

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

DANIEL OLIVEIRA BURGUEZ

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**CÁLCULO AUTOMÁTICO EM BLINDAGENS DE
SUBESTAÇÕES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Porto Alegre

2012

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

CÁLCULO AUTOMÁTICO EM BLINDAGENS DE SUBESTAÇÕES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2012

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

DANIEL OLIVEIRA BURGUEZ

CÁLCULO AUTOMÁTICO EM BLINDAGENS DE SUBESTAÇÕES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS
Doutor pela Chalmers University Of Technology, Gotemburgo, Suécia

Msc. Roberto Ricardo de Simões Freire, ARTETEC
Mestre pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Junho de 2012.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha irmã e à minha esposa, pelo carinho, dedicação e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luís Tiarajú, pela dedicação como professor e pela orientação neste trabalho.

Ao engenheiro Roberto Freire pela oportunidade e auxílio na realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e todos os seus funcionários e professores.

A todos os amigos e colegas que sempre estiveram ao meu lado e contribuíram ao longo do curso.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre descargas atmosféricas, sistemas de proteção e o desenvolvimento de um software para automatização dos cálculos em projetos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas baseado no modelo eletrogeométrico. O programa foi desenvolvido em MS Access e apresenta ao usuário uma interface de entrada e configuração de dados, realiza o dimensionamento e calcula o risco de falha em blindagens de subestações e edificações contra descargas atmosféricas.

Palavras-chave: Subestações, Descargas Atmosféricas, Blindagem.

ABSTRACT

This paper presents a study on lightning discharges, protection systems and the development of a software to optimize calculations in design of Lightning Stroke Shielding Systems based on the electrogeometric model. The software was developed in MS Access and provides the user an interface for configuration and data entry, verifies the design and calculates failure probability in shielding of substations and buildings.

Keywords: Substations, Lightning Strokes, Shielding.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | Objetivos | 12 |
| 1.2 | Estrutura do Trabalho..... | 13 |
| 2 | DESCARGAS ATMOSFÉRICAS | 14 |
| 2.1 | formação de carga nas nuvens..... | 14 |
| 2.2 | características das descargas | 16 |
| 2.2.1 | Tipos de descargas | 16 |
| 2.3 | distância de incidência..... | 18 |
| 2.4 | intensidade de corrente..... | 19 |
| 2.5 | Nível cerâmico..... | 21 |
| 2.5.1 | Densidade de descargas | 23 |
| 3 | SISTEMAS DE PROTEÇÃO | 24 |
| 3.1 | Avaliação geral de risco | 25 |
| 3.1.1 | Seleção do nível de proteção | 26 |
| 3.1.2 | Risco de exposição..... | 27 |
| 3.2 | Método de Franklin | 29 |
| 3.3 | Método de Faraday | 33 |
| 4 | MODELO ELETROGEOMÉTRICO | 34 |
| 4.1 | Método da esfera rolante | 34 |
| 4.2 | Zona de proteção..... | 36 |
| 4.3 | Corrente real de Blindagem | 40 |
| 5 | PROTEÇÃO DE SUBESTAÇÕES UTILIZANDO O MODELO ELETROGEOMÉTRICO | 42 |
| 5.1 | Suportabilidade ao impulso atmosférico..... | 42 |
| 5.2 | Impedância de Surto..... | 43 |
| 5.2.1 | Raio geométrico do feixe de condutores..... | 43 |
| 5.3 | Corrente crítica I_c em função da sobretensão admitida..... | 44 |
| 5.4 | Eficiência e risco de falha | 45 |
| 5.5 | Equipamento fora da área de proteção | 47 |
| 6 | SOFTWARE PARA PROJETO DE SPDA | 49 |
| 6.1 | Desenvolvimento | 49 |
| 6.1.1 | Funcionamento..... | 49 |
| 6.2 | Descrição dos módulos do software..... | 50 |
| 6.2.1 | Introdução ao Sistema Projetos SPDA..... | 50 |
| 6.2.2 | Menu Principal | 50 |
| 6.2.3 | Cadastro de usuário | 50 |
| 6.2.4 | Cadastro de Clientes | 51 |
| 6.2.5 | Cadastro de dados de projeto..... | 53 |
| 6.2.6 | Cadastro de áreas da subestação a serem protegidas..... | 55 |
| 6.2.7 | Módulo de análise de distância lateral: | 58 |
| 6.2.8 | Módulo de relatório | 60 |
| 7 | CONCLUSÕES | 62 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Nuvem carregada e campos elétricos resultantes [3] | 15 |
| Figura 2 – Possibilidades de ocorrência de descargas atmosféricas..... | 17 |
| Figura 3 – Conceito da distância R segundo a NBR5419 | 19 |
| Figura 4 – Mapa isoceráunico do Brasil [22] | 22 |
| Figura 5 – Área de exposição equivalente [11]..... | 27 |
| Figura 6 – Ângulo de proteção com uso de cabos pelo método de Franklin [3] | 29 |
| Figura 7 – Ângulo de proteção com uso de hastes pelo método de Franklin [3]..... | 30 |
| Figura 8 – Área de proteção do captor Franklin | 31 |
| Figura 9 – Método da esfera rolante aplicado a uma edificação [26]..... | 35 |
| Figura 10 – Raio de proteção de uma haste pelo método da esfera rolante [26] | 36 |
| Figura 11 – Área de proteção de hastes e cabos captadores [26]..... | 37 |
| Figura 12 – Distância lateral máxima em função da altura do dispositivo protegido | 38 |
| Figura 13 – Distância máxima entre captadores..... | 39 |
| Figura 14 – Equipamento fora da área de proteção | 48 |
| Figura 15 – Sistema Projetos SPDA: Menu Principal | 51 |
| Figura 16 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de usuários | 52 |
| Figura 17 – Sistema Projetos SPDA: Cadastros de clientes | 52 |
| Figura 18 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de projetos | 53 |
| Figura 19 – Módulo de Áreas do Projeto | 55 |
| Figura 20 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de detalhes da área | 57 |
| Figura 21 – Seleção do campo Edificação. | 57 |
| Figura 22 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de detalhes dos pontos críticos | 58 |
| Figura 23 – Exemplo de relatório de cálculo gerado pelo sistema | 61 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Probabilidade da intensidade de corrente [15]..... | 21 |
| Quadro 2 – Ângulos de proteção para o método de Franklin | 32 |
| Quadro 3 – Dimensões da malha de acordo com o nível de proteção [11]..... | 33 |
| Quadro 4 – Raio da esfera rolante..... | 36 |
| Quadro 5 – Tensão Suportável ao Impulso Atmosférico [12] | 42 |
| Quadro 6 – Fator A: Tipo de ocupação da estrutura [11] | 67 |
| Quadro 7 – Fator B: Tipo de construção da estrutura [11]..... | 67 |
| Quadro 8 – Fator C: Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas | 67 |
| Quadro 9 – Fator D: Localização da estrutura [11] | 68 |
| Quadro 10 – Fator E: Topografia da Região [11]..... | 68 |
| Quadro 11 – Exemplos de Classificação de estruturas [11]..... | 69 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SPDA: Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

TSIA: Tensão de Suportabilidade ao impulso atmosférico

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers

IEC: International Electro technical Commission

1 INTRODUÇÃO

Projetos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, também conhecidos como SPDA, em geral envolvem diversas teorias, dados regionais e requisitos previstos em Normas Técnicas que tem de ser pesquisadas para cada caso específico. Além disso, principalmente no caso de subestações, o dimensionamento de sistemas de proteção exige uma série de cálculos e verificações para diversas áreas e pontos críticos que podem exigir o uso de mais de um método de proteção.

Assim, existe a necessidade de reunir todas essas informações em um só trabalho e criar uma ferramenta que torne mais simples e eficiente o trabalho de projetistas.

Existem softwares no mercado para o projeto de blindagem de prédios e estruturas em geral. Porém, programas feitos para o projeto específico de subestações de energia apresentam um custo elevado o que pode tornar inviável para uma empresa comprar uma licença do produto.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver um software para projetos, apresentando ao usuário uma interface de entrada de dados que possa ser configurada, realizando o dimensionamento e calculando o risco de falha em blindagem de subestações e edificações baseando-se no modelo eletrogeométrico. Após os cálculos o software gera um relatório contendo os dados do projeto, um resumo dos cálculos efetuados e especificações previstas em norma em função das características da estrutura.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será apresentada uma base teórica sobre as descargas atmosféricas, prováveis consequências de uma descarga sobre uma subestação ou edificação e métodos de proteção já desenvolvidos.

A seguir, o capítulo 3 abordará um histórico e os principais modelos de sistemas de proteção, contemplando métodos de projeto e especificações previstas em normas técnicas.

O capítulo 4 é dedicado ao modelo eletrogeométrico, apresentando a teoria e todos os procedimentos e fórmulas que serão aplicadas ao software. A aplicação em blindagens de subestações é mostrada no capítulo 5.

A especificação do software, desenvolvimento e apresentação do funcionamento é mostrada no capítulo 6.

2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

É provável que descargas atmosféricas sobre a terra já ocorriam muito antes da presença de seres humanos e, possivelmente, os raios tenham sido um fator importante na produção das matérias orgânicas que deram origem a todos os seres vivos. A ocorrência dessas descargas sempre exerceu certo medo e fascínio sobre os humanos, sendo que as civilizações antigas costumavam associar raios e trovões a deuses ou crenças mitológicas. As primeiras pesquisas científicas sobre raios começaram em meados do século dezoito, mas até hoje não existe unanimidade sobre como se dá a separação das cargas elétricas que originam as descargas atmosféricas [1].

2.1 FORMAÇÃO DE CARGA NAS NUVENS

Muitas teorias sobre formação de centros de carga e separação das cargas no interior das nuvens, que tem como consequência os raios, já foram desenvolvidas. Uma teoria atribui a separação de cargas à existência de íons positivos e negativos no ar e a existência de um campo elétrico normal em direção à terra. Grandes gotas d'água nesse campo elétrico são polarizadas. As partes superiores das gotas adquirem carga negativa e as inferiores carga positiva. Conforme as gotas polarizadas caem devido à gravidade, as partes carregadas positivamente atraem íons negativos, sendo que o mesmo não acontece com as partes superiores de carga negativa e, como resultado, as gotas acumulam carga negativa, e as cargas originalmente distribuídas aleatoriamente se separam. Grandes gotas d'água transportam essa carga negativa até a porção mais baixa da nuvem, fazendo com que a porção inferior desta fique negativamente carregada e a parte superior positivamente carregada.

Outra teoria é que a interação entre correntes de ventos ascendentes que atingem as nuvens causam a fragmentação das gotas fazendo com que estas fiquem positivamente carregadas e o ar negativamente carregado. O vento ascendente não permite que essas gotas

fragmentadas, de carga positiva, desçam para a parte inferior da nuvem, fazendo com que a região mais alta da nuvem tenha carga positiva enquanto a região central e inferior permanecem com carga negativa.

Também foi sugerido que em regiões com temperatura negativas no interior da nuvem e a subsequente formação de cristais de gelo é um fator essencial para a explicação dos centros de carga no interior da nuvem. Ao mesmo tempo alguns consideram que uma composição dos três fenômenos citados é a ocorrência mais provável [3] [5].

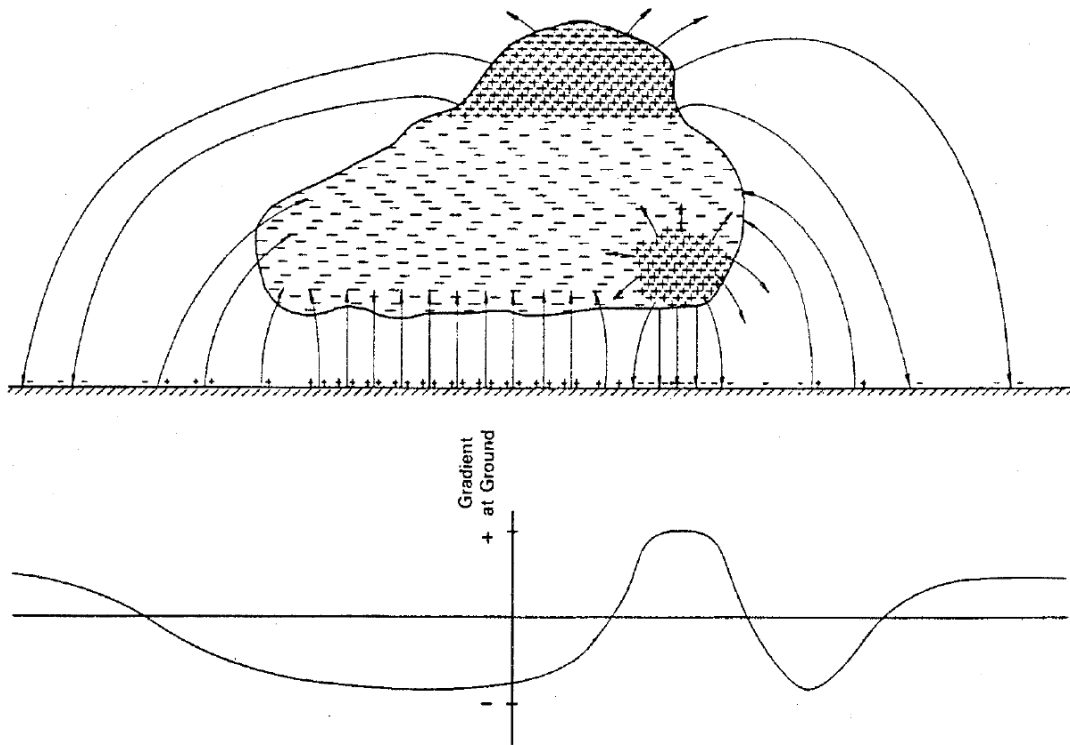


Figura 1 – Nuvem carregada e campos elétricos resultantes [3]

O fato importante a ser considerado pelo engenheiro projetista é que uma separação de cargas em nuvens carregadas de fato ocorre. Experimentos realizados com instrumentos de medição mostraram que nuvens, em tempestades, normalmente têm sua base e topo carregados positivamente, enquanto seu corpo se carrega negativamente, conforme mostrado na Figura 1. Essa distribuição causa uma acumulação de cargas de polaridade oposta à da

terra ou objetos na superfície sob a nuvem, gerando um forte campo elétrico e, conseqüentemente, uma diferença de potencial entre a nuvem e a terra [1] [3].

2.2 CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS

Se o gradiente elétrico ultrapassar a rigidez dielétrica do ar, acontecerá a descarga atmosférica. A suportabilidade do ar varia de acordo com fatores como pressão, temperatura e umidade relativa do ar, tendo, por exemplo, valores de aproximadamente 30 kV/cm em dias de tempo seco e condições normais de temperatura e pressão [4]. Em dias com alta umidade, a probabilidade de ocorrer um raio aumenta drasticamente, já que este valor pode chegar próximo a 10 kV/cm[1].

Há mais de um tipo de descarga atmosférica, entre eles estão descargas entre nuvens, dentro de uma nuvem, descargas que atingem estruturas altas ou que terminam na terra. Raios que incidem sobre a terra são o campo de interesse em se tratando de sistemas de blindagem.

2.2.1 Tipos de descargas

A formação do raio ocorre em duas etapas. O primeiro passo é a ionização do ar e a ocorrência da primeira descarga, que se propaga para fora da nuvem seguindo um caminho tortuoso e em etapas, e por isso é conhecida como líder escalonado [27] ou líder saltador [16]. Nesse processo, o líder escalonado busca o caminho mais fácil para a formação do canal. Geralmente, o líder escalonado ramifica-se por vários caminhos, mas na maioria das vezes só um ramo atinge a terra e, quando isso ocorre, uma descarga de retorno de alta intensidade de carga e luminosidade volta pelo mesmo caminho da descarga piloto em direção às nuvens. A corrente associada ao líder escalonado é pequena, da ordem de 100A [5], enquanto a magnitude da corrente descarga de retorno é em média 24kA [6]. Descargas

subsequentes, chamadas de líderes diretos tendem a ocorrer logo após a primeira descarga, aproveitando-se do caminho ionizado deixado pelo líder escalonado [2].

De acordo com a polaridade da carga e o sentido de propagação do líder inicial, quatro tipos de descargas são identificados:

- a) Descarga negativa descendente (nuvem à terra);
- b) Descarga positiva ascendente;
- c) Descarga positiva descendente;
- d) Descarga negativa ascendente (terra à nuvem);

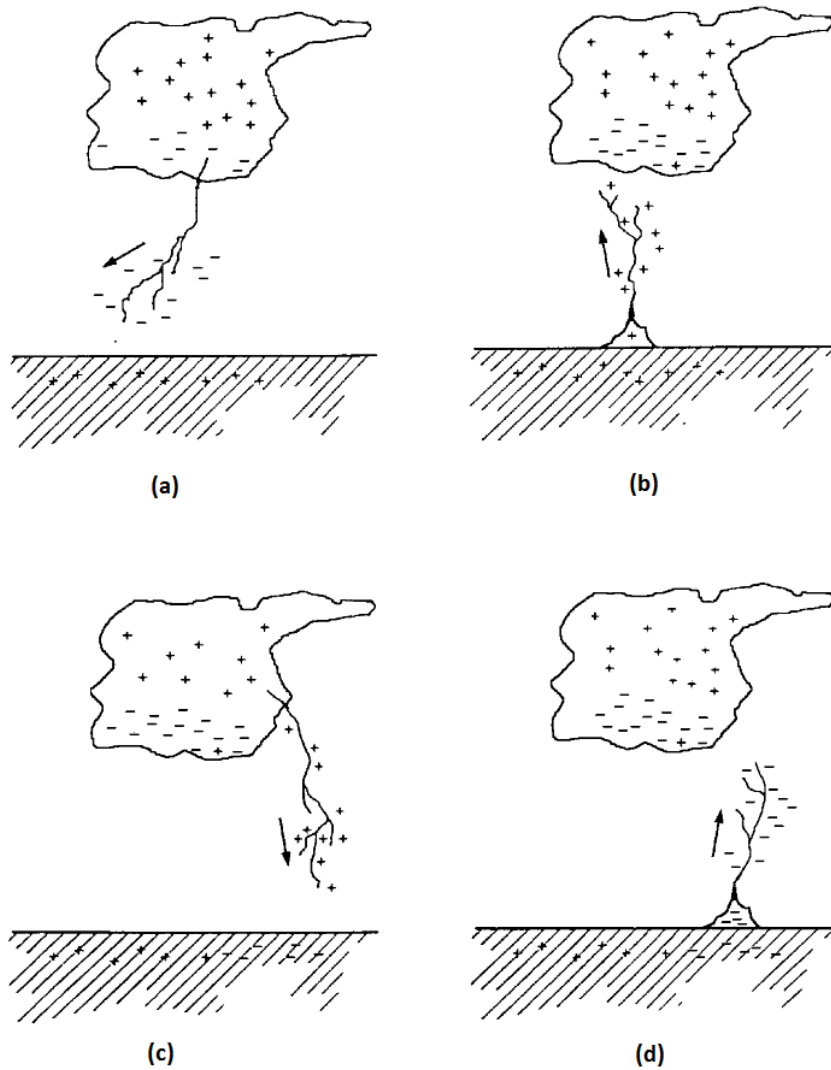


Figura 2 – Possibilidades de ocorrência de descargas atmosféricas

A Figura 2 apresenta as diversas possibilidades de ocorrência de descargas atmosféricas. Quanto à polaridade, estudos demonstram um percentual acima de 90% para raios com polaridade negativa [4].

2.3 DISTÂNCIA DE INCIDÊNCIA

A distância de atração, correspondente ao comprimento do último líder escalonado, e a corrente de descarga estão correlacionadas [9]. À medida que avança, o líder induz na superfície da terra uma carga elétrica crescente de sinal contrário. Com a aproximação do líder, o campo elétrico na terra torna-se suficientemente intenso para dar origem a um líder ascendente (receptor), que parte em direção ao primeiro. O encontro de ambos estabelece o caminho da corrente do raio (corrente de retorno), que então se descarrega através do canal ionizado [11]. De acordo com o modelo eletrogeométrico, a distância crítica de atração de uma descarga atmosférica, isto é, a distância na qual o líder escalonado de uma descarga é atraída por um objeto, é proporcional à densidade de carga do líder escalonado. A corrente da descarga de retorno, no entanto, é proporcional à densidade de carga do próximo líder. Como a descarga de retorno é um parâmetro amplamente mensurado e registrado, a distância crítica é expressa como uma função da intensidade de corrente da descarga de retorno. Muitas equações já foram sugeridas, sendo a mais utilizada, dada por [3] [7]:

$$Sc = 7,2 \times k \times Ic^{0.65} [m] \quad (1)$$

Onde,

Sc – Distância de incidência

Ic – Corrente em kA

k – Coeficiente de acordo com o tipo de estrutura atingido

Já, segundo a NBR5419-2005 [11], em conformidade com o IEC [20], o valor da distância de incidência R que deve ser considerado, entre o ponto de partida do receptor (líder

ascendente) e a extremidade do líder escalonado (descendente), conforme a Figura 3, é dado por:

$$R = 10 \times I_c^{0.65} [m] \quad (2)$$

Onde,

R – Distância de incidência

I_c – Corrente em kA

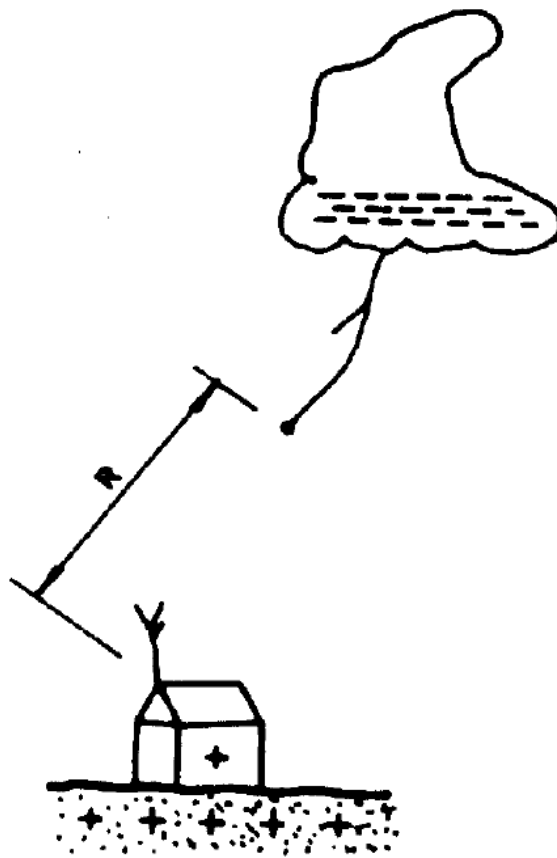


Figura 3 – Conceito da distância R segundo a NBR5419

2.4 INTENSIDADE DE CORRENTE

Como a distância de atração e a intensidade de corrente estão relacionadas, é interessante conhecer a distribuição das correntes de descarga [2]. Nos casos mais usuais de líderes negativos descendentes, o contato com a terra possui efeito semelhante ao de um

curto-circuito. Uma alta corrente positiva percorre o canal a partir do solo, porém, sua duração é de apenas alguns microssegundos. Baseado em diversas coletas de dados em campo, Popolansky [15] concluiu que a melhor representação seria uma curva logarítmica normal com dois parâmetros:

$$\begin{aligned} 1) \quad & \textit{Imédia} = 50\% \\ 2) \quad & \sigma = \ln \frac{I_{16\%}}{I_{50\%}} \end{aligned} \quad (3)$$

Onde,

σ – Desvio padrão

$I_{16\%}$ - Valor de corrente cuja probabilidade de incidência seja de 16%;

$I_{50\%}$ - Valor de corrente cuja probabilidade de incidência seja de 50%;

Sendo a probabilidade de descargas com correntes iguais ou superiores a I expressa de acordo com a equação 4:

$$P(I) = \frac{\ln \frac{I}{I_{50\%}}}{\sigma} [\%] \quad (4)$$

Adotando-se valores de $I_{50\%}=25\text{kA}$ e $I_{16\%}=61\%$, obtêm-se os dados do quadro 1. Nota-se que existe uma grande probabilidade de correntes acima de 5kA.

Outra fórmula também utilizada para o cálculo da probabilidade do raio exceder a corrente estimada, é mostrada abaixo [7]:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{I_0}\right)^{2,6}} [\%] \quad (5)$$

Onde, em (4) e (5), $P(I)$ é a probabilidade de corrente I exceder a corrente estimada I_0 .

I_0 corresponde à amplitude média da corrente de descargas atmosféricas. Segundo Anderson [7], a corrente média para incidência sobre condutores, estruturas e mastros é de 31 kA, enquanto Mousa [17] obteve um valor médio de 24 kA para incidência direta ao solo.

| I[kA] | P(I)[%] |
|-------|---------|
| 2 | 99,80 |
| 5 | 97,00 |
| 10 | 83,00 |
| 20 | 60,00 |
| 50 | 25,00 |
| 100 | 8,00 |
| 200 | 1,00 |
| 300 | 0,20 |

Quadro 1 – Probabilidade da intensidade de corrente [15]

2.5 NÍVEL CERÁUNICO

Nível ceráunico é um parâmetro que indica o número de dias em que ocorrem trovoadas por ano em um determinado local. É importante notar que se em um dia ocorre uma ou diversas trovoadas, esse período sempre é computado com um dia de trovoadas [16].

Este índice não fornece indicação de intensidade, duração, extensão ou número de tempestades ocorridas, mesmo assim, normalmente é o que apresenta os melhores dados disponíveis [2].



Figura 4 – Mapa isoceráunico do Brasil [22]

O nível ceráunico de uma região é normalmente identificado através de um mapa de curvas isoceráunicas. Registrando todos os índices ceráunicos em um mapa, e ligando os pontos de igual intensidade, obtêm-se as linhas de mesmos índices. O mapa isoceráunico do Brasil é mostrado na Figura 4.

2.5.1 Densidade de descargas

A densidade de descargas atmosféricas para a terra N_g é o número de raios para a terra por quilômetros quadrados por ano. O valor de N_g para uma determinada região é dado pela equação [11]:

$$N_g = 0.04 \times Td^{1.25} \text{ [raios/ km}^2\text{/ano]} \quad (6)$$

Onde,

N_g – Densidade de descargas atmosféricas por km² por ano

Td – Nível Ceráunico, obtido de mapas isoceráunicos

Porém, segundo o IEEE [3], baseado no trabalho de diversos cientistas e padrões adotados internacionalmente, é mais comum relacionar diretamente as duas variáveis, como mostrado na equação 7, onde k é uma constante que varia entre 0,1 e 0,2.

$$N_g = k \times Td \text{ [raios/ km}^2\text{/ano]} \quad (7)$$

3 SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Existe um longo registro, desde a idade média, de danos causados em estruturas de altura elevada, como igrejas e torres, algumas delas tendo sido danificadas ou destruídas diversas vezes por raios. Somente a partir de 1752, com o surgimento do primeiro sistema de proteção contra descargas atmosféricas, criado por Benjamin Franklin, os danos causados por raios passaram a diminuir. Muitos prédios históricos, no entanto, nunca foram arruinados por raios, possivelmente por já possuírem em sua estrutura um sistema de proteção. Em 1777, Franklin afirmou que prédios que possuem telhados com estrutura de metal, e com barras de metal que vão do telhado ao solo, nunca são prejudicados por raios, pois este “passaria” pelo metal direto até a terra, e não pelas paredes da estrutura [1][8].

A partir dessa época seguiram-se diversos estudos sobre esse fenômeno. A maioria dos experimentos subsequentes envolvia um cabo ou haste metálica polarizada pelo campo elétrico de uma nuvem, fazendo com que cargas opostas se acumulassem nas extremidades do condutor. Conforme a distância entre esse condutor e o solo era reduzida, uma descarga para o solo acontecia. Esses estudos forneceram a primeira prova direta da existência de eletricidade nas nuvens, embora outros cientistas já houvessem relatado a similaridade entre raios e centelhas geradas em laboratório.

Em 1876, Maxwell sugeriu que as hastes captoras, hoje conhecidas como captos Franklin, atraíam mais raios do que as áreas ao redor. Ele propôs que um prédio fosse completamente revestido de metal de espessura suficiente para suportar a corrente de um raio, construindo o que hoje é conhecido como Gaiola de Faraday. Se esse prédio fosse atingido por um raio, a corrente gerada se concentraria na parte externa da estrutura metálica, não havendo nem mesmo a necessidade de aterramento. Em último caso, a descarga apenas produziria um arco entre a estrutura e a terra.

Já em meados do século 20, surgiram as primeiras versões do modelo eletrogeométrico, que passou a considerar as características das descargas como parâmetro de projeto. O modelo eletrogeométrico é um método mais apurado para a obtenção da zona de proteção do sistema adotado. É uma técnica que foi inicialmente concebida para proteção de linhas de transmissão, e que hoje é implementada e aplicada também em edificações. Este modelo será visto em maiores detalhes no capítulo 4.

No Brasil, a NBR 5419 – 2005 define os níveis de proteção, parâmetros e requisitos técnicos de instalações de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Os três métodos de instalação previstos em norma são método de Franklin, método de Faraday e método da Esfera Rolante. Esses métodos serão abordados com ênfase em sua utilização prática de acordo com a norma citada e sua aplicação no software proposto. Um SPDA projetado e instalado conforme esta norma não pode assegurar a proteção absoluta de uma estrutura, de pessoas e bens. Entretanto, a aplicação desta norma reduz de forma significativa o risco de danos devidos às descargas atmosféricas[11].

3.1 AVALIAÇÃO GERAL DE RISCO

Descargas atmosféricas podem causar danos a pessoas, edificações, equipamentos e interrupção de serviços em diferentes proporções. Como não é possível evitar a ocorrência de raios, os sistemas de proteção são projetados de modo que estes sejam atingidos no caso de ocorrência do raio [20].

A probabilidade de um raio cair na área protegida é muito pequena. Mesmo assim, sabe-se que um sistema de proteção sempre tem a chance de falhar. Por isso sistemas de proteção são requeridos de acordo com a avaliação dos riscos envolvidos [16]

3.1.1 Seleção do nível de proteção

A NBR5419-2005 estabelece quatro níveis de proteção que são determinados de acordo com as características e o tipo de ocupação da estrutura. Estruturas especiais com riscos inerentes de explosão, tais como aquelas contendo gases ou líquidos inflamáveis, requerem geralmente o mais alto nível de proteção contra descargas atmosféricas.

Para os demais tipos de estrutura, deve ser inicialmente determinado se um SPDA é, ou não, exigido. Caso seja exigido, deve-se definir entre os quatro níveis de proteção de acordo com os critérios estabelecidos na norma. Os quatro níveis de proteção são resumidos a seguir [21]:

- Nível I é o caso mais crítico, onde a falha do sistema de proteção pode gerar danos às estruturas adjacentes, com risco de explosão, perda de patrimônio, ou ainda risco de contaminação do meio ambiente, como indústrias petroquímicas, postos de combustível e usinas elétricas.
- Nível II refere-se a construções onde o risco de acidentes com pessoas, de perda de patrimônio cultural, ou perda de dados importantes. Nesta classe são ordenados hospitais, museus, escolas e bancos.
- Nível III é classificado para estruturas de uso comum, como residências e indústrias menores.
- Nível IV consiste em construções onde não há um grande fluxo de pessoas, como armazéns e depósitos.

O quadro 11, apresentado no Anexo 1, mostra o nível de proteção de diversos tipos de estruturas comuns e especiais de acordo com a NBR5419.

3.1.2 Risco de exposição

A probabilidade de uma estrutura ser atingida por um raio em um ano é o produto da densidade de descargas atmosféricas para a terra, N_g , vista anteriormente, pela área de exposição equivalente da estrutura.

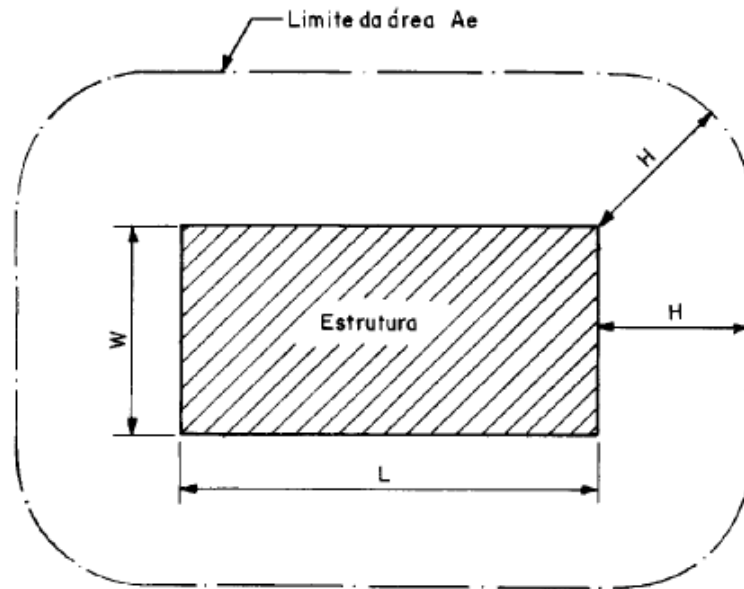


Figura 5 – Área de exposição equivalente [11]

A área de exposição equivalente A_e é a área, em metros quadrados, do plano da estrutura prolongada em todas as direções, de modo a levar em conta sua altura. Os limites da área de exposição equivalente estão afastados do perímetro da estrutura por uma distância correspondente à altura da estrutura no ponto considerado. Assim, para uma estrutura retangular simples de comprimento L , largura W e altura H , a área de exposição equivalente A_e conforme a Figura 5, é dada pela equação 8.

$$A_e = L \times W + 2 \times L \times H + 2 \times W \times H + \pi \times H^2 \quad [m^2] \quad (8)$$

A seguir, calcula-se a frequência anual média de descargas atmosféricas sobre uma determinada área, N_d , dada por:

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6} \quad [\text{raios por ano}] \quad (9)$$

Para a frequência média anual admissível de danos N_c , valem os seguintes limites, reconhecidos internacionalmente:

- a) riscos maiores que 10^{-3} (isto é, 1 em 1 000) por ano são considerados inaceitáveis, requerendo SPDA.
- b) riscos menores que 10^{-5} (isto é, 1 em 100 000) por ano são, em geral, considerados aceitáveis.

De acordo com a NBR5419, ao valor de N_d calculado devem ser aplicados os fatores de ponderação A, B, C, D e E, conforme os critérios indicados nos Quadros 6 ao 10, mostradas no anexo 1. Multiplica-se o valor de N_d pelos fatores pertinentes, obtendo-se N_{dc} :

$$N_{dc} = A \times B \times C \times D \times E \times N_d \quad (10)$$

Onde,

Fator A – Corresponde ao tipo de ocupação de estrutura;

Fator B – Tipo de construção;

Fator C – Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas;

Fator D – Localização da estrutura

Fator E – Topografia da região.

Compara-se N_{dc} com a frequência admissível de danos N_c , conforme o seguinte critério:

- a) se $N_{dc} \geq 10^{-3}$, a estrutura requer um SPDA;
- b) se $10^{-3} > N_{dc} > 10^{-5}$, a conveniência de um SPDA deve ser tecnicamente justificada e decidida por acordo entre projetista e usuário;
- c) se $N_{dc} \leq 10^{-5}$, a estrutura dispensa um SPDA.

3.2 MÉTODO DE FRANKLIN

O método proposto por Franklin tem como base uma haste elevada. Esta haste produz, sob a nuvem carregada, uma alta concentração de cargas elétricas juntamente com um campo elétrico intenso, produzindo a ionização do ar e propiciando o raio. O raio captado pela ponta da haste é transportado pelo cabo de descida e escoado pelo sistema de aterramento [16].

Também pode ser usado um condutor horizontal, sendo equivalente e tendo a mesma eficiência de uma haste de mesma altura que se desloca ao longo de todo o comprimento do condutor.

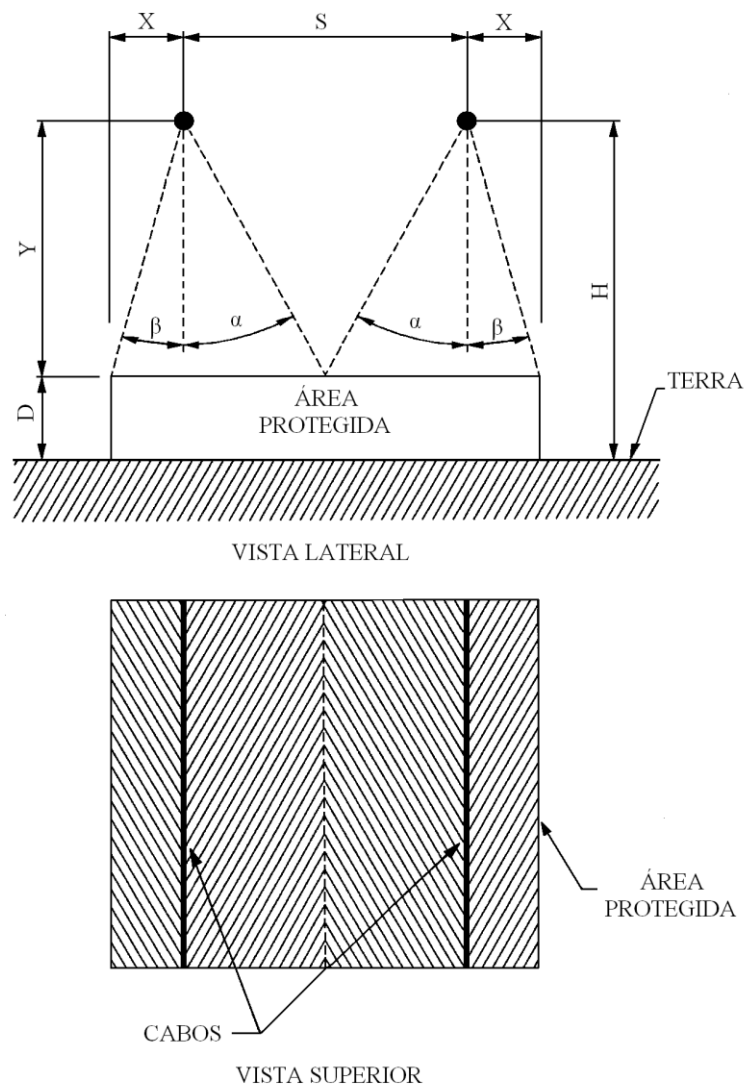


Figura 6 – Ângulo de proteção com uso de cabos pelo método de Franklin [3]

A área de proteção de um captor Franklin é normalmente determinada utilizando-se o chamado método dos ângulos fixos. Este método utiliza ângulos verticais para determinar o número, altura e quantidade de hastes necessárias para proteger uma determinada área. A Figuras 6 e 7 mostram a área de proteção obtida pelo método do ângulos fixos utilizando cabos e hastes, respectivamente [3].

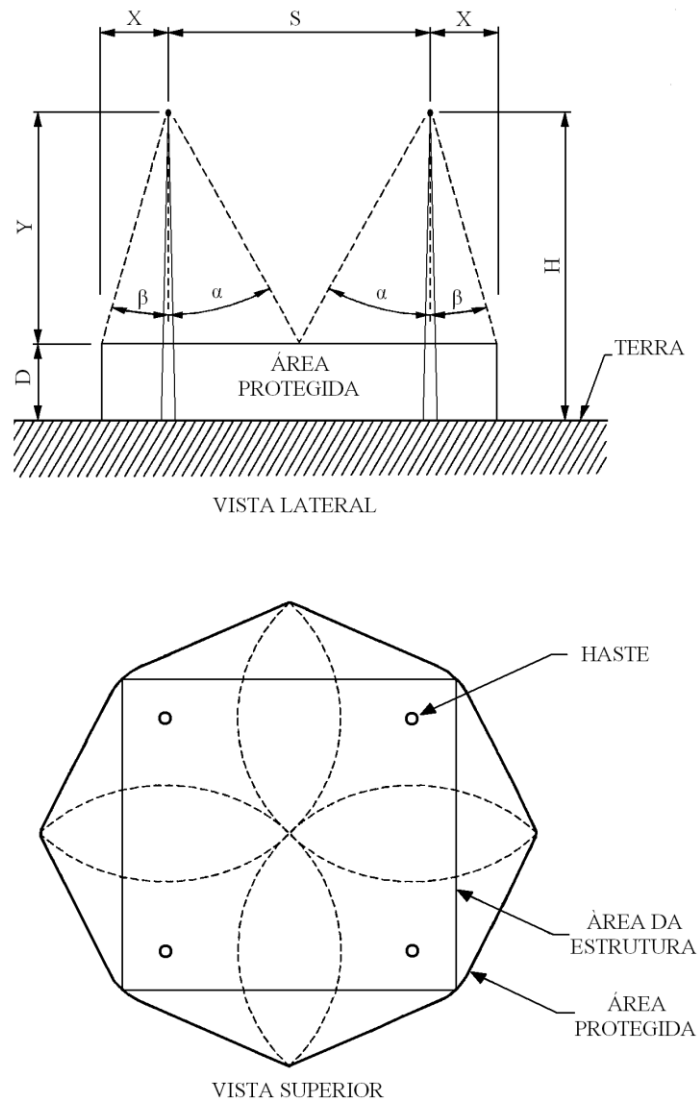


Figura 7 – Ângulo de proteção com uso de hastes pelo método de Franklin [3]

O cálculo do raio de proteção e verificação da altura máxima de uma estrutura em função da distância lateral em relação ao captor é muito simples visto que o volume de

proteção de um captor Franklin tem o formato de um cone [3]. O raio de proteção em relação a um plano considerado é dado pela equação 11.

$$Rp = Hc \times \tan \alpha \text{ [m]} \quad (11)$$

Onde,

Rp – Raio de proteção, ou seja, distância lateral máxima no nível do solo

Hc – Altura do captor em relação ao plano protegido

α – Ângulo de proteção em relação à vertical

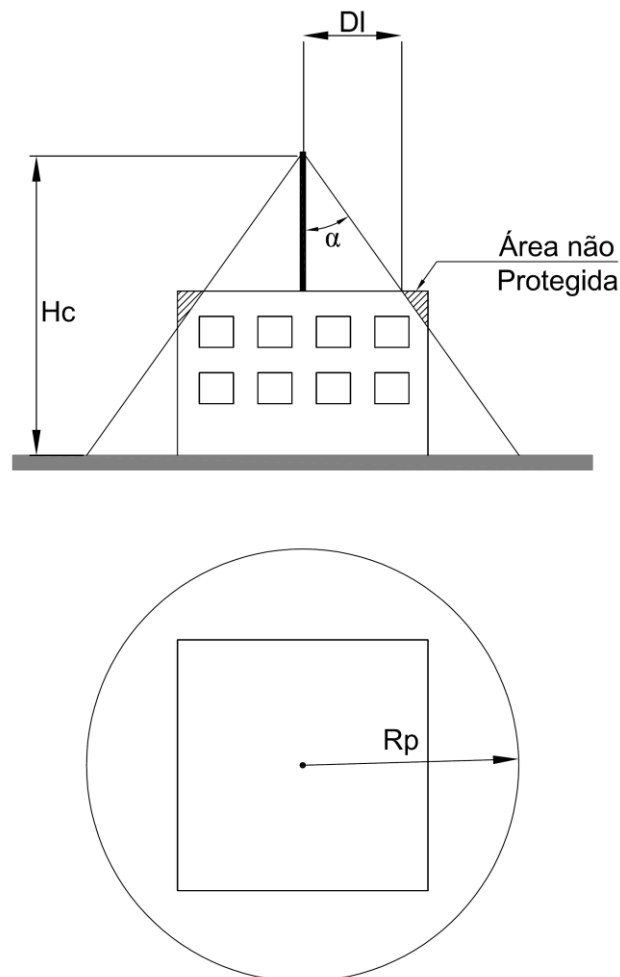


Figura 8 – Área de proteção do captor Franklin

Já a distância lateral máxima de um ponto em função da altura da estrutura a ser protegida, conforme ilustrado na Figura 8, é dada pela equação 12. Alternativamente, com a mesma equação pode-se ter a altura máxima em função da distância lateral do equipamento.

$$Dl = \frac{He \times Rp}{Hc} [m] \quad (12)$$

Onde,

Dl – Distância Lateral máxima da estrutura protegida

Rp – Raio de proteção, ou seja, distância lateral máxima no nível do solo

Hc – Altura do captor em relação ao plano protegido

He – Altura do equipamento protegido

A NBR5419 - 2005 [11] estabelece os ângulos a serem considerados para o correto posicionamento dos captores em função da altura e a classe de proteção adotadas, de acordo com o Quadro 2, obedecendo aos seguintes critérios:

- Para escolha do nível de proteção, a altura é em relação ao solo
- Para verificação da área protegida, é em relação ao plano horizontal a ser protegido.

| Nível de Proteção | Altura do Captor (m) | | | | |
|-------------------|----------------------|-----|-----|-----|--------------|
| | 20 | 30 | 45 | 60 | Maior que 60 |
| I | 25° | * | * | * | ** |
| II | 35° | 25° | * | * | ** |
| III | 45° | 35° | 25° | * | ** |
| IV | 55° | 45° | 35° | 25° | ** |

Quadro 2 – Ângulos de proteção para o método de Franklin

(*) – Deve-se aplicar o método da esfera rolante ou de gaiola de Faraday;

(**) – Somente aplicável o método da gaiola de Faraday.

3.3 MÉTODO DE FARADAY

A proteção conhecida como Método de Faraday consiste em usar os condutores de captura em forma de anel, formando malhas, ou gaiolas. Trata-se de um sistema muito eficiente e, por isso, é largamente adotado.

O princípio básico desse tipo de proteção é a Lei de Lenz. A gaiola de Faraday é formada por vários quadrículos de condutores, e quando a corrente do raio passa pela gaiola, o campo magnético no interior desta é nulo, ou muito pequeno. Quanto mais malhada for a gaiola, melhor a blindagem [16].

Este método é muito utilizado em prédios de pouca altura e grande área, porém a norma obriga a utilização deste método para edificações acima de 60m de altura. As dimensões da malha de acordo com o nível de proteção são dadas no quadro 3.

| Nível de Proteção | Dimensão da Malha (m) |
|--------------------------|------------------------------|
| I | 5 x 10 |
| II | 10 x 15 |
| III | 10 x 15 |
| IV | 20 x 30 |

Quadro 3 – Dimensões da malha de acordo com o nível de proteção [11]

4 MODELO ELETROGEOMÉTRICO

Uma das primeiras versões do modelo eletrogeométrico foi desenvolvida por Golde [23] em 1945, mas o método nunca foi adaptado para ser usado em sistemas de blindagem. Nos anos 50, a alta taxa de desligamento das primeiras linhas de transmissão de 345 kV na América do Norte devido à incidência de raios, influenciou a pesquisa de novos métodos de proteção contra este fenômeno, pois os métodos de ângulos fixos e de curvas empíricas mostravam-se ineficientes para este tipo de construção [18].

Uma versão mais atual do modelo foi desenvolvida em 1963 por Young [25], mas novas pesquisas logo chegaram a melhores resultados. Um projeto de pesquisa extremamente relevante foi apresentado por E. R. Whitehead, que incluiu um modelo teórico de uma linha de transmissão sujeita a descargas diretas e o desenvolvimento de expressões analíticas relativas à performance da linha. A versão final deste modelo foi publicada por Gilman e Whitehead [19] em 1973.

O modelo eletrogeométrico foi revisado diversas vezes, mas fundamenta-se basicamente em duas grandezas, vistas na seções 2.3 e 2.4, que são corrente crítica de descarga, I_c , dada em kA, e a distância crítica de atração, Sc , dada em metros. Os modelos de Franklin e Faraday, anteriormente citados, consideravam variáveis como altura das nuvens e dos elementos do sistema, mas deixavam de lado as características elétricas das descargas. Foi a avaliação destas variáveis elétricas que permitiu o estudo de novas metodologias e o correlacionamento da blindagem com a tensão nominal dos equipamentos e a respectiva capacidade de suportar surtos de tensão.

4.1 MÉTODO DA ESFERA ROLANTE

Esse método envolve girar uma esfera imaginária de raio Sc , igual à distância de atração, sobre a estrutura protegida. A distância de atração adotada no modelo

eletrogeométrico é dependente da corrente do raio, sendo calculada conforme descrito na seção 2.3.

A área de proteção é obtida conforme essa esfera imaginária percorre a superfície ao redor da região protegida, sendo sustentada pelas hastes ou cabos protetores. Os elementos sob a curva formada pela esfera durante o trajeto estão protegidos e qualquer item que toca ou penetra a esfera não está protegido. A Figura 9 mostra o método da esfera rolante aplicado a um prédio, considerando um raio de atração igual a 46m.

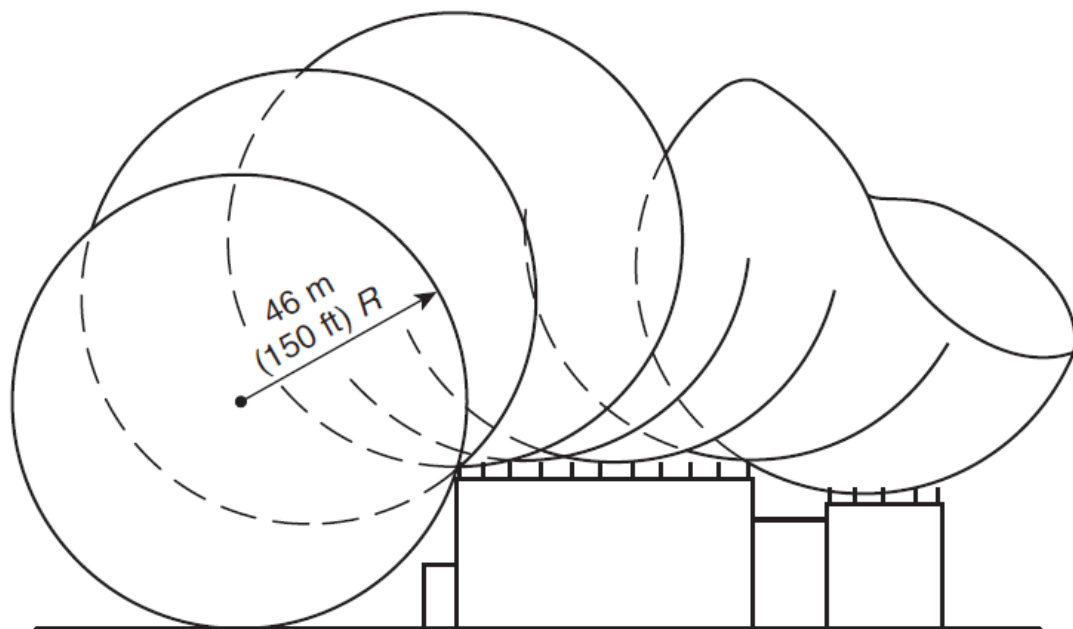


Figura 9 – Método da esfera rolante aplicado a uma edificação [26]

Segundo a NBR5419 - 2005, o modelo eletrogeométrico serve para delimitar a área de proteção dos captadores de um SPDA, sejam eles constituídos por hastes, cabos ou uma combinação de ambos, sendo especialmente útil no caso de estruturas altas ou com formas arquitetônicas complexas. A norma estabelece o raio da esfera rolante na proteção de edificações. O quadro 4 apresenta o raio da esfera rolante de acordo com o nível de proteção e a máxima intensidade de corrente associada a cada nível.

| Nível de Proteção | Raio da Esfera Rolante(m) | Corrente Máxima(kA) |
|-------------------|---------------------------|---------------------|
| I | 20 | 3 |
| II | 30 | 5 |
| III | 40 | 10 |
| IV | 60 | 15 |

Quadro 4 – Raio da esfera rolante

4.2 ZONA DE PROTEÇÃO

A zona de proteção obtida com o método da esfera rolante pode ser melhor compreendida analisando as figuras 10 e 11.

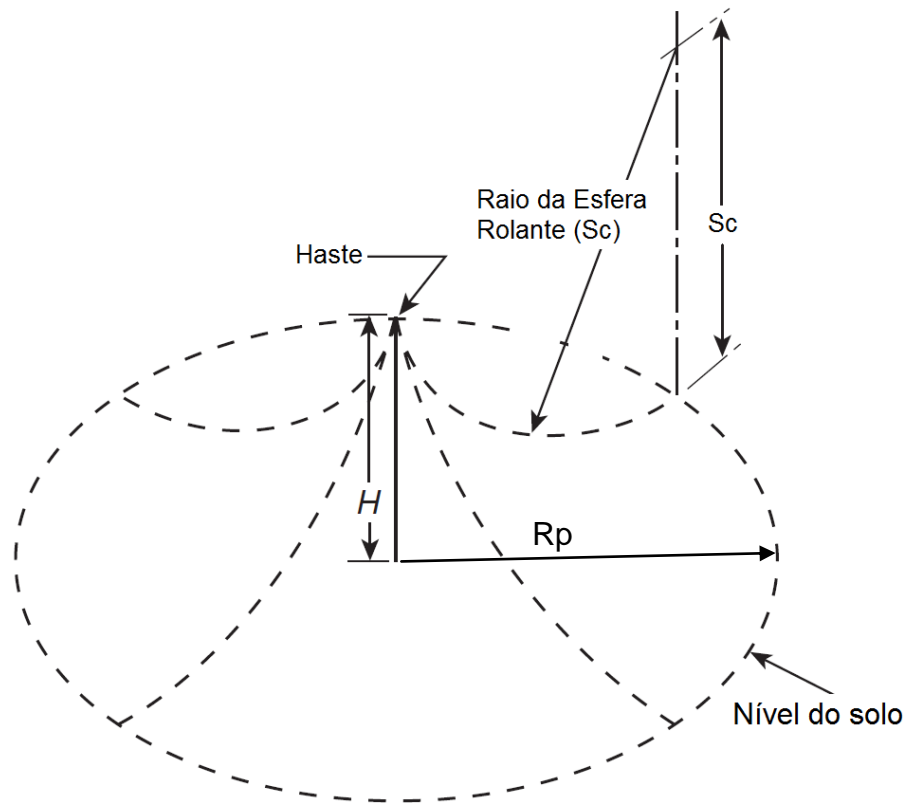


Figura 10 – Raio de proteção de uma haste pelo método da esfera rolante [26]

A Figura 10 mostra uma haste de altura H em relação ao nível do solo. As linhas tracejadas delimitam a área de proteção obtida quando uma esfera de raio Sc gira ao redor da haste. Observa-se que o raio de proteção Rp , no nível do solo, indicado pelo círculo tracejado, varia dependendo da dimensão do raio Sc em relação à altura da haste H .

- No caso de $Sc \leq H$, o raio de proteção será sempre dado por:

$$Rp = Sc [m] \quad (13)$$

- Quando $Sc > H$, o raio de proteção é dado pela equação 14:

$$Rp = \sqrt{Sc^2 - (Sc - H)^2} [m] \quad (14)$$

Uma análise semelhante pode ser feita quando são usados cabos captore horizontais. O raio de proteção no nível do solo se estende formando uma zona de proteção retangular por todo o comprimento do cabo, e circular nas duas extremidades conforme ilustrado na Figura 11.

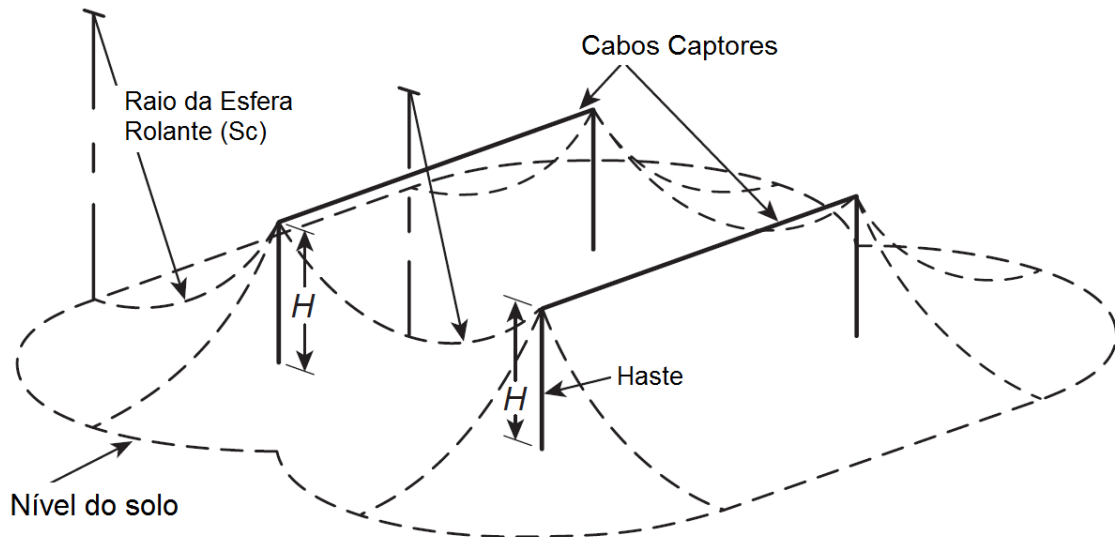


Figura 11 – Área de proteção de hastes e cabos captore [26]

Em projetos tem-se interesse em saber se edificações, equipamentos ou cabos de certa altura encontram-se dentro da área de proteção. Por isso é necessário calcular a máxima distância lateral em relação ao captor em que um elemento de altura h pode estar instalado para que esteja protegido. Novamente, esta distância pode ser calculada para dois casos vistos anteriormente, conforme ilustrado na Figura 12.

- $Sc \leq H$ (figura 12(a)):

$$DL \leq Sc - \sqrt{Sc^2 - (Sc - h)^2} \text{ [m]} \quad (15)$$

- $Sc > H$ (figura 12(b)):

$$DL \leq \sqrt{Sc^2 - (Sc - H)^2} - \sqrt{Sc^2 - (Sc - h)^2} \text{ [m]} \quad (16)$$

Onde, em (15) e (16),

H – Altura do Captor em relação ao plano considerado

h – Altura do elemento protegido

Sc – Raio da esfera rolante

DL – Distância lateral máxima

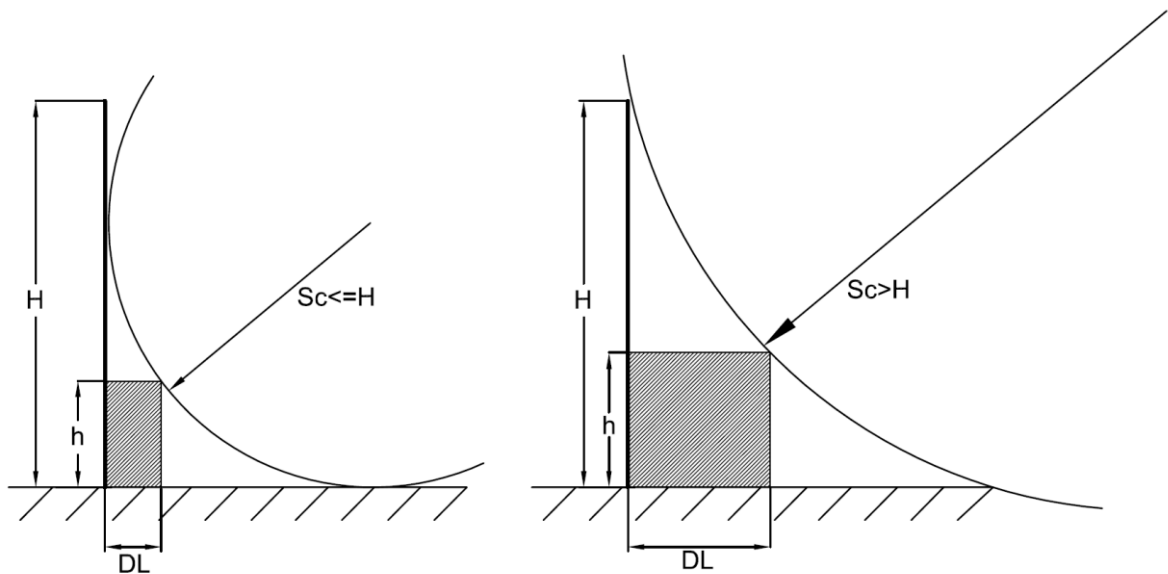


Figura 12 – Distância lateral máxima em função da altura do dispositivo protegido

Outra situação importante a ser considerada em projetos é o caso de um equipamento entre dois captores separados por uma distância menor que o raio da esfera rolante, de modo que a esfera ficaria equilibrada sobre os dois captores, aumentando a área de proteção lateral, como mostrado na Figura 13. Essa situação é comumente encontrada em proteção de subestações e linhas de transmissão. Nesse caso é necessário saber qual a sobrelevação

mínima dos captores sobre o equipamento protegido em função da altura dos captores e da distância entre eles.

Analisando a Figura 13, tem-se que a sobrelevação mínima Δh , é dada pela equação 17.

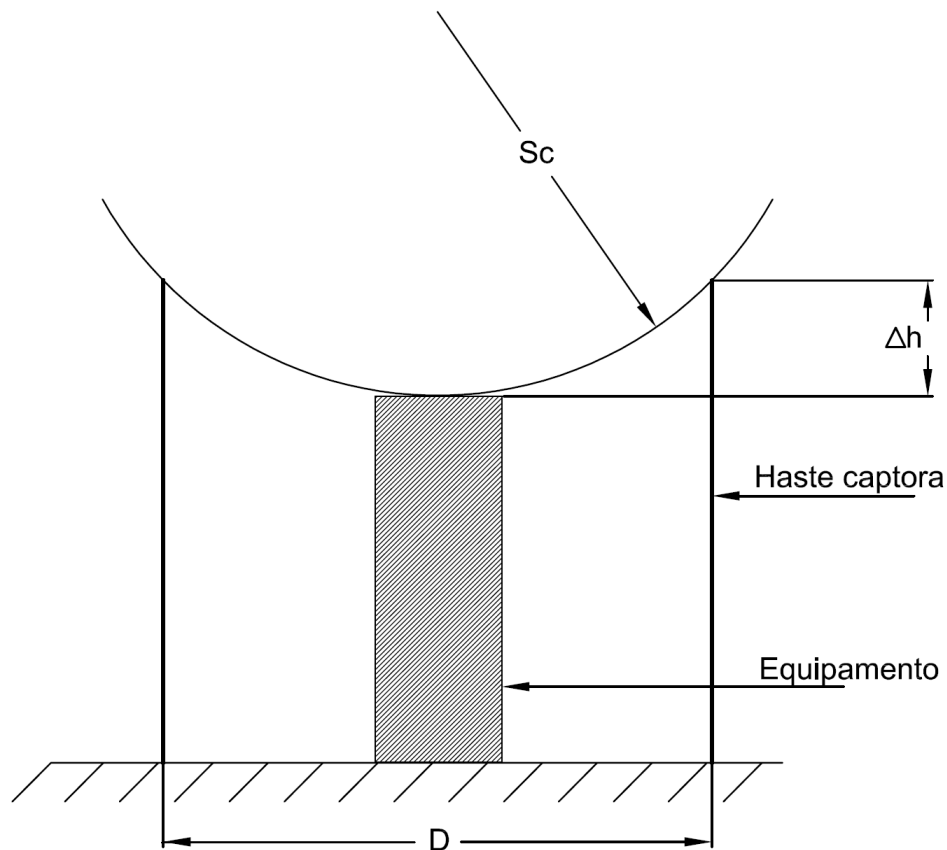


Figura 13 – Distância máxima entre captores

$$\Delta h > Sc - \sqrt{Sc^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad [m] \quad (17)$$

Onde,

Δh – Sobrelevação mínima

Sc – Raio da esfera rolante

D – Distancia entre os captores

4.3 CORRENTE REAL DE BLINDAGEM

Nos projetos de SPDA de subestações, é comum o emprego de sobrelevações maiores que os valores mínimos calculados, visando utilizar dimensões padronizadas das hastes ou torres instaladas. Assim, a corrente de descarga para a qual a blindagem ainda é eficaz, denominada corrente real de blindagem, é inferior ao valor crítico [18]. Analisando o caso ilustrado na Figura 13, o primeiro passo é calcular a distância crítica real, S_b , dada pela equação:

$$S_b = \frac{1}{2} \left(\Delta h^{real} + \frac{D}{\Delta h^{real}} \right) [m] \quad (18)$$

E a partir de S_b tem-se que a corrente real I_b , dada por:

$$I_b = \left(\frac{S_b}{7.2} \right)^{\frac{1}{0.65}} [kA] \quad (19)$$

Onde, em (18) e (19),

Δh^{real} – Sobrelevação real da blindagem

S_b – Raio da esfera rolante real da blindagem

I_b – Corrente crítica real da blindagem

D – Distância entre os captadores

A corrente para a partir da qual a blindagem protege os elementos sob os captadores é um dado importante utilizado na verificação da eficiência e risco de falha da proteção. A corrente real da blindagem, quando esta é superdimensionada, é sempre inferior ao valor crítico calculado. Na maioria dos casos os valores críticos são utilizados no cálculo da probabilidade de falha, obtendo-se um resultado ainda mais conservador e, ainda assim, com a eficiência desejada. Porém, em casos mais específicos, se não calculados os valores reais,

podem ocorrer desperdícios e custos desnecessários em função de superdimensionamento da proteção.

5 PROTEÇÃO DE SUBESTAÇÕES UTILIZANDO O MODELO ELETROGEOMÉTRICO

Em subestações o principal objetivo é evitar que sobretensões originadas de raios causem danos aos equipamentos e interrupções nos serviços. Assim, os captosres devem ser posicionados em locais estratégicos visando proteger toda a instalação e devem possuir altura e espaçamentos adequados. A localização dos captosres é função da geometria do objeto a ser protegido e da zona de proteção definida pelos diversos captosres do sistema escolhido.

No método eletrogeométrico a blindagem é projetada de forma a interceptar todas as descargas que possuem um valor de corrente maior ou igual a corrente crítica I_c suportada pelos equipamentos e, por isso, a determinação deste valor é o primeiro passo no desenvolvimento de projetos.

5.1 SUPORTABILIDADE AO IMPULSO ATMOSFÉRICO

A tensão suportável ao impulso atmosférico dos isolamentos depende de estudos de coordenação de isolamento da instalação, especificados na NBR 6939. Esta norma define as tensões de suportabilidade para os diversos níveis de tensão de operação da subestação, conforme o Quadro 5.

| Tensão Nominal | Tensão Suportável ao Impulso Atmosférico |
|----------------|--|
| 13,8kV | 110kV |
| 23kV | 150kV |
| 34,5kV | 200kV |
| 44kV | 250kV |
| 69kV | 350kV |

Quadro 5 – Tensão Suportável ao Impulso Atmosférico [12]

A NBR 6939 define tensão suportável ao impulso atmosférico como o valor de crista de uma tensão de ensaio de impulso atmosférico, para o qual a probabilidade de não

ocorrerem descargas disruptivas na isolação é igual a uma probabilidade de referência especificada de 50%. A norma adota a probabilidade igual a 90%. Desta forma, a probabilidade de ocorrerem descargas disruptivas nesta tensão de operação é de 10%. Então, para o cálculo da corrente crítica, deve ser ajustado o valor da tensão de suportabilidade para ensaios de impulso atmosféricos, a partir da equação 20.

$$TSIA_{10\%} = TSIA \times (1 - 1.3 \times \sigma) [kV] \quad (20)$$

Onde:

$TSIA$ – Tensão Suportável ao Impulso atmosférico para o nível de tensão de operação correspondente, apresentada no Quadro 5

σ – Desvio padrão assumido. Será igual a 0,03 para testes de impulso atmosférico e de 0,06 para testes de impulso de manobra

5.2 IMPEDÂNCIA DE SURTO

A impedância de surto do condutor energizado pode ser obtida pela equação 21 [2].

$$Z_s = 60 \times \ln\left(\frac{2 \times h}{r}\right) [\Omega] \quad (21)$$

Onde:

h – Altura média dos condutores [m]

r – Raio externo do condutor de fase, ou raio geométrico para feixe de condutores

Z_s – Impedância de surto do condutor energizado atingido

5.2.1 Raio geométrico do feixe de condutores

O raio geométrico utilizado no cálculo da Impedância de Surto, Z_s , para o caso de um único condutor de fase, é equivalente ao raio externo do condutor. Já para o caso de um feixe de condutores, é preciso considerar a geometria do feixe, conforme as seguintes equações:

- Dois condutores:

$$R_g = \sqrt{r \times l} \quad (22)$$

- Três condutores:

$$R_g = \sqrt[3]{r \times l^2} \quad (23)$$

- Quatro condutores:

$$R_g = \sqrt[4]{\sqrt{2} \times r \times l^3} \quad (24)$$

Onde, em 22, 23 e 24,

R_g – Raio geométrico do feixe de condutores

r – raio externo do subcondutor

l – Distância entre subcondutores

5.3 CORRENTE CRÍTICA I_C EM FUNÇÃO DA SOBRETENSÃO ADMITIDA

O modelo eletrogeométrico projeta a blindagem a partir do valor da amplitude da corrente definida pelo projeto. A utilização da amplitude de corrente da descarga como parâmetro de projeto, permite correlacionar a blindagem com o nível de tensão da estrutura protegida. Este fato é extremamente importante em projetos de subestações, já que a capacidade de suportabilidade de surtos de tensão dos componentes está ligada à sua tensão nominal.

O valor de corrente crítica pode ser determinado pela tensão de suportabilidade da estrutura que, no caso de subestações, é a tensão suportável de impulso atmosférico dos isolamentos – TSIA, dividido pela impedância de surto do condutor energizado, como demonstrado pela equação 25 [18]:

$$I_C = 2.2 \times \frac{TSIA_{10\%}}{Z_S} [kA] \quad (25)$$

Onde:

$TSIA$ – Tensão Suportável de Impulso Atmosférico dos isolamentos

Z_s – Impedância de surto do condutor energizado atingido

I_c – Corrente de descarga de projeto

Desta forma, a blindagem deverá proteger a estrutura contra descargas atmosféricas de correntes com amplitudes maiores ou iguais às obtidas em (23), já que correntes abaixo da calculada serão suportadas pelo isolamento, não causando danos ou interrupções na subestação.

Em edificações convencionais, o valor de I_c recomendado é de aproximadamente 5 kA pico, enquanto para instalações de distribuição de energia a recomendação é de 2 kA pico [18]. Esta recomendação de mínimo de corrente crítica de 2 kA pode ser confirmada analisando o Quadro 1, que demonstra que raios com menos de 2 kA apresentam uma probabilidade muito pequena de ocorrer, sendo possível desconsiderá-los.

5.4 EFICIÊNCIA E RISCO DE FALHA

O risco de falha é determinado considerando-se a área exposta e a probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas. O cálculo do número de raios que incide numa determinada área por ano pode ser expresso pela equação abaixo:

$$Ra = Ng \cdot Ae \text{ [raios/ano]} \quad (26)$$

Onde:

Ra – Número de raios incidentes por ano na área especificada;

Ng – Densidade de descargas atmosféricas por km² por ano;

Ae – Área considerada

A densidade de descargas Ng pode ser calculada conforme visto na seção 2.5.1, utilizando a equação (6). A determinação da área exposta depende muito da geometria do

SPDA e também da superposição das áreas protegidas simultaneamente por diversos elementos de blindagem. Essa área pode ser aproximada dividindo a subestação em diversas subáreas retangulares e calculando a área equivalente de cada subárea através da equação (8) apresentada anteriormente.

Para a determinação da falha de uma blindagem, é necessário saber qual a probabilidade da incidência de uma descarga atmosférica que apresente uma corrente elétrica menor do que a corrente de projeto, já que estas “passariam” pela blindagem.

A probabilidade $P(I)$, de que o raio exceda uma corrente I estimada foi vista na seção 2.4. Logo, a probabilidade $P(<I)$ de que uma corrente de descarga atmosférica seja menor do que I é dada por:

$$P(< I) = 1 - P(I) \quad (27)$$

Em casos práticos, em projetos de blindagem de subestações, tem-se interesse em saber a taxa de falhas por ano ou o número de anos decorridos entre falhas. Deste modo, a taxa de falha da blindagem pode ser obtida pela equação:

$$F = Ra \cdot P(< I) \text{ [falhas/ano]} \quad (28)$$

Onde:

F – Numero de falhas da blindagem em um ano

$P(<I)$ – Probabilidade da corrente de incidência ser menor do que a corrente estimada

Ra – Número de raios incidentes por ano na área especificada

Como no projeto de SPDA é comum dividir a área total em subáreas, é possível representar como o risco de falha total como a somatória do risco de n subáreas, conforme a equação 29.

$$Ft = \sum_{i=1}^n F_i \quad (29)$$

E o tempo estimado em anos para a ocorrência de uma falha é dado por:

$$T_f = \frac{1}{Ft} [\text{Anos}/\text{Falha}] \quad (30)$$

Onde:

T_f – Tempo decorrido entre falhas

Ft – Taxa de falha total da Blindagem

5.5 EQUIPAMENTO FORA DA ÁREA DE PROTEÇÃO

Equipamentos localizados dentro da zona de proteção estariam isentos de falhas, pois todas as descargas que o atingissem não seriam, teoricamente, capazes de causar uma sobretensão acima da suportada pelo equipamento. Infelizmente, uma proteção tão idealizada nem sempre é econômica ou fisicamente viável [3].

Nesse caso, elementos fora da área de proteção estariam sujeitos a descargas atmosféricas acima da corrente crítica, o que causaria danos aos equipamentos. Para estruturas desprotegidas pode-se determinar o risco aceitável de acordo com o projeto e, então, calcular a probabilidade de falha de cada item desprotegido.

Assume-se o caso de um equipamento cuja corrente crítica, baseada em seu TSIA, é dada por I_0 , e a distância crítica associada é dada por S_0 . Conforme ilustrado na Figura 14, a parte superior do equipamento está localizada fora da área de proteção, formada pela superfície sob a esfera de raio S_0 .

A partir da altura real do equipamento, fazendo uso das equações 18 e 19, pode-se calcular o raio da esfera S_I que criaria uma área de proteção sobre o equipamento e a corrente máxima a que o equipamento estaria sujeito, I_I . Descargas atmosféricas com correntes de amplitude menor que I_I não seriam interceptadas pela blindagem.

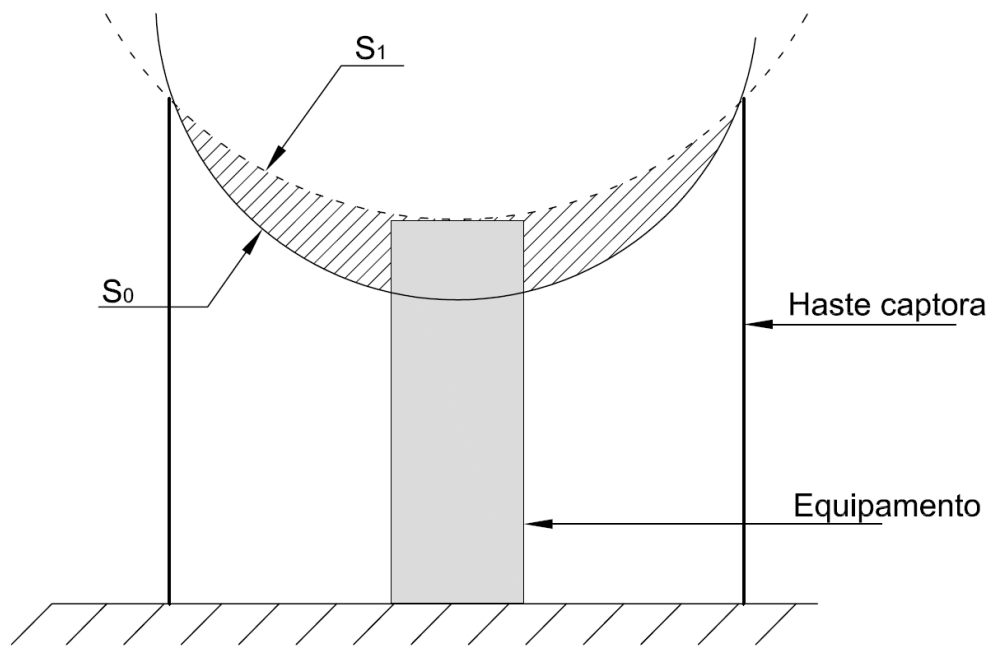


Figura 14 – Equipamento fora da área de proteção

A área hachurada na Figura 14 indica a região de risco, em que a probabilidade de ocorrência de descargas com corrente na faixa entre I_0 e I_1 , que podem atingir os equipamentos, é dada pela equação (31) e a taxa de falha correspondente pode ser calculada conforme o procedimento visto na seção 5.4.

$$Pd = P(< I_1) - P(< I_0) \quad (31)$$

Onde,

Pd – Probabilidade de descargas com corrente maior que I_0 e menor que I_1 .

$P(<I_1)$ – Probabilidade de descargas com corrente menor que I_1 .

$P(<I_0)$ – Probabilidade de descargas com corrente menor que I_0 .

6 SOFTWARE PARA PROJETO DE SPDA

A partir de todos os dados apresentados nesse trabalho foi desenvolvido um sistema para realização dos cálculos no desenvolvimento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

6.1 DESENVOLVIMENTO

O Access permite a criação de projetos que oferecem um menu de navegação para acesso aos módulos do sistema. Todas as ferramentas necessárias, como formulários, tabelas de base de dados, relatórios, pesquisas e macros estão disponíveis para desenvolvimento no MS Access 2010.

6.1.1 Funcionamento

Cada projeto será identificado por usuário e cliente e será armazenado em banco de dados para continuação de projetos não finalizados ou consultas futuras.

Devido às características de subestações em geral é necessário dividir a área de proteção em seções retangulares que viabilizam a construção do SPDA. Assim, o programa desenvolvido solicita ao usuário o cadastro das informações relativas a cada área separadamente. Além disso poderão ser adicionados dados referentes a pontos críticos que desejam ser analisados em função de distâncias laterais ou sobrelevação da proteção.

Cada campo do software deverá ser preenchido obedecendo a teoria em que foi baseado, sendo que em alguns casos será permitido escolher entre mais de uma fórmula ou aplicar fatores de correção aos cálculos.

6.2 DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS DO SOFTWARE

Esse sistema foi desenvolvido em MS Access 2010 e MS Visual Basic for Applications 7.0 e apresenta ao usuário uma interface de entrada de dados onde podem ser configurados os padrões de cálculo, baseados em normas técnicas, que serão utilizados no dimensionamento e cálculo do riscos de falhas, avaliando a configuração e posicionamento dos elementos de proteção.

6.2.1 Introdução ao Sistema Projetos SPDA

O sistema é composto basicamente por três módulos: Cadastro de Clientes, Cadastro de Usuários e o Cadastro de Projetos, que é subdividido em Detalhes do Projeto, Detalhes da Área e Detalhes da Distância Lateral. Além dos módulos descritos, o sistema gera um relatório chamado Relatório de Cálculo SPDA.

6.2.2 Menu Principal

O menu principal é a tela inicial do software Projetos SPDA. A partir desta tela é possível acessar as listas Projetos Abertos; Projetos Finalizados, Usuários e Clientes conforme ilustrado na Figura 15.

6.2.3 Cadastro de usuário

Na tela de cadastro de usuário, que é acessada pelo caminho: Menu Principal; Lista de Usuários; Novo Usuário, é possível incluir as informações detalhadas dos usuários, conforme a Figura 16. Com o objetivo de facilitar o cadastro, apenas o campo *Nome* é obrigatório.

| Nome do Projeto | Proprietário | Status | Início | Fim | Áreas |
|-------------------|--------------|--------------|-----------|-----|-------|
| PROJETO 1 | Usuário1 | Não Iniciado | 5/7/2012 | | 3 |
| Projeto teste TCC | Usuário1 | Não Iniciado | 5/19/2012 | | 3 |

Figura 15 – Sistema Projetos SPDA: Menu Principal

6.2.4 Cadastro de Clientes


Na tela de cadastro de clientes, que é acessada pelo caminho: Menu Principal; Lista de Clientes; Novo Cliente, é possível incluir as informações detalhadas dos clientes conforme Figura 17. Com o objetivo de flexibilizar o cadastro, apenas o campo *Nome* é obrigatório.

Detalhes do Usuário

Usuário teste

Ir para [dropdown] Salvar e Novo Fechar

Geral **Projeto**

Nome  Email

Sobrenome Página da Web

Empresa

Cargo

Telefones

Telefone Comercial

Telefone Residencial

Telefone Celular

Número do Fax

Endereço

Rua

Cidade

Estado/Provincia

CEP

País/Região

Anotações

Record: 1 of 2 of 3 Unfiltered Search


Figura 16 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de usuários

Detalhes do Cliente

Cliente teste

Ir para [dropdown] Salvar e Novo Fechar

Geral

Empresa  Email

Contato Principal

Nome

Sobrenome

Cargo

Telefones

Telefone Comercial

Telefone Celular

Número do Fax

Endereço

Rua

Cidade

Estado/Provincia

CEP

País/Região

Anotações

Record: 1 of 1 Filtered Search

Figura 17 – Sistema Projetos SPDA: Cadastros de clientes

6.2.5 Cadastro de dados de projeto

Na tela de Detalhes do projeto, mostrada na Figura 18, tem-se acesso, através de abas, aos módulos de Detalhes do Projeto, Áreas do Projeto e Distância Lateral. No campo **Ir para Projeto**, pode-se selecionar qualquer um dos projetos já cadastrados para visualização ou edição.

Ao clicar em **Imprimir**, o sistema mostra na tela um relatório com o resultado do projeto selecionado. Os detalhes desse relatório são descritos na seção 6.2.8.

The screenshot shows a web application window titled "Detalhes do Projeto". At the top, there is a navigation bar with a dropdown menu labeled "Ir para Projeto:" and buttons for "Imprimir", "Salvar", and "Fechar". Below this is a form with a "Nome" field containing "Projeto teste". The form is organized into tabs: "Detalhes do Projeto" (active), "Áreas do Projeto", and "Distância Lateral". The "Detalhes do Projeto" tab contains several input fields and dropdown menus: "Responsável:" (Usuário teste), "Data de Início:" (5/20/2012), "Empresa:" (Cliente teste), "Data de Término:", "Prioridade:" ((2) Normal), "Status:" (Não Iniciado), "Corrente Mínima:", "Nível Cerâmico:", "Descarga Provável:", "Padrão Cálculo Ng:", "Padrão Cálculo Sc:", and "K (cálculo de Ng:". There are also "Anexos:" and "Anotações:" sections. The bottom of the form shows a status bar with "Record: 1 of 1", "Filtered", and a search box.

Figura 18 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de projetos

Nesse módulo são solicitados ao usuário os dados referentes ao projeto, que serão utilizados posteriormente no cálculo dos resultados finais. Para garantir a integridade dos

cálculos, o sistema valida os campos que são de preenchimento obrigatório. Os dados da proteção aqui cadastrados são os padrões utilizados no projeto e parâmetros que serão válidos para todas as áreas consideradas. Os campos são descritos a seguir:

- **Corrente mínima:** Em alguns casos, utiliza-se um valor de corrente crítica I_c mínimo, como, por exemplo 2kA em subestações até 69kV, devido à baixa probabilidade de descargas abaixo deste valor. Preenchendo um valor de corrente mínima o sistema compara este valor com I_c calculada e decide qual valor será adotado no projeto. Se I_c calculada for menor que I_c mínimo, I_c mínimo é adotado. Do contrário, é válido o valor de I_c calculado.
- **Descarga Provável:** Amplitude média da corrente de descargas atmosféricas.
- **Padrão cálculo S_c :** Campo para seleção da fórmula utilizado no cálculo da distância de atração, S_c , conforme segue:

$$\text{IEEE:} \quad S_c = 7,2 \cdot k \cdot I_c^{0.65} [m]$$

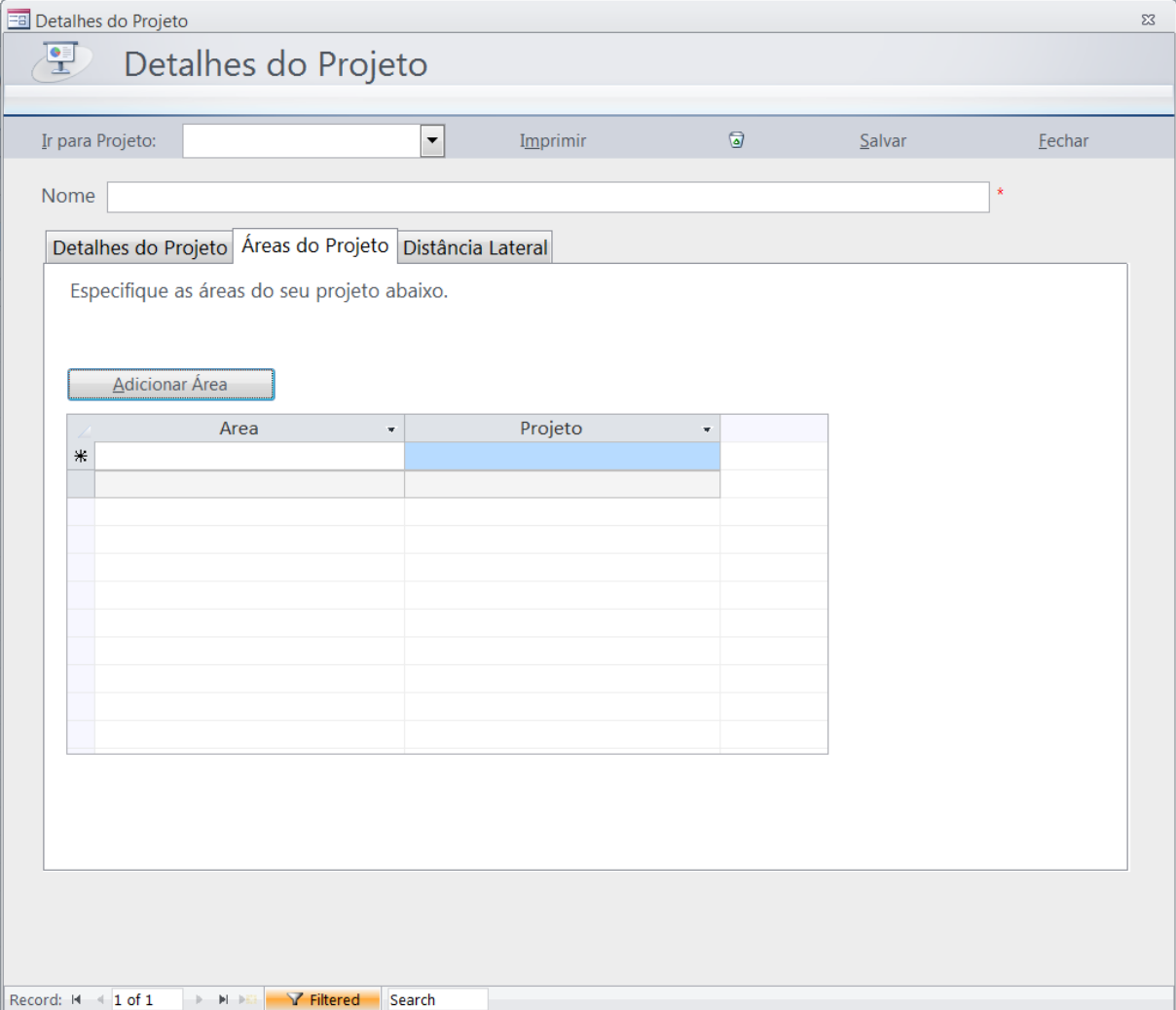
$$\text{IEC:} \quad S_c = 10 \times I_c^{0.65} [m]$$

$$\text{NBR:} \quad S_c = 2 \times I_c + 30(1 - e^{-I_c}) [m]$$

- **Nível Ceráunico:** Nível ceráunico da região.
- **Padrão cálculo N_g :** Campo para seleção da fórmula utilizado no cálculo da Densidade de descargas, N_g . (Ver seção 2.5.1).
- **K(Cálculo de N_g):** Constante de baixa utilizada no cálculo de N_g caso selecionado o padrão IEEE. (Ver seção 2.5.1).

6.2.6 Cadastro de áreas da subestação a serem protegidas

No módulo de Áreas do Projeto, mostrado na Figura 19, é possível cadastrar novas áreas ou visualizar a lista de áreas já cadastradas, permitindo o acesso para visualização ou edição.



The screenshot displays the 'Detalhes do Projeto' window. At the top, there is a navigation bar with 'Ir para Projeto:' followed by a dropdown menu, and buttons for 'Imprimir', 'Salvar', and 'Fechar'. Below this is a 'Nome' input field with a red asterisk indicating a required field. The main content area has three tabs: 'Detalhes do Projeto', 'Áreas do Projeto' (which is active), and 'Distância Lateral'. Under the active tab, there is a text prompt 'Especifique as áreas do seu projeto abaixo.' and a button labeled 'Adicionar Área'. Below the button is a table with two columns: 'Area' and 'Projeto'. The first row of the table is highlighted in blue and contains an asterisk in the first column. The table is currently empty of data. At the bottom of the window, there is a status bar showing 'Record: 1 of 1', a 'Filtered' indicator, and a search box.

Figura 19 – Módulo de Áreas do Projeto

O cadastro de novas áreas é feito clicando em **Adicionar Área** e acessando a tela Detalhes da Área, mostrada na Figura 20. O sistema analisa os dados considerando a divisão em áreas de proteção retangulares protegidas por hastes ou cabos captadores, conforme a teoria descrita nos capítulos 4 e 5. Os campos solicitados são descritos a seguir:

- **Identificação:** Nome ou característica para identificação da área.

- **Tensão:** Nível de tensão da área protegida da subestação.
- **Nº Cond./Fase:** Número de condutores por fase.
- **Dist. Entre Subcond:** Distância entre subcondutores para o caso de feixe de condutores. Para 1 condutor, deve ser preenchida distância 0 (zero).
- **Altura Condutores:** Altura dos condutores da subestação na área cadastrada.
- **Bitola Condutor:** Bitola dos condutores da subestação na área cadastrada.
- **Tipo de Captor:** Campo para seleção do tipo de captor (Haste ou cabo).
- **Bitola Captor:** Campo para seleção da bitola dos captores.
- **Dist. entre Captores:** Distância entre os captores. O sistema considera o uso de dois cabos captores horizontais ou hastes verticais nos vértices da área. No caso de hastes, deve ser inserida a distância entre dois vértices opostos, equivalente à diagonal da área retangular formada pelas hastes.
- **Altura Captor:** Altura dos captores.
- **Largura:** Largura da área protegida
- **Comprimento:** Comprimento da área protegida.
- **Edificação:** Para prédios, o método de cálculo da corrente crítica através da tensão de suportabilidade ao impulso atmosférico não pode ser aplicado. Desta forma, a corrente crítica é aplicada diretamente a partir de um valor definido no campo **Adotar Ic**. Se selecionada a opção **Edificação**, todos os campos não aplicáveis são desabilitados, conforme a Figura 21.
- **Adotar Ic:** Caso este campo seja preenchido, o valor de corrente crítica inserido, *Ic adotado*, é o que será utilizado nos cálculos, desconsiderando *Ic calculado* e *Ic mínimo*. Esse campo também deve ser obrigatoriamente preenchido quando selecionada a opção **Edificação**.

A partir dos dados de uma ou mais áreas cadastradas, o sistema analisa se a sobrelevação dos captores em relação aos elementos protegidos está adequada e calcula a probabilidade de falha por área e total do projeto.

Detalhes do Resultado Final

Detalhes da Área

Salvar Fechar

Projeto:

Identificação Área:

Edificação:

Tensão: *

Nº Cond./Fase: *

Dist entre Subcond:

Altura Condutor: *

Bitola Condutor: *

Adotar Ic:

Tipo de Captor: *

Bitola Captor: *

Dist entre Captores:

Altura Captor: *

Largura: *

Comprimento: *

Anotações:

Record: 1 of 1 Filtered Search

Figura 20 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de detalhes da área

Detalhes do Resultado Final

Detalhes da Área

Salvar

Projeto:

Identificação Área:

Edificação:

Tensão: *

Nº Cond./Fase: *

Dist entre Subcond:

Altura Condutor: *

Bitola Condutor: *

Adotar Ic:

Tipo de Captor:

Bitola Captor:

Dist entre Captores:

Altura Captor:

Largura:

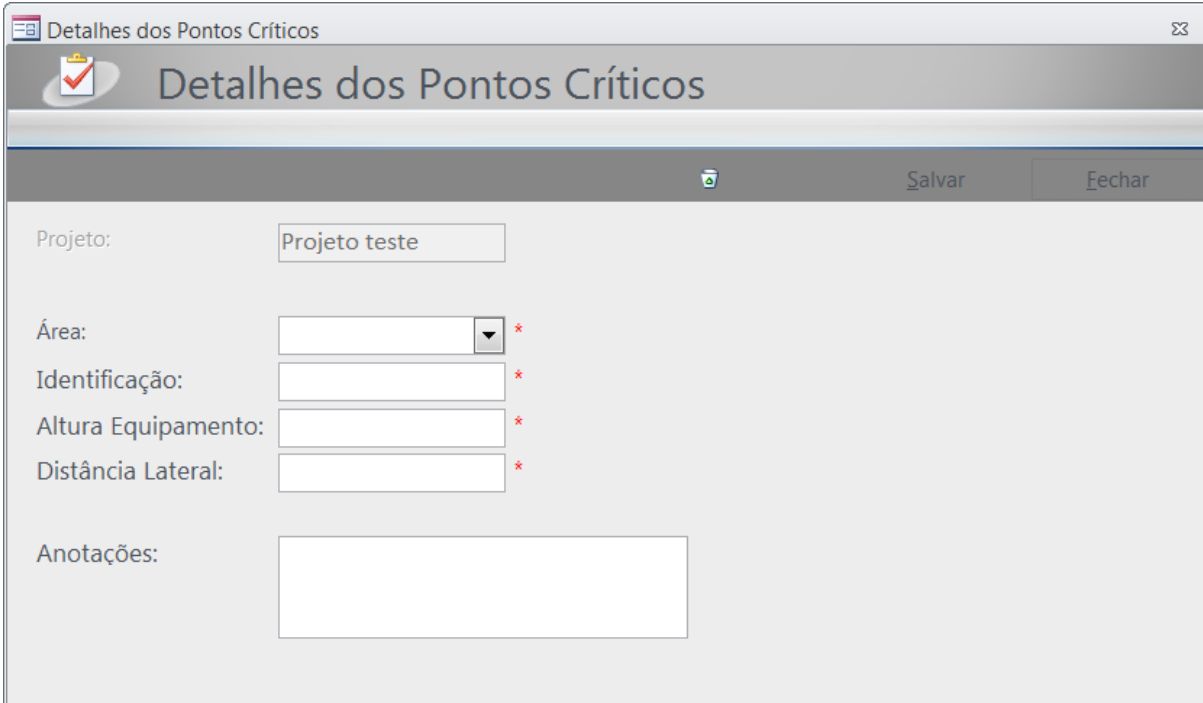
Comprimento:

Campos desabilitados

Figura 21 – Seleção do campo Edificação.

6.2.7 Módulo de análise de distância lateral:

Esse módulo é utilizado para análise de pontos que não se encontram sob a proteção, mas afastados por uma distância lateral dos cabos ou hastes captoras. A cada área podem ser adicionados diversos “pontos críticos” que necessitam de uma análise individual. O sistema calcula a máxima distância lateral em função da altura da estrutura protegida. No caso estrutura com forma complexa, com variação de altura, cada ponto mais afastado do captor em que há variação de altura deve ser analisado.



A imagem mostra uma interface de usuário de um sistema web. No topo, há uma barra de título com o texto "Detalhes dos Pontos Críticos" e um ícone de lupa. Abaixo, há uma barra de navegação com os botões "Salvar" e "Fechar". O formulário principal contém os seguintes campos:

- Projeto:
- Área: *
- Identificação: *
- Altura Equipamento: *
- Distância Lateral: *
- Anotações:

Figura 22 – Sistema Projetos SPDA: Cadastro de detalhes dos pontos críticos

Esse módulo também pode ser útil quando a estrutura estiver coberta por somente um cabo captor horizontal ou uma haste vertical. Se no campo **Dist. entre Captores**, no cadastro de Detalhes da Área, for inserido o valor 0 (zero), o sistema não fará a análise da sobrelevação, mas todos os dados relativos à subestação, captores e dimensões da área ficam cadastrados para análise de distância lateral e taxa de falha. Os campos solicitados, mostrados na Figura 22, são descritos a seguir:

- **Área:** Campo para selecionar a área a que corresponde o ponto crítico analisado.
- **Identificação:** Nome ou característica para identificação do ponto analisado.
- **Altura Equipamento:** Altura do equipamento protegido.
- **Distância Lateral:** Distância horizontal do equipamento protegido em relação ao captor.

6.2.8 Módulo de relatório

Após a realização dos cálculos o sistema apresenta ao usuário um relatório contendo os dados do SPDA, o resultado dos cálculos e a verificação da eficiência do sistema. São demonstrados os resultados referentes às áreas e aos pontos críticos verificados independentemente. Ao final do relatório é informada a taxa de falha total do projeto.

Para gerar o relatório deve-se clicar no campo **Imprimir**, na tela Detalhes de Projeto. Um exemplo de relatório gerado pelo sistema é demonstrado a seguir. Nesse exemplo foi cadastrado um projeto contendo três áreas com as seguintes características:

- Área Teste1: Área de proteção de condutores da subestação protegida por dois cabos captores e contendo dois pontos de análise de distância lateral.
- Área Teste 2: Área de proteção de uma edificação. Nesse caso todos os dados relativos à tensão foram desconsiderados e foi adotado um valor de corrente definido pelo usuário. Essa área não possui pontos críticos.
- Área Teste 3: Área de proteção de condutores da subestação protegida por dois cabos captores. Sem pontos críticos cadastrados.

| Relatório de Cálculo SPDA | | | | | |
|--|----------------------------|---|---------------------------------------|----------------------------------|------|
| Projeto: | Projeto Teste 1 | | | | |
| Nível Cerâmico: | 30.00 | Corrente de descarga mínima [kA]: 2.00 | | | |
| Padrão Cálculo Ng | IEEE | Corrente de descarga mínima [kA]: 24.00 | | | |
| K (Cálculo Ng) | 0.20 | Padrão Cálculo Sc: | | IEEE | |
| Área: | Área Teste 1 | | | | |
| Tensão [kV]: | 69 | Ic Calculado[kA]: | 2.19 | Dist. Condutores [mm]: 0.00 | |
| TSIA [kV]: | 350.00 | Raio Geométrico [mm]: | 28.36 | Altura do Condutor [m] 6.25 | |
| TSIA Corrigido [kV]: | 364.20 | Nº Condutores: | 1.00 | Bitola do Condutor: CA Magnolia | |
| Zs [Ohms]: | 365.31 | | | | |
| Dist. Captores [m]: | 7.50 | Área Equivalente [km²] | 1.34E-03 | Ic Projeto[kA]: | 2.00 |
| Tipo de Captor: | Cabo | Raios / Ano na Área: | 8.05E-03 | Sobrelevação Mínima: 0.64 | |
| Bitola do Captor: | Aço HS | Probabilidade I<Ic [%]: | 0.16% | Sobrelevação: 1 | |
| Resultado: | Estrutura protegida | | | | |
| Número de falhas por ano: | 1.26E-05 | | | | |
| Anos decorridos entre falhas | 7.95E+04 | | | | |
| Análise de Distância Lateral/Pontos Críticos: SC-1 | | | | | |
| Altura da Estrutura [m] | | 6.00 | Distância Lateral Máxima | | 0.57 |
| Distância Lateral [m]: | | 0.50 | Resultado: Estrutura protegida | | |
| Análise de Distância Lateral/Pontos Críticos: TR-2 | | | | | |
| Altura da Estrutura [m] | | 4.50 | Distância Lateral Máxima | | 1.52 |
| Distância Lateral [m]: | | 1.20 | Resultado: Estrutura protegida | | |
| Área: | Área Teste 2 | | | | |
| <i>Modo "Edificação" selecionado. Todos campos desnecessários foram desabilitados.</i> | | | | | |
| Dist. Captores [m]: | 1.75 | Área Equivalente [km²] | 1.15E-03 | Ic Projeto[kA]: | 2.00 |
| Tipo de Captor: | Cabo | Raios / Ano na Área: | 6.88E-03 | Sobrelevação Mínima: 0.03 | |
| Bitola do Captor: | Aço HS | Probabilidade I<Ic [%]: | 0.16% | Sobrelevação: 11 | |
| Resultado: | Estrutura protegida | | | | |
| Número de falhas por ano: | 1.07E-05 | | | | |
| Anos decorridos entre falhas | 9.31E+04 | | | | |
| Área: | Área Teste 3 | | | | |
| Tensão [kV]: | 13.8 | Ic Calculado[kA]: | 0.83 | Dist. Condutores [mm]: 100.00 | |
| TSIA [kV]: | 110.00 | Raio Geométrico [mm]: | 94.76 | Altura do Condutor [m] 7.50 | |
| TSIA Corrigido [kV]: | 114.46 | Nº Condutores: | 3.00 | Bitola do Condutor: CA Magnolia | |
| Zs [Ohms]: | 303.87 | | | | |
| Dist. Captores [m]: | 4.00 | Área Equivalente [km²] | 7.01E-04 | Ic Projeto[kA]: | 2.00 |
| Tipo de Captor: | Cabo | Raios / Ano na Área: | 4.21E-03 | Sobrelevação Mínima: 0.18 | |
| Bitola do Captor: | Aço HS | Probabilidade I<Ic [%]: | 0.16% | Sobrelevação: 1 | |
| Resultado: | Estrutura protegida | | | | |
| Número de falhas por ano: | 6.57E-06 | | | | |
| Anos decorridos entre falhas | 1.52E+05 | | | | |
| Totais do Projeto | | | | | |
| Número de falhas por ano: | 4.25E-05 | | | | |
| Anos decorridos entre falhas: | 2.36E+04 | | | | |

Figura 23 – Exemplo de relatório de cálculo gerado pelo sistema

7 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, buscou-se apresentar os modelos e teorias mais utilizadas e previstas em normas técnicas que serviram de base para a construção do programa para projetos de SPDA. A maioria desses experimentos vem sendo divulgado através de artigos publicados internacionalmente e por institutos de pesquisa.

Como a maioria dos sistemas de proteção já desenvolvidos envolve fórmulas empíricas e dados estatísticos, projetos de blindagem de subestações e edificações podem exigir o uso de diferentes teorias ou padrões, de acordo com a empresa ou concessionária responsável. Além disso, as áreas de proteção podem ter diferentes configurações geométricas, uso de cabos ou hastes, em diferentes quantidades e posicionamentos.

Este programa, desenvolvido em MS-Access e baseado no modelo eletrogeométrico, permite a configuração de padrões de cálculo para cada projeto cadastrado e foi desenvolvido com o intuito de trabalhar dividindo-se uma área complexa em diversas subáreas retangulares. Os recursos permitem analisar uma área protegida por um ou mais captos, sejam equipamentos, condutores ou edificações. Os resultados apresentados informam se a estrutura que se deseja proteger encontra-se dentro da área de proteção e avalia o risco de falha do SPDA por área e total do projeto.

Apesar de oferecer diversas formas de análise, não foi possível a inclusão de módulos para todas as possíveis configurações de SPDA, visto que as possibilidades são infinitas. Mas o uso deste programa pode ser de grande utilidade na avaliação de sistemas de blindagem, pois torna mais eficiente e confiável a realização dos cálculos e apresentação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- [1] VLAKOV, WLADIMIR A.; UMAN, MARTIN A. - **Lightning Physics and Effects**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [2] HECHT, A. D. - **Blindagem de Subestações**. CEEE, Maio de 1984.
- [3] IEEE Std. - **IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations**. Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1996.
- [4] FONSECA, C. S. - **Sobretensões Atmosféricas**. In: TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO, capítulo 4, Universidade Federal Fluminense, EDUFF – Editora Universitária Niterói, Rio de Janeiro, 1987.
- [5] WAGNER, C. F. - **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**. 4th ed. Westinghouse Electric Corp, pp. 542-577, 1964.
- [6] MOUSA, A.M.; SRIVASTAVA, K. D. - **The implications of the electrogeometric model regarding effect of height of structure on the median amplitudes of collected lightning strokes**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1450-1460, 1989.
- [7] ANDERSON, J. G. – **Transmission Line Reference Book 345 kV and Above**. Capítulo 12, Electric Power Research Institute, 1987.
- [8] SCHONLAND, B. F. J. - **Lightning and the Long Electric Spark**. Advanced Science, Novembro de 1962
- [9] P. CHOWDHURI - **Shielding of Substations Against Direct Lightning Strokes by Shield Wires**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994 - Tennessee Technological University

- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão.** Rio de Janeiro, 1997.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5419: Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas.** Rio de Janeiro, 2005.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6939: Coordenação do Isolamento.** Rio de Janeiro, 2000.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-9523: Subestações de Distribuição.** Rio de Janeiro, 2005.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-14039: Instalações Elétricas de Média Tensão de 1kV a 36,2kV.** Rio de Janeiro, 2005.
- [15] POPOLANSKI, F. – **Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents.** Cigre/Electra n° 22, 1972
- [16] KIDERMANN, G. – **Descargas Atmosféricas.** Sagra – DC Luzzato Editores, 1992
- [17] MOUSA, A. M. – **A Computer Program for Designing the Lightning Shielding Systems of Substations.** IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, pp. 143-152, 1991.
- [18] TELLÓ, M., DIAS, G. A. D. & HAFFNER S. L. – **Blindagem de Instalações Elétricas Contra Descargas Atmosféricas Diretas Empregando Métodos Probabilísticos.** III International Seminar on Lightning Protection, 1994.
- [19] D.W. Gilman and E.R. Whitehead - **The Mechanism of Lightning Flashover on High-Voltage and Extra-High-Voltage Transmission Lines.** Electra n° 27, March 1973, pp 65 - 96.
- [20] IEC 62305-4:2006 – **Protection against Lighting.**

- [21] MAMEDE, J. F. - **Instalações Elétricas Industriais**. 6ª Edição, Editora LTC, 2001.
- [22] MACINTYRE, A. J, NISKIER, J. – **Instalações Elétricas**. Livros Técnicos e Científicos Editora AS, 1996
- [23] Golde, R.H. - **The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines**. AIEE Trans., Vol. 64, pp. 902 - 910, 982 - 984.
- [24] MOUSA, A.M., SRIVASTAVA, K.D. - **Modelling of Power Lines In Lightning Incidence Calculations**. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 5, NO. 1, pp. 303 – 310
- [25] F. S. YOUNG, J. M. CLAYTON, A. R. BILEMAN - **Shielding of Transmission Lines**. IEEE Trans. (Power Apparatus and Systems, Special Supplement), Vol. 82S, pp 132-154, 1963.
- [26] NFPA 780 – **Standard for the installation of lightning protection systems**. 2008 Edition.
- [27] PORTIER, G. DE C. – **Física dos Rios e Engenharia de Proteção**. 2ª Edição, Editora Edipucrs, 2010.
- [28] D’AJUZ, ARY - **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**. Furnas Centrais Elétricas, Universidade Federal Fluminense / EDUFF, 1987.

ANEXOS

ANEXO A

| Tipo de ocupação | Fator A |
|---|---------|
| Casas e outras estruturas de porte equivalente | 0,3 |
| Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa ¹⁾ | 0,7 |
| Fábricas, oficinas e laboratórios | 1,0 |
| Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo | 1,2 |
| Locais de afluência de público (por exemplo: igrejas, pavilhões, teatros, museus, exposições, lojas de departamento, correios, estações e aeroportos, estádios de esportes) | 1,3 |
| Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades | 1,7 |

Quadro 6 – Fator A: Tipo de ocupação da estrutura [11]

| Tipo de construção | Fator B |
|---|---------|
| Estrutura de aço revestida, com cobertura não-metálica ¹⁾ | 0,2 |
| Estrutura de concreto armado, com cobertura não-metálica | 0,4 |
| Estrutura de aço revestida, ou de concreto armado, com cobertura metálica | 0,8 |
| Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha | 1,0 |
| Estrutura de madeira, ou revestida de madeira, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha | 1,4 |
| Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples, com cobertura metálica | 1,7 |
| Qualquer estrutura com teto de palha | 2,0 |
| ¹⁾ Estruturas de metal aparente que sejam contínuas até o nível do solo estão excluídas desta tabela, porque requerem apenas um subsistema de aterramento. | |

Quadro 7 – Fator B: Tipo de construção da estrutura [11]

| Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos | Fator C |
|--|---------|
| Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos | 0,3 |
| Estruturas industriais e agrícolas contendo objetos particularmente suscetíveis a danos ¹⁾ | 0,8 |
| Subestações de energia elétrica, usinas de gás, centrais telefônicas, estações de rádio | 1,0 |
| Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial | 1,3 |
| Escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público | 1,7 |
| ¹⁾ Instalação de alto valor ou materiais vulneráveis a incêndios e às suas conseqüências. | |

Quadro 8 – Fator C: Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas

| Localização | Fator D |
|--|---------|
| Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (por exemplo: em grandes cidades ou em florestas) | 0,4 |
| Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar | 1,0 |
| Estrutura completamente isolada, ou que ultrapassa, no mínimo, duas vezes a altura de estruturas ou árvores próximas | 2,0 |

Quadro 9 – Fator D: Localização da estrutura [11]

| Topografia | Fator E |
|-------------------------------|---------|
| Planície | 0,3 |
| Elevações moderadas, colinas | 1,0 |
| Montanhas entre 300 m e 900 m | 1,3 |
| Montanhas acima de 900 m | 1,7 |

Quadro 10 – Fator E: Topografia da Região [11]

| Classificação da estrutura | Tipo da estrutura | Efeitos das descargas atmosféricas | Nível de proteção |
|--|---|--|-------------------------|
| Estruturas comuns ¹⁾ | Residências | Perfuração da isolamento de instalações elétricas, incêndio, e danos materiais Danos normalmente limitados a objetos no ponto de impacto ou no caminho do raio | III |
| | Fazendas, estabelecimentos agropecuários | Risco direto de incêndio e tensões de passo perigosas Risco indireto devido à interrupção de energia e risco de vida para animais devido à perda de controles eletrônicos, ventilação, suprimento de alimentação e outros | III ou IV ²⁾ |
| | Teatros, escolas, lojas de departamentos, áreas esportivas e igrejas | Danos às instalações elétricas (por exemplo: iluminação) e possibilidade de pânico Falha do sistema de alarme contra incêndio, causando atraso no socorro | II |
| | Bancos, companhias de seguro, companhias comerciais, e outros | Como acima, além de efeitos indiretos com a perda de comunicações, falhas dos computadores e perda de dados | II |
| | Hospitais, casa de repouso e prisões | Como para escolas, além de efeitos indiretos para pessoas em tratamento intensivo e dificuldade de resgate de pessoas imobilizadas | II |
| | Indústrias | Efeitos indiretos conforme o conteúdo das estruturas, variando de danos pequenos a prejuízos inaceitáveis e perda de produção | III |
| | Museus, locais arqueológicos | Perda de patrimônio cultural insubstituível | II |
| Estruturas com risco confinado | Estações de telecomunicação usinas elétricas Indústrias | Interrupção inaceitável de serviços públicos por breve ou longo período de tempo Risco indireto para as imediações devido a incêndios, e outros com risco de incêndio | I |
| Estruturas com risco para os arredores | Refinarias, postos de combustível, fábricas de fogos, fábricas de munição | Risco de incêndio e explosão para a instalação e seus arredores | I |
| Estruturas com risco para o meio ambiente | Indústrias químicas, usinas nucleares, laboratórios bioquímicos | Risco de incêndio e falhas de operação, com conseqüências perigosas para o local e para o meio ambiente | I |
| <p>¹⁾ ETI (equipamentos de tecnologia da informação) podem ser instalados em todos os tipos de estruturas, inclusive estruturas comuns. É impraticável a proteção total contra danos causados pelos raios dentro destas estruturas; não obstante, devem ser tomadas medidas (conforme a ABNT NBR 5410) de modo a limitar os prejuízos a níveis aceitáveis.</p> <p>²⁾ Estruturas de madeira: nível III; estruturas nível IV. Estruturas contendo produtos agrícolas potencialmente combustíveis (pós de grãos) sujeitos a explosão são considerados com risco para arredores.</p> | | | |

Quadro 11 – Exemplos de Classificação de estruturas [11]