grounding is necessary.

Keywords: Lightning. Ceramic Index. High voltage. Zinc oxide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Nuvem Bipolar e ionização do ar seguido de Descarga Atmosférica.....	17
Figura 2 - Quebra da resistência dielétrica.....	17
Figura 3 - Tipos de Descargas.....	19
Figura 4 - Mapa Isoceráunico do Brasil.....	21
Figura 5 - Proteção por Para-raios tipo Franklin.....	26
Figura 6 - Ângulo de proteção utilizando hastes.....	27
Figura 7 - Modelo Gaiola de Faraday.....	28
Figura 8 - Método da Esfera Rolante.....	29
Figura 9 - Efeito das Sobretensões em função da utilização ou não de Para-Raios.....	32
Figura 10 – Para-Raios com invólucro de porcelana.....	36
Figura 11 – Para-raios polimérico de ZnO sem espaço interno de ar.....	37
Figura 12 - Para-raios polimérico de ZnO com espaço interno de ar.....	38
Figura 13 – Corrente Transitória Impulsiva Oriunda de uma Descarga Atmosférica.....	46
Figura 14 – Rede de Distribuição existente da SE 'A'.....	49
Figura 15 – Modelo de Para-Raios polimérico tipo PBP.....	50
Figura 16 – Subestação abrigada modelo RIC.....	51
Figura 17 – Diagrama Unifilar SE 'A'.....	52
Figura 18 – Novo poste de derivação da rede de Média Tensão.....	53
Figura 19 – Corte AA Subestação abrigada.....	53
Figura 20 – Planta Baixa Subestação 'A'.....	54
Figura 21 – Rede de Distribuição existente para SE 'B'.....	55
Figura 22 – Modelo para Subestação 'B' em Poste Simples.....	56

Figura 23 – Conexão entre a rede de distribuição MT e a Subestação	57
Figura 24 – Localização SE Vila do Conde.....	58
Figura 25 – Linhas de Transmissão Instaladas	58
Figura 26 – Sistemas de Transformação.....	59
Figura 27 – Sistemas Ancilares.....	59
Figura 28 – Diagrama Unifilar Elétrico Vila do Conde.....	60
Figura 29 – Fluxograma para escolha de Para-Raios.....	61
Figura 30 – Passos para escolha de Para-Raios de Altas Tensões.....	62
Figura 31 – Características tensão x tempo de Para-Raios.....	63
Figura 32 – Circuito Utilizado na simulação.....	67
Figura 33 – Circuito utilizado de modelo de Para-Raios.....	67
Figura 34 – Fluxograma para escolha de Para-Raios para SE 'A'.....	68
Figura 35 – Densidade de descargas atmosféricas – região Sul.....	69
Figura 36 - Fluxograma para escolha de Para-Raios para SE 'B'.....	70
Figura 37 - Fluxograma para escolha de Para-Raios para SE Vila do Conde.....	71
Figura 38 - Densidade de descargas atmosféricas – região Norte.....	72
Figura 39 – Janela de entradas dos pontos para modelar o Para-Raios.....	73
Figura 40 – Impedância x Tensão nos terminais.....	73
Figura 41 – Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede.....	74
Figura 42 – Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede.....	75
Figura 43 – Gráfico da tensão da rede em relação à resistência de aterramento.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Raio da Esfera Rolante.....	29
Tabela 2 – Principais Distúrbios	45

LISTA DE SIGLAS

BLDN	Rede de Detecção de Raios do Brasil
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LPATS	Sistema de Localização e Rastreamento de Raios
MDF	Técnica de Indicação de Direção Magnética
MOV	Varistor de Óxido Metálico
NBR	Norma Brasileira
RDRSIPAM	Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia
RIC – BT	Regulamento das Instalações Consumidoras – Baixa Tensão
RINDAT	Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas
SE	Subestações
SiC	Carbeto de Silício
SIDDEM	Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
TOA	Técnica da Diferença do Tempo de Chegada
WWLL	World Wide Lightning Location Network
ZnO	Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO.....	14
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	16
2.1	FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	16
2.2	CLASSIFICAÇÃO DAS DESCARGAS.....	18
2.2.1	As descargas intranuvens.....	18
2.2.2	As descargas entre nuvem e solo.....	18
2.3	COMO LOCALIZAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	19
2.4	ÍNDICE CERÁUNICO.....	20
3	MÉTODO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	24
3.1	MÉTODOS DE PROTEÇÃO.....	25
3.2	PARA-RAIOS.....	29
3.2.1	Classificação dos para-raios	31
3.3	ATERRAMENTO.....	43
3.4	TRANSITÓRIOS.....	45
4	ESTUDO DE CASO EM SUBESTAÇÕES.....	48
4.1	INTRODUÇÃO.....	48
4.2	ESTUDOS DE CASO.....	48
4.2.1	Subestação 'A' de energia abrigada	49
4.2.2	Subestação 'B' em poste simples.....	54
4.2.3	Subestação 'C' Vila do Conde.....	58

	13
4.3 METODOLOGIA PARA ESCOLHA DE PARA-RAIOS.....	60
4.4 SOFTWARE PSCAD.....	66
5 RESULTADOS.....	68
5.1 SUBESTAÇÃO 'A' DE ENERGIA ABRIGADA.....	68
5.2 SUBESTAÇÃO 'B' EM POSTE SIMPLES.....	70
5.3 SUBESTAÇÃO VILA DO CONDE.....	71
5.4 SIMULAÇÃO PSCAD.....	72
6 CONCLUSÃO.....	79
Trabalhos Futuros.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

1. INTRODUÇÃO

Os surtos com origem atmosférica são um dos principais causadores de interferências e danos nas redes de transmissão e distribuição, resultando em indicadores negativos da qualidade de energia fornecida, Mamede (2015). As descargas atmosféricas podem produzir surtos na rede que chegam a centenas de kV, através da incidência direta nos condutores (descargas diretas), atingindo algum ponto nas proximidades da linha (descargas indiretas) ou atingindo diretamente uma estrutura edificada, ocasionando grande impacto para o sistema de distribuição de energia elétrica em virtude da grande extensão de linhas de transmissão. Os parâmetros físicos das subestações têm influência significativa no estudo dos efeitos produzidos por incidência de descargas atmosféricas; entre esses parâmetros destacam-se o arranjo físico da subestação, incluindo os pátios, a malha de aterramento, os SPDA (sistemas de proteção contra descargas atmosféricas), as caneletas, a casa de comando, a torre de telecomunicação e a linha telefônica, os quais são submetidos ao efeito de transitórios, pois o caminho a ser percorrido até os equipamentos depende destes efeitos. Uma das motivações deste trabalho é destacar a importância dos para-raios em diferentes arranjos de proteção e analisar qual o modelo mais adequado para cada situação, dependendo das variáveis de contorno, como ambiente, clima. O presente trabalho estudará a proteção contra descargas atmosféricas que incidam em construções de subestações de média e alta tensão.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é, através de estudos de caso conseguir afirmar que para cada condição de contorno, como poluição, clima, umidade em uma subestação poderá ser utilizado determinado modelo de proteção contra descargas atmosféricas. Além de poder confirmar, através de um software de simulação de para-raios, a veracidade da necessidade de equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas, apresentando resultados de tensão elétrica com e sem a estrutura do para-raios.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será apresentada a parte teórica sobre descargas atmosféricas, o que são e como são formadas, além de uma breve explicação sobre o índice cerâmico: o que é, como é

calculado e um panorama do Brasil e seus índices. Os tipos de formação de raios e como são localizados.

O capítulo 3 abordará sobre os métodos de proteção, o que são e porque são utilizadas, suas instalações, estrutura, composição química. Será feito um breve comentário sobre aterramento e destacar a junção sobre aterramento e para raio. Será abordado o subtema de transitórios, assunto de grande relevância para compreensão das tensões e correntes que são parâmetros para seleção de para-raios. E terá uma abordagem da classificação de para-raios e ensaios que são realizados nos mesmos.

O capítulo 4 apresenta três subestações, duas no Sul e uma no Norte do país, que serão abordadas para os estudos de caso e é apresentado o software utilizado para simulação de para-raios.

O capítulo 5 descreve o resultado da metodologia mostrada no capítulo 4, assim como os resultados das simulações.

O capítulo 6 se refere à conclusão.

2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Descarga atmosférica é um fenômeno natural que desde o princípio da humanidade causa medo e danos e pode provocar a morte, pois injeta correntes da ordem de até centenas de milhares de ampères no objeto atingido. A descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga elétrica transitória de curta duração, com uma alta corrente associada, que usualmente atinge quilômetros de extensão. [1] Tal descarga ocorre quando nuvens em uma determinada região da atmosfera atingem uma quantidade de cargas elétricas de forma a gerar campos elétricos tão intensos que superam a rigidez dielétrica do ar, causando assim, sua ruptura. Este parâmetro é da ordem de 30 kV/cm para o ar seco nas condições atmosféricas padronizadas, mas pode ser bem menor, devido tanto à redução da pressão atmosférica como também devido à elevada umidade na atmosfera. [2]

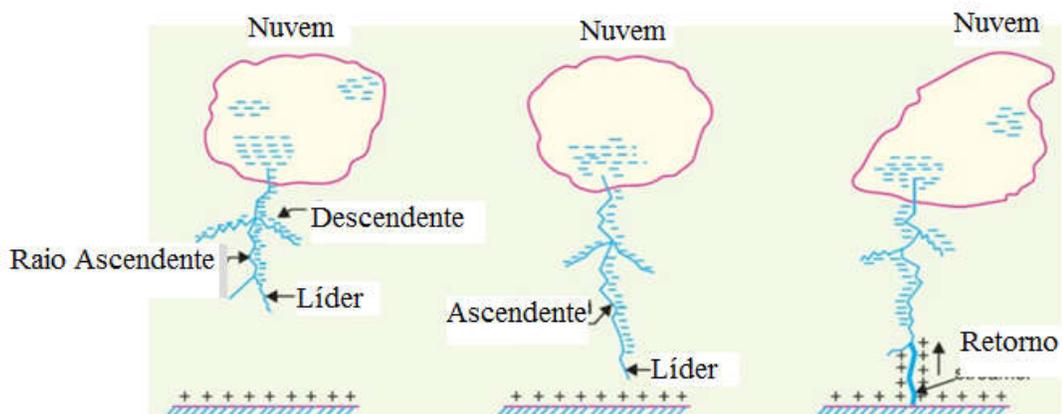
Para que tal processo possa acontecer, é necessário que as condições ambientais estejam favoráveis. Nas nuvens de tempestade, podem ser identificados quatro tipos de descargas atmosféricas: descargas dentro da nuvem, entre nuvens, entre nuvem e solo e entre nuvem e a estratosfera. [3] As descargas nuvem solo podem ser classificadas em descargas ascendentes e descendentes segundo a direção da evolução do canal de descarga que faz o fechamento do percurso ionizado. Elas também podem ser classificadas segundo a polaridade da carga na região da nuvem conectada ao solo por esse percurso, negativas e positivas. Deste modo, podem-se ter descargas atmosféricas descendentes positivas e negativas e descargas ascendentes positivas e negativas. [3] A grande maioria das descargas é de polaridade negativa, sendo considerado um percentual igual ou maior do que 90 %, o que é de grande importância para o desempenho das linhas e dos equipamentos em virtude da diferente resposta de suas isolações de acordo com a polaridade. O valor médio da crista da corrente de descarga varia entre 30 kA e 50 kA, dependendo do local da ocorrência. O tempo médio de duração de uma corrente de descarga aproxima-se de 300 ms. Para descargas entre nuvem e solo, seu percurso pode estender-se entre 1 e 3 km abaixo da nuvem, embora seu percurso total possa superar 10 km. [3]

2.1 FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A forma mais comum de explicar a formação das cargas e o modelo das nuvens é a representação bipolar, onde conforme a Figura 1, onde a nuvem se comporta como um enorme bipolo com cargas positivas na parte superior e as negativas na inferior. A nuvem carregada induz no solo cargas positivas, que ocupam uma área correspondente ao tamanho

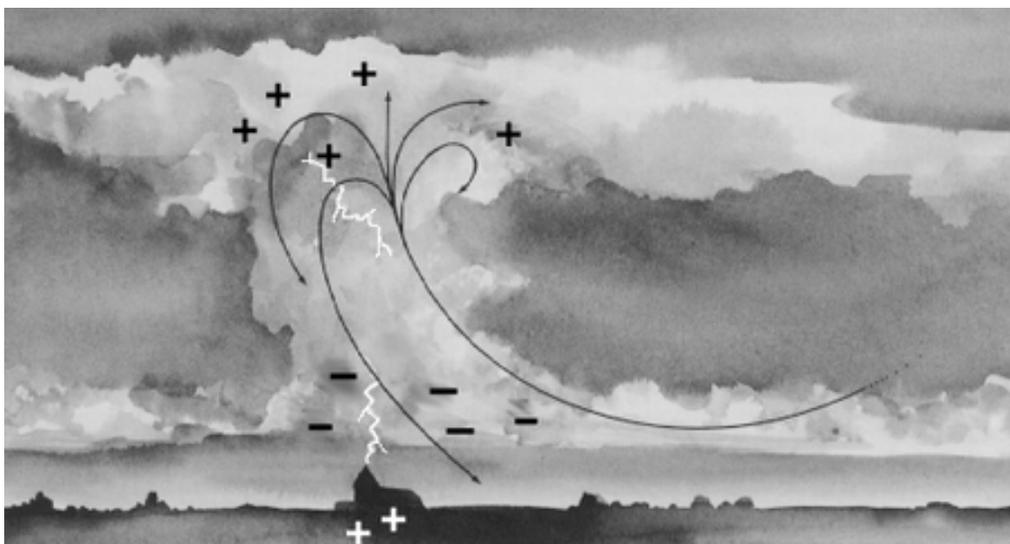
da nuvem; como a nuvem é arrastada pelo vento, a região de cargas positivas no solo acompanha o seu deslocamento, formando uma forma de sombra de cargas positivas que seguem a nuvem, conforme a Figura 2, ocorrendo um raio quando a diferença de potencial entre a nuvem e a superfície da Terra ou entre duas nuvens é suficiente para ionizar o ar; os átomos do ar perdem alguns de seus elétrons e tem início a uma corrente elétrica (descarga).

Figura 1 - Nuvem bipolar e ionização do ar seguido de descarga atmosférica.



Fonte: <http://university.listenlights.com/2017/08/04/mechanism-of-lightning-discharge/> - adaptado. Acesso em: 20. out. 2017.

Figura 2 - Quebra da resistência dielétrica.



Fonte: <https://www.exploratorium.edu/ronh/weather/weather.html> - Acesso em: 20. out. 2017.

2.2 CLASSIFICAÇÕES DAS DESCARGAS

2.2.1 As Descargas Intranuvens

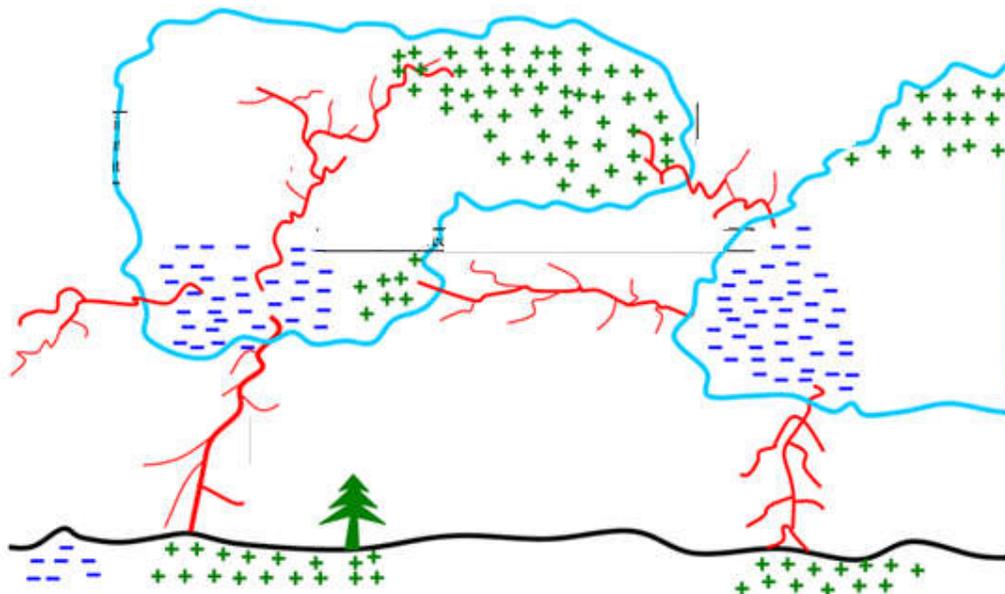
As descargas deste tipo são assim chamadas por iniciarem dentro de uma nuvem e são as mais frequentes, pelo fato de a capacidade isolante do ar diminuir com a altura em função da diminuição da densidade do ar e devido às regiões de cargas opostas dentro da nuvem estarem próximas. [4] Eles são menos perigosos para o sistema elétrico e o fato de estarem imersas nas nuvens impossibilita que se conheçam detalhes sobre a sua formação. Estatisticamente, elas representam cerca de 70% do número total de descargas. Esse percentual varia com a latitude geográfica, sendo 90% em regiões próximas ao equador geográfico. [4]

2.2.2 As Descargas entre Nuvem e Solo

Trata-se do tipo de maior interesse na segurança de seres humanos, animais e instalações. [4] Essa categoria de descarga inicia na superfície de uma nuvem ou no solo, abaixo ou próximo de uma nuvem de tempestade. Sua denominação é feita de acordo com o sentido de movimento da carga que o origina. Dessa maneira, os raios entre nuvens e solo podem ser do tipo nuvem-solo ou solo-nuvem. Eles também se classificam quanto ao sinal da carga líder que inicia uma descarga, podendo ser negativos ou positivos. A maioria das descargas nuvem-solo é negativa. As descargas nuvem solo, também denominadas raios, são as mais estudadas devido ao seu caráter destrutivo.

Na Figura 3, podem-se analisar de forma ilustrativa os tipos de descargas mencionadas anteriormente:

Figura 3 - Tipos de Descargas.



Fonte: <http://cdn.iopscience.com/images/> - adaptado. Acesso em: 24. nov. 2017.

2.3 COMO LOCALIZAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Uma rede de detecção de raios consiste em um complexo sistema de instrumentos de medida utilizado para detectar descargas atmosféricas identificando precisamente a localização do ponto de impacto de cada descarga. [5] Diferentes técnicas de detecção de descargas atmosféricas são utilizadas, cada uma apresentando vantagens e desvantagens na sua utilização. As principais são a técnica de indicação de direção magnética (MDF), a técnica da diferença do tempo de chegada (TOA) e a combinação das técnicas MDF e TOA. [5]

O país possui cinco redes de detecção, a maioria operando sobre a responsabilidade de setores governamentais, sendo elas: RINDAT (Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas), abrangendo grande parte da área monitorada do Brasil; BLDN (Rede de Detecção de Raios do Brasil), que cobre o estado de Rondônia; SIDDEM (Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos), cobrindo os estados do Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e o Rio Grande do Sul; WWLL (*World Wide Lightning Location Network*), cobrindo o Brasil inteiro, mas com baixa eficiência e precisão; RDRSIPAM (Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia), que compreende os estados do Pará, Maranhão, Tocantins e parte do Mato Grosso. [5]

As descargas atmosféricas diretas ou indiretas são as principais causas dos desligamentos em redes de distribuição, acarretando danos nos equipamentos e isoladores do sistema elétrico. Informações sobre descargas atmosféricas eram restritas a mapas isoceráunicos elaborados a partir do número de trovoadas por ano. Contudo essa ferramenta não é confiável, pois estudos na região sudeste do país têm mostrado que estes mapas podem apresentar erros que ultrapassam 500%. Com o objetivo de obter informações confiáveis sobre a ocorrência de descargas elétricas e avaliar seu impacto sobre o sistema elétrico, as empresas decidiram investir na implantação de sistemas de detecção e monitoramento de descargas atmosféricas. [13]

O Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas gera pesquisa científica e produtos destinados a aplicações na previsão de tempo, na análise e manutenção de sistemas elétricos de transmissão, de distribuição e na emissão de laudos de análise de eventos severos para seguradoras e empresas de engenharia. [13]

O sistema atua através do Sistema de Posicionamento Global (GPS), que possibilita informações de temporização de raios com resoluções de até 300 nanossegundos, utilizando tecnologias denominadas "Sistema de Localização e Rastreamento de Raios" ("*Lightning Positioning and Tracking System*" - LPATS). A precisão das informações de localização de raios do sistema é, em média, de 500 metros dentro do perímetro definido pela posição das estações remotas de recepção. Entre os produtos de visualização gerados pelo sistema se destacam:

- Localização geográfica e temporal de descargas atmosféricas nuvem-terra;
- Localização de temporais;
- Determinação de características de descargas como: valor estimado do pico da corrente de retorno, polaridade e número de componentes (multiplicidade) se a descarga for de natureza múltipla.

2.4 ÍNDICE CERÁUNICO

De forma a padronizar um índice de tempestades, foi criado o Mapa Isoceráunico, que determina o número de dias de tempestades por ano para uma dada região, sendo esse índice chamado de T_d pela NBR 5419-2015. Os mapas, historicamente, utilizavam uma metodologia sujeita a falhas, pois grande parte dos dados era originária de concessionárias de energia, através de operadores de subestação. [4]

Pelos índices T_d dos mapas isocerânicos, a norma NBR 5419-2:2015 sugere o uso da Equação 1 para obter N_g .

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \left[\frac{km^2}{ano} \right] \quad (1)$$

Sendo que N_g se refere à densidade de Descargas Atmosféricas para a terra.

A Figura 4 apresenta o mapa isocerânico no Brasil.

Figura 4 - Mapa Isocerânico do Brasil.



Fonte: NBR 5419/ 2005.

Um exemplo é Porto Alegre, onde foi feito o estudo de caso, que possui $T_d = 20$ dias de tempestades por ano, ou seja, um índice $N_g = 1,69$. Pelos dados de 27/novembro/2017 às

15h07min do INPE, obtêm-se um valor de 2,19 raios /km² ano. Atenta-se para a NBR 5419-2: 2015, na qual o INPE fornece diretamente a densidade de descargas atmosféricas no anexo F.

A frequência da ocorrência de descargas atmosféricas é determinada através do nível isoceráunico de uma região e a partir dele pode-se obter o número de raios por quilômetro quadrado ao ano. A conversão do nível ceráunico para densidade de raios para terra é realizada através de um fator de proporcionalidade que varia de 0,1 a 0,25 e indica o número de dias no ano com ocorrências de trovoadas. [7]

$$N = kI \quad (2)$$

Onde

N = densidade de raios (raios/km²)

k = fator de proporcionalidade

I = nível ceráunico

Para a determinação dos surtos de tensão e corrente resultantes em várias partes do sistema são necessárias uma análise de ondas trafegantes. Essas ondas surgem quando uma descarga atinge um condutor fase de uma linha de transmissão. Então se inicia uma propagação de ondas de tensão e de corrente que trafegam em ambas as direções a partir do ponto de impacto aproximadamente à velocidade da luz. A propagação da onda continua até encontrar uma descontinuidade, que pode ser disjuntores abertos, transformadores, outras linhas ou o rompimento da isolação da linha. Quando ocorre uma descontinuidade, as ondas podem ser refletidas ou transmitidas. A análise de ondas trafegantes em sistemas lineares simples pode ser feita manualmente, enquanto para sistemas mais complexos requerem o uso de computadores. [7]

A implantação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas nos vários elementos do sistema de potência visa à blindagem e a atenuação das ondas trafegantes no sistema quando o mesmo é atingido por uma descarga. Para implantar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas nas linhas de transmissão e subestações faz-se necessário o estudo de incidência de raios com descargas atmosféricas diretas no condutor, nas torres, mastros ou cabos para-raios e o estudo de incidências de raios nas proximidades da linha. [7]

O estudo das incidências de raios nas torres, mastros ou cabos para-raios, recebe um tratamento estatístico por possuir uma grande quantidade de parâmetros de origem aleatória como corrente de raio, isolamento do sistema, aterramento de torres entre outros. A ocorrência de desligamentos em consequência desse fenômeno pode ser minimizada através de um projeto de aterramento das estruturas e um ajuste dos elementos de projeto da cabeça da torre, e ao contrário da queda direta, esses efeitos dificilmente vão ser eliminados. [7]

A probabilidade de a estrutura ser atingida por Raios, N_d através da Equação 3 da norma NBR 5419-2:2015.[8]

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6} \text{ [ao ano]} \quad (3)$$

3. MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Um sistema de proteção contra descargas atmosféricas tem como objetivo blindar uma estrutura, seus ocupantes e seus conteúdos dos efeitos térmicos, mecânicos e elétricos associados com os relâmpagos. O sistema atua de modo que a descarga atmosférica possa entrar ou sair do solo sem passar através das partes condutoras da estrutura ou através de seus ocupantes, danificando-os ou causando acidentes.

Um sistema de proteção contra descargas atmosféricas não impede que o relâmpago atinja a estrutura, ele promove um meio para controlar e impedir danos através da criação de um caminho de baixa resistência elétrica para a corrente elétrica fluir para o solo. A ideia de proteger prédios e outras estruturas dos efeitos diretos dos relâmpagos por meio do uso de condutores foi, pela primeira vez, sugerida cerca de dois séculos atrás por Benjamin Franklin.

Os principais componentes de um sistema de proteção contra relâmpagos ou sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), são [9]:

- Terminais Aéreos;
- Condutores de descida;
- Terminais de aterramento;
- Condutores de ligação equipotencial.

Os terminais aéreos, conhecidos como para-raios, são hastes condutoras rígidas montadas em uma base com o objetivo de capturar o relâmpago. Os condutores de descida são cabos que conectam os terminais aéreos aos terminais de aterramento. Os terminais de aterramento são condutores que servem para conectar os condutores de descida ao solo. Os condutores de ligação equipotencial, por sua vez, são condutores que visam igualar o potencial entre os diferentes condutores para impedir descargas laterais. [9]

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. [13]

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. [14]

Na opinião de Mamede Filho (2005) tratando-se de redes com tensão nominal superior a 69 kV ou dotadas de cabos para-raios para blindagem, o seu nível de isolamento é compatível com os valores das sobretensões induzidas, não acarretando falha nas isolações.

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).

3.1 Métodos de Proteção

A NBR5419 apresenta quatro níveis de proteção, os quais são determinados pelo tipo de ocupação da estrutura e suas características. Os quatro níveis são definidos a seguir [12]:

- Nível I é o caso mais crítico, com risco de explosão, perda de patrimônio, ou ainda risco de contaminação ao meio ambiente, como indústrias petroquímicas, posto de combustível e usinas elétricas, além de serem capaz de destruir estruturas vizinhas.
- Nível II se refere a riscos de acidentes com pessoas, de perda de patrimônio cultural, perda de dados importantes. Encontram-se hospitais, museus, escolas e bancos.
- Nível III é para estruturas de uso comum, como casas e indústrias de pequeno porte.
- Nível IV se refere a construções com grande fluxo de pessoas.

Os métodos de proteção são as diferentes maneiras de se captar os raios, já que as descidas e os aterramentos são os mesmos e oferecem um volume protegido. Existem três métodos a conhecer:

- Método Franklin
- Método Gaiola de Faraday ou Malha
- Método da Esfera Rolante ou Eletro geométrico

É de fundamental importância conhecer os três tipos de métodos na hora da elaboração de um projeto de SPDA para determinar qual se encaixa na proteção adequada da edificação.

O método Franklin é composto por um captor com quatro pontas montado sobre um mastro, cuja altura deve ser calculada conforme as dimensões da edificação, podendo ser colocado um ou mais captores para uma proteção mais abrangente. Consiste na colocação de hastes verticais sobre a edificação ou próximas desta, de modo que a edificação fique dentro do cone de proteção projetado pela ponta do Para-Raios. Devido às limitações impostas pela norma NBR 5419/2005, a abertura do cone foi substancialmente reduzida e por esse motivo o método Franklin passa a ser cada vez menos usado em grandes edifícios, contudo é indicado para edificações de pequeno porte.

A proteção baseia-se na rotação de um triângulo em torno de um eixo (geratriz), cujo ângulo de abertura é pré-determinado, variando em função do nível de proteção e altura da edificação. [10] A Figura 5 exemplifica este tipo de modelo de para-raios. A área de proteção de um captor Franklin é normalmente determinada utilizando-se o método dos ângulos fixos a Figura 6 mostra a área de proteção obtida.

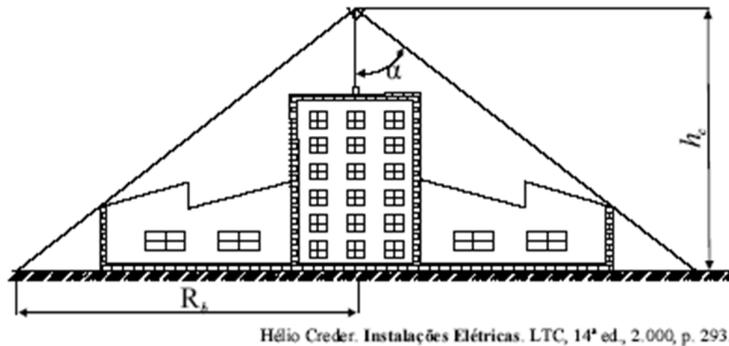
Figura 5 - Proteção por Para-raios tipo Franklin.



Fonte: http://www.fisica-potierj.pro.br/spda_instalacoes/franklin - Acesso em: 02. dez. 2017.

Atualmente denominado método dos cones, onde o ângulo do cone depende da altura do captor e do nível de proteção adotado.

Figura 6: Ângulo de proteção utilizando hastes.



Fonte: Hélio Creder, Instalações Elétricas.

Apesar de muito usado, o modelo subdimensiona um SPDA, deixando áreas sem a devida proteção. [4]

O método Gaiola de Faraday ou malha funciona como captor, mas seguramente a posição dos captores na cobertura do volume a proteger deverá ser determinada pelo Método Eletrogeométrico que apresenta a forma física mais aceitável para justificar esse funcionamento. [4]

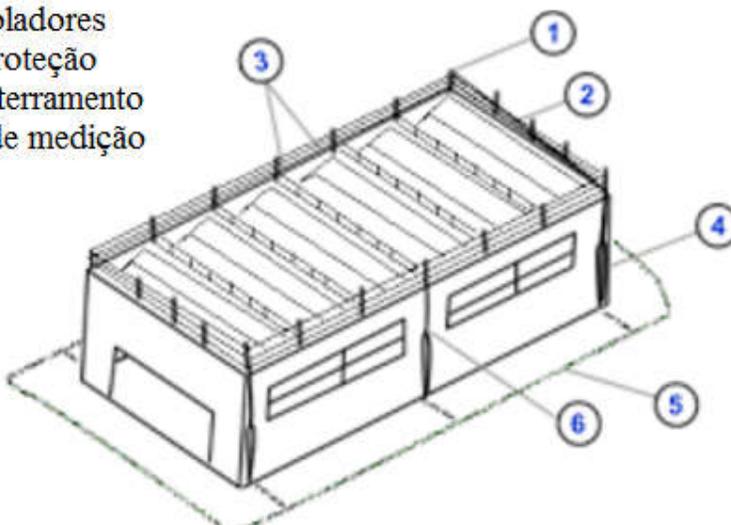
Este Método consiste no lançamento de cabos sobre a cobertura da edificação, modulados com fechamentos de acordo com o nível de proteção exigido para edificação. Esse método funciona como blindagem eletrostática, uma tentativa de reduzir os campos elétricos dentro da edificação. O princípio básico da proteção de Michael Faraday é usar os condutores de captura em forma de anel, conforme pode ser visto na Figura 7. Este método se baseia no princípio de que, se a corrente se distribui uniformemente na superfície de uma estrutura, é nulo o campo no interior da mesma. [10] As suas vantagens são:

- Melhor eficiência e proteção;
- Menor impacto estético;
- Sistema aprovado internacionalmente;
- Manutenção preventiva pequena.

Figura 7 - Modelo Gaiola de Faraday.

SISTEMA DE PROTEÇÃO TIPO GAIOLA DE FARADAY

- 1 - Captor tipo terminal aéreo
- 2 - Cabo de cobre nu
- 3 - Suporte isoladores
- 4 - Tubo de proteção
- 5 - Malha de aterramento
- 6 - Conector de medição



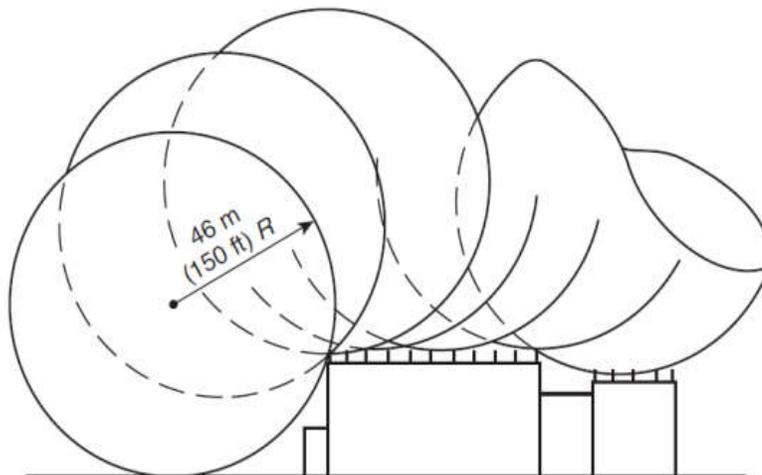
Fonte: <https://www.sabereletrica.com.br/protECAo-por-gaiola-de-faraday/> - adaptado. Acesso em: 07. jan. 2018.

O Método da Esfera Rolante ou Eletrogeométrico foi considerado o método de proteção mais próximo da realidade física das Descargas Atmosféricas nuvem-solo, porém não é o método mais preciso. Algumas alterações em relação ao modelo Eletrogeométrico desenvolvido para subestações e linhas de transmissão foram realizadas, de forma a simplificar os cálculos envolvidos e compatibilizar com a realidade das estruturas. [4]

Este método constituiu-se de uma evolução do método Franklin. Muito usado para proteção de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, o método foi simplificado para ser aplicado em edificações, servindo tanto para dimensionar o SPDA quanto para checar a proteção com relação às edificações vizinhas, desníveis e estruturas específicas, tais como antenas, placas e painéis, normalmente colocados nos topos das edificações. O raio da esfera é adotado em função do nível de proteção selecionado em cada edificação, este método é utilizado somente para cálculo e dimensionamento. Para confirmar se esses materiais estão corretamente posicionados e dimensionados, é utilizado o método da esfera rolante, conforme Figura 8, que consiste em fazer rolar uma esfera fictícia, com raio pré-dimensionado em todos os sentidos e direções sobre o topo e fachadas da edificação, com o objetivo de fazer com que os mastros do Franklin ou cabos da Gaiola de Faraday, impeçam que a esfera toque a

edificação. [10] A Tabela 1 apresenta o raio da esfera rolante de acordo com o nível de proteção e a máxima intensidade de corrente para cada nível.

Figura 8 - Método da esfera rolante.



Fonte: Pereira.

Tabela 1 - Raio da esfera rolante.

Nível	I	II	III	IV
Raio da esfera [m]	20	30	45	60

Fonte: NBR5419-2:2015.

3.2 Para- Raios

A sua principal função é a de proteger os equipamentos contra descargas que entram na subestação através das linhas de transmissão e também proteger contra as falhas da blindagem contra descargas diretas. Isto é feito limitando-se a tensão a um valor conhecido, evitando que tensões superiores cheguem aos equipamentos protegidos. Como uma função adicional, os para-raios podem proteger o sistema contra surtos de manobra. [13]

Os para-raios são construtivamente bem simples. Compostos por um elemento resistivo não linear e um centelhador. Em condições normais de operação o para-raios funciona com circuito aberto. Com sobretensão, o centelhador dispara e uma corrente passa pelo resistor não linear, limitando a tensão. Atualmente o elemento resistivo mais comum é o composto por óxido metálico, substituindo os de carboneto de silício. [13]

Até meados dos anos 80, os para-raios, em sua grande maioria, não possuíam qualquer tipo de supervisão, incluindo os para-raios de óxido de zinco que surgiram no final da década de 60. Com o passar do tempo, devido à percepção de sua importância no sistema, pôde-se ver um crescente interesse em prever seu tempo de vida útil ainda em funcionamento para assim antecipar-se a uma provável falha do mesmo, evitando-se conseqüentemente danos ao sistema. Foi descrito um detector portátil de corrente de fuga resistiva para manutenção preventiva de para-raios. Os autores desenvolveram um instrumento que detecta corrente de fuga sem necessidade de desconexão do para-raios, sendo este fato um grande benefício para as concessionárias na prevenção de falhas em para-raios. Como a corrente de fuga resistiva, causada principalmente pela deterioração do para-raios de ZnO, leva a um aumento da componente da 3ª harmônica da corrente, mede-se esta componente, para através disso estabelecer a técnica de avaliação e manutenção do para-raios. [12]

Este detector portátil desenvolvido por SHIRAKAWA et al. (1988) é adequado para sistemas com baixa distorção de tensão de 3ª harmônica (1% ou menos). Seguindo o mesmo caminho, o trabalho de LUNDQUIST et al. (1990) é um dos pioneiros na medição de corrente de fuga de para-raios de óxido metálico. Neste trabalho, vários métodos para determinação da condição de para-raios de ZnO por meios da medida da corrente de fuga dos para-raios são discutidos. Um novo método, que é baseado na análise da 3ª harmônica da corrente de fuga, é apresentado. A principal vantagem do novo método é a baixa sensibilidade às harmônicas de tensão do sistema. A presença de harmônicas na tensão tem apresentado um grande problema no método de SHIRAKAWA et al. (1988), já que elas podem interferir com as harmônicas geradas pela resistência não-linear do para-raios. O efeito favorável do novo método é alcançado pela introdução de uma ponta de prova que permite uma compensação das harmônicas de corrente pelas harmônicas na tensão.

Trabalhos subsequentes apresentam os mais recentes desenvolvimentos da tecnologia e testes de para-raios, como por exemplo. Neste trabalho em especial, os autores analisam os novos desenvolvimentos, discutindo a substituição da convencional isolação de porcelana por isolação polimérica, permitindo melhora das características mecânicas e do comportamento de modo de falha. Além disso, especiais aplicações para para-raios, como proteção de subestações isoladas a gás e prevenção de faltas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão, são colocadas em consideração. [13]

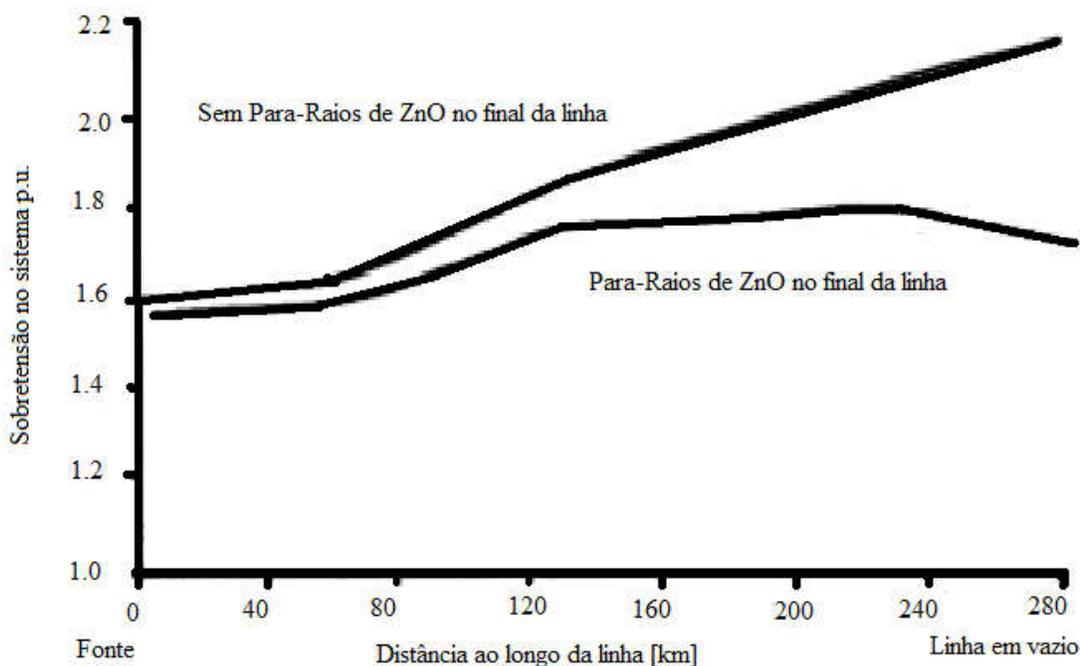
Por sua vez, KLEIN et al. (1999) propõem um sistema de monitoramento de para-raios de óxido metálico que mede a corrente de fuga total através de sensores e sem desconexão do para-raios. O sistema armazena todos os valores de corrente, temperatura, entre outros parâmetros num computador, que pode estar distante do equipamento e conectado através de fibra ótica. O banco de dados do sistema permite detectar mudanças graduais das condições do para-raios. Consequentemente, o aumento das perdas e o risco de instabilidade térmica podem ser detectados pela observação contínua da corrente de fuga. [14]

Enfim, HEINRICH et al. (2001) fazem em seu trabalho uma comparação entre os mais recentes procedimentos de diagnósticos de para-raios de óxido metálico desenvolvidos. O trabalho comenta sobre vários métodos, dando destaque para a medição da temperatura, considerada pelo autor “o mais universal parâmetro de monitoramento”. [15]

3.2.1 Classificação dos Para-Raios

Os para-raios estão instalados próximos aos principais equipamentos de uma subestação, garantindo a confiabilidade, economia e continuidade de operação. A sua atuação tem por base a absorção de uma parte da corrente associada à onda de tensão, impedindo que as sobretensões alcancem valores superiores àqueles nos quais os equipamentos foram projetados, evitando danos aos mesmos e ao sistema elétrico. Apesar do seu importante papel no sistema elétrico, os para-raios são equipamentos de baixo custo e de pequenas dimensões. A Figura 9 ilustra o efeito das sobretensões em uma linha a vazio com e sem para-raios de ZnO. [6].

Figura 9 – Efeito das sobretensões em função da utilização ou não de para-raios.



Fonte: Pereira – adaptado.

Os para-raios normatizados atualmente são de Óxido de Zinco e sem qualquer centelhador. Basicamente são constituídos de uma coluna de varistores envolvida por uma coluna de porcelana ou material polimérico, havendo ainda outros componentes estruturais. Os principais componentes dos para-raios ZnO são:

a) Varistor de Óxido Metálico (MOV)

Os blocos de óxido de zinco dos para-raios atuais possuem elevada capacidade térmica e são capazes de dissipar grande quantidade de energia de surto, resultando em elevados níveis de suportabilidade de corrente de surto.

b) Invólucro

O invólucro é a parte isolante externa do para-raios que proporciona a necessária distância de escoamento e abriga os componentes internos. Um invólucro pode consistir de várias partes que propiciem resistência mecânica e proteção contra intempéries. Os blocos de ZnO dos para-raios são encapsulados em invólucros de porcelana ou de material polimérico com características não higroscópicas e extremidades hermeticamente fechadas, garantindo perfeita estanqueidade ao equipamento.

c) Anel Equalizador

O anel equalizador do para-raios é de material condutor, geralmente de forma circular, cuja finalidade é modificar a distribuição do campo elétrico ao longo do para-raios tornando-a a mais uniforme possível. O anel equalizador é normalmente utilizado em para-raios de alta e extra-alta tensão. [10]

- CLASSES DE UM PARA-RAIO:

A norma IEEE Std. C62.1 (1980) apresenta três classes de para-raios utilizadas em sistemas de alta-tensão:

- estação (3 a 684 kV);
- intermediária (3 a 120 kV);
- distribuição (1 a 30 kV).

Segundo a norma, a classificação dos para-raios depende dos tipos de ensaios a que eles deverão ser submetidos em seu processo de fabricação. Os ensaios e seus valores limites são descritos na norma citada.

- CARACTERÍSTICA DE PROTEÇÃO

Para definir a característica de proteção é necessário conhecer as características de proteção dos para-raios, que dependem basicamente do tipo de para-raios utilizado e devem estar abaixo dos valores normalizados resultantes da combinação das seguintes curvas características determinadas na NBR 5309 (ABNT, 1991):

- Tensão disruptiva de impulso atmosférico x Tempo para disrupção;
- Tensão residual x Corrente de descarga $8 \times 20 \mu\text{s}$;
- Tensão disruptiva de impulso de manobra x Tempo para disrupção (no caso de para-raios de 10 kA com tensão nominal superior a 100 kV, e para-raios de 15 e 20 kA). [10]

O nível de proteção para impulso atmosférico do para-raios é definido pelo valor máximo entre a tensão residual para impulso de corrente com frente íngreme dividida por 1,15 e o maior valor de tensão residual à corrente de descarga nominal, obtidos para as amostras de ensaio durante o ensaio de tipo. O nível de proteção para impulso de manobra é definido como o valor máximo da tensão residual para uma amplitude de corrente especificada, obtido para as amostras de ensaio durante o ensaio de tipo. [10]

- CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Os para-raios, conforme a NBR 5287 (ABNT, 1988), devem ser adequados para as seguintes condições normais de serviço:

- Temperatura ambiente de -5 °C a 40 °C;
- altitude não superior a 1000 m;
- frequência da fonte de corrente alternada de alimentação de 48 Hz a 62 Hz e
- tensão aplicada continuamente aos terminais do para-raios não superior à sua tensão nominal.

Para-raios em operação diferente das normais ou sujeitos à fumaça, vapores, poluição, umidade ou vibrações exigem estudos especiais por parte dos fabricantes.

- IDENTIFICAÇÃO DOS PARA-RAIOS

Ainda segundo a NBR 5287 (ABNT, 1988), os para-raios devem conter em sua identificação, no mínimo a tensão nominal, frequência nominal, corrente de descarga nominal, classe de alívio de sobrepresão (se possuir), nome e marca do fabricante, tipo ou modelo, número de série, mês e ano de fabricação. Para para-raios mais robustos (10 kA, 15 kA e 20 kA), as informações anteriores devem ser acrescidas da classe de descarga da linha de transmissão, massa do elemento e a norma técnica de projeto e ensaios juntamente com seu ano de edição. [10]

- LOCALIZAÇÃO DOS PARA-RAIOS

Idealmente, a posição mais eficaz para todos os para-raios é nos terminais do equipamento a ser protegido. Por uma série das razões, às vezes os para-raios acabam situando-se a alguma distância do equipamento a ser protegido, ou até mesmo devido um para-raios ser usado para proteger mais de um equipamento. Alocar um para-raios distante do equipamento a ser protegido reduz a sua margem de proteção. Para isso, uma análise tem que ser feita para determinar o quão distante um para-raios pode se localizar do equipamento a ser protegido e ainda assim fornecer uma proteção adequada. A norma IEEE Std. C62.22 (1997) auxilia nos cálculos dessas distâncias.

Os ensaios, segundo a NBR 5287 (ABNT, 1998), podem ser classificados basicamente em:

- ENSAIOS DE TIPO

É um conjunto de ensaios realizados em para-raios, montados com componentes normais de fabricação, que tem por objetivo verificar as características de projeto do para-raios e a

conformidade do mesmo com a norma. Estes ensaios não precisam ser repetidos, salvo acordo entre fabricantes e comprador, enquanto não forem alterados o projeto, os materiais ou processos de fabricação. A relação dos ensaios de tipo é a seguinte:

- a) ensaios de tensão disruptiva a frequência nominal a seco e sob chuva;
- b) ensaios de tensão disruptiva de impulso atmosférico;
- c) ensaios de tensão disruptiva de impulso de manobra a seco e sob chuva, quando aplicáveis;
- d) ensaio de tensão residual;
- e) ensaios de corrente suportável de impulso;
- f) ensaio de ciclo de operação;
- g) ensaios de alívio de sobrepressão interna, quando aplicável;
- h) ensaios de tensões de radiointerferência e de ionização interna;
- i) ensaios de tensão suportável no invólucro, sem a parte interna ativa;
- j) ensaios do desligador automático, quando aplicável;
- k) ensaio de poluição artificial;
- l) ensaio de estanqueidade;
- m) ensaio de corrente de fuga, quando aplicável. [11]

- ENSAIOS DE ROTINA

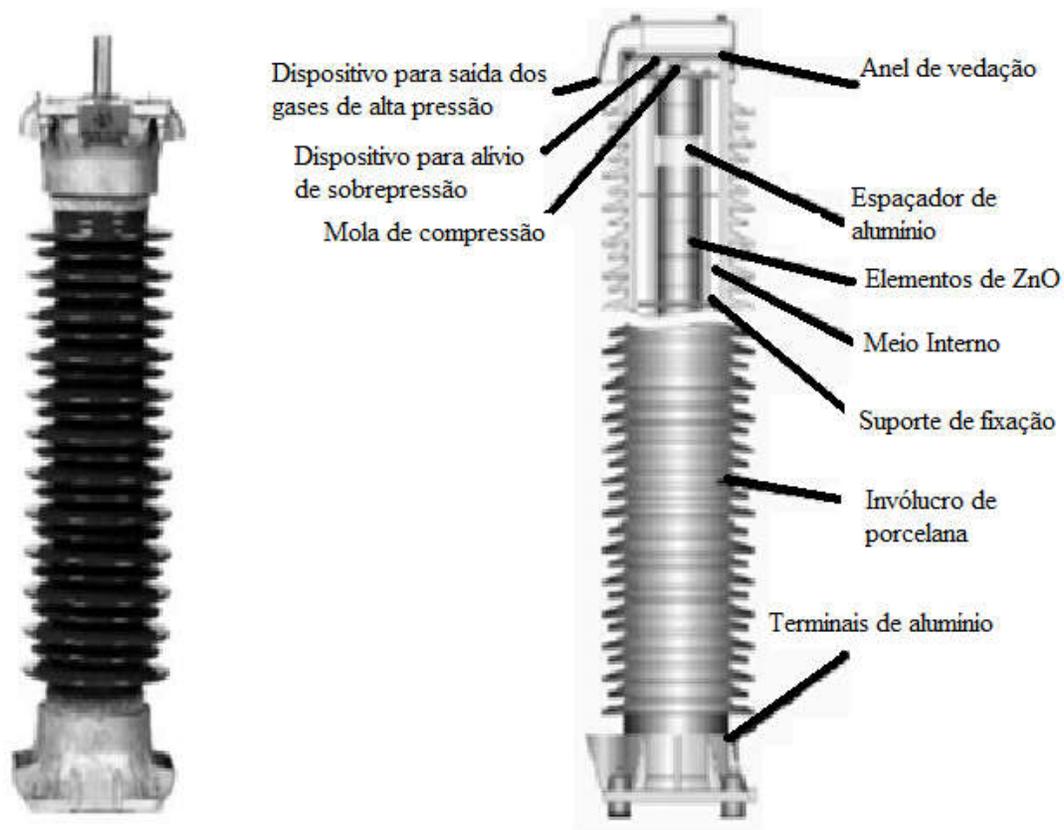
É um conjunto de ensaios realizados em cada elemento de para-raios completo, com o objetivo de verificar as características mínimas de qualidade e uniformidade de produção em conformidade com o projeto. A relação de ensaios de rotina é a seguinte:

- a) ensaio de tensão disruptiva à frequência nominal a seco;
- b) ensaio de corrente de fuga, quando aplicável, na tensão fase-terra do sistema;
- c) ensaio de estanqueidade.

Existem atualmente duas filosofias de para-raios de ZnO com relação ao tipo de invólucro: para-raios com invólucros de porcelana e polimérico. Para ambas as filosofias, existem diferentes concepções de projeto de montagem, que são geralmente apresentados pelos fabricantes em seus catálogos técnicos. [10]

Para-raios de ZnO com invólucro de porcelana: Os primeiros para-raios de ZnO com invólucros de porcelana desenvolvidos para sistemas de potência foram apresentados ao mercado no final de década de 70. Na década de 80 diversas empresas desenvolveram e produziram para-raios de ZnO para aplicação em subestações. A Figura 10 apresenta os detalhes construtivos de um para-raios com invólucro de porcelana constituído por uma seção.

Figura 10 - Para-Raio com invólucro de porcelana.



Fonte: Richard Coleon – adaptado.

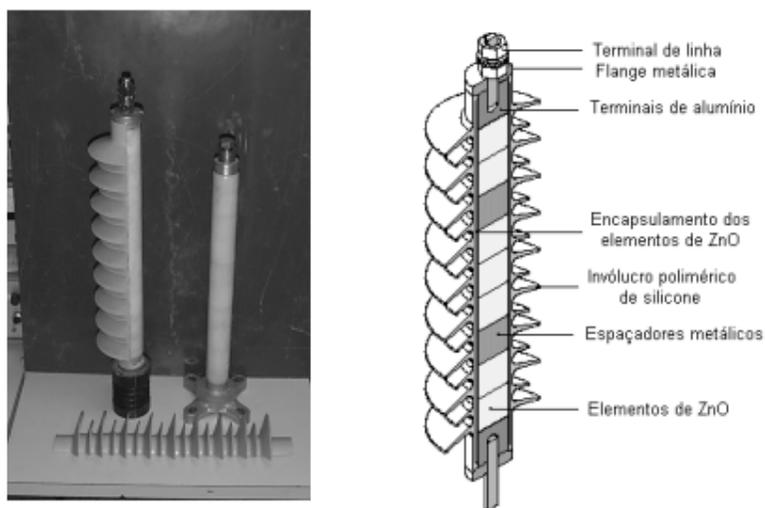
De um modo geral, o processo de montagem dos para-raios de porcelana deve ser tal que os elementos de ZnO se mantenham localizados preferencialmente de forma concêntrica dentro do invólucro de porcelana, com uma geometria definida para minimizar os efeitos de distribuição não uniforme de campo elétrico e de ionização interna, mesmo sob condições severas de poluição externa. Mecanismos de alívio de sobrepessão devem ser incorporados dentro dos flanges terminais, de modo a evitar a fragmentação ou a explosão violenta dos para-raios, em caso de uma eventual falha seguida da passagem da corrente de curto-circuito do sistema. Os perfis das saias da porcelana devem garantir uma distância de escoamento adequada às condições ambientais e características elétricas do invólucro compatíveis com as características de proteção dos para-raios. Geralmente os para-raios com invólucros de porcelana apresentam distâncias de escoamento de 20 mm / kV.

Para-raios de ZnO 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 para aplicação em para-raios de alta tensão. Apesar das diferenças construtivas entre os diferentes fabricantes, existem atualmente duas concepções de projeto: de para-raios poliméricos com e sem espaçamentos internos de ar.

Os projetos de para-raios sem espaços internos de ar entre os elementos de ZnO e o invólucro não requerem dispositivos de alívio de sobrepressão e têm normalmente se mostrado mais confiáveis em relação a possibilidade de penetração de umidade, como mostra a Figura 11. Outra vantagem deste tipo de projeto está relacionada ao peso do para-raios, comparado a um para-raios apresentando espaços internos de ar de mesmas características elétricas. A principal vantagem do projeto de para-raios com espaços internos de ar está relacionada à sua maior suportabilidade mecânica em relação aos projetos sem espaçamentos internos de ar, sendo este tipo de projeto mais recomendado para aplicações que exigem esforços mecânicos não atendidos pelo outro projeto. [16]

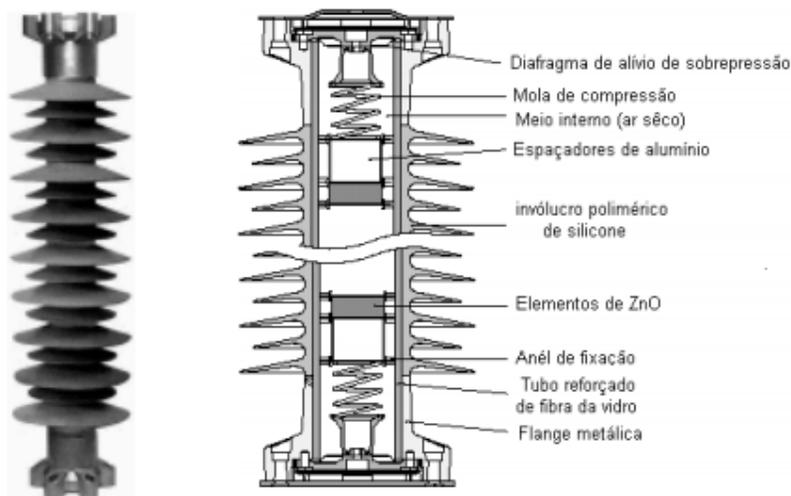
A Figura 12 ilustra os detalhes construtivos de um para-raio polimérico com espaços internos de ar.

Figura 11- Para-raios polimérico de ZnO sem espaço interno de ar.



Fonte: Richard Coleon.

Figura 12- Para-raios polimérico de ZnO com espaço interno de ar.



Fonte: Richard Coleon.

Independentes do tipo construtivo considerado têm sido verificados nos últimos anos que os dois maiores problemas observados nos para-raios com invólucro de porcelana ao longo do tempo: perda de estanqueidade e fragmentação do invólucro com ou sem explosão, vêm sendo minimizados pela utilização de para-raios com invólucro polimérico. A experiência de campo tem demonstrado que os para-raios poliméricos, em especial àqueles apresentando projetos sem espaçamentos internos de ar, são bem menos propensos a perda de estanqueidade do que os para-raios com invólucro de porcelana, reduzindo a causa mais comum de falha nos para-raios. [10]

Outro aspecto importante dos projetos construtivos de para-raios poliméricos está associado ao efeito em caso de falha do para-raios, o qual depende do projeto mecânico construtivo do para-raios. Em caso de falha interna nos para-raios com invólucro de porcelana, existe a possibilidade de explosão ou fragmentação do invólucro, com riscos de danos aos equipamentos adjacentes ou mesmo às pessoas próximas ao evento. O mesmo fenômeno pode ser verificado em para-raios poliméricos com espaçamento interno de ar, apesar dos riscos aparentemente serem menores. Para esses tipos de para-raios, os projetos do dispositivo de alívio de sobrepressão e da estrutura mecânica da porcelana ou do tubo de fibra de vidro (em para-raios poliméricos) têm uma importância fundamental no desempenho mecânico dos para-raios em caso de uma eventual falha. [10]

Devido ao menor peso, maior facilidade e flexibilidade de montagem e pela não fragmentação ou explosão do invólucro com desprendimento dos elementos de ZnO, para-raios com projetos sem espaçamentos internos de ar têm sido instalados mais próximos aos

equipamentos a serem protegidos, melhorando de modo considerável as características de proteção desses equipamentos quando da ocorrência de sobretensões atmosféricas, através da redução das tensões impulsivas nos seus terminais devido ao efeito distância. Em alguns casos, tem sido prática, a instalação dos para-raios diretamente na carcaça dos transformadores. Em adição, os para-raios com invólucro polimérico apresentam vantagens em relação aos para-raios de porcelana, tornando a sua utilização mais atrativa: Melhor desempenho sob contaminação, bem como uma melhor distribuição de tensão ao longo do para-raio.

Tem sido verificado na prática, que o bom desempenho de invólucros poliméricos em ambientes altamente contaminados e sujeitos a elevada umidade e elevada exposição de raios ultravioleta, está diretamente relacionado com o tipo e a qualidade do polímero utilizado. Melhores desempenhos em regiões mais críticas têm sido obtidos com a utilização de materiais apresentando silicone como polímero base os quais, em geral, apresentam uma maior capacidade de hidrofobicidade e melhor comportamento sob ação ultravioleta, comparados a outros tipos de polímeros. [16]

No entanto, para aplicações em sistemas de extra-alta tensão, ou em regiões de elevado nível de contaminação, cuidados devem ser tomados com relação às características do material polimérico empregado na fabricação do invólucro, em especial com relação às características de envelhecimento por exposição ultravioleta e de hidrofobicidade.

-Redução das perdas de energia provenientes da menor corrente de fuga nos invólucros poliméricos, comparado aos de porcelana;

- A maior distância de escoamento do invólucro polimérico, para um mesmo comprimento, permite a montagem de para-raios com invólucros de menor comprimento, facilitando a montagem. Em para-raios aplicados em subestações, esta redução pode ser de até 40% ou mais;

- Menor peso em relação aos para-raios com invólucro de porcelana (tipicamente menos do que 50% do peso no caso de para-raios sem espaçamentos internos de ar para aplicação em subestações), acarretando em menores esforços mecânicos sobre as estruturas e permitindo uma maior versatilidade na montagem dos arranjos.

- Maior facilidade de transporte, manuseio, armazenamento e instalação, proporcionando uma redução significativa de custos.

- Não necessitam, geralmente, de dispositivos de alívio de sobrepressão (para-raios sem espaçamentos internos de ar), tornando o projeto do para-raios mais simples e menos custoso;

- Não apresentam problemas de trincas ou lascas nas saias, ocasionadas por transporte, mau manuseio durante a instalação ou mesmo vandalismo, e que podem vir a comprometer a estanqueidade do para-raios ao longo do tempo;

- Possuem uma melhor capacidade de dissipação de calor, aumentando as suas propriedades térmicas e melhorando a sua capacidade de dissipação de calor. [13]

Devido às vantagens técnicas e econômicas apresentadas pelos para-raios com invólucros poliméricos, quando comparados aos projetos de para-raios de porcelana, a utilização desse tipo de para-raios em subestações vem crescendo de uma maneira bastante acentuada. Existe atualmente uma grande quantidade de para-raios com invólucro polimérico instalados em sistemas com tensões nominais até 500 kV. No Brasil, empresas concessionárias de energia e grandes consumidores industriais vêm instalando desde o início da década de 90 para-raios poliméricos em sistemas com tensões nominais até 230 kV. Aplicações em sistemas de 500 kV foram realizadas nos últimos anos. [14]

Desempenho dos para-raios instalados em subestações:

Considerando que os para-raios aplicados em subestações apresentem bons projetos elétricos e mecânico dos sistemas de vedação, estima-se que a sua vida útil seja em torno de 20 a 25 anos. No entanto, na prática, têm sido constatadas ao longo dos últimos anos algumas alterações significativas no seu desempenho que resultam, em muitas das vezes, na operação inadequada ou até mesmo na falha dos para-raios com menos de dez anos de operação comprometendo, desta forma, a confiabilidade do para-raios e a continuidade no fornecimento de energia elétrica. Durante a sua vida útil, os para-raios são submetidos diferentes solicitações elétricas e ambientais:

- Tensão normal de operação;
- Sobretensões temporárias;
- Descargas de longa duração ou de alta intensidade e curta duração;
- Contaminação externa do invólucro, quando instalados em ambientes poluídos.
- Variações climáticas, exposição a raios ultravioleta, umidades elevadas, etc.

Essas solicitações, impostas aos para-raios individualmente ou em conjunto, podem afetar e alterar de forma significativa a característica “tensão x corrente” dos elementos de ZnO através do aumento da componente resistiva da corrente e das perdas em condições de regime permanente, e da redução da capacidade de absorção de energia dos para-raios. Em para-raios de SiC, além de alterar a característica “tensão x corrente” dos elementos de SiC, essas solicitações afetam e alteram as características disruptivas dos centelhadores. [14]

No caso de para-raios de ZnO sem centelhadores a tensão de serviço pode provocar, ao longo do tempo, o envelhecimento dos blocos de ZnO. Cuidados devem ser tomados com relação aos efeitos de uma distribuição não uniforme de tensão ao longo dos invólucros dos para-raios aplicados em Alta e Extra-Alta tensões, especialmente em regiões com elevados índices de contaminação.

Descargas de longa duração ou de alta intensidade e curta duração podem solicitar severamente os para-raios acarretando, via de regra, na perfuração, trincas ou descargas externas em todos ou alguns dos elementos não lineares que compõem os para-raios. Impulsos de alta intensidade e de curta duração, característicos de sobretensões atmosféricas, podem causar alteração da característica “ $V \times I$ ” dos elementos não lineares, descargas externas ou perfuração em todos ou alguns elementos.

A contaminação externa do invólucro tem se mostrado como outro fator bastante crítico para a degradação dos para-raios aplicados em subestações, e pode afetar de forma significativa o desempenho dos para-raios com invólucros de porcelana, levando-os a degradação e ao envelhecimento.

Depósitos de materiais contaminantes nas superfícies dos invólucros dos para-raios, associada à umidade externa, podem causar uma elevação da corrente de fuga pelo invólucro, provocando uma distribuição de tensão não uniforme interna ao longo do para-raios. Este efeito pode causar a disrupção dos centelhadores, no caso de para-raios de SiC. Em para-raios de ZnO, esse efeito pode causar um aquecimento excessivo em alguns dos elementos de ZnO que compõem o para-raios, provocando a degradação dos mesmos com aumento da componente resistiva da corrente de fuga e das perdas, e a conseqüente redução na capacidade de absorção de energia dos para-raios.

O efeito da contaminação externa do invólucro torna-se mais crítico em para-raios constituídos por mais de uma seção onde a corrente de fuga externa pelo invólucro da seção superior pode ser transferida para a parte interna da seção inferior devido a transferência galvânica através dos flanges metálicas, aumentando consideravelmente a componente resistiva da corrente e as perdas através dos elementos de ZnO. Além disso, a contaminação do invólucro gera o fenômeno de ionização interna no interior dos para-raios. Investigações de campo e laboratoriais têm mostrado que qualquer variação de tensão ao longo da porcelana, resultante de chuva, fumaça ou poluição, é capaz de gerar descargas internas que produzem alterações irreversíveis na composição interna do gás, através de reações químicas no gás de enchimento, queima de oxigênio e criação de componentes químicos. Em para-raios de SiC, o efeito acima altera ao longo do tempo as características disruptivas dos

centelhadores e a característica “tensão x corrente” dos elementos não-lineares de SiC, acarretando na falha do para-raios. No caso de para-raios de ZnO, a ausência de oxigênio e a criação de novos gases químicos gerados pelas descargas parciais são responsáveis pelo envelhecimento acelerado de todos ou alguns dos elementos de ZnO que constituem o para-raios, podendo levar a falha do para-raios ao longo dos anos. [15]

Outro ponto que deve ser considerado é a possibilidade de religamentos da subestação. Havendo uma falha do para-raios, esse representa um curto-circuito para o sistema, provocando a atuação da proteção. Quando há religamento, existe uma probabilidade de explosão do para-raios devido à passagem da corrente de curto-circuito, uma vez que o mecanismo de alívio de sobrepressão geralmente não terá função para essa segunda operação. [16]

Crítérios para a seleção e aplicação dos para-raios para subestações:

O dimensionamento adequado dos para-raios em relação às características dos sistemas para os quais esses são aplicados, propicia uma proteção adequada aos equipamentos protegidos além de uma otimização na relação entre benefício e custo para aquisição dos para-raios.

De uma maneira genérica, os seguintes passos devem ser seguidos para uma seleção e aplicação adequadas dos para-raios em subestações:

- Seleção das características de operação e de proteção dos para-raios, em função das características dos sistemas;
- Seleção ou determinação da suportabilidade da isolação;
- Avaliação da coordenação do isolamento.

Cada um dos aspectos acima requer estudos específicos. São apresentados a seguir os procedimentos básicos para a seleção e aplicação dos para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores.

A seleção de um para-raios envolve basicamente as seguintes considerações:

- Determinação da tensão nominal e da máxima tensão contínua de operação, em função da máxima tensão de operação do sistema e das possíveis sobretensões temporárias que podem vir a ocorrer e suas respectivas durações, no ponto de aplicação dos para-raios;
- Determinação da corrente de descarga nominal;
- Determinação da capacidade de absorção dos para-raios, em função das energias a serem absorvidas por esses, quando da ocorrência de sobretensões atmosféricas e de manobras;
- Características de proteção para sobretensões atmosféricas e de manobra;
- Requerimentos de alívio de sobrepressão ou de corrente suportável de falta;

- Condições de serviço (ambientais)

Em para-raios aplicados a sistemas a alta e Extra Alta tensões, além da análise das sobretensões temporárias devido a faltas no sistema, as demais causas de sobretensões temporárias devem ser analisadas. [13]

Tem sido verificado que a maioria das empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais definem, em suas especificações técnicas, a tensão nominal dos para-raios de ZnO sem centelhadores seguindo os mesmos critérios anteriormente utilizados para a seleção dos para-raios com centelhadores. Esse critério garante ao usuário que, em caso de ocorrência de uma sobretensão temporária no sistema, não irá ocorrer a ruptura dos para-raios com centelhadores evitando, desta forma, a absorção pelo para-raios de uma energia que esse não possuía condições de dissipar e que fatalmente resultaria em sua falha.

No entanto, no caso de para-raios de ZnO, fato que pode em alguns casos acarretar na escolha de para-raios com tensões nominais maiores do que o necessário.

Além de suportarem as energias provenientes das sobretensões temporárias, os para-raios instalados nos sistemas elétricos devem ser capazes de absorver as energias provenientes das sobretensões transitórias que ocorrem nos sistemas, causadas por:

- Energização ou religamento de linhas longas;
- Abertura de bancos de capacitores ou cabos, através de disjuntores que permitam o reacendimento (restrike);
- Descargas atmosféricas diretas sobre os condutores fase das linhas aéreas de transmissão ou de descargas sobre as estruturas próximas às subestações ou sobre os cabos para-raios, provocando descargas de retorno "backflashover" nas cadeias de isoladores.

3.3 Aterramento

Aterramento é a parte fundamental para o funcionamento de diversos sistemas, além do SPDA. [4]

A NBR 5419 determina uma resistência abaixo de 10Ω para o sistema, e é de suma importância a medição da resistividade do solo para o projeto de aterramento.

O estudo das possíveis interferências e a adoção de um sistema de proteção integrado pode incluir aterramento correto, blindagem eletromagnética, condutores segregados e blindados, assim como a utilização dos Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). Todas essas

possibilidades integram a solução para evitar danos aos sistemas eletrônicos e devem ser levadas em consideração. [10]

Dentro de uma subestação, além da malha de aterramento principal, recomenda-se o uso de um sistema de aterramento para os equipamentos eletrônicos sensíveis, que pode ser feito pelo sistema de terra de ponto único ou pelo sistema terra de múltiplos pontos. A escolha de qual sistema usar está ligada ao comprimento dos cabos de interconexão. Em grandes instalações, com cabos de comprimentos maiores (acima de 10 metros) e/ou sujeitos a sinais interferentes de alta frequência, o terra de múltiplos pontos é recomendado. [11]

Passos para se projetar um Sistema de Aterramento:

1. Medição da resistividade do solo em várias profundidades;
2. Fazer a estratificação do Solo em camadas;
3. Escolha do tipo de aterramento;
4. Cálculo da resistência do aterramento;
5. Construção de Sistema de Aterramento.

Quando se estuda coordenação de isolamento de uma subestação, a tensão máxima que aparece nos terminais dos equipamentos é função da natureza da solicitação, do dispositivo de proteção utilizado, das características dos equipamentos e dos comprimentos dos barramentos da subestação. Todos esses elementos são importantes para a realização desse estudo, mas as características dos dispositivos de proteção e as suas localizações merecem uma consideração especial. [6]

Os dispositivos de proteção, para efeito de coordenação de isolamento de subestações, são os para-raios e os centelhadores, que conectados em paralelo com os equipamentos permitem desviar para terra todos os surtos que excedem os níveis especificados de proteção. A localização dos para-raios também é de fundamental importância. Quando um para-raios não se encontra conectado diretamente nos terminais do equipamento a ser protegido, ocorre o efeito distância, ou seja, devido à separação entre o equipamento e os para-raios, a tensão pode sofrer uma acentuada amplificação com relação ao nível de proteção dos para-raios, por isso a localização do para-raios deve ser realizada de forma que todos os equipamentos da subestação sejam solicitados por tensões inferiores à tensão suportável nominal a impulso atmosférico, reduzida de um percentual correspondente à margem de segurança. [6]

Para a determinação dos níveis de isolamento dos equipamentos das subestações devem ser realizados estudos para a determinação dos espaçamentos elétricos mínimos e das distâncias de segurança no interior de uma subestação. Com base em ensaios em laboratório de diversas configurações de eletrodo, são obtidas informações sobre o espaçamento requerido para

suportar um determinado impulso, que devem ser utilizadas para o estabelecimento das distâncias elétricas mínimas, com o objetivo de evitar que ocorram descargas no isolamento, em tensões superiores àquelas que os equipamentos foram especificados.

3.4 Transitórios

O complexo sistema de energia elétrica é composto de usinas geradoras, subestações, linhas de transmissão, de distribuição e alimentadores para conduzir a energia até as unidades consumidoras. Conforme DUGAN et al. (1996), o termo transitório tem sido aplicado a análise das variações do sistema de energia para denotar um evento que é indesejável, mas momentâneo, em sua natureza.

Transitórios eletromagnéticos são as manifestações elétricas locais, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais do sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Os fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos, os chamados transitórios impulsivos, causados por descargas atmosféricas e os transitórios oscilatórios, causados por chaveamentos.

A Tabela 2 descreve os principais tipos de distúrbios provocados pela incidência de descargas atmosféricas, com suas causas.

Tabela 2 – Principais distúrbios.

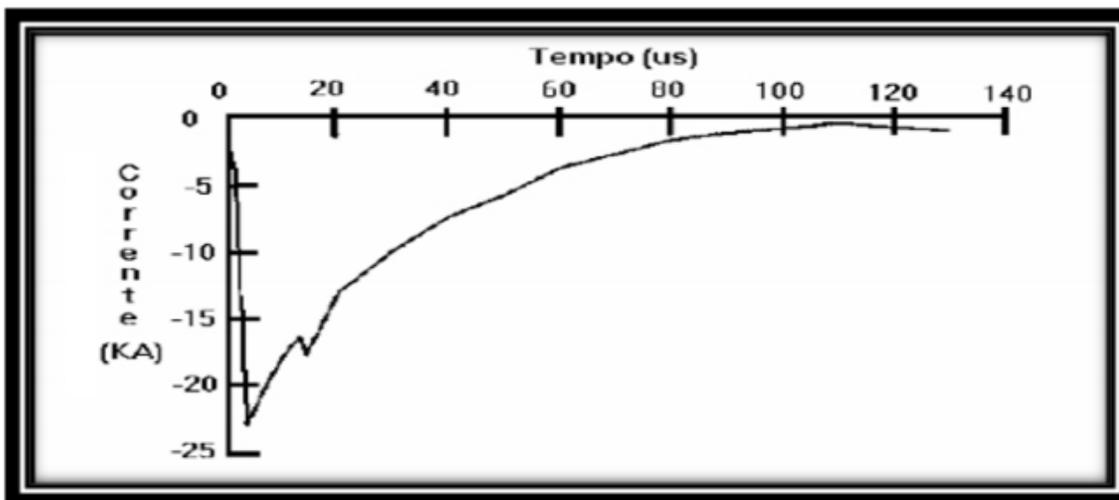
Tipo de distúrbio	Descrição	Possíveis Causas
Interrupção de energia	Total interrupção do fornecimento de energia:	Acidentes, ações da natureza
	Interrupção momentânea: de 0,5s a 3s	curto circuitos internos
	Interrupção temporária: de 3s até 1min	
	Interrupção permanente: superior a 1min	
Transitório	Alterações súbitas, breve aumento de tensão	Tempestades, fusíveis, disjuntores chaveamento de capacitores

Efeitos	Soluções
Queda do sistema	UPS
Perda da memória de controladores	Gerador de emergência
Avaria de hardware	
Avaria de produtos	
Perda de dados	Para-Raios
Queima de placas de circuitos	Transformadores de isolamento

Fonte: Mário Oleskovicz – adaptado.

Um transitório impulsivo é uma súbita alteração não desejável no sistema, que se encontra em condição de regime permanente, refletido nas formas de ondas da tensão e corrente, ou ambas, sendo unidirecional na sua polaridade (primeiramente positivo ou negativo). Normalmente é causado por descargas atmosféricas com frequências bastante diferentes daquela da rede elétrica. O gráfico da Figura 13 ilustra uma corrente típica de um transitório impulsivo, oriundo de uma descarga atmosférica. Os transitórios impulsivos são normalmente caracterizados pelos seus tempos de aumento e decaimento, os quais podem ser revelados pelo conteúdo espectral do sinal em análise.

Figura 13 - Corrente Transitória Impulsiva Oriunda de uma Descarga Atmosférica.



Fonte : Pereira.

Por se tratarem de transitórios causados por descargas atmosféricas, é de fundamental importância se observar qual o nível da tensão no ponto de ocorrência da descarga. Em se tratando de descargas em pontos de extra-alta tensão, o surto se propaga ao longo da linha em direção aos seus terminais podendo atingir os equipamentos instalados em subestações de manobra ou abaixadoras. Entretanto, a onda de tensão ao percorrer a linha, desde o ponto de

incidência até as subestações abaixadoras para a tensão de distribuição, tem o seu valor de máximo consideravelmente atenuado, e assim, consumidores ligados na baixa tensão não sentirão os efeitos advindos de descargas atmosféricas ocorridas em nível de transmissão. Contudo, os consumidores atendidos em tensão de transmissão e supostamente localizados nas proximidades do ponto de descarga, estarão sujeitos a tais efeitos, podendo ocorrer a danificação de alguns equipamentos de suas respectivas instalações.

Até o momento foram apresentados dados de referências importantes, a fim de que se possa realizar a análise metodológica para determinação de modelos de para-raios a serem escolhidos. Apresentaram-se potenciais de toque e passo baseados nas normas IEC, os quais são fatores determinantes para determinar as características fundamentais dos equipamentos de proteção contra descargas em subestações.

Potencial de toque: É aquela que o corpo humano tem contato com partes metálicas energizadas acidentalmente. O valor máximo de tensão de toque que o corpo humano suporta sem que ocorra fibrilação ventricular está expresso na Equação 4:

$$E_m = \frac{116 + 0,174\rho_s}{\sqrt{T_f}} \quad (4)$$

Potencial de Passo: Quando a pessoa se encontra na área de uma malha de terra, e através dela, flui naquele instante uma corrente de defeito, a pessoa fica submetida a uma tensão entre os dois pés. Quando a corrente elétrica proveniente de uma descarga atmosférica entra no solo através de eletrodos ou diretamente, ela se dispersa em forma de arcos centrada no local da penetração, podendo provocar uma tensão de passo.

Para redução dessa perigosa tensão de passo, são inseridas nas subestações uma camada de brita com espessura entre 10 e 20cm para melhorar o nível de isolamento. O valor máximo de tensão de passo que o corpo humano suporta sem que ocorra fibrilação ventricular está expresso na Equação 5.

$$E_{pa} = \frac{116 + 0,7\rho_s}{\sqrt{T_f}} \quad (5)$$

4. ESTUDO DE CASO EM SUBESTAÇÕES

Neste capítulo são apresentados os dados que foram utilizados para comprovação da metodologia apresentada, as fontes são referenciadas conforme o correr do texto.

4.1 Introdução

A maioria dos desligamentos acidentais nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica são provocados por Descargas Atmosféricas diretas ou indiretas. Os custos causados pelas descargas são de grandes proporções, como queima de para-raios e queima de transformadores.

A estrutura do arranjo físico da subestação, incluindo pátios, a malha de aterramento, os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, as canaletas, a casa de comando e a torre de telecomunicações devem ser levados em consideração em virtude de sofrerem os efeitos residuais desse fenômeno.

Para a determinação dos níveis de isolamento dos equipamentos das subestações devem ser realizados estudos para a determinação dos espaçamentos elétricos mínimos e das distâncias de segurança no interior de uma subestação. Com base em ensaios em laboratório de diversas configurações de eletrodo, são obtidas informações sobre o espaçamento requerido para suportar um determinado impulso, que devem ser utilizadas para o estabelecimento das distâncias elétricas mínimas, com o objetivo de evitar que ocorram descargas no isolamento, em tensões superiores àquelas que os equipamentos foram especificados.

Devido à importância relevante do assunto é realizado um estudo de caso analisando os tipos de para-raios comumente utilizados na construção de subestações em comparação com para-raios utilizados anos atrás.

4.2 Estudos de Caso

Duas subestações selecionadas para a análise deste trabalho estão localizadas no Estado do Rio Grande do Sul, denominadas de subestação A, com potência de 387kW, subestação B com potência de 366,66kW, respectivamente. A terceira subestação está localizada no Pará, subestação Vila do Conde.

Serão apresentados dados de cada subestação e apresentado o índice cerâmico da região em questão, tanto pelo mapa isocerâmico quanto pelos cálculos do índice. Seguidamente será apresentado um fluxograma para escolhas de para-raios em subestações, sendo a subestação A

o padrão ouro. Entre os modelos de para-raios definidos estão: o para-raios de carbetto de silício, de óxido de zinco polimérico com e sem espaçamento de ar e, óxido de zinco de porcelana.

Tais subestações foram escolhidas devido ao fato de estarem nos extremos do Brasil, Norte e Sul, para assim poder validar a metodologia em qualquer tipo de ambiente e clima.

4.2.1 Subestação 'A' de energia abrigada:

A instalação da subestação abrigada A foi conectada à rede de distribuição em média tensão, com a finalidade de atender uma clínica de exames e diagnósticos por imagem.

Devido às características da rede de distribuição conforme a Figura 14 e entrada de energia do consumidor, foi projetada a implantação de infraestrutura elétrica de distribuição, para atender as instalações de uma subestação de 300 kVA com transformador à seco, conforme recomendações da ABNT e do RIC-MT CEEE, 2008. [19]

Figura 14 - Rede de distribuição existente da SE 'A'.

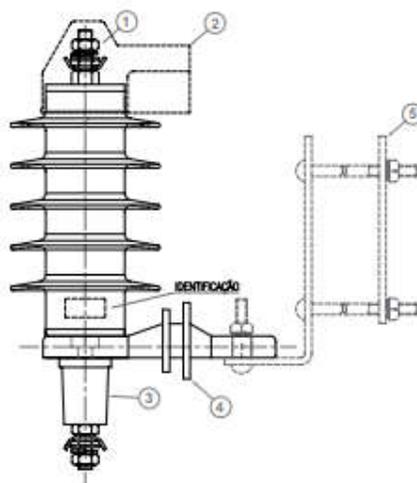


Fonte: Rambor, 2014.

A carga instalada prevista, após o levantamento junto ao proprietário e os profissionais responsáveis pelos projetos de arquitetura e engenharia, ficou determinado em 387,0 kW, com a demanda prevista fora de ponta em 242,17 kVA. Foi alimentada na rede de média tensão, com tensão secundária de 220/127 V e frequência 60 Hz. O transformador possui um peso aproximado de 850 kg, com impedância em percentual de 5%. Como forma de permitir a correção do valor de tensão no secundário, o transformador possui o *TAPE* de 13,8/13,2/12,0 kV.

Na rede de média tensão, foi instalado um poste de derivação de concreto cônico com 11 (onze) metros – 4 kN, com estrutura C2 para derivação da rede de distribuição e uma estrutura N1 na rede da concessionária. Sua proteção externa contra sobre cargas e curto-circuito, foi feita com chaves fusíveis com tensão nominal 15 kV e corrente nominal 300 A – 10,0 kA, elo fusível de 15K conforme anexo “H” do RIC-MT CEEE,2008. Contra descargas atmosféricas e sobretensões foram colocados três para-raios poliméricos do tipo PBP 12,0 kV – 10 kA, conforme Figura 15. O aterramento dos para-raios com condutor de bitola de 25,0 mm², conforme estabelecido na norma da concessionária, o aterramento teve suas hastes afastadas da base do poste a mais de um metro e resistência inferior a 10 Ohms. Os condutores de média tensão do ramal de ligação são subterrâneos, com cabos de 35,0 mm² - 12/20 kV, instalados através de tubulação e caixas de passagem até a subestação.

Figura 15 - Modelo Para-raios polimérico tipo PBP.

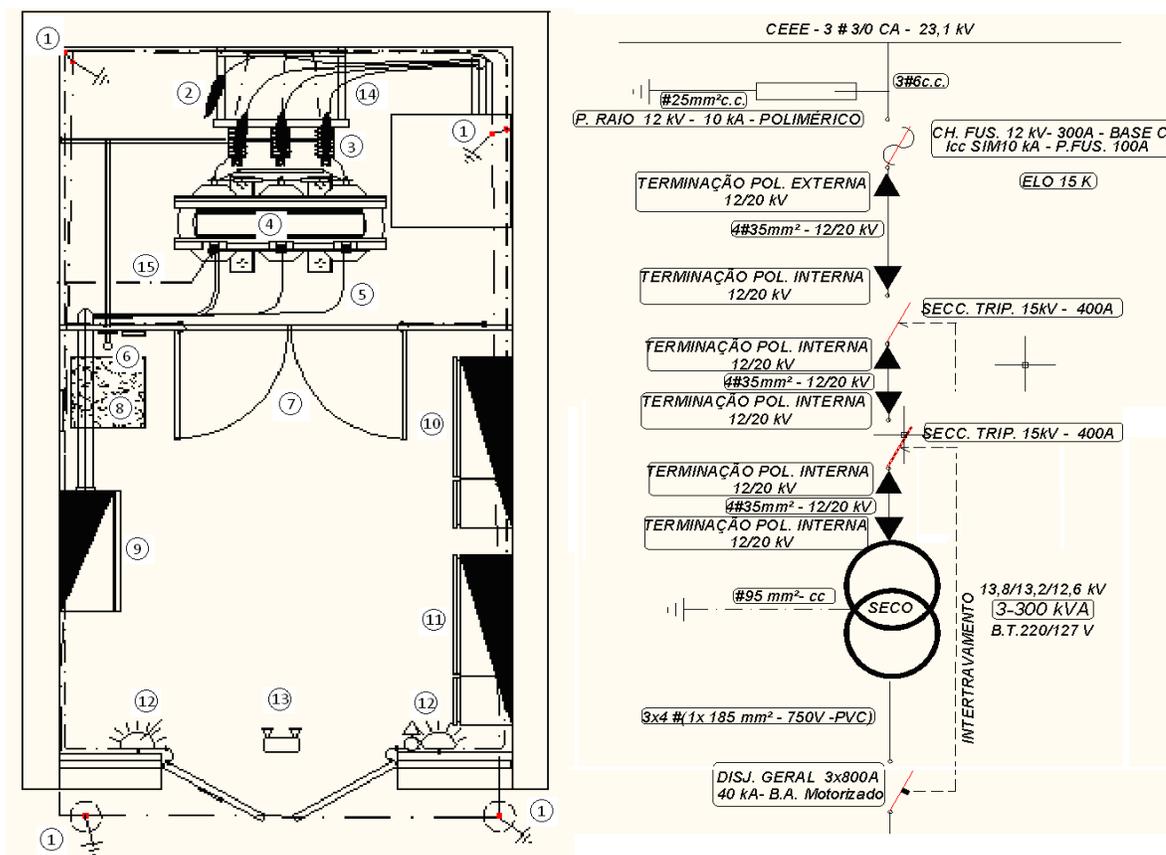


Fonte: <http://www.balestro.ind.br/wp-content/uploads/2015/05/Para-raios-Oxido-Zinco-Polim-silicone-PBP.pdf>. Acesso em 12. nov. 2017.

O sistema foi aterrado com cabo de 95,0 mm², os cabos do secundário do transformador são de 185,0 mm² por fase e neutro, com isolamento para 750 V e temperatura de 70° C. O disjuntor de proteção da baixa tensão é tripolar de 225 A e capacidade de ruptura 10 kA. O cálculo de demanda foi realizado conforme as orientações do Regulamento de Instalações Consumidoras – Baixa Tensão (RIC-BT CEEE, 2012).

Todas as estruturas metálicas, inclusive, portas, janelas e telas, foram ser aterradas, obedecendo aos padrões estabelecidos no RIC – MT CEEE, 2008 e apresentados no projeto conforme a Figura 16 dos detalhes construtivos e o diagrama elétrico unifilar.

Figura 16 - Subestação abrigada modelo RIC.



LEGENDA

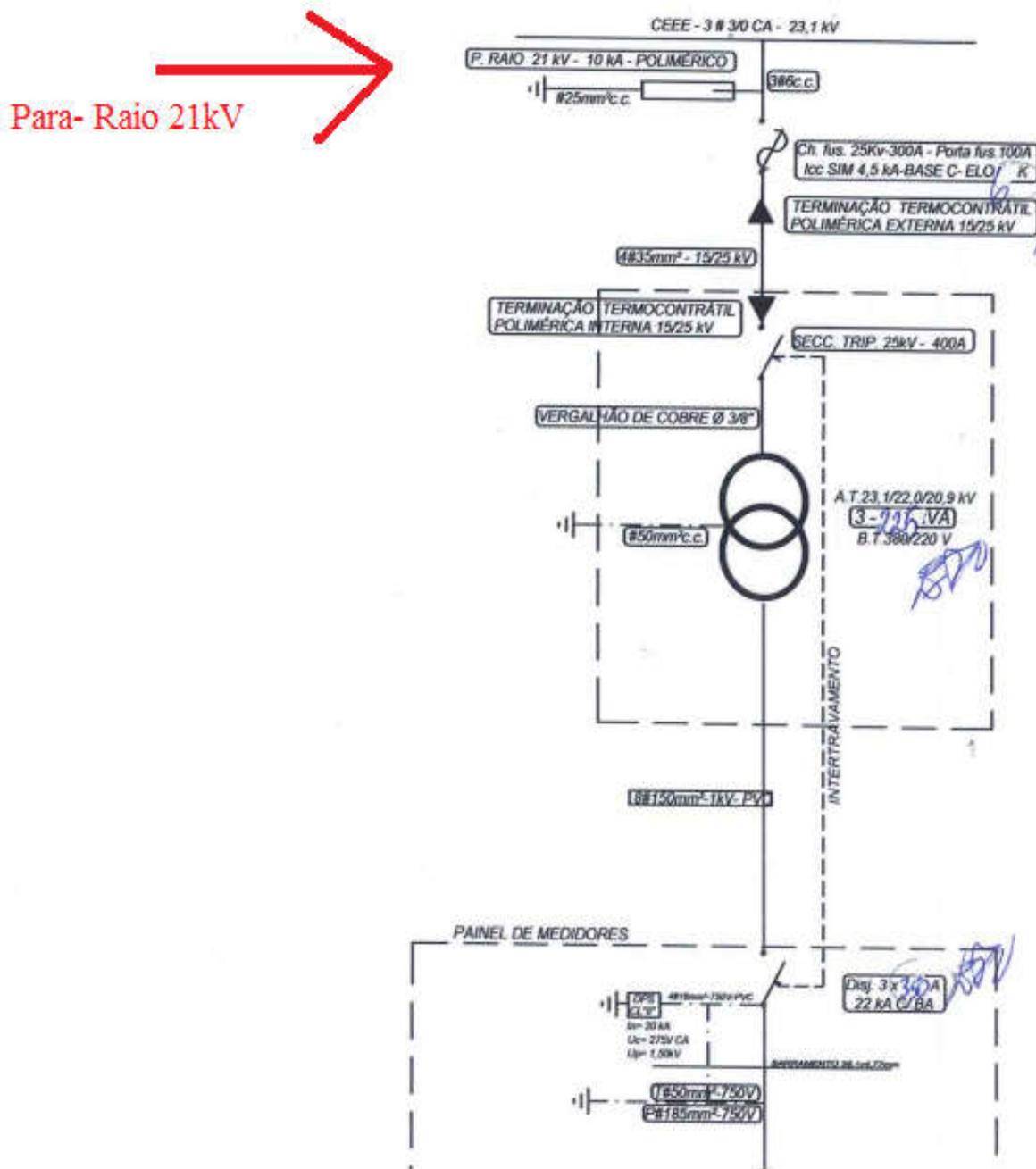
- | | |
|---|---|
| ① Haste de Aterramento 16x2400 Cobreada | ⑧ Tapete de Borracha com Isolação 15kV |
| ② Terminação Termocontrátil Polimérica interna | ⑨ CED c/ Disjuntor Tripolar 3x800A - 22kA |
| ③ Seccionadora Tripolar 15kV - 400A | ⑩ Caixa de Maedção Indireta (Horosazonal) - 3x600A - 22kA |
| ④ Transformador Trifásico a Seco, 300kVA - 13,8/12,2/12,6kV | ⑪ Caixa de Maedção Indireta (Horosazonal) - 3x200A - 22kA |
| ⑤ Cabo de Cobre Singelo - 3x4 # (185,0mm ² - 750V - PVC) | ⑫ Luminária Tipo Drops 100W |
| ⑥ Punho de Acionamento da Chave Seccionadora | ⑬ Iluminação de Emergência com Fonte Autônoma |
| ⑦ Gradil de Tela OTIS Malha 16,0mm, Arame nº 14BWG | ⑭ Cabo de Cobre Singelo - 12/20kV - 4x35,0mm ² |
| | ⑮ Cabo de Cobre Nú para Aterramento do Transformador #95mm ² |

Fonte: RIC–MT CEEE, 2008.

A subestação transformadora foi projetada em compartimento de alvenaria, aberturas metálicas e duas medições indiretas em baixa tensão junto à subestação, localizada dentro das dependências do consumidor e com a porta de acesso direcionada para a via pública, com

acesso fácil e liberado aos colaboradores da concessionária local. O compartimento possui tela de separação entre a rede de baixa e média tensão, sua ventilação tem aberturas de portas e janelas, conforme o RIC – MT CEEE, 2008.

Figura 17 – Diagrama Unifilar SE 'A'.



Fonte: Rambor, 2014 - adaptado

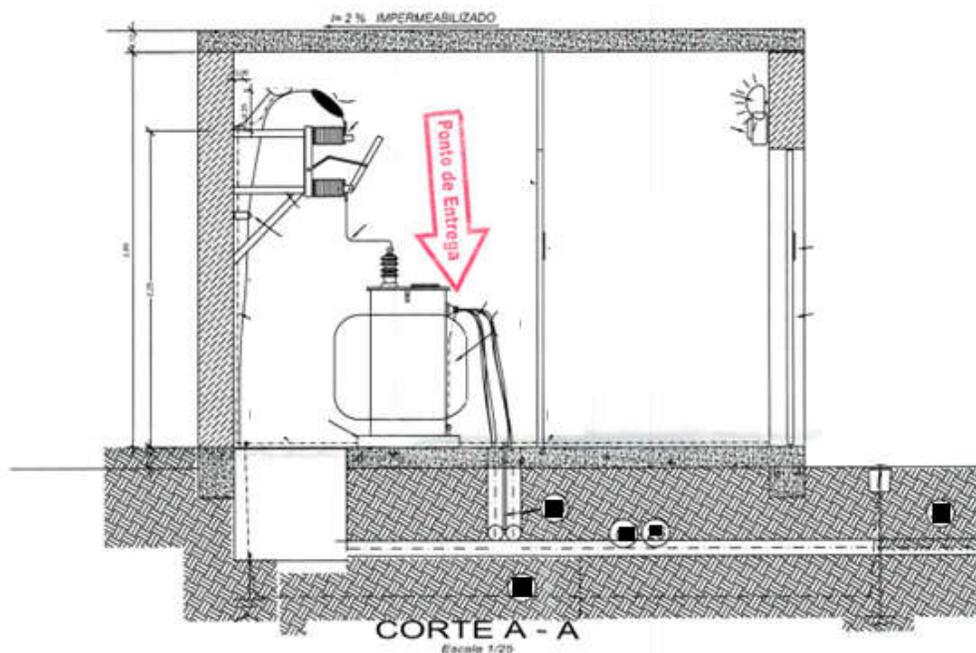
A Figura 18 apresenta o poste de derivação instalado conforme a descrição da rede de média tensão citada anteriormente e ilustrada no diagrama unifilar da Figura 17. A Figura 19 apresenta o corte da subestação, enquanto a Figura 20 mostra a planta baixa da mesma subestação.

Figura 18 - Novo poste de derivação da rede de média tensão.



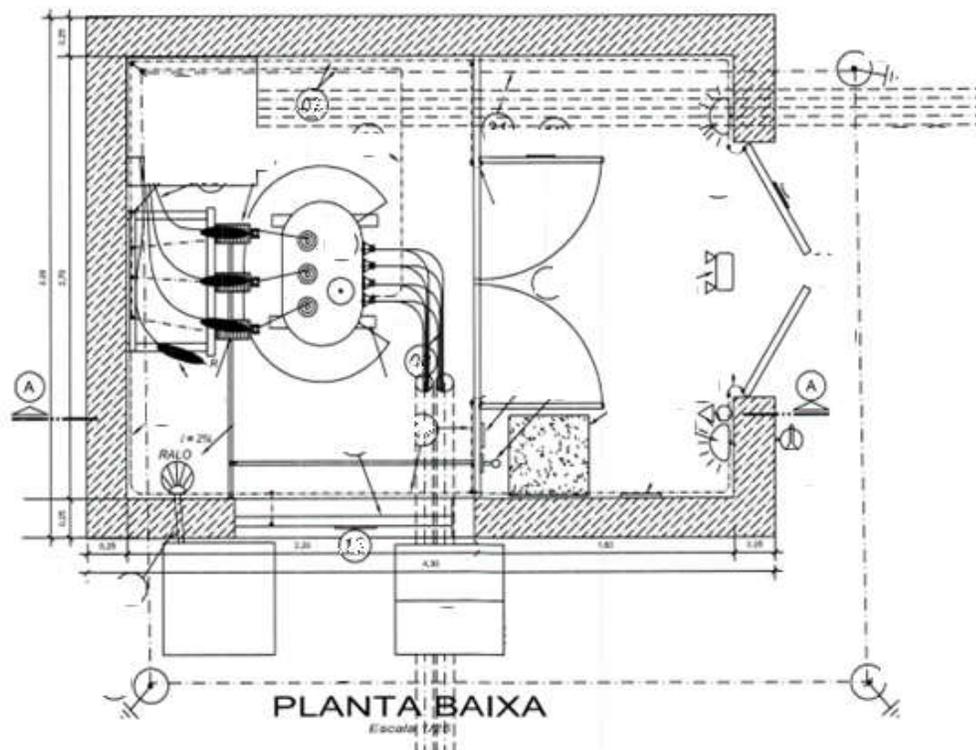
Fonte: Rambor, 2014.

Figura 19 – Corte Subestação abrigada.



Fonte: Rambor, 2014.

Figura 20 – Planta Baixa Subestação A.

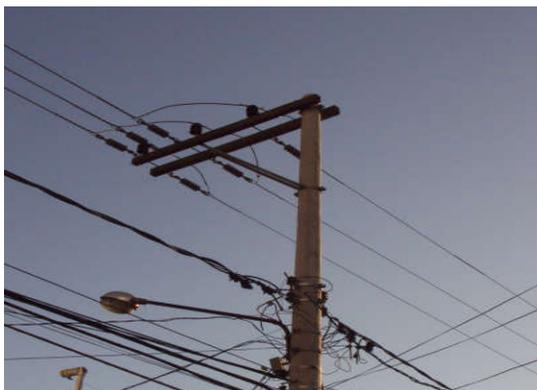


Fonte: Rambor, 2014.

4.2.2 Subestação 'B' em poste simples

Instalação de subestação de energia em poste simples, conectada a rede de distribuição em média tensão, com a finalidade de atender uma clínica de exames e diagnósticos por imagem. Devido às características da rede de distribuição, conforme a Figura 21 e entrada de energia do consumidor, foi projetada para implantação de infraestrutura elétrica de distribuição, com montagem de tomada de energia em poste de concreto, que deverá ser implantado.

Figura 21 - Rede de distribuição existente para SE 'B'.

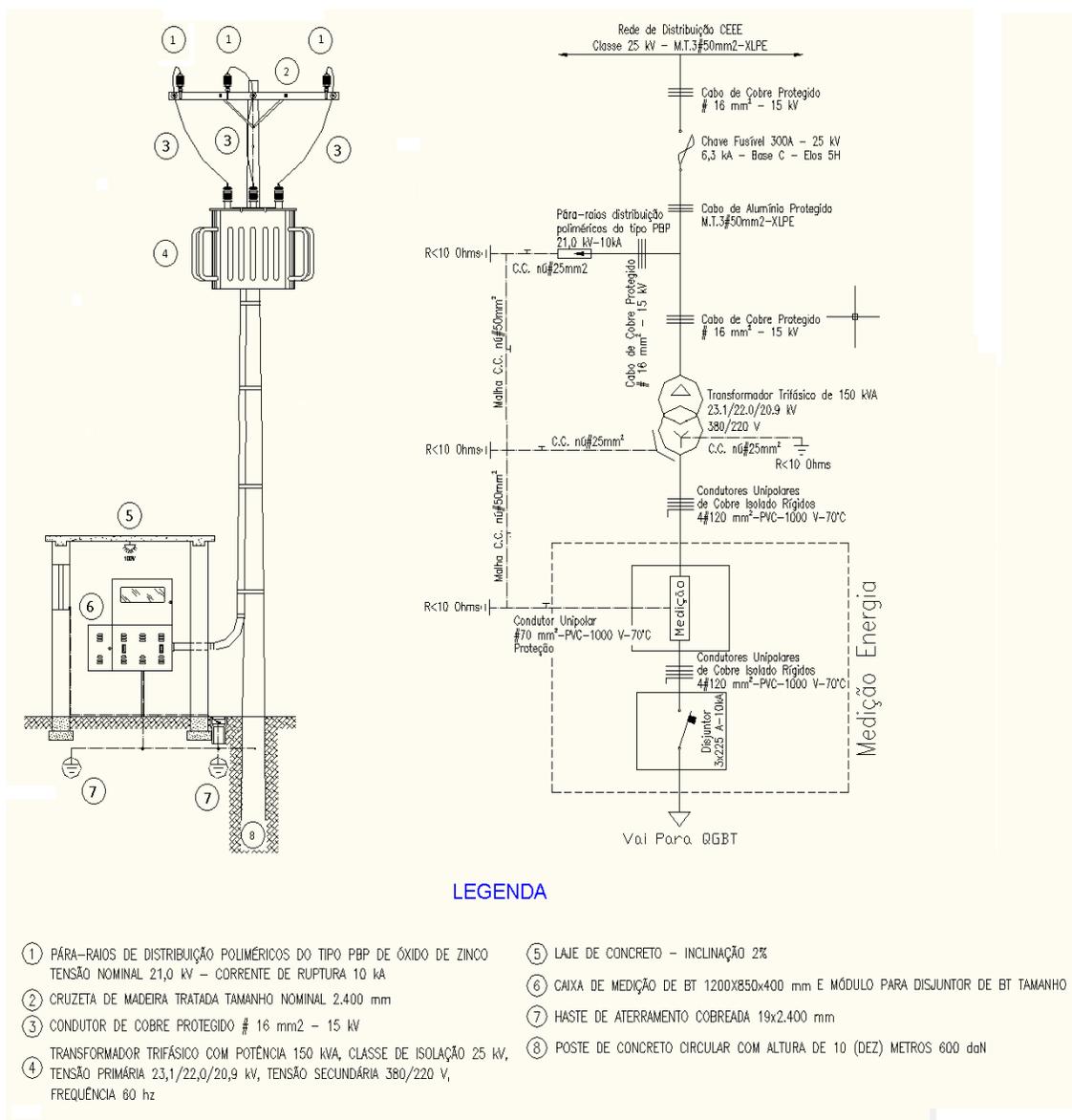


Fonte: Rambor, 2014.

A carga instalada, após o levantamento junto ao proprietário e os profissionais responsáveis pelos projetos de arquitetura e engenharia, ficou determinada em 366,66 kW, com a demanda prevista fora de ponta em 113,66 kVA. A subestação transformadora foi projetada em poste simples de concreto, medição indireta em baixa tensão no alinhamento do terreno, localizada dentro das dependências do consumidor e com a porta de acesso direcionada para a via pública, com acesso fácil e liberado aos colaboradores da concessionária local. [17]

Com capacidade de 150 kVA, trifásica classe 25 kV alimentado em rede de média tensão, com tensão secundária de 380/220 V e frequência 60 Hz. O transformador possui peso aproximado de 496 kg, com impedância em percentual de 4,35%. Como forma de permitir a correção do valor de tensão no secundário, o mesmo possui *TAPE* de 23,1/22,0/20,9 kV, conforme a Figura 22 apresenta os detalhes construtivos.

Figura 22 – Subestação 'B' em Poste Simples.



Fonte: RIC–MT CEEE, 2008.

Na rede de média tensão, foi instalado um poste de derivação de concreto cônico com 12 (doze) metros – 400 daN. Sua proteção externa contra sobre cargas e curto-circuito são chaves fusíveis com tensão nominal 25 kV e corrente nominal 300 A - 6,3 kA, o elo fusível tem corrente nominal de 5 A, do tipo “H”. Os condutores de média tensão do ramal de ligação serão aéreos, com cabos de alumínio CA 3#2 AWG.

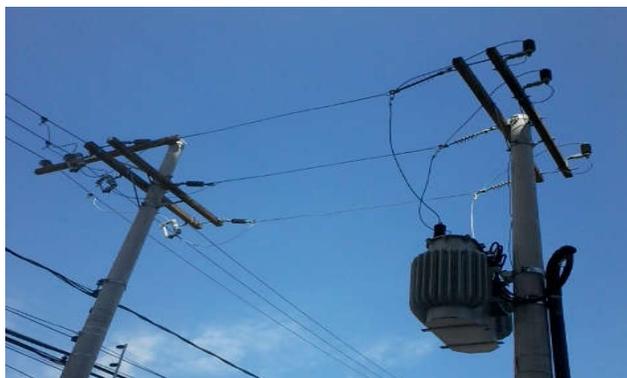
O poste da subestação é de concreto cônico com altura de dez metros – 600 daN. Sua proteção contra descargas atmosféricas e sobretensões, foi feita através de três para-raios

poliméricos do tipo PBP 21,0 kV – 10 kA. O aterramento dos para-raios tem seu condutor, com bitola de 25,0 mm², conforme estabelecido na norma da concessionária, o aterramento teve suas hastes afastadas da base do poste a mais de um metro e resistência inferior a 10 Ohms.

Foram utilizados cabos de 120,0 mm² para o ramal de entrada, com isolamento para 1000 V e temperatura de 70° C, o aterramento da medição possui a bitola de 70,0 mm². O disjuntor de proteção da baixa tensão projetado, foi um tripolar de 225 A com capacidade de ruptura de 10 kA. O cálculo de demanda foi realizado conforme as orientações do Regulamento de Instalações Consumidoras – Baixa Tensão (RIC-BT CEEE, 2012).

A Figura 23 apresenta o poste de derivação e a subestação em poste simples, instalado conforme a descrição da rede de média tensão, citada anteriormente e ilustrada na Figura 22.

Figura 23 - Conexão entre a rede de distribuição MT e a Subestação.



Fonte: Rambor, 2014.

4.2.3 Subestação 'C' Vila do Conde

Tem uma potência instalada 3.452 MVA e 230kV de tensão, implantada em uma área de 31.598 km². Localizada no Pará, município de Barcarena, conforme Figura 24.

Figura 24 – Localização Subestação Vila do Conde.



Fonte: Pereira.

A subestação Eletronorte de Vila do Conde tem como área de atuação o norte e nordeste do estado do Pará e apresenta conforme as Figuras 25,26 e 27, os seguintes equipamentos instalados:

Figura 25 – Linhas de Transmissão Instaladas.

LINHAS DE TRANSMISSÃO
▪ LT Vila do Conde/Tucuruí I 500kV (334 km) – ELN
▪ LT Vila do Conde/Tucuruí II 500kV (331 km) – TBE
▪ LT Vila do Conde/Tucuruí III 500kV (324 km) – ELEC NOR
▪ LT Vila do Conde/Guamá I 230kV (50 km) – ELN
▪ LT Vila do Conde/Guamá II 230kV (50 km) – ELN
▪ LT Vila do Conde/Castanhal 230kV (128 km) – TBE
▪ LT Vila do Conde/Paragominas 230kV (235 km) – HIDRO
▪ LT Vila do Conde/Albras I 230kV (1,5 km) – HIDRO
▪ LT Vila do Conde/Albras II 230kV (1,5km) – HIDRO

Fonte: Pereira.??????

Figura 26 – Sistemas de Transformação.

SISTEMAS DE TRANSFORMAÇÃO	
▪	Banco de Transformadores I 500/230/13,8kV – 750MVA
▪	Banco de Transformadores II 500/230/13,8kV – 750MVA
▪	Banco de Transformadores III 500/230/13,8kV – 750MVA
▪	Banco de Transformadores IV 500/230/13,8kV – 750MVA
▪	Transformador Trifásico I de 230/13,8 kV – 160 MVA
▪	Transformador Trifásico II 230/13,8 kV – 160 MVA
▪	Transformador Trifásico III 230/69/13,8kV – 33 MVA
▪	Transformador Trifásico IV 230/69/13,8kV – 33 MVA
▪	Transformador Trifásico V 230/69/13,8kV – 33 MVA
▪	Transformador Trifásico VI 230/69/13,8kV – 33 MVA

Fonte: Pereira.

Figura 27 – Sistemas Ancilares.

SISTEMAS ANCILARES	
▪	Banco de Capacitores I 230kV – 111 MVar
▪	Banco de Capacitores II 230kV – 111 MVar
▪	Banco de Capacitores III 230kV – 111 MVar
▪	Banco de Capacitores IV 230kV – 111 MVar
▪	Compensador Síncrono I 13,8 kV – 150 MVar
▪	Compensador Síncrono II 13,8 kV – 150 MVar
▪	Banco de Reatores I 500kV – 60 MVar
▪	Banco de Reatores II 500kV – 60 MVar – TBE
▪	Banco de Reatores III 500kV – 66.85 MVar – ELEC NOR
▪	Banco de Reatores IV 500kV – MVar

Fonte – Pereira.

O sistema de transmissão Eletronorte da SE Vila do Conde conta ainda com:

*Disjuntores: 11 unidades de 500kV e 33 unidades de 230kV;

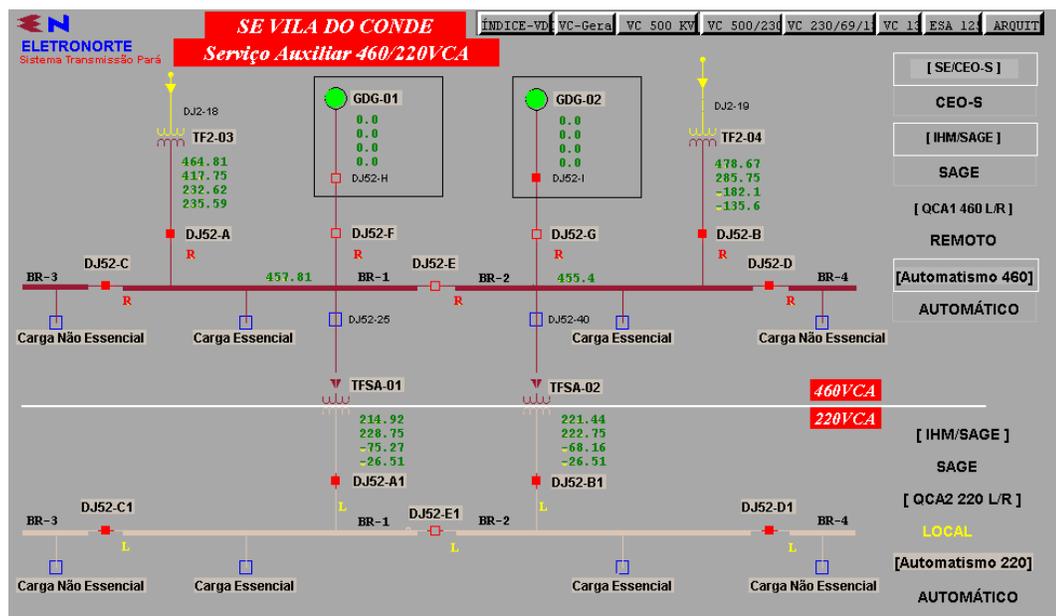
*Seccionadoras isoladoras: 31 unidades de 500kV e 86 unidades de 230kV;

*Seccionadoras de aterramento: 06 unidades de 500kV e 16 unidades de 230kV;

*Transformadores de corrente: 48 unidades de 500kV, 123 unidades de 230kV e 12 unidades de 69kV;

*Para-raios: 27 unidades de 500kV, 60 unidades de 230kV e 24 unidades de 69kV.

Figura 28 – Diagrama Unifilar Elétrico Vila do Conde.



Fonte – Universidade Federal do Pará.

O sistema de proteção e controle da SE Vila do Conde conta atualmente com uma arquitetura bem definida e eficaz, onde toda a sua estrutura utiliza relés digitais de diversos fabricantes, tais como: Siemens, ABB, Areva, Sainco e Sel. Faz uso de uma rede de comunicação desenvolvida para o sistema de oscilografia que é constituído por unidades da Reason e Ecil, a qual é responsável pelos registros de informações concernentes a identificação e estudo de variações sofridas pelo sistema.

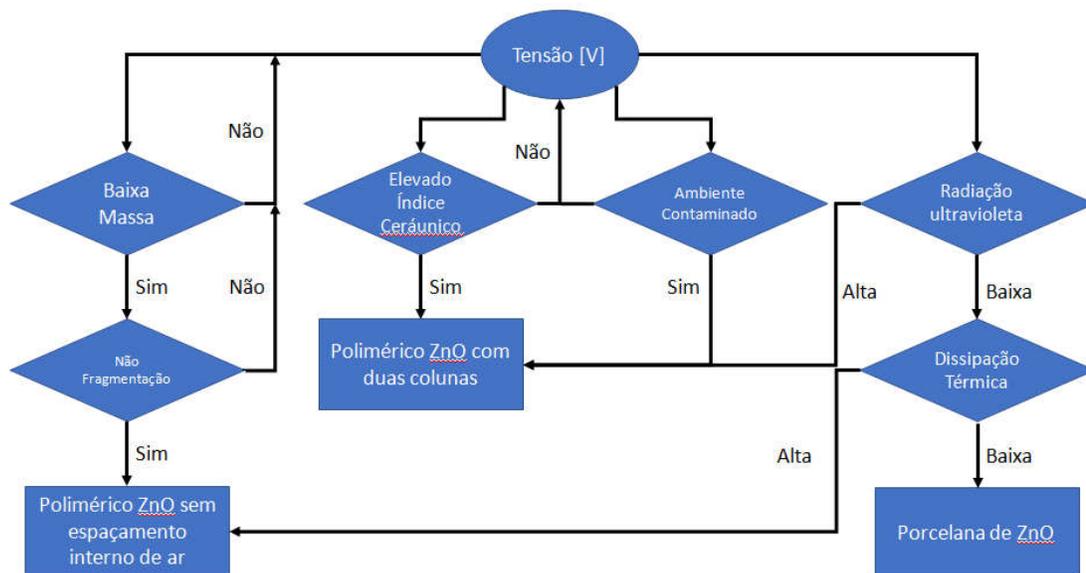
A proteção de linha é ajustada para atuar como proteção de retaguarda para equipamentos/linhas ligados a terminais remotos. As proteções digitais estão instaladas em painéis localizados na casa de relés, juntamente com as unidades de controle. Os oscilógrafos digitais possuem recursos para registro de dados pré e pós falta e que podem ser coletados via rede e central de oscilografia. [18]

4.3 Metodologia para escolha de Para-Raios

O dimensionamento adequado dos para-raios em relação às características dos sistemas para os quais esses são aplicados, propicia uma proteção adequada aos equipamentos protegidos além de uma otimização na relação entre benefício e custo para aquisição dos para-

raios. De uma maneira genérica, os seguintes passos, Figura 29, devem ser seguidos para uma seleção e aplicação adequadas dos para-raios em subestações:

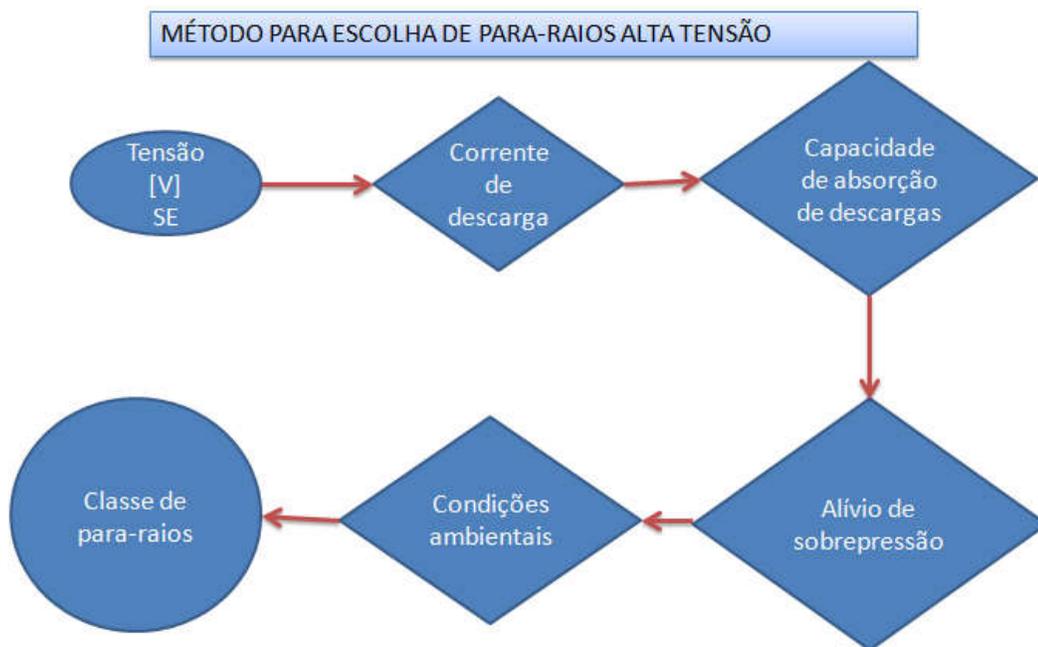
Figura 29 – Fluxograma para escolha de para-raios.



Fonte: Do autor.

A seleção de um para-raios envolve basicamente as seguintes considerações, conforme Figura 30.

Figura 30 – Passos para escolha de Para-Raios de Altas Tensões.



Fonte: Do autor.

Em para-raios aplicados a sistemas a Alta e Extra Alta tensões, além da análise das sobretensões temporárias devido a faltas no sistema, as demais causas de sobretensões temporárias devem ser analisadas. Tem sido verificado que a maioria das empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais definem, em suas especificações técnicas, a tensão nominal dos para-raios de ZnO sem centelhadores seguindo os mesmos critérios anteriormente utilizados para a seleção dos para-raios com centelhadores. Esse critério garante ao usuário que, em caso de ocorrência de uma sobretensão temporária no sistema, não irá ocorrer a ruptura dos para-raios com centelhadores evitando, desta forma, a absorção pelo para-raios de uma energia que esse não possuía condições de dissipar e que fatalmente resultaria em sua falha.

No entanto, no caso de para-raios de ZnO, fato que pode em alguns casos acarretar na escolha de para-raios com tensões nominais maiores do que o necessário. Por exemplo

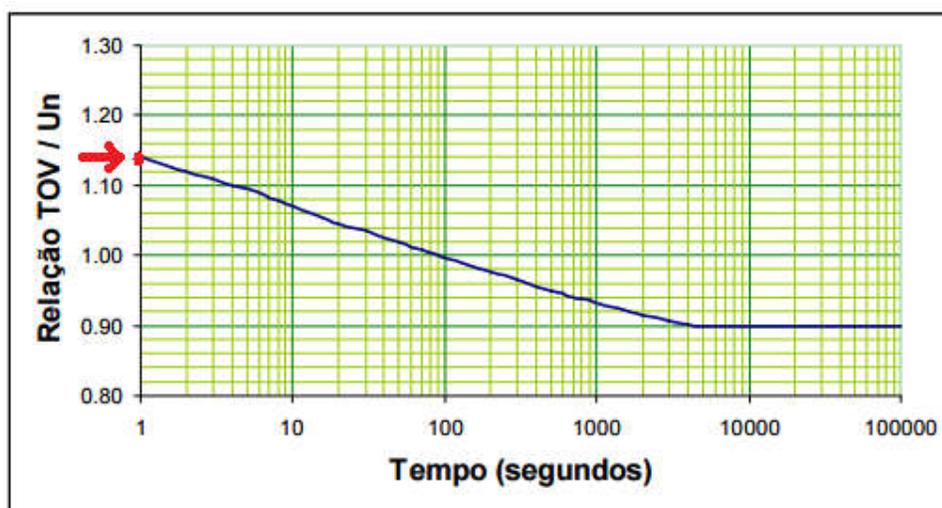
- Tensão nominal U_n : 138 kVef;
- Máxima tensão operativa do sistema U_{max} : 145 kVef ;
- Máxima sobretensão temporária 125 kV;
- Duração considerada para a falta: 1 segundo.

Para-raios sem centelhadores: $MCOVPR \geq 145 / \sqrt{3} \Rightarrow MCOVPR \geq 84$ kVef

Será considerada uma margem de segurança de 5% para compensar possíveis efeitos de distribuição não uniforme de tensão ao longo do para-raios, e que poderia provocar a sua degradação. Desta forma a MCOV do para-raios deve ser superior a 88 kV. A princípio será escolhido um para-raios com tensão nominal de 120 kV, o qual apresenta uma MCOV de 96 kV.

O próximo passo consiste em verificar se as características de suportabilidade do para-raios para sobretensões temporárias atendem a sobretensão verificada no sistema. Uma curva típica apresentando a característica “tensão de frequência fundamental versus tempo” para um para-raios classe estação é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Característica tensão x tempo.



Fonte – Coleon –adaptado.

- Definição da corrente de descarga nominal dos para-raios:

No caso de subestações conectadas a linhas blindadas a amplitude da corrente de descarga do para-raios pode ser estimada pela Equação 4:

$$I_{m\acute{a}x} = I_c = \frac{2,4 * U_{CFO} - V_r}{Z_0} \quad (4)$$

$I_{m\acute{a}x}$ Corrente de descarga que flui pelo para-raios, em ampères.

I_c Corrente de coordenação do para-raios

U_{CFO} Tensão disruptiva crítica de polaridade negativa da linha, em volts.

V_r Tensão residual do para-raios para impulso atmosférico (para o valor estimado da corrente de coordenação), em volts.

Z_0 Impedância de surto monofásica da linha, em ohms.

Quando a blindagem não abrange toda a extensão da linha, torna-se provável uma maior corrente de descarga nos para-raios. Neste caso deve-se considerar:

- (1) A densidade de descargas para terra da região;
- (2) A probabilidade de descargas na linha que excedem um valor determinado;
- (3) O percentual da corrente de descarga total.

- Determinação da capacidade de absorção de energia dos para-raios:

Para uma especificação adequada dos para-raios, ou em casos de sistemas mais críticos, estudos específicos envolvendo simulações computacionais devem ser realizados, de modo a se obter as máximas energias a serem absorvidas pelos para-raios. A partir desses estudos, é definida a capacidade mínima de absorção de energia dos para-raios, que deve ser maior do que as energias máximas obtidas nos estudos. No caso de para-raios aplicados a sistemas de Extra Alta Tensões deve-se avaliar principalmente as energias absorvidas devido aos surtos de manobra.

- Requerimentos de suportabilidade a correntes de falta:

De modo a evitar riscos às pessoas e aos demais equipamentos instalados nas suas proximidades, os para-raios devem ser projetados para suportar mecanicamente os efeitos das correntes de curto-circuito. No caso de para-raios com invólucro de porcelana ou poliméricos que apresentem o dispositivo de alívio de sobrepressão esse dispositivo deve atuar, de modo a evitar a fragmentação ou explosão do invólucro. No caso de para-raios poliméricos sem espaçamentos internos de ar, esses devem suportar mecanicamente os esforços da corrente de curto-circuito sem liberação ou desprendimento de sua parte ativa. No caso de falha do para-raios flui através desse uma corrente correspondente a corrente de curto-circuito do sistema, que pode ser determinada pela Equação 5.

$$I_{falta} = \frac{P_{cc}(MVA)}{\sqrt{3}V_n} \quad (5)$$

I_{falta} Corrente de curto-circuito do sistema

P_{cc} Potência de curto-circuito do sistema

V_n Tensão nominal do sistema (kV).

- Condições de serviço (ambientais):

Os níveis de poluição, aplicados a invólucros de porcelana, são definidos pela norma técnica IEC 60.815, abrangendo quatro níveis:

- Nível de poluição leve: distância de escoamento de 16 mm / kVfase-fase
- Nível de poluição moderado: distância de escoamento de 20 mm / kVfase-fase
- Nível de poluição alto: distância de escoamento de 25 mm / kVfase-fase
- Nível de poluição muito alto: distância de escoamento de 31 mm / kVfase-fase

Para-raios com invólucros poliméricos apresentam valores de distância de escoamento normalmente superiores a 25 mm / kVfase-fase.

Potencial de passo:

A diferença de potencial experimentada entre os pés de uma pessoa é definida como potencial de passo. [16] A Norma IEC [8] coloca que a vizinhança dos condutores de descida de um SPDA é favorável para o desenvolvimento de potenciais de passo, mesmo que o SPDA tenha sido projetado conforme Norma. Conforme [8] o perigo é reduzido se:

- A probabilidade da presença de pessoas nas imediações dos condutores de descida é muito baixa;

Se nenhuma destas condições forem satisfeitas medidas de proteção devem ser implantadas seguindo as diretivas abaixo:

- Equipotencialização através de um sistema de aterramento em malha;
- Restrição física de acesso e/ou instalação de avisos de perigo para minimizar a probabilidade de acesso de pessoas no entorno de 3 metros dos condutores de descida.

Potencial de toque:

Uma pessoa em contato com uma peça com potencial distinto do ponto onde seus pés se apoiam pode estar sujeita a uma tensão que irá gerar a circulação de corrente em seu corpo. Esta tensão é denominada potencial de toque. [22] A Norma IEC [8] alerta que os condutores de descida de um SPDA são pontos favoráveis para o desenvolvimento de potenciais de toque. Conforme [8] o perigo é reduzido se:

- A probabilidade da presença de pessoas nas imediações dos condutores de descida é muito baixa.
- Subsistema de descida é do tipo natural, composto por diversos pilares com continuidade elétrica assegurada.

Se nenhuma destas condições forem satisfeitas medidas de proteção devem ser implantadas seguindo as diretivas abaixo:

- Isolação dos condutores de descida expostos para impulsos de 100 kV em rampa 1,2/50 μ s;

- Restrição física e/ou instalação de avisos de perigo para evitar que os condutores de descida sejam tocados.

->

4.4 Software PSCAD

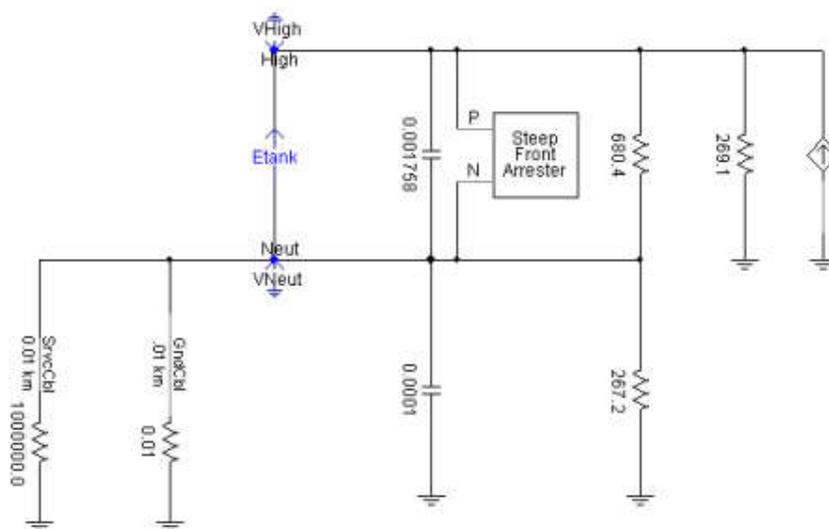
Neste trabalho foi utilizado o software PSCAD como ferramenta para fazer as simulações da atuação do para raios. A ELECTROMAG é a representante oficial e exclusiva do PSCAD no Brasil. O PSCAD é um software de simulação desenvolvido pela Manitoba-HVDC, dedicado ao projeto e à análise de sistemas de potência.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

O sistema a ser modelado é um transformador acoplado a uma linha trifásica. 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 6.

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

O circuito abaixo demonstrado foi montado a partir dos dados presentes no software PSCAD, conforme a Figura 32.

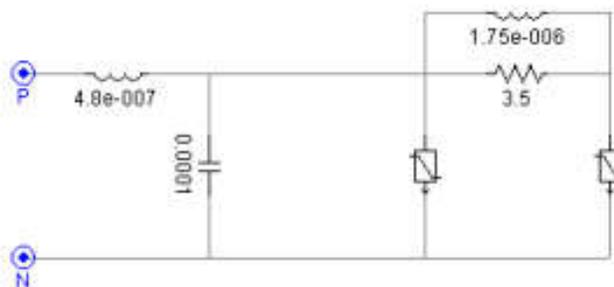
Figura 32 - Circuito Utilizado na simulação.



Fonte: Do autor.

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 32 podemos observar uma caixa que representa o para-raios indicada pelo nome “*Steep Front Arrester*”. Na Figura 33 pode-se visualizar o circuito que modelou o para-raios.

Figura 33 - Circuito Utilizado de modelo do Para-Raio.



Fonte: Do autor.

A partir da metodologia mencionada neste capítulo é possível analisar cada subestação, sendo a SE 'A' o padrão ouro, ou seja, padrão para as outras análises. No capítulo 5 será apresentado graficamente o resultado da importância de utilizar equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas, com foco no para-raios em um transformador.

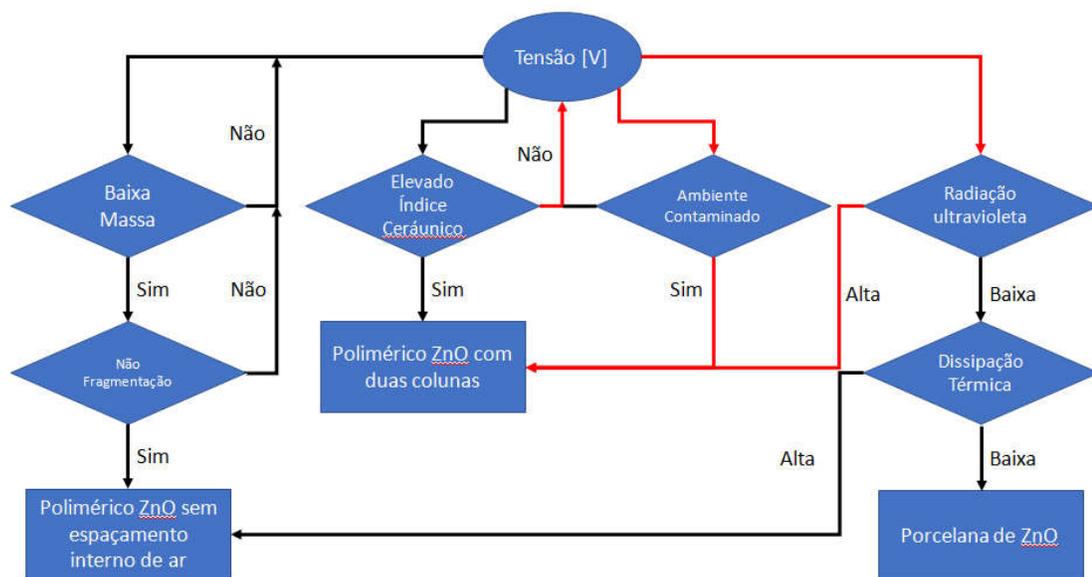
5. RESULTADOS

5.1 Subestação 'A' de energia abrigada

Em Porto Alegre, onde foi feito o estudo de caso, possui $T_d = 20$ dias de tempestades por ano, ou seja, um índice $N_g = 1,69$. Pelos dados de 27/novembro/2017 às 15h07min do INPE, obtêm-se um valor de 2,19 raios /km² ano. No entanto pelo mapa isoceráunico o valor sobe para 20 raios/ano. Levando em consideração a localização da subestação ser em uma capital com elevados índices de poluição, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) os valores ultrapassam em até oito vezes o limite que é recomendado pela Organização Mundial da Saúde.

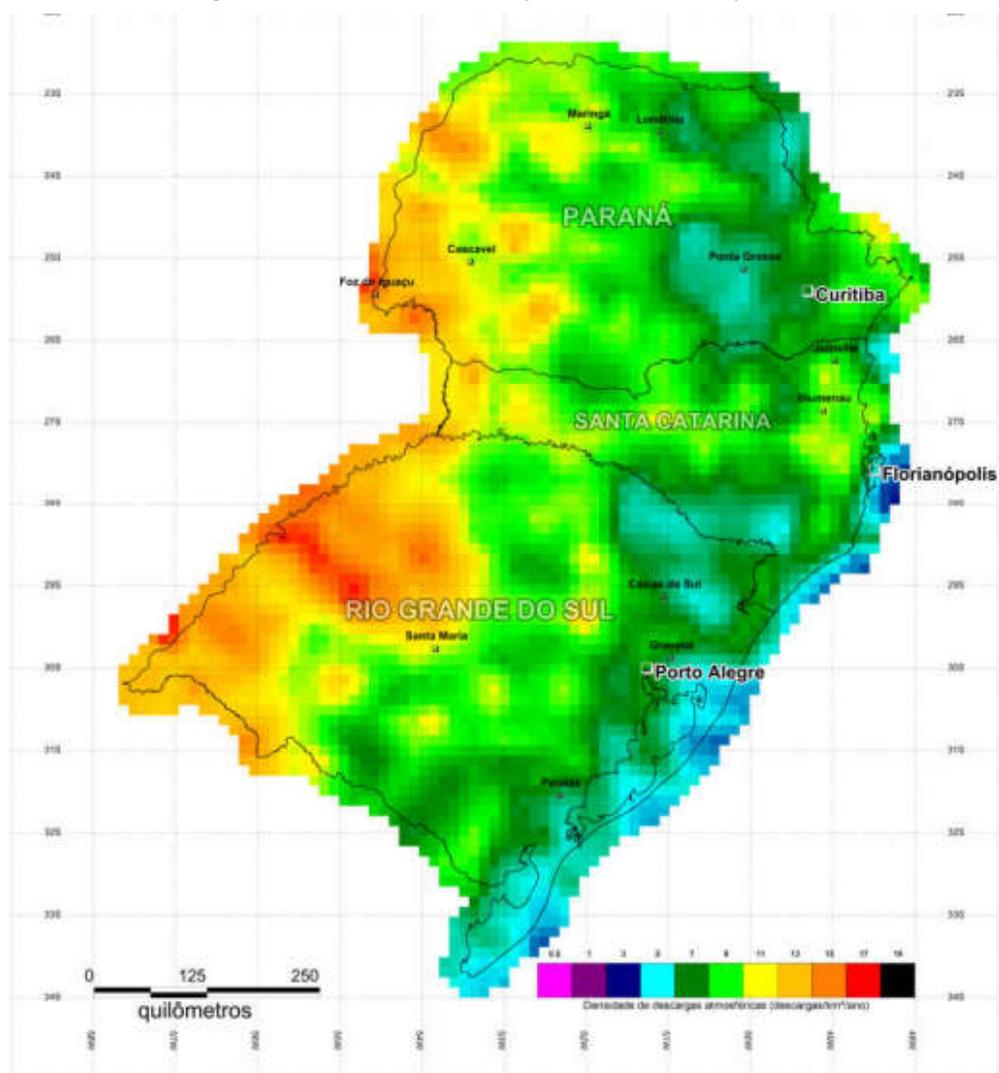
Com esses dados seguiu-se o fluxograma da Figura 29, obtendo como resultado a Figura 34.

Figura 34 - Fluxograma para escolha de Para-Raio.



Fonte:Do autor.

Figura 35 – Densidade de descargas atmosféricas – região Sul.



Fonte: NBR5419-2:2015

Conforme o fluxograma foi sendo atualizado foi possível observar que o padrão ouro é compatível com a metodologia implementada, obtendo com isso o para-raio polimérico de óxido de zinco, conforme foi utilizado no projeto oficial. Também se baseou na Figura 34, que apresenta a densidade de descargas atmosféricas, as quais são relevantes para o uso da metodologia.

Como se trata de uma subestação de média tensão, com linhas sem blindagem, foi levado em consideração o índice cerâmico da região. Linhas sem qualquer blindagem são geralmente limitadas a linhas com tensões nominais mais baixas (69 kV e abaixo), e/ou linhas localizadas em áreas de baixa densidade de descargas atmosféricas para a terra.

A probabilidade dos para-raios instalados em subestações de baixa tensão estarem sujeitos a altas correntes e taxas de crescimento pode ser elevada em áreas da alta densidade de

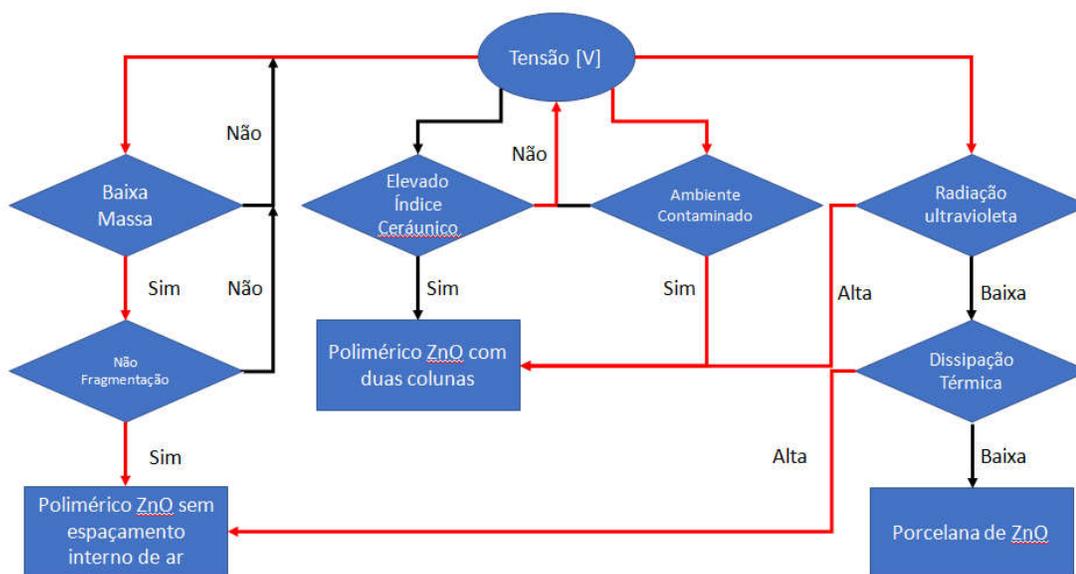
descarga atmosférica para a terra. Nestes casos, a corrente de coordenação não deve ser inferior a 20.000 A. Para linhas localizadas em áreas de baixa densidade de descarga atmosférica para terra, as correntes de coordenação podem ser similares àquelas para linhas completamente blindadas em áreas de alta densidade de descargas para terra.

A experiência prática tem demonstrado que para-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA têm sido frequentemente utilizados pelas empresas concessionárias de energia em sistemas com tensão operativa até 362 kV. Acima desse nível de tensão, tem-se utilizado somente para-raios de 20 kA.

5.2 Subestação 'B' em poste simples

A Figura 36 apresenta o caminho para a escolha do para-raio da subestação da clínica médica.

Figura 36 - Fluxograma para escolha de Para-Raio.



Fonte: Do autor.

Além dos dados da subestação A se fazerem presentes aqui, devido a estarem na mesma região de Porto Alegre, observou-se uma alta dissipação térmica do para-raio no ambiente médico. Assim, obteve-se a possibilidade de poder escolher entre para-raios poliméricos de ZnO com duas colunas ou apenas uma coluna sem espaçamento interno de ar.

De um modo geral, as empresas concessionárias de energia vêm adotando no Brasil para-raios classe 2 ou 3 de descarga de linhas de transmissão (DLT) para sistemas com máxima

tensão operativa até 145 kV; para-raios classe 3 para sistemas de 145 kV a 242 kV; para-raios classes 3 ou 4 para sistemas de 362 kV e para-raios classe 5 para sistemas com tensões operativas acima de 460 kV. Para a subestação A e B utilizou-se para-raios de classe 3.

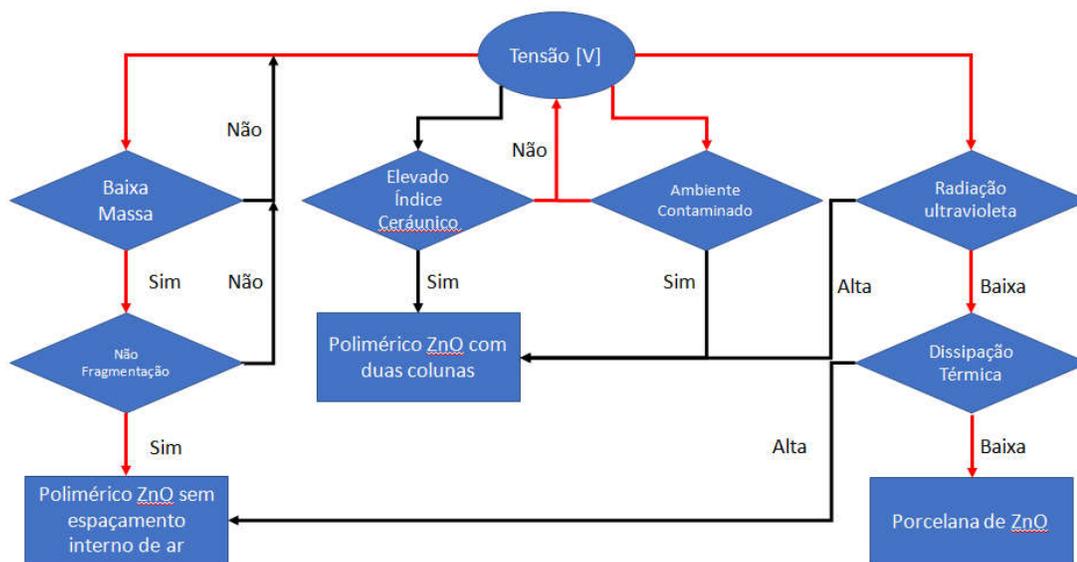
Por exemplo, para a classe 3, segundo a IEC, existe uma faixa de variação na capacidade de absorção de energia para os para-raios de 4,2 a 8,0 kJ / kV nominal. De uma forma geral, a experiência de campo tem demonstrado que para-raios com capacidade de absorção de energia mínima de 3,5 kJ / kV nominal são adequados para a maioria dos sistemas com tensões nominais até 138 kV, mesmo considerando a presença de bancos de capacitores. Para sistemas com tensões nominais de 230 kV, para-raios com uma capacidade de absorção de energia mínima de 7,0 kJ / kV nominal atendem à maioria dos sistemas.

No caso da incidência de descargas atmosféricas verifica-se um aumento da energia absorvida pelos para-raios com o aumento da tensão residual. Descargas atmosféricas incidindo ao longo de uma linha de transmissão em um ponto distante da subestação conectada a linha, não são significativas para a definição da capacidade de absorção de energia dos para-raios instalados nas subestações.

5.3 Subestação Vila do Conde

Como não há dados sobre os modelos de para-raios utilizados nesta subestação, o resultado do fluxograma sugere o uso de para-raios de modelo polimérico, segundo mostra a Figura 37.

Figura 37 - Fluxograma para escolha de para-raio.



interpolações para descrever o comportamento em outros pontos de atuação, conforme Figura 39.

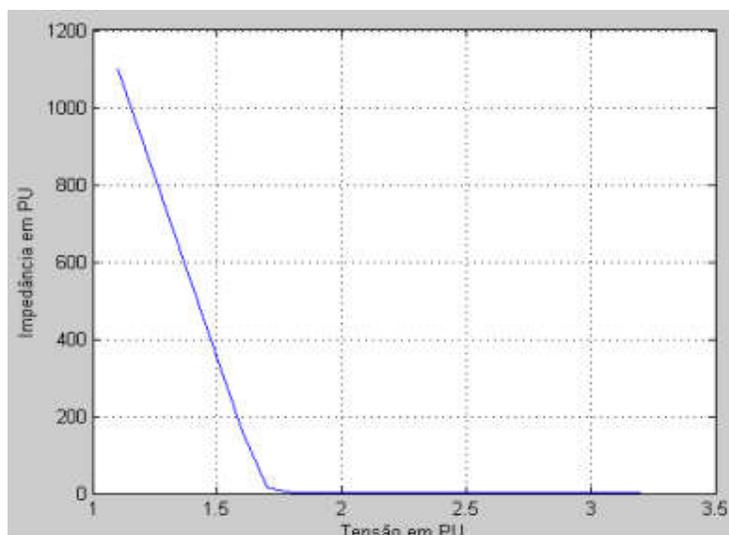
Figura 39 - Janela de entradas dos pontos usados para modelar o para-raios.

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

Fonte: PSCAD.

A resistência do para-raios se comporta inversamente a tensão de acordo com o que se observa na Figura 40, que é o gráfico da variação da impedância em relação ao nível de tensão aplicado sobre seus terminais.

Figura 40 - Impedância x Tensão nos terminais.

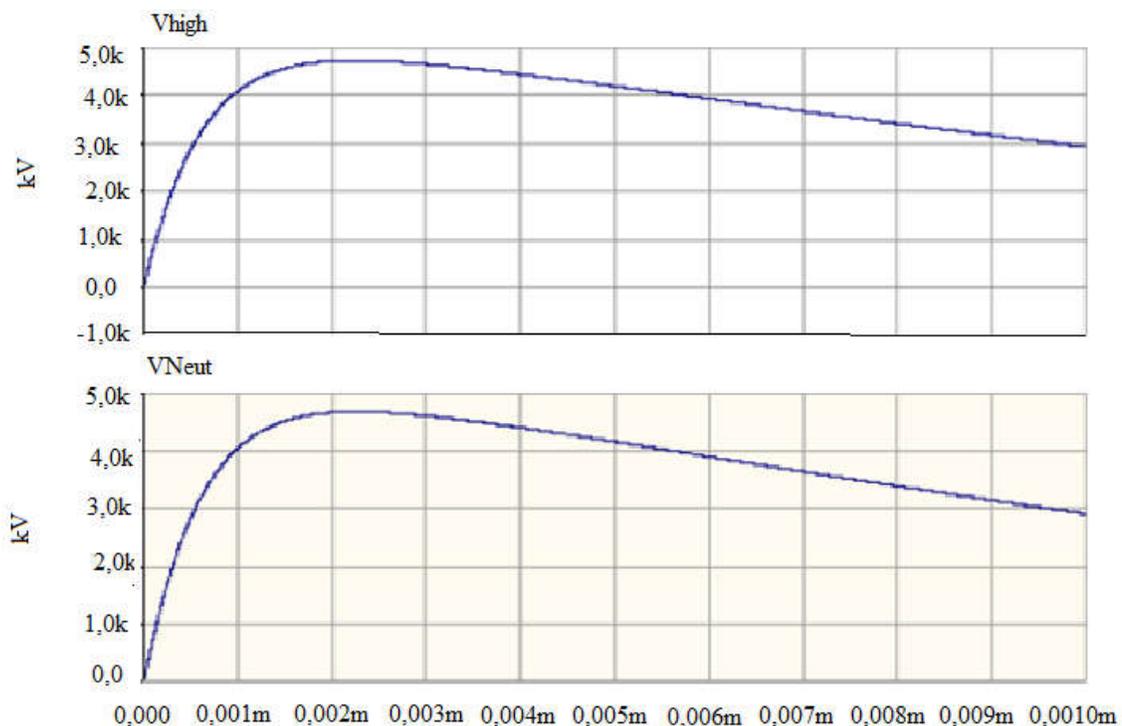


Fonte:Do autor

A impedância cai conforme o nível de tensão sobe. Pode-se facilmente visualizar graficamente, na Figura 40, pois conforme o nível de tensão sobe o resistor permite mais passagem de corrente.

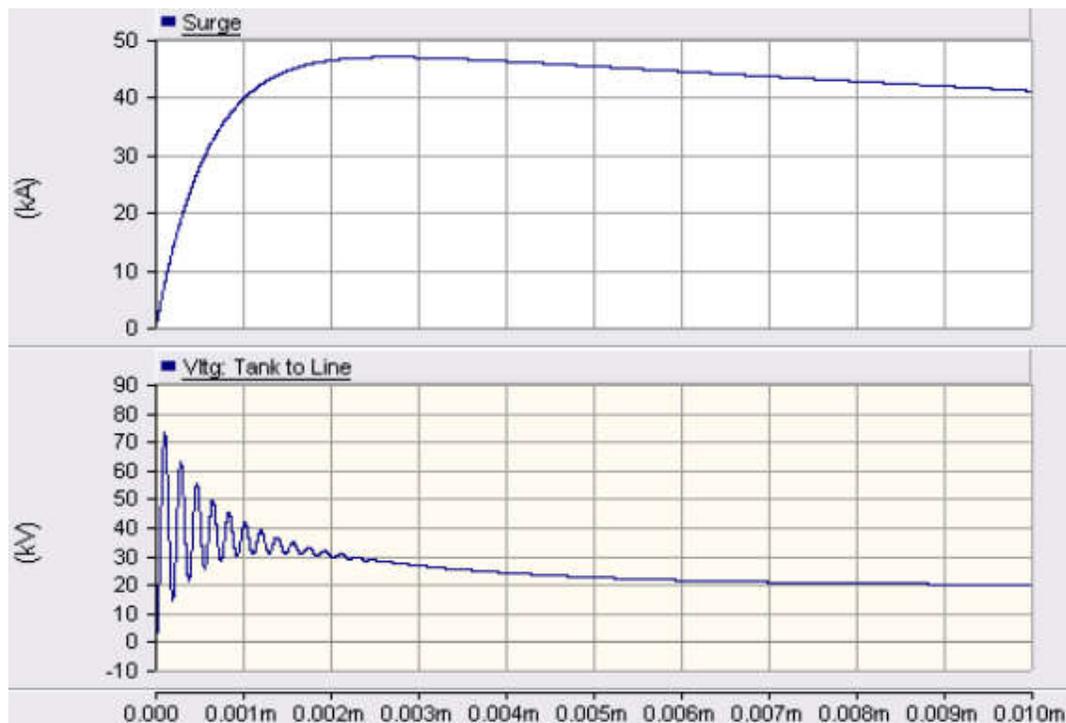
As primeiras simulações buscaram averiguar o comportamento do sistema com a atuação do para-raios e com a ausência do mesmo. Com a utilização do para-raios pode-se averiguar na Figura 41 que os valores de tensão se estabilizaram com uma tendência de diminuição das tensões. Tanto a tensão de fase, quanto a tensão sobre o neutro passaram a possuir o mesmo comportamento, isso se deve ao fato de que o para-raios insere corrente entre a fase e o neutro.

Figura 41 - Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede.



A Figura 42 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 6.

Figura 42 - Gráfico da tensão da rede em relação à distância da rede.

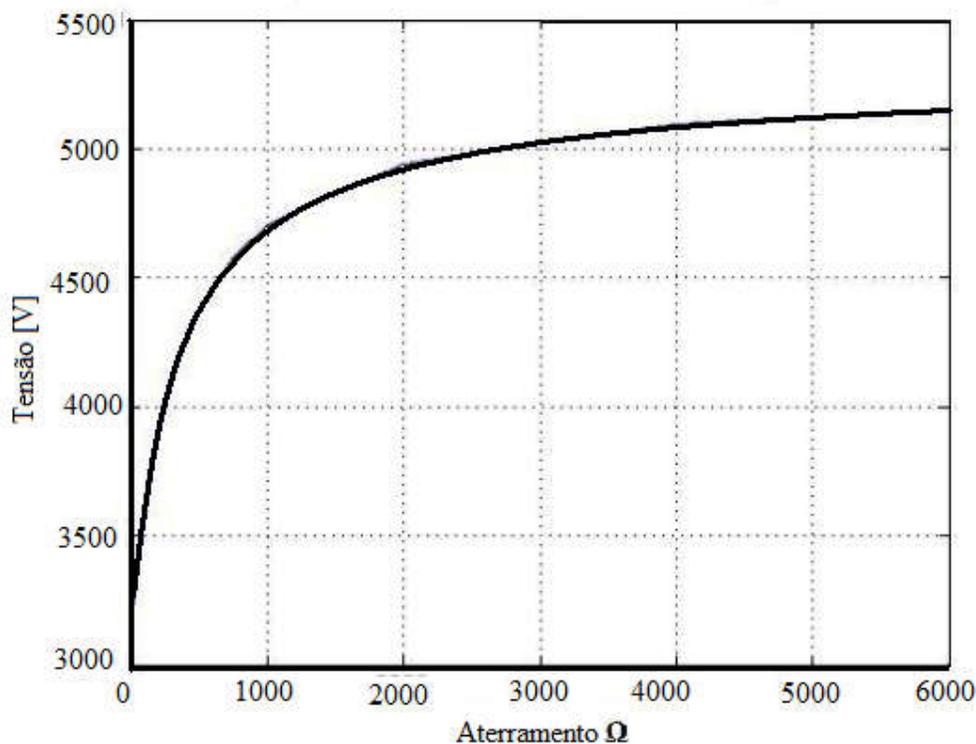


Fonte: Do autor

Percebe-se, após análise das Figuras 41 e 42 que, com a ausência do para-raio no sistema, observa-se elevados valores de tensão que pode ocasionar o rompimento da linha com queima de diversos componentes.

Para uma análise da dependência da resistência quanto à eficiência da atuação dos para-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 43 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 para-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.

Figura 43 - Gráfico de tensão em relação à resistência de aterramento.



Fonte: Do autor.

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.

O desenvolvimento de resistores não-lineares, baseado no óxido de zinco (ZnO), modificou inteiramente a tecnologia de construção de para-raios, devido a sua característica não-linear permitir a fabricação de para-raios desprovidos de centelhadores de qualquer espécie. A utilização de centelhadores em série ou em paralelo é admitida somente para aplicações especiais, onde existe a necessidade de reduzir os níveis de proteção ou então de aumentar a capacidade de absorção de energia.

De qualquer forma, a diferença principal entre um para-raios convencional e um para-raios de ZnO encontra-se na ausência de centelhadores.

Depósitos de materiais contaminantes nas superfícies dos invólucros dos para-raios, associados à umidade externa, podem causar uma elevação da corrente de fuga pelo invólucro, provocando uma distribuição de tensão interna não uniforme ao longo do para-raios. Este efeito pode causar a disrupção dos centelhadores, no caso de para-raios de SiC. Em para-raios de ZnO, esse efeito pode causar um aquecimento excessivo em alguns dos elementos de ZnO que compõem o para-raios, provocando a degradação desses elementos com aumento da componente resistiva da corrente de fuga e das perdas, e a consequente redução na capacidade de absorção de energia dos para-raios. [26]

O efeito da contaminação externa do invólucro torna-se mais crítico em para-raios constituídos por mais de uma seção, uma vez que a corrente de fuga superficial do invólucro da seção superior pode ser transferida para a parte interna da seção inferior devido à transferência galvânica através dos flanges metálicos, aumentando consideravelmente a componente resistiva da corrente e as perdas através dos elementos de ZnO. [26]

Vale salientar que não são somente a penetração de umidade e a poluição que contribuem para a falha de para-raios. A própria descarga atmosférica tem contribuído para a falha de para-raios. Uma grande incidência de descargas atmosféricas ou um mau dimensionamento do para-raios pode levá-lo ao envelhecimento precoce e à deterioração dos elementos resistivos com consequente aumento da corrente de fuga e aquecimento do equipamento.

Atualmente quase todos os para-raios adquiridos pelas empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais para novos projetos de subestações, ampliações de subestações existentes ou para a substituição dos para-raios convencionais de SiC, são do tipo Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores. Apesar do aumento crescente do número de para-raios de ZnO, em alguns países, como por exemplo o Brasil, a grande maioria dos para-raios atualmente instalados nas subestações ainda são do tipo Carbetto de Silício (SiC), apesar das suas limitações tecnológicas, quando comparados aos para-raios de ZnO sem centelhadores. Estudos realizados junto às empresas de energia elétrica e grandes indústrias apontaram que aproximadamente 64% dos para-raios instalados nas subestações brasileiras são de Carbetto de Silício (SiC), com tempos de instalação e de operação médios superiores a 20 anos. Condições similares têm sido verificadas em outros países. No Brasil algumas empresas de energia elétrica vêm adotando a utilização de centelhadores com dielétrico de ar na entrada das subestações com tensões nominais até 138 kV. [18]

Foi possível perceber que na grande maioria das referências bibliográficas, quando mencionados os modelos de para-raios, o modelo polimérico é o mais utilizado, em torno de 70% de uso nas novas construções. Em subestações de Alta Tensão é visível a preferência por

este tipo de instrumento, tanto devido à sua confiabilidade, quanto em relação à baixa probabilidade de explosão perante descargas ou surtos.

6. CONCLUSÃO

Os para-raios, apesar de apresentarem um custo pequeno em relação aos outros equipamentos de uma subestação, têm a importante função de limitar as sobretensões que podem ocorrer no sistema de transmissão, protegendo os equipamentos e operadores das subestações e contribuindo para a confiabilidade, economia e continuidade da operação.

Os baixos índices de falha nos para-raios novos induziram, há muito tempo, a uma despreocupação das concessionárias em relação aos registros e análise das falhas desses equipamentos, visto que é recomendado pelos próprios fabricantes uma troca de para-raios a cada 10 ou 15 anos, sendo que a prevenção de reparo deve ser feita a cada 5 anos, a fim de evitar maiores problemas. O cenário atual indica um aumento nestes índices provocado, principalmente, pelo envelhecimento, pela penetração de umidade, pela perda de estanqueidade ou pelo armazenamento inadequado. Por ser o para-raios um equipamento selado que não permite a inspeção e avaliação de seus componentes, partiu-se para métodos que ultrapassassem esta limitação.

Dentro deste enfoque, este trabalho buscou apresentar, através de simulação, a relevância do uso do para-raio e do aterramento, apresentando as diferenças entre modelos e mostrando o melhor tipo de para-raio utilizado, ultimamente, em projetos de subestação, conforme apresentado no estudo de caso.

Foi exposta a evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões, desde os centelhadores com dielétrico de ar, passando pelos para-raios tipo expulsão e de carboneto de silício (SiC), até os para-raios de óxido de zinco (ZnO), que é tipo de para-raios cujas características mais se aproximam de um para-raios ideal. Os para-raios de ZnO vêm conquistando gradativamente seu espaço, seja substituindo os para-raios de SiC ou sendo adquiridos para novas subestações. A limitação da evolução tecnológica dos para-raios de SiC faz com que os para-raios de ZnO apresentem diversas vantagens em relação aos para-raios de SiC como apresentado neste trabalho.

Entre os detalhes construtivos dos para-raios, dois tipos ganharam destaque: para-raios com invólucro de porcelana e com invólucro polimérico. Atualmente os para-raios com invólucros de porcelana são os mais vendidos, talvez devido ao seu menor custo em relação ao polimérico. Porém diversas vantagens do polimérico sobre a porcelana foram destacadas como, por exemplo, o melhor comportamento mecânico; a maior facilidade de transporte, armazenamento e manuseio; superior desempenho sob contaminação; menor peso; não apresentam problemas como trincas e lascas como ocorre com a porcelana; etc.

Posteriormente foram relacionados todos os tipos de ensaios existentes em um para-raios: de tipo, de rotina e de campo, concluindo na sequência com o assunto sobre as características construtivas e operativas de para-raios.

Este trabalho foi de grande contribuição para esclarecer maiores detalhes sobre métodos de proteção em Alta e Média Tensão, visto que são escassas as referências sobre este tema. Apesar de poucos trabalhos relacionados ao assunto, foi possível encontrar na bibliografia casos a serem estudados e apresentados neste documento. Conclui-se que ainda não foi conseguida uma proteção completa ou totalmente efetiva para as descargas atmosféricas. Apesar de toda tecnologia empregada nos sistemas ainda não se conseguiu cem por cento de eficiência, o que deve fazer com que não nos descuidemos, de forma alguma, nos precavendo com certos cuidados numa tempestade com descargas atmosféricas. A devida atenção deve ser considerada quanto aos efeitos de descargas atmosféricas em subestação em virtude dos transtornos produzidos pelos transitórios decorrentes da ação direta e indireta de descargas.

Trabalhos Futuros

Separa no índice, conclusão, trabalhos futuros

Com a experiência e resultados obtidos neste trabalho, citam-se abaixo alguns tópicos que poderão ser objeto de continuidade:

1. Investigar Descargas Elétricas Atmosféricas com resolução temporal.
2. Análise de demais efeitos indiretos das descargas atmosféricas sobre o sistema elétrico nacional.
3. Realizar um estudo apurado sobre a climatologia de cada região brasileira, caracterizando e destacando particularidades relacionadas à incidência de descargas atmosféricas.
4. Investigar o desempenho dos sensores de Descargas Elétricas Atmosféricas quanto a sua eficiência e confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] UMAN, M.A. **Lightning**, Livro, Editora McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [2] POTIER, G. C.. **Física dos Raios & Engenharia de Proteção** – 2ª Edição. 2 ed. PORTO ALEGRA: EDIPUCRS,2010. v. 1000. 296p.
- [3] RAMBOR, C. G. **Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão Devido ao uso de Equipamentos Hospitalares com Potências Elevadas**. 2014. 11f. Dissertação de Pós Graduação Em Engenharia Elétrica, UNISOCIESC, 2014.
- [4] AJUZ, ARY D. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – aplicação em sistemas de potência de alta tensão-** EDUFF, 1987.
- [5] VISACRO, Silvério; **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**, Editora Líber, 2005.
- [6] MUNIZ, R. N.; ROCHA, BRIGIDA R. P.; MACEDO, VALQUIRIA G. **Análise da Eficiência da RDR-SIPAM para Modelagem de uma Rede de Detecção de Raios para Amazônia**, CMC Nordeste 2012.
- [7] D’Ajuz, A; Resende, F. M; Carvalho, F. M. S; Nunes, I. G; Amon, J. F; Dias, L. E. N; Pereira, M. P; Kastrup, O. F; Moraes, S. A. **“Equipamentos Elétricos - Especificações e Aplicações em Subestações de Corrente Alternada”**, Editora Universitária, FURNAS/UFF, Rio de Janeiro, 1985.
- [8] RINDAT - **Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas**. Disponível em:< <http://www.rindat.com.br>>. Acesso em : 26 de agosto de 2017.
- [9] MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3ª Ed. Rio de janeiro: LTC, 2005.
- [10] CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais; Projeto de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas. Manual de distribuição ND-3.1., 2001
- [11] INPE, I. N. D. P. E.-. **Ranking de incidência de descargas por município no Brasil. Portal ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica**, 2010. Disponível em: <www.inpe ranking.br>. Acesso em: 12 de agosto de 2017.

[12] VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: uma Abordagem de Engenharia**. São Paulo: Arliber, 2005.

[13] PEREIRA, M. P.; 1985. **Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão**. p. 124-145. Rio de Janeiro:Furnas.

[14] PEREIRA, Jorge L.M; ROCHA, Brígida R. P.; LOPES, Márcio N. G., SANTOS, Luciano S. **Effects of Atmospheric Discharge in Vila do Conde Substation- Artigo Ground**, Manaus, Maio 2014.

[15] MONTENEGRO, J. C.; RAMIREZ, J. L.; 1995. **Degradation of Zinc Oxide Varistors**. In: FIRST IEEE INTERNATIONAL CARACAS CONFERENCE. (Dez. 1995). Proceedings. p. 352-354.

[16] IEEE Std. C62.1, **IEEE Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC Circuits**, IEEE, New York, 1989.

[17] ALVES, C. A. S.; ZAPATA, J. J.; FRANCO, J. L.; 2003. **Monitoramento e Diagnóstico de Pára-raios de ZnO em Sistemas de Alta e Extra Alta Tensões**. In: Seminário Internacional de Mantenimiento y Servicios Asociados em Sistemas Eléctricos SIMSE CIER 2003. Cartagena de Indias – Colômbia.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Pára-Raios de Resistor Não Linear a Carboneto de Silício (SiC) para Circuitos de Potência de Corrente Alternada** - Especificação, NBR 5287. Rio de Janeiro, 1988.

[19] BALESTRO – **Para-Raios de Óxido de Zinco**. Disponível em: <<http://www.balestro.ind.br/wp-content/uploads/2015/05/Para-raios-Oxido-Zinco-Polim-silicone-PBP.pdf>>. Acesso em: 23 de outubro de 2017.

[20] SHIRAKAWA, S.; ENDO, F.; KITAJIMA, H. et al.; 1988. **Maintenance of Surge Arrester by Portable Arrester Leakage Current Detector**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 3 (Jul.), p. 998-1003.

[21] LUNDQUIST, J.; STENSTRÖN, L.; SCHEI, A. et al.; 1990. **New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 4 (Out.), p. 1811-1822.

[22] IEEE Std. C62.2, **IEEE Guide for the Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for Alternating Current Systems**, IEEE, New York, 1987.

[23] IEEE Std. C62.1, **IEEE Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC Circuits**, IEEE, New York, 1989.

[24] IEEE Std. C62.11, **IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)**, IEEE, New York, 1999.

[25] DE NIGRIS, M.; SIRONI, A.; BONFANTI, I. et al.; 1998. **Most Recent Developments in Surge Arresters Technology and Testing. In: POWERCON' 98. 1998 INTERNATIONAL CONFERENCE (Ago. 1998). *Proceedings*. p. 194- 201.**

[26] DUPONT, Carlos J.; 2003. **Integração de Análises de Defeitos e Definição de um grau de Risco Global para Transformadores de Potência**. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[27] CATÁLOGO: ABB – **Product Guide/High Voltage Surge Arresters**. Disponível em: <www.abb.com>. Acesso em: 15 de novembro de 2017.

[28] CATÁLOGO: ELPRO – **Station Surge Arrester**. Disponível em: <www.elpro.co.in>. Acesso em: 20 de outubro de 2017.

[29] CATÁLOGO: SIEMENS – **Siemens Power Engineering Guide – Transmission and Distribution – Surge Arresters**. Disponível em <www.siemens.com>. Acesso em: 14 de novembro de 2017.