
CAPÍTULO
13

PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

13.1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas causam sérias perturbações nas redes aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além de provocarem danos materiais nas construções atingidas por elas, sem contar os riscos de vida a que as pessoas e animais ficam submetidos.

As descargas atmosféricas induzem surtos de tensão que chegam a centenas de kV nas redes aéreas de transmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica, obrigando a utilização de cabos-guarda ao longo das linhas de tensão mais elevada e pára-raios a resistor não-linear para a proteção de equipamentos elétricos instalados nesses sistemas.

Quando as descargas elétricas entram em contato direto com quaisquer tipos de construção, tais como edificações, tanques metálicos de armazenamento de líquidos isolados da terra, partes estruturais ou não de subestações, são registrados grandes danos materiais que poderiam ser evitados caso essas construções estivessem protegidas adequadamente por Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas – SPDA.

O presente capítulo estudará somente a proteção contra descargas atmosféricas que incidam sobre as construções anteriormente mencionadas, fugindo ao escopo deste livro a abordagem da proteção contra as sobretensões resultantes nas redes urbanas e rurais, o que pode ser visto no livro do autor *Manual de Equipamentos Elétricos* 3.ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

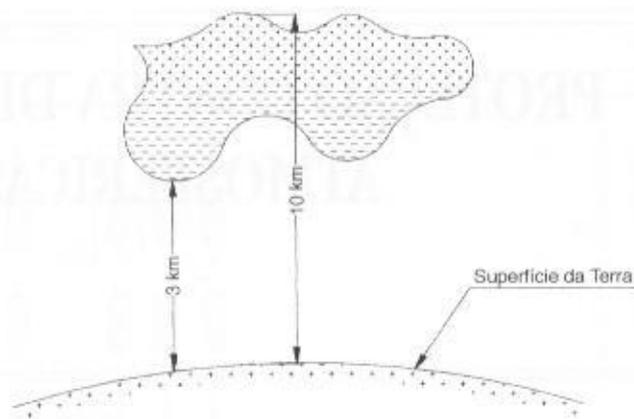
13.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ORIGEM DOS RAIOS

Ao longo dos anos, várias teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno dos raios. Atualmente tem-se como certa que a fricção entre as partículas de água, que formam as nuvens, provocada pelos ventos ascendentes de forte intensidade, dá origem a uma grande quantidade de cargas elétricas. Verifica-se experimentalmente na maioria dos fenômenos atmosféricos que as cargas elétricas positivas ocupam a parte superior da nuvem, enquanto as cargas elétricas negativas se posicionam na sua parte inferior, acarretando conseqüentemente uma intensa migração de cargas positivas na superfície da terra para a área correspondente à localização da nuvem, conforme se pode observar na Figura 13.1. Dessa forma, as nuvens adquirem uma característica bipolar.

Como se pode deduzir pela Figura 13.1, a concentração de cargas elétricas positivas e negativas numa determinada região faz surgir uma diferença de potencial entre a terra e a nuvem. No entanto, o ar apresenta uma determinada rigidez dielétrica, normalmente elevada, que depende de certas condições ambientais. O aumento dessa diferença de potencial, que se denomina gradiente de tensão, poderá atingir um valor que supere a rigidez dielétrica do ar interposto entre a nuvem e a terra, fazendo com que as cargas elétricas migrem na direção da terra, num trajeto tortuoso e normalmente cheio de ramificações, cujo fenômeno é conhecido como descarga piloto. É de aproximadamente 1 kV/mm o valor do gradiente de tensão para o qual a rigidez dielétrica do ar é rompida.

A ionização do caminho seguido pela descarga piloto propicia condições favoráveis de condutibilidade do ar ambiente. Mantendo-se elevado o gradiente de tensão na região entre a nuvem e a terra, surge, em função da aproximação do solo de uma das ramificações da descarga piloto, uma descarga ascendente, constituída de cargas elétricas positivas, denominada descarga ascendente

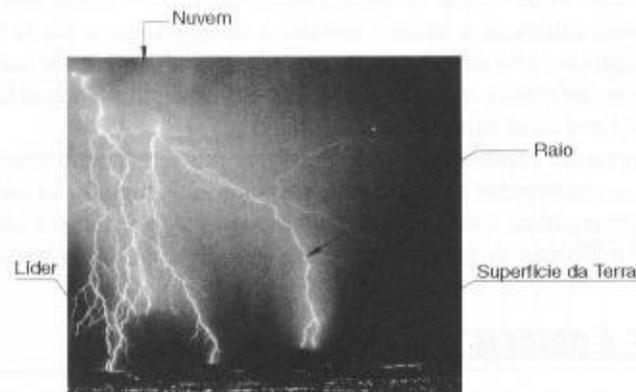
FIGURA 13.1
Distribuição das cargas elétricas das nuvens e do solo



de retorno da terra para a nuvem, originando-se em seguida a descarga principal no sentido da nuvem para terra, de grande intensidade, responsável pelo fenômeno conhecido como trovão, que é o deslocamento da massa de ar circundante ao caminhar do raio, em função da elevação de temperatura e, conseqüentemente, do aumento de volume.

Se as nuvens acumulam uma grande quantidade de cargas elétricas que não foram neutralizadas pela descarga principal inicia-se as chamadas descargas reflexas ou múltiplas cujas características são semelhantes à descarga principal. A Figura 13.2 mostra uma fotografia de uma descarga atmosférica, fenômeno característico de descargas múltiplas. As descargas reflexas podem acontecer por várias vezes após cessada a descarga principal.

FIGURA 13.2
Descargas atmosféricas múltiplas



Já a Figura 13.3 ilustra graficamente a formação das descargas atmosféricas, conforme o fenômeno foi descrito anteriormente.

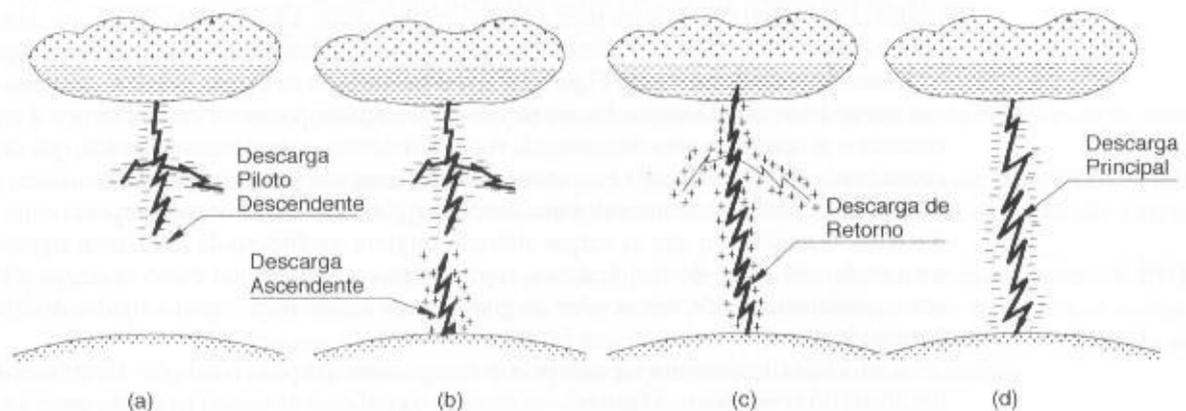
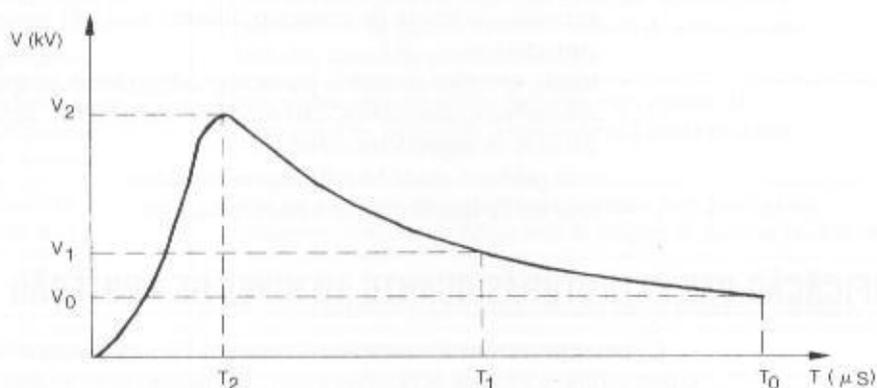


FIGURA 13.3
Formação de uma descarga atmosférica

Tomando-se como base as medições feitas na Estação do Monte San Salvatori, as intensidades das descargas atmosféricas podem ocorrer nas seguintes probabilidades:

- 97% \leq 10 kA;
- 85% \leq 15 kA;
- 50% \leq 30 kA;
- 20% \leq 15 kA;
- 4% \leq 80 kA.

Também ficou comprovado que a corrente de descarga tem uma única polaridade, isto é, uma só direção. Uma onda típica de descarga atmosférica foi determinada para efeito de estudos específicos. A Figura 13.4 mostra a conformação dessa onda em função do tempo.



A onda atinge o seu valor máximo de tensão V_2 num tempo T_2 , compreendido entre 1 e 10 μs . Já o valor médio V_1 , correspondente ao valor médio da cauda da onda, é atingido num intervalo de tempo T_1 de 20 a 50 μs , caindo para $V \cong 0$ ao final de T_0 no intervalo de 100 a 200 μs . A onda de tensão característica foi normalizada para valores de $T_1 = 50 \mu\text{s}$ e $T_2 = 1,5 \mu\text{s}$, normalmente conhecida como onda de $1,2 \times 50 \mu\text{s}$. Já a onda característica da corrente de descarga foi normalizada para $T_1 = 20 \mu\text{s}$ e $T_1 = 8 \mu\text{s}$, também conhecida normalmente como onda de $8 \times 20 \mu\text{s}$.

O conhecimento da forma da onda e dos seus valores típicos de tensão e tempo, além dos percentuais de sua ocorrência, possibilita os estudos destinados ao dimensionamento dos pára-raios de proteção contra sobretensões nas linhas e redes elétricas e dos pára-raios de haste destinados à proteção de construções prediais e instalações em geral.

13.3 ORIENTAÇÕES PARA PROTEÇÃO DO INDIVÍDUO

Durante as tempestades, na maioria das vezes, as pessoas se tomam de pavor na presença das descargas atmosféricas, procurando proteção em locais muitas vezes impróprios sob o ponto de vista de segurança. A seguir será resumidamente analisada a segurança das pessoas em diferentes situações em que podem encontrar-se durante as tempestades.

- as pessoas devem retirar-se da água, seja praia ou barragens, pois no caso de descargas atmosféricas podem surgir no espelho d'água quedas de tensão acentuadas capazes de acidentar o indivíduo, notadamente se este estiver em posição de nado;
- ao sair da água não se deve ficar andando ou deitado na praia; procurar sempre um abrigo que possa oferecer a melhor segurança;
- se o indivíduo estiver no interior de um pequeno barco ou jangada, por exemplo, praticando pescaria, deve recolher a vara de pesca, colocando-a no interior do barco, procurando deitar-se ou abaixar-se; se for possível desembarcar com segurança, que o faça, identificando logo um local mais seguro;
- durante partidas de futebol de várzea, o chamado futebol de poeira, é conveniente interromper a partida e procurar abrigo;
- nas quadras de esporte abertas ou campos de futebol em que não há nenhuma forma de proteção contra descargas atmosféricas, as pessoas devem proteger-se sob as arquibancadas,

inclusive os atletas; de quando em vez a imprensa televisiva registra e relata ocorrências de raios atingindo atletas em pleno jogo;

- evitar permanecer em picos de morro;
- evitar locais abertos, como estacionamento e área rural;
- os operários devem abandonar o topo das construções durante as tempestades;
- evitar permanecer debaixo de árvores isoladas; é preferível procurar locais com maior número de árvores quando não se encontrar abrigo mais seguro;
- nunca deitar-se debaixo de uma árvore, principalmente com o corpo na posição radial; no caso de uma descarga atingir a árvore, a corrente é injetada no solo no sentido radial, podendo o indivíduo ficar submetido à elevada queda de tensão entre as pontas dos pés e os braços;
- os melhores abrigos que as pessoas normalmente podem encontrar em situações de tempestades são:
 - qualquer estrutura que possua uma proteção contra descargas atmosféricas;
 - grandes estruturas de concreto, mesmo que não possuam proteção contra descargas atmosféricas;
 - túneis, estações de metrô, passarelas subterrâneas ou quaisquer estruturas subterrâneas;
 - automóveis, caminhões, carrocerias e congêneres, desde que devidamente fechados e dotados de superfícies metálicas;
 - vias públicas, onde há edificações elevadas;
 - interior de lanchas ou de navios metálicos.

13.4 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRUTURAS QUANTO AO NÍVEL DE PROTEÇÃO

Como se procurou mostrar anteriormente, as descargas atmosféricas podem danificar seriamente o patrimônio e vitimar as pessoas e animais quando estes se encontram dentro do campo elétrico formado entre a nuvem e o solo e sejam diretamente atingidos.

Mesmo com a instalação de um sistema de pára-raios, há sempre a possibilidade de falha desse sistema, podendo a construção protegida, neste caso, ser atingida por uma descarga atmosférica. A partir dessa premissa, a IEC 1024-1/NBR 5419/01 determina quatro diferentes níveis de proteção, com base nos quais devem ser tomadas decisões de projeto mais ou menos severas. Esses níveis de proteção estão assim definidos:

Nível I: é o nível mais severo quanto à perda de patrimônio. Refere-se às construções protegidas, cuja falha no sistema de pára-raios pode provocar danos às estruturas adjacentes, tais como as indústrias petroquímicas, de materiais explosivos etc.

Nível II: refere-se às construções protegidas, cuja falha no sistema de pára-raios pode ocasionar a perda de bens de estimável valor ou provocar pânico aos presentes, porém sem nenhuma consequência para as construções adjacentes. Enquadram-se neste nível os museus, teatros, estádios, companhias comerciais comuns etc.

Nível III: refere-se às construções de uso comum, tais como os prédios residenciais, lojas de departamento e indústrias de manufaturados simples.

Nível IV: refere-se às construções onde não é rotineira a presença de pessoas. São feitas de material não-inflamável, sendo o produto armazenado nelas de material não-combustível, tais como armazéns de concreto para produtos de construção.

A norma NBR 5419/01 fornece os vários tipos de estruturas e os equivalentes níveis de proteção quanto às descargas atmosféricas, reproduzidos na Tabela 13.1.

13.5 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS – SPDA

Os requisitos básicos para a instalação de um SPDA depende do tipo de estrutura que se quer proteger, conforme será estudado a seguir, indicando-se ao mesmo tempo os principais elementos utilizados num SPDA, conforme mostrado esquematicamente na Figura 13.5, tratando-se de edificações existentes, galpões pré-fabricados etc.

13.5.1 Estruturas Comuns

São assim consideradas as edificações residenciais, comerciais e industriais com exceção das chaminés. Os principais elementos utilizados num SPDA são:

TABELA 13.1

Classificação das estruturas quanto ao nível de proteção

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 morte 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, casas 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 químicos	Risco de incêndio e falhas de operação, com conseqüências perigosas para o local e para o meio ambiente	I

¹ETI (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 NBR 5410) de modo a limitar os prejuízos a níveis aceitáveis.

²Estruturas de madeira: nível III; estruturas nível IV. Estruturas contendo produtos agrícolas potencialmente combustíveis (pós de grãos) sujeitos à explosão são considerados com risco para arredores.

13.5.1.1 Captor

Os captores podem ser considerados naturais e não-naturais.

Os captores naturais são aqueles elementos condutores potencialmente expostos a uma descarga atmosférica. Podem ser tomados como integrante do SPDA e têm como exemplos as estruturas metálicas constituídas por tanques e tubos com espessura mínima da parede de 0,5 mm de aço galvanizado.

Também as coberturas metálicas de galpões industriais são consideradas captores naturais.

Já os captores não-naturais são constituídos de elementos metálicos como uma haste condutora, um cabo horizontal ou um elemento desenhado especialmente para essa função, denominado pára-raios tipo Franklin, formado normalmente por três ou mais pontas de aço inoxidável ou cobre. É também denominado captor de ponta. A Figura 13.6 mostra um captor de quatro pontas.

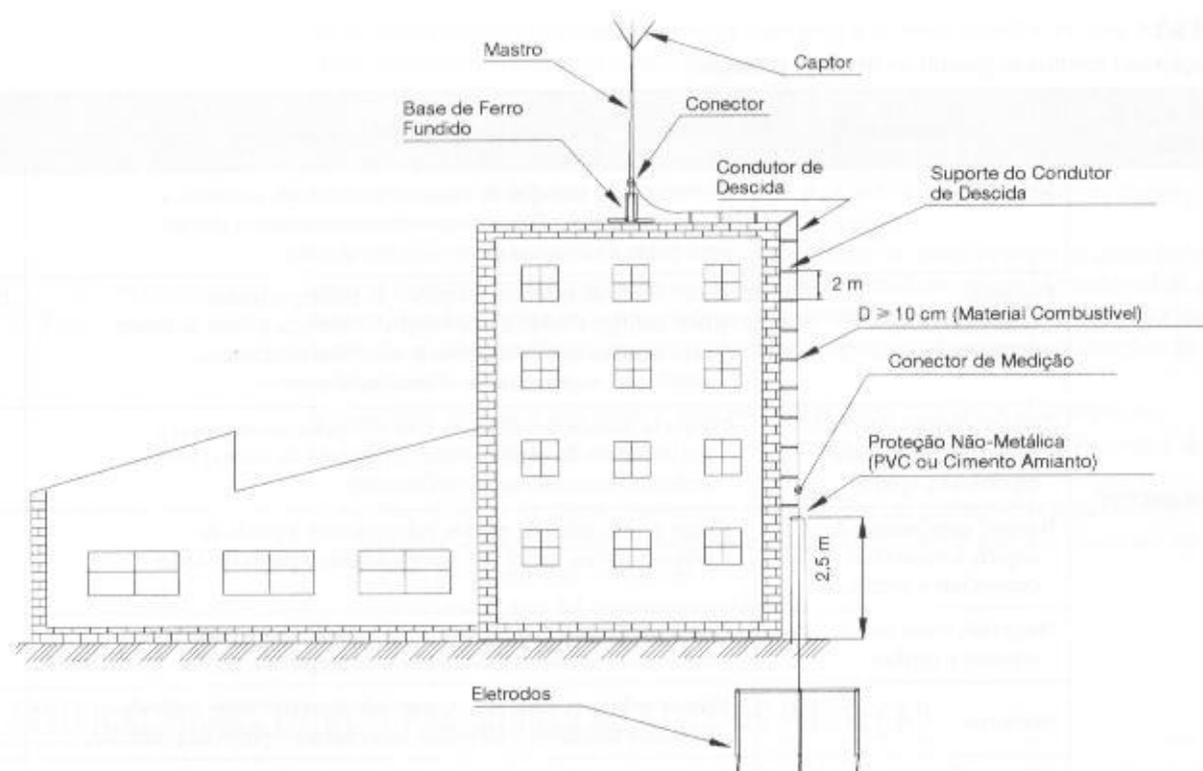
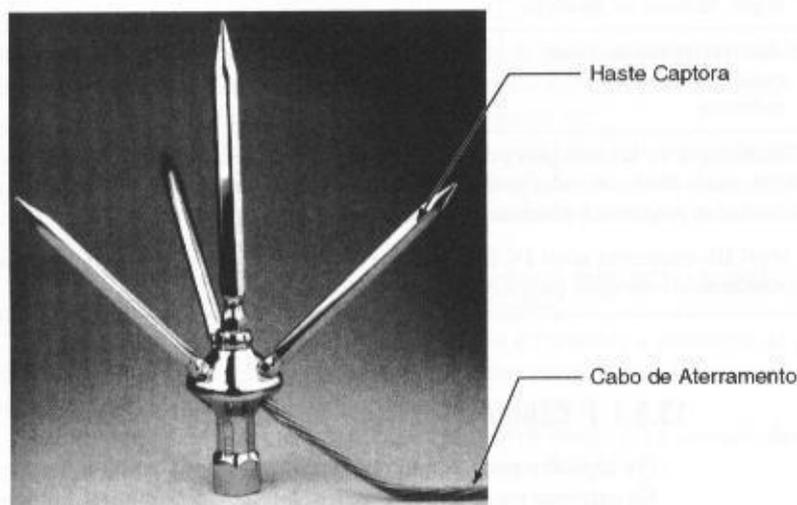


FIGURA 13.5
Elementos de um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

FIGURA 13.6
Captor de descarga atmosférica



13.5.1.2 Mastro ou haste

É o suporte do captor do tipo Franklin, sendo constituído de um tubo de cobre de comprimento entre 3 e 5 m e 55 mm de diâmetro. Deve ser fixado firmemente num isolador de uso exterior. A função do mastro é suportar o captor e servir de condutor metálico.

13.5.1.3 Isolador

É a base de fixação do mastro ou haste. Normalmente é utilizado um isolador fabricado em porcelana vitrificada ou vidro temperado, para um nível de tensão de 10 kV.

13.5.1.4 Condutor de descida

É o condutor metálico que faz a ligação entre o mastro ou captor e o eletrodo de terra, e a sua seção é dada na Tabela 13.2.

TABELA 13.2

Seções mínimas dos condutores de um SPDA

Material	Captor e Anéis Intermediários	Condutor de Descida para Estrutura até 20 m	Condutor de Descida para Estrutura Superior a 20 m	Eletrodo de Aterramento
	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)
Cobre	35	16	35	50
Alumínio	70	25	70	-
Aço galvanizado a quente ou embutido no concreto	50	50	50	80

Constituem-se ainda condutores de descida as estruturas metálicas, tais como postes, torres e similares, bem como as armaduras de aço de estruturas de concreto que têm continuidade até a base das mesmas.

O posicionamento dos condutores de descida deve obedecer os seguintes requisitos:

a) SPDA isolado

- para um ou mais mastros separados é necessário, no mínimo, um condutor de descida para cada mastro (não-condutor);
- para um ou mais condutores horizontais separados, é necessário um condutor de descida na extremidade de cada condutor horizontal;
- para uma rede de condutores, é necessário um condutor de descida para cada estrutura de suporte (não-condutora).

b) SPDA não isolado

- os condutores de descida não-naturais devem ser distribuídos ao longo do perímetro do volume a proteger, obedecendo os afastamentos máximos previstos na Tabela 13.3, devendo-se adotar, no mínimo, dois condutores de descida;
- os condutores de descida não-naturais devem ser interligados a condutores horizontais formando anéis a cada 20 m de altura, sendo o primeiro anel constituído dos condutores de aterramento, podendo-se alternativamente adotar condutores radiais, em ambos os casos, enterrados a uma profundidade mínima de 50 cm;
- os condutores de descida devem ser instalados a uma distância mínima de 50 cm de portas, janelas e outras aberturas;
- os condutores de descida podem ser instalados na superfície ou embutidos se a parede for de material não-inflamável;
- os condutores de descida podem ser instalados na superfície se a parede for de material inflamável e a elevação de temperatura decorrente da passagem da corrente elétrica não resultar em risco para o material da referida parede;

TABELA 13.3

Espaçamento médio dos condutores de descida não-naturais

Nível de Proteção	Espaçamento (m)
I	10
II	15
III	20
IV	25

- os suportes metálicos dos condutores de descida não devem estar em contato com a parede de material inflamável cuja elevação de temperatura decorrente da passagem da corrente elétrica resultar em risco para o material da referida parede, devendo-se, no entanto, manter uma distância de 10 cm entre o condutor de descida e o volume a proteger;
- sempre que possível deve-se instalar um condutor de descida em cada canto da estrutura;
- recomenda-se que os usuários evitem utilizar equipamentos eletrônicos sensíveis próximo aos condutores de descida;
- os condutores de descida não devem ser instalados no interior de calhas ou tubos de águas pluviais, a fim de evitar corrosão, mesmo que o condutor seja isolado;
- os condutores de descida externos devem ser protegidos contra danos mecânicos até, no mínimo, 2,5 m acima do nível do solo. A proteção deve ser feita por eletroduto rígido de PVC ou eletroduto rígido metálico. Quando a proteção for metálica o condutor de descida deve ser conectado em ambas as extremidades do eletroduto.

De acordo com a NBR 5419/01 – Proteção de Edificações contra Descargas Atmosféricas, os condutores de descida podem ser do tipo não-natural e natural.

a) Condutores de descida não-naturais

São aqueles constituídos de condutores metálicos de cobre comercial de condutividade mínima 98% para o tipo recozido, ou alumínio, apropriado para utilização como condutor elétrico. Devem obedecer os seguintes requisitos:

- os condutores de descida devem ser retilíneos e verticais, de modo a fazer o trajeto o mais curto possível;
- as emendas dos condutores de descida devem ser feitas preferencialmente com solda isotérmica, podendo-se empregar também conectores à compressão, rebites ou parafusos;

b) Condutores de descida naturais

São aqueles constituídos de elementos próprios da estrutura ou que não se enquadram na condição de condutores naturais, mas que devem obedecer as seguintes prescrições:

- os pilares metálicos de estruturas podem ser empregados como condutores de descida, desde que apresentem continuidade elétrica.
- as instalações metálicas das estruturas com comprovada continuidade elétrica podem ser utilizadas como condutores de descida naturais, mesmo que revestidos por material isolante, respeitando-se as seções mínimas dos condutores de descida definidas na Tabela 13.2;
- as armações de aço interligadas às estruturas de concreto armado podem ser utilizadas como condutores de descida, desde que pelo menos 50% dos cruzamentos das barras verticais com as horizontais sejam firmemente amarrados com arame torcido, e as barras verticais sejam soldadas ou sobrepostas por, no mínimo, 20 vezes seu diâmetro e firmemente amarradas com arame torcido;
- podem ser embutidos na estrutura condutores de descida específicos, com continuidade elétrica assegurada por solda ou por conexão mecânica tipo aparafusado ou à compressão, modelo cunha ou equivalente interligados à armação;
- pode-se utilizar também a armação de aço embutida em concreto armado pré-fabricado, desde que se assegure a continuidade da conexão;
- não pode ser utilizada como condutor de descida armação de aço de concreto protendido;
- não podem ser utilizadas tubulações metálicas de gás como condutores de descida;
- as tubulações metálicas consideradas permanentes, exceto para uso de gases inflamáveis, podem ser utilizadas como condutores de descida, desde que se comprove a continuidade elétrica da mesma;
- nas edificações existentes de concreto armado poderá ser utilizada a armadura de ferro do concreto armado, desde que comprovado a continuidade elétrica e a resistência elétrica medida seja inferior a 1Ω ;
- nas edificações existentes de concreto armado podem ser utilizados como descida condutores externos, interligados a condutores horizontais, dispostos em anéis a cada 20 m de espaçamento.

13.5.1.5 Eletrodo de terra

São elementos metálicos instalados vertical ou horizontalmente e responsáveis pela dispersão da corrente elétrica de descarga no solo.

O condutor de descida deve ser conectado na sua extremidade inferior aos eletrodos de terra, cujo valor da resistência de aterramento não deverá ser superior a 10Ω para instalações em geral, e 1Ω para edificações destinadas a materiais explosivos ou facilmente inflamáveis. O arranjo e as dimensões do sistema de aterramento devem favorecer a dispersão das correntes de descarga atmosférica para a terra sem causar sobretensões perigosas. Podem ser utilizados como eletrodo de aterramento os seguintes elementos:

- condutores em anel;
- hastes verticais;
- condutores horizontais radiais;
- armações de aço das fundações.

O dimensionamento e instalação dos eletrodos devem atender às seguintes prescrições:

a) Eletrodos de aterramento naturais

São constituídos pelas armaduras de aço embutidas nas fundações das estruturas, satisfazendo as seguintes prescrições:

- as armações de aço embutidas nas fundações das estruturas de concreto armado podem ser utilizadas como eletrodo de aterramento, desde que sejam amarradas com arame torcido em cerca de 50% de seus cruzamentos;
- as barras horizontais das armações de aço das fundações utilizadas como condutor de aterramento devem ser soldadas ou sobrepostas por, no mínimo, 20 vezes o seu diâmetro e firmemente amarradas com arame torcido;
- pode-se utilizar como acréscimo às armações de aço das fundações uma barra de aço de construção com diâmetro mínimo de 10 mm, ou uma fita de aço de 25×4 mm disposta com a largura na posição vertical, formando um anel em todo o perímetro da estrutura;
- as armaduras de aço das fundações devem ser interligadas com as armaduras de aço dos pilares da estrutura, utilizadas como condutores de descida naturais, devendo-se assegurar continuidade elétrica entre as armaduras referidas;
- a camada de concreto que deve envolver os eletrodos anteriormente referidos é de, no mínimo, 5 cm;
- se forem utilizadas como condutores de descida as armações verticais de aço da estrutura, estas devem ser conectadas às barras ou eletrodos horizontais das fundações utilizadas como eletrodos de aterramento, assegurando-se perfeita continuidade.

a) Eletrodos de aterramento não-naturais

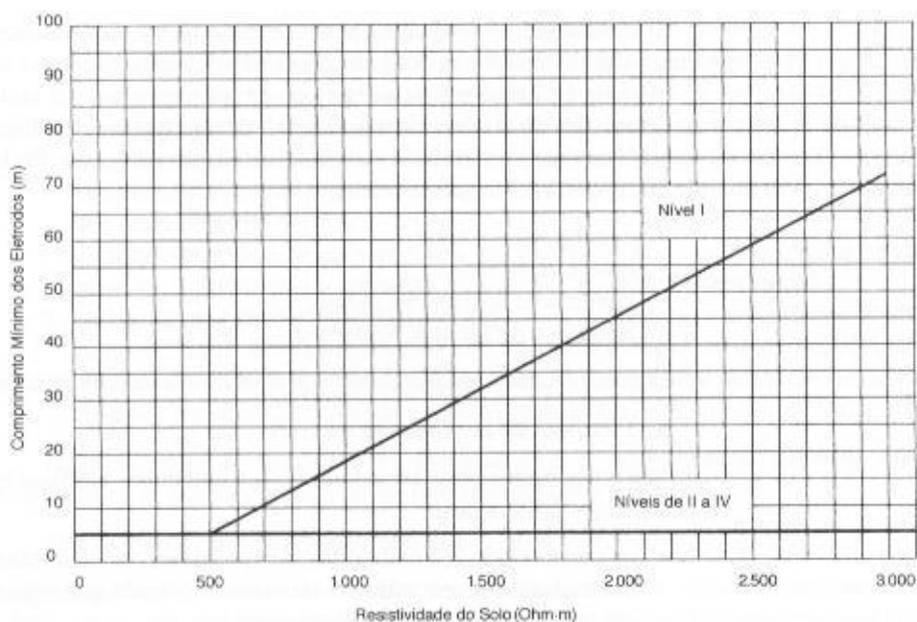
- os eletrodos de aterramento não-naturais devem ser instalados a uma distância de 1,0 m das fundações da estrutura;
- os condutores de aterramento formados de condutores em anel, ou condutores horizontais radiais, devem ser instalados a uma profundidade mínima de 50 cm;
- os eletrodos verticais devem ser distribuídos uniformemente no perímetro da estrutura, espaçados entre si no valor igual ou superior a sua profundidade de cravação no solo;
- de preferência, devem ser instalados vários eletrodos regularmente distribuídos, cujos comprimentos são conhecidos através da Figura 13.7 em função do nível de proteção que se deseja para a estrutura e da resistividade do solo;
- cada condutor de descida deve ser conectado, no mínimo, a um eletrodo distinto, radial ou vertical, devendo-se utilizar, no mínimo, dois eletrodos.

13.5.1.6 Ligações equipotenciais

O SPDA deve ser conectado com os demais sistemas de aterramento, ou seja, com as massas do sistema elétrico e com os equipamentos de tecnologia da informação, devendo obedecer as seguintes prescrições básicas:

- os condutores de ligação equipotencial devem ser conectados a uma barra de ligação equipotencial instalada no subsolo ou próxima ao nível do solo, de forma a se ter fácil acesso;
- em grandes estruturas pode ser instalada mais de uma barra de ligação equipotencial devidamente interligada.
- a cada intervalo não superior a 20 m deve existir uma ligação equipotencial para estruturas com mais de 20 m de altura;

FIGURA 13.7
Comprimento mínimo dos
eletrodos de aterramento



- as barras de ligação equipotencial devem conectadas ao anel horizontal que interligam os condutores de descida;
- as seções mínimas dos condutores equipotenciais que devem suportar toda a corrente de descarga atmosférica são estabelecidas na Tabela 13.2;
- todos os condutores não-vivos dos sistemas elétricos e equipamentos de tecnologia da informação devem ser direta ou indiretamente conectados à ligação equipotencial;
- as luvas isolantes inseridas nas canalizações de gás ou de água devem ser curto-circuitadas;
- numa mesma edificação deve-se projetar um só sistema de aterramento no qual através de ligações equipotenciais se conectariam todas as partes da instalação que obrigatoriamente deveriam ser conectados à terra. A Figura 13.8 mostra a forma pela qual são interconectadas todas as partes não condutivas da instalação, tais como tubulação metálica de água, condutor de aterramento, armações metálicas diversas como bandejas, prateleiras, painéis

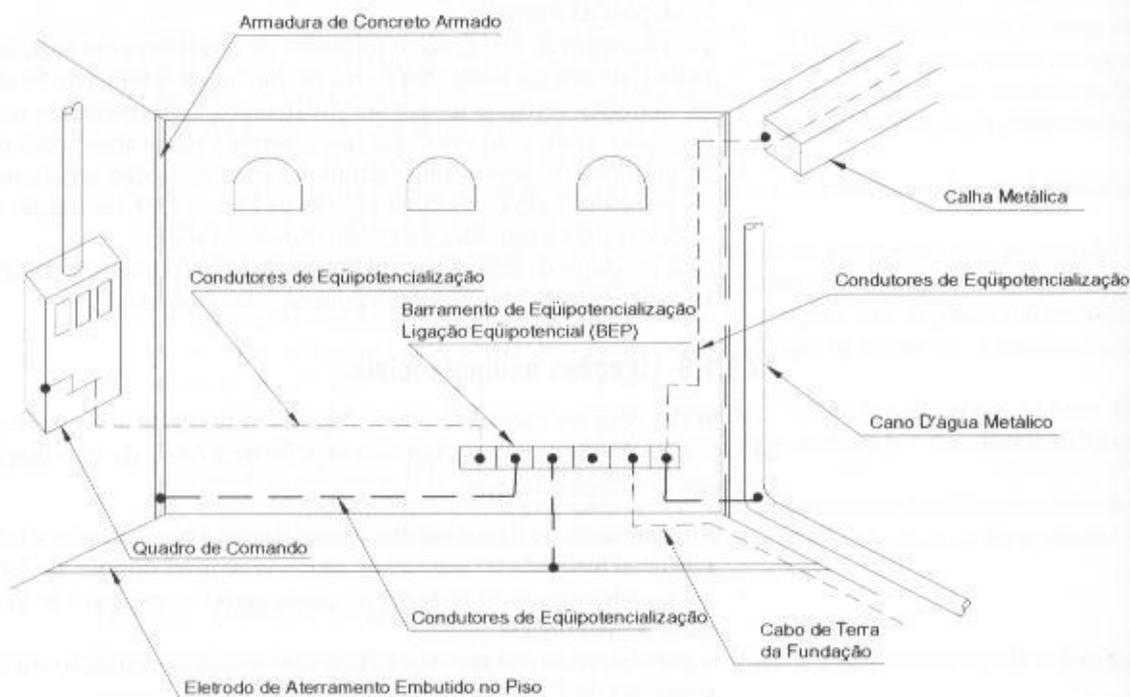


FIGURA 13.8
Ligações equipotenciais

etc. A conexão da tubulação metálica de gás com o sistema de aterramento deve ser definida pelas normas da concessionária de gás local.

13.5.1.7 Conexão de medição

É assim denominada a conexão desmontável destinada a permitir a medição da resistência de aterramento. Deve ser instalada a 2,5 m ou mais acima do nível do solo, nos condutores de descida externos.

13.5.1.8 Proximidades do SPDA com outras estruturas

Se um SPDA qualquer está adjacente a uma estrutura constituída de massas, condutores de um sistema elétrico e instalações metálicas, entre as quais o SPDA, e não for possível estabelecer uma ligação equipotencial para evitar um centelhamento perigoso, deve-se assegurar uma distância de segurança igual ou superior ao valor dado pela Equação (13.1).

$$D = K_i \times \frac{K_c}{K_m} \times L_{cd} \quad (13.1)$$

K_i – depende do nível de proteção admitido e seu valor é encontrado na Tabela 13.4;

K_c – depende da configuração dimensional:

$K_c = 1$ para configuração unidimensional;

$K_c = 0,66$ para configuração bidimensional;

$K_c = 0,44$ para configuração tridimensional.

É bom salientar que um condutor de descida conectado a um eletrodo de terra é considerado uma configuração unidimensional. Já uma gaiola de Faraday, cujos condutores de descida são conectados aos respectivos eletrodos de terra em torno de uma estrutura, é considerada uma configuração tridimensional.

K_m – depende do material de construção e seu valor é encontrado na Tabela (13.4);

L_{cd} – comprimento do condutor de descida, em m, compreendido entre o ponto em que se considera a proximidade e o ponto mais próximo da ligação equipotencial.

TABELA 13.4

Valores de K_i e K_m

Nível de Proteção	K_i	Material	K_m
I	0,100	Ar	1,00
II	0,075	Sólido	0,50
III	0,050		
IV	0,050		

Deve-se entender que a Equação (13.1) somente se aplica quando a corrente do condutor indutor pode ser estabelecida em função da corrente da descarga atmosférica.

As tubulações de gás devem situar-se pelo menos a 2 m dos condutores de descida. Caso contrário, essas tubulações devem estar interligadas a cada 20 m de sua altura por meio de ligação equipotencial.

13.5.2 Estruturas Especiais

São consideradas estruturas especiais:

13.5.2.1 Chaminés construídas em chapa de aço

- as chaminés construídas em chapa de aço de, no mínimo, 4 mm de espessura não necessitam captos e condutores de descida;

- se a chaminé for adjacente a uma estrutura ou esteja situada dentro da distância de 2 m, deve ser interligada ao SPDA dessa estrutura.

13.5.2.2 Chaminés com altura superior a 20 m e seção transversal no topo acima de 0,30 m²

- os captosres devem ser de cobre maciço ou de aço inoxidável;
- os captosres devem ser instalados no topo da chaminé cilíndrica a intervalos máximos de 2,5 m ao longo do seu perímetro;
- os captosres devem estar acima do topo da chaminé ter altura de, no mínimo, 50 cm e, no máximo, 80 cm;
- o diâmetro mínimo dos captosres deve ser de 15 mm;
- os captosres devem ser interligados na sua extremidade inferior por um condutor formando um anel fechado em torno da chaminé;
- não é necessária a utilização de captosres em chaminés em cujo topo existe uma cobertura de aço de no mínimo 0,5 mm;
- devem ser instalados, no mínimo, dois condutores de descida de cobre instalados diametralmente opostos;
- os condutores de descida devem ser interligados por um anel, situado, no máximo, a 3,5 m da base da chaminé, de preferência sob o solo e a intervalos iguais de cerca de 20 m;
- em chaminés de seção quadrada ou retangular, os captosres não devem estar a mais de 60 cm dos cantos e espaçados, no máximo, em 2,5 m ao longo do perímetro.
- os condutores de descida devem ser protegidos contra danos através de eletroduto rígido de PVC ou eletroduto rígido metálico, neste caso, interligado nas duas extremidades com os respectivos condutores de descida;
- os condutores de descida devem ser fixados a intervalos máximos de 2 m;
- os condutores horizontais devem ser fixados a intervalos máximos de 60 cm.

13.5.2.2.1 Chaminés de concreto armado

- as armações de aço interligadas das estruturas de concreto armado podem ser utilizadas como condutores de descida, desde que pelo menos 50% dos cruzamentos das barras verticais com as horizontais sejam firmemente amarrados com arame torcido, e as barras verticais sejam soldadas ou sobrepostas por, no mínimo, 20 vezes seu diâmetro e firmemente amarradas com arame torcido;
- os condutores de descida devem ser conectados à armação de aço do concreto no topo, na base da estrutura, bem como a cada 20 m;
- todas as massas e instalações metálicas incorporadas à chaminé, tais como escadas, plataformas, tubulações e suportes para luz de obstáculo, devem ser conectadas aos condutores de descida na base, no topo e a cada 20 m de altura;
- todas as massas e instalações metálicas situadas a uma distância de até 20 m da base da chaminé devem ser interligadas ao sistema de aterramento da chaminé.

13.5.2.3 Estruturas contendo líquidos ou gases inflamáveis

- o volume de proteção dos captosres deve ser determinado pelo método eletrogeométrico adotando-se como raio da esfera fictícia uma distância de 20 m;
- a distância mínima entre um mastro ou cabo aéreo e a estrutura a proteger não deve ser inferior a 2 m.

13.6 MÉTODO DE AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DO NÍVEL DE PROTEÇÃO

As prescrições para instalação de pára-raios dependem do tipo e dos riscos a que cada estrutura está submetida.

13.6.1 Instalações de Pára-raios em Estruturas Normais

São assim consideradas as edificações que não se enquadram dentro da NBR 5419/01 como estruturas especiais. Isto é, são as edificações residenciais, comerciais e industriais do tipo convencional.

O método de seleção do nível de proteção adequado a uma determinada estrutura deve levar inicialmente em conta se há ou não exigência de instalação da referida proteção em função dos riscos inerentes. Para alguns locais é considerado indispensável a instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), ou seja:

- locais de grande afluência de pessoas;
- locais onde se prestam serviços públicos essenciais, tais como subestações de potência das concessionárias de energia elétrica, edifícios de estações de telecomunicação etc;
- áreas de elevada densidade de descargas atmosféricas;
- estruturas de valor histórico ou cultural;
- estruturas isoladas com altura superior a 25 m;
- locais em que seus ocupantes desejam sentir-se seguros, mesmo que o risco de descarga atmosférica seja desprezível.

A seleção do nível de proteção de um SPDA pode ser feita de acordo com as seguintes prescrições, estabelecidas na norma BS 6651 (norma inglesa) e inserida na NBR 5419/01.

a) Avaliação do risco de exposição

A densidade de descargas atmosféricas que atingem a terra N_{da} é o número de raios por km² por ano que atinge o solo. O seu valor é de:

$$N_{da} = 0,04 \times N_i^{1,25} \text{ (km}^2\text{/ano)} \quad (13.2)$$

N_i – índice cerâmico, ou seja, número de dias de trovoada por ano.

O valor de N_i pode ser conhecido através de instituições oficiais ou não que operam na área do projeto, tais como instalações aeronáuticas, serviços de meteorologia, institutos de pesquisa relacionados etc. Na falta de informações dessas organizações, pode-se utilizar o mapa das curvas isocerâmicas mostradas na Figura 13.9.

b) Área de exposição equivalente

Corresponde à área do plano da estrutura prolongada em todas as direções, considerando a altura da mesma. Os limites da área de exposição equivalente estão afastados do perímetro da estrutura por uma distância correspondente à altura da estrutura no ponto considerado. Logo, o valor da área de exposição equivalente é determinado pela Equação (13.3).

$$A_e = L \times W + 2 \times L \times H + 2 \times W \times H + \pi \times H^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (13.3)$$

L – comprimento da estrutura, em m;

W – largura da estrutura, em m;

H – altura da estrutura, em m.

A Figura 13.10 mostra a área de exposição equivalente de uma estrutura com as definições geométricas necessárias.

c) Freqüência média anual previsível de descargas atmosféricas sobre uma estrutura

É dada pela Equação (13.4).

$$N_{pr} = N_{da} \times A_e \times 10^{-6} \text{ (por ano)} \quad (13.4)$$

N_{pr} – número provável de raios que possa atingir a construção, por ano.

d) Freqüência admissível de danos

A comunidade técnica internacional reconhece os limites a seguir indicados como a freqüência admissível de danos.

- riscos maiores que 10^{-3} , ou seja, um dano ocorrido na estrutura para 1.000 descargas por ano; valor inaceitável;

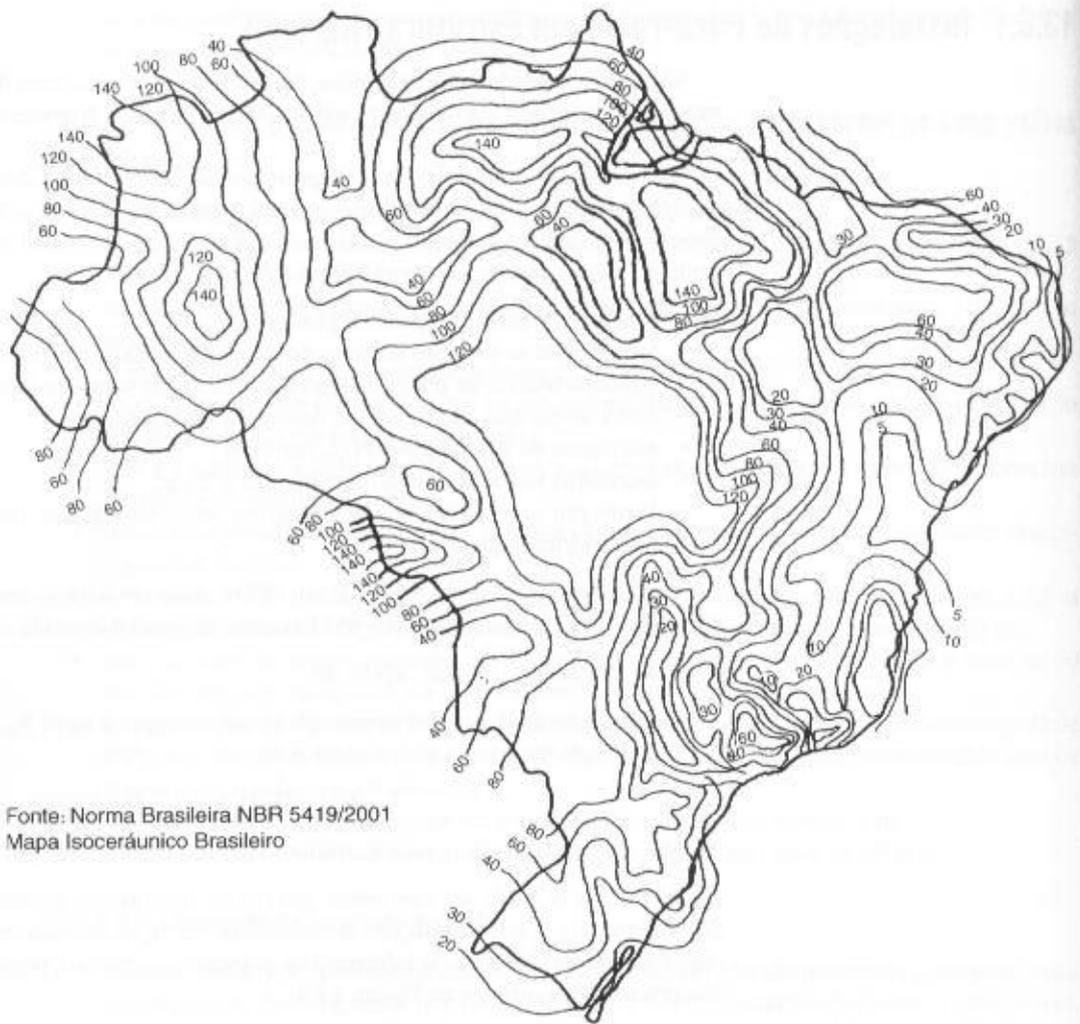


FIGURA 13.9
Curvas isocerànicas do
território brasileiro

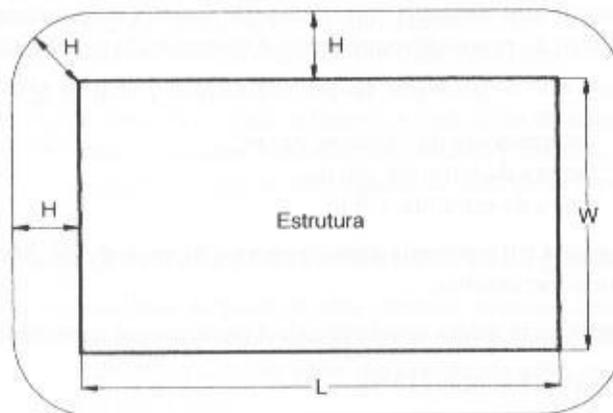


FIGURA 13.10
Área equivalente de atração das
descargas atmosféricas

- riscos menores que 10^{-5} , ou seja, um dano ocorrido na estrutura para 100.000 descargas por ano: valor aceitável.

e) Avaliação geral do risco

Antes de se tomar uma decisão aleatória sobre a necessidade de dotar determinada construção de uma proteção adequada contra a incidência de raios, é prudente que se calcule a probabilidade

ponderada que permitirá uma decisão sobre a importância técnica do empreendimento. Esta avaliação é feita aplicando-se os fatores de ponderação dados na Equação (13.4).

$$P_0 = A \times B \times C \times D \times E \times N_p \quad (13.5)$$

A, B, C, D, E, F – fatores de ponderação da Tabela 13.5.

A necessidade ou não de se dotar a estrutura de um SPDA é dada na Tabela 13.6.

TABELA 13.5

Fatores de ponderação

Tipo de Ocupação	A	Material de Construção	B	Conteúdo	C	Localização	D	Tipografia	E
Habitação	0,3	Construções de cobertura não-metálica	0,2	Sem valor patrimonial ou histórico	0,3	Áreas circundadas por árvores ou estruturas de qualquer natureza	0,4	Planícies	0,3
Habitação com antena externa	0,7	Construções de concreto e cobertura não-metálica	0,4	Sensível a danos	0,8	Áreas semi-isoladas	1,0	Colinas	1,0
Construções Industriais	1,0	Construções de metal ou concreto e cobertura metálica	0,8	Subestações, centrais telefônicas, instalações de gás, estações de rádio e TV	1,0	Áreas isoladas	2,0	Montanhas com altura entre 300 a 900 m	1,3
Construções destinadas a hotéis, motéis, salas comerciais	1,2	Construções de alvenaria	1,0	Museus e monumentos e construções de mesma natureza	1,3			Montanhas com altura acima de 900 m	1,7
Construções destinadas a shopping centers, museus, centros esportivos	1,3	Construções de madeira	1,4	Escolas, hospitais e similares	1,7				
Escolas, hospitais e similares	1,7	Construções de alvenaria ou madeira com cobertura metálica	1,7						
		Construções com cobertura de palha e similares	2,0						

TABELA 13.6

Probabilidade ponderada

Probabilidade Ponderada	Proteção Desejada
$P_0 \leq 10^{-5}$	A estrutura dispensa o SPDA
$10^{-3} > P_0 > 10^{-5}$	A instalação do SPDA deve ser feita somente por conveniência do usuário
$P_0 \geq 10^{-3}$	Obrigatório o uso do SPDA

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (13.1)

Uma planta industrial do ramo metalúrgico simples, com área coberta plana de $50 \times 30 \text{ m}^2$ e altura de 8 m, localizada em terreno plano de pouca arborização, é constituída de concreto armado com cobertura metálica, não aterrada. Determinar a necessidade de proteção contra descargas atmosféricas, sabendo-se que a indústria está localizada no Distrito Industrial de Fortaleza – Ceará.

- Densidade de descargas atmosféricas

$$N_{da} = 0,04 \times N_i^{1,25} = 0,04 \times 20^{1,25} = 1,69 \text{ descarga/km}^2$$

$N_i = 20$ dias de trovoadas por ano (veja no mapa da Figura 13.9 a linha isocerâmica próxima à praias de Fortaleza, no estado do Ceará).

- Área de exposição equivalente

$$A_e = L \times W + 2 \times L \times H + 2 \times W \times H + \pi \times H^2$$

$$A_e = 50 \times 30 + 2 \times 50 \times 8 + 2 \times 30 \times 8 + \pi \times 8^2 = 2.981 \text{ m}^2$$

- Frequência média anual de descarga atmosférica

$$N_{pr} = N_{da} \times A_e \times 10^{-6} = 1,69 \times 2.981 \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-3} \text{ descargas/ano}$$

Ou seja, a estrutura será atingida por uma descarga atmosférica a cada 200 anos: $\frac{1}{5 \times 10^{-3}} = 200 \text{ anos}$.

- Avaliação geral do risco

$$P_o = A \times B \times C \times D \times E \times N_{pr}$$

$$P_o = A \times B \times C \times D \times E \times N_{pr} = 1,0 \times 0,8 \times 0,3 \times 1,0 \times 0,3 \times 5 \times 10^{-3} = 3,6 \times 10^{-4}$$

Através da Tabela 13.6 pode-se concluir que a instalação de um SPDA deve ser decidida pelo usuário ou por exigência da companhia seguradora.

Se a cobertura metálica da estrutura for constituída em chapa de alumínio com espessura igual ou superior a 0,50 mm, não é necessária a instalação de captos na cobertura. Assim, faz-se necessária apenas a instalação dos condutores de descida conectados na sua extremidade superior à cobertura metálica e na sua extremidade inferior à malha de terra instalada ao longo do perímetro da construção distando um metro da fundação.

13.7 MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Existem basicamente três métodos de proteção contra descargas atmosféricas, ou seja:

13.7.1 Método de Franklin

Consiste em se determinar o volume de proteção propiciado por um cone, cujo ângulo da geratriz com a vertical varia segundo o nível de proteção desejado e para uma determinada altura da construção. A Tabela 13.7 fornece o ângulo máximo de proteção para uma altura da construção não superior a 20 m.

TABELA 13.7

Ângulo de proteção e altura da construção

Nível de Proteção	Altura do Captor (m)				
	0–20	21–30	31–45	46–60	> 60
Ângulo de Proteção (em graus)					
I	25	(A)	(A)	(A)	(B)
II	35	25	(A)	(A)	(B)
III	45	35	25	(A)	(B)
IV	55	45	35	25	(B)

(A) Aplicam-se somente os métodos eletrogeométrico, malha ou gaiola de Faraday.
(B) Aplica-se somente o método da gaiola de Faraday.

Utilizando a propriedade das pontas metálicas de propiciar o escoamento das cargas elétricas para a atmosfera, chamado *poder das pontas*, Franklin concebeu e instalou um dispositivo que desempenha esta função, denominado pára-raios.

Fica claro que as descargas elétricas dentro de uma determinada zona são mais facilmente escoadas pelo pára-raios do que por uma estrutura de concreto, por exemplo. A Figura 13.11 mostra o princípio fundamental da atuação de um pára-raios. As cargas elétricas, em vez de irromperem de um ponto qualquer do solo, são conduzidas até as pontas do pára-raios (captor) através de um cabo de excelente condutividade elétrica (cabo de cobre), permitindo, desta forma, que as descargas sejam efetuadas através deste, propiciando a proteção da construção dentro de um determinado raio de atuação.

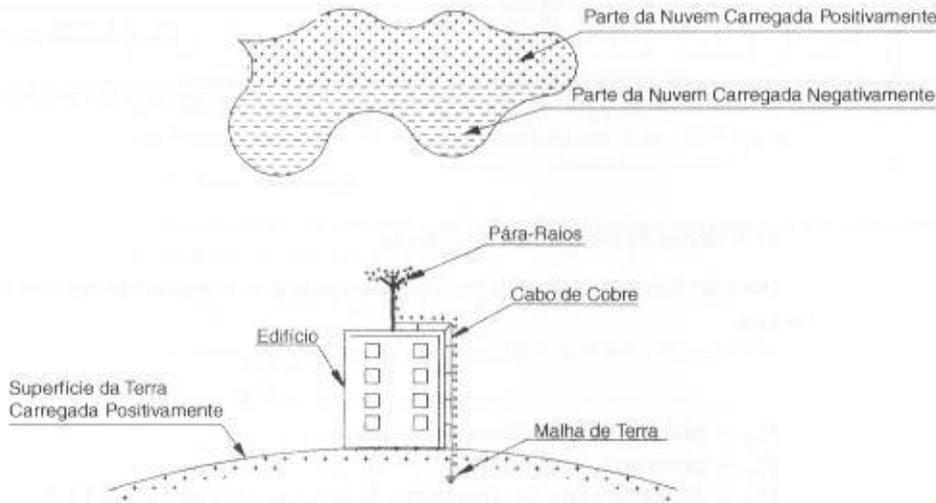


FIGURA 13.11
Ilustração da concentração de cargas elétricas no captor

Já a Tabela 13.7 fornece o ângulo de proteção contra descargas atmosféricas tomando como base diferentes alturas da construção. Por exemplo, num projeto de uma construção predial comercial de 10 andares, ou seja, 30 m de altura aproximadamente, o ângulo de proteção deve ser de 25°, já que se trata de prédio classificado no nível de proteção II, conforme classificação vista na Tabela 13.1.

O método de Franklin é recomendado para aplicação em estruturas muito elevadas e de pouca área horizontal, onde se podem utilizar uma pequena quantidade de captores, o que torna o projeto economicamente interessante.

Os projetos de instalação de pára-raios pelo método de Franklin podem ser elaborados tomando-se a seguinte seqüência de cálculo.

a) Zona de proteção

O pára-raios deve oferecer uma proteção dada por um cone cujo vértice corresponde à extremidade superior do captor e cuja geratriz faz um ângulo de α° com a vertical, propiciando um raio de base do cone de valor dado pela Equação (13.11), conforme se observa na Figura 13.12.

$$R_p = H_c \times \text{tg}\alpha \tag{13.6}$$

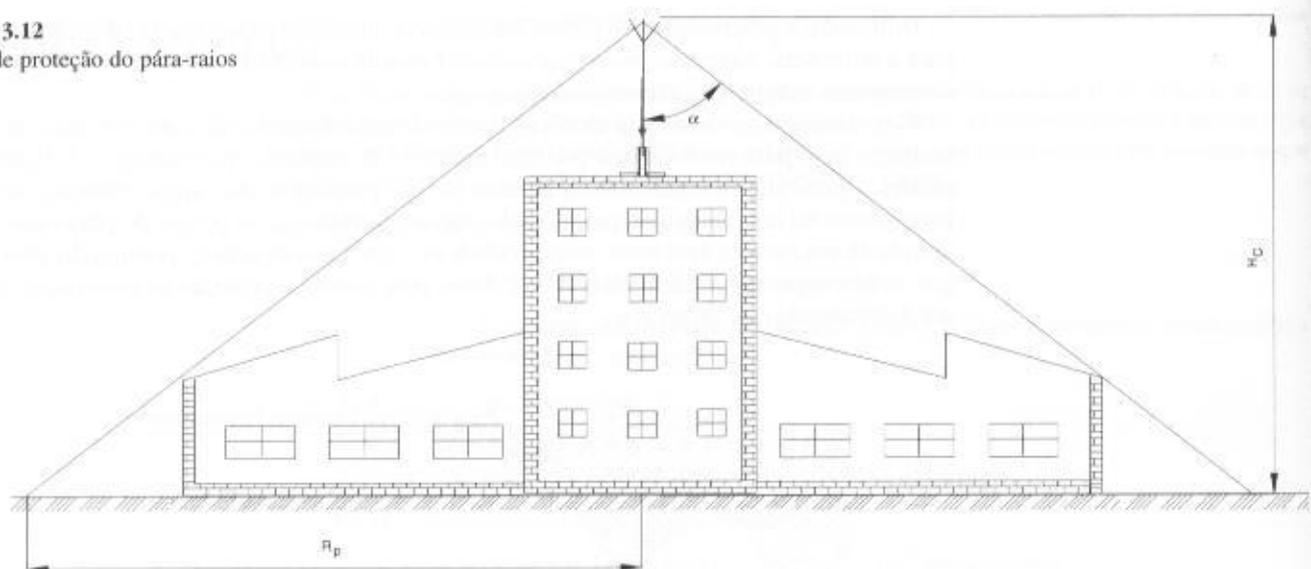
R_p – raio da base do cone de proteção, em m;

H_c – altura da extremidade do captor, em m;

α – ângulo de proteção com a vertical dado na Tabela 13.7. Se houver mais de um captor, pode-se acrescer 10° ao ângulo α .

Deve-se estabelecer uma proteção de borda da parte superior da edificação através de um condutor, compondo a malha de interligação dos captores.

FIGURA 13.12
Ângulo de proteção do pára-raios



b) Número de condutores de descida

Deve ser função do nível de proteção desejado e do afastamento entre os condutores de descida, ou seja:

$$N_{cd} = \frac{P_{co}}{D_{cd}} \quad (13.7)$$

N_{cd} – número dos condutores de descida;

P_{co} – perímetro da construção, em m;

D_{cd} – distância entre os condutores de descida dada na Tabela 13.3.

Os condutores de descida devem ser distribuídos ao longo de todo o perímetro da construção, com um espaçamento máximo em função do nível de proteção desejado dado na Tabela 13.3, não se admitindo um número de descidas inferior a 2.

A Figura 13.13 mostra esquematicamente os condutores de descida de uma construção fabril.

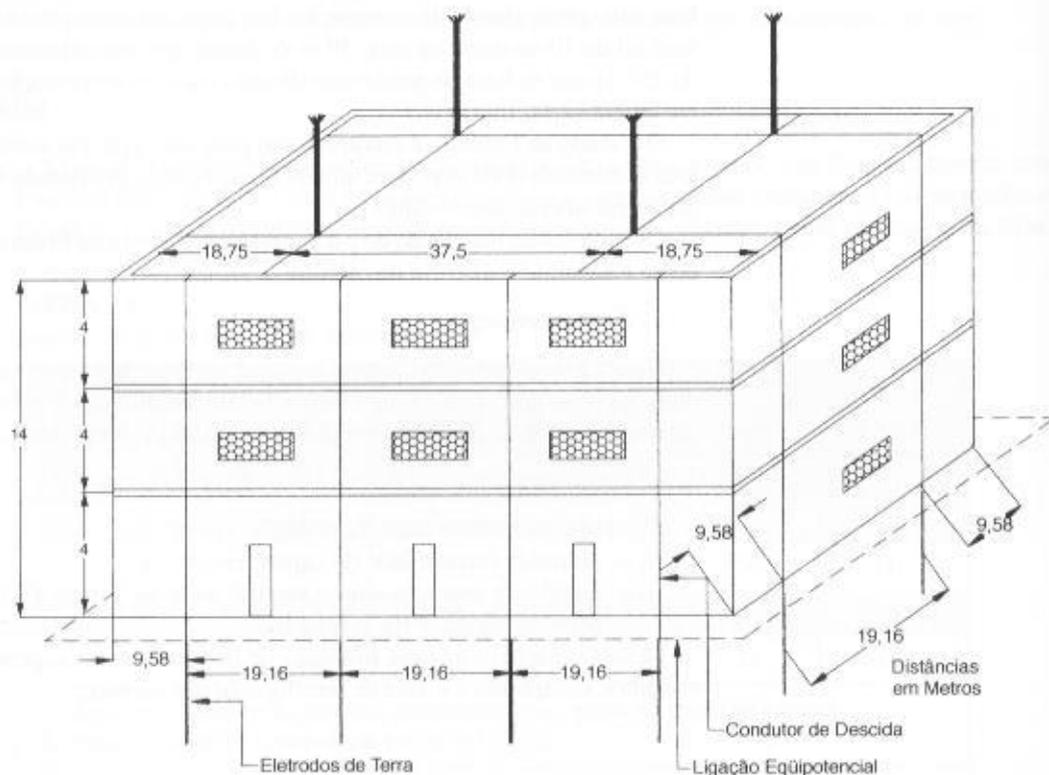


FIGURA 13.13
Elementos para proteção de edifícios contra descargas atmosféricas

c) Seção do condutor

De preferência, devem ser utilizados condutores de cobre nu, principalmente em zonas industriais de elevada poluição ou próximas à orla marítima.

A seção mínima dos condutores é dada em função do tipo do material condutor e da altura da edificação, conforme a Tabela 13.2.

d) Resistência da malha de terra

A resistência da malha de terra não deve ser superior a 10 Ω em qualquer época do ano.

Quando a construção for destinada a materiais explosivos ou inflamáveis, a resistência da malha de terra não deve ser superior a 1 Ω.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (13.2)

Conhecidas as dimensões do prédio da indústria de manufaturado simples representada na Figura 13.13, projetar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. A vista superior da edificação é mostrada nas Figuras 13.14 e 13.15. A resistividade do solo é de 1.000 Ω · m.

a) Zona de proteção

Considerando-se somente dois pára-raios instalados nos pontos A e B indicados nas Figuras 13.14, o raio de proteção de cada um deve ser de:

$$R_{p1} = \sqrt{20^2 + 18,75^2} = 27,4 \text{ m}$$

- Nível de proteção da estrutura: III – $\alpha = 45^\circ$ (Tabela 13.7)

Como há mais de um captor, tem-se:

$$\alpha = 45 + 10 = 55^\circ$$

$$R_{p1} = H_c \times \text{tg}\alpha$$

$$H_c = \frac{R_{p1}}{\text{tg}\alpha} = \frac{27,4}{\text{tg}55} = 19,18 \text{ m}$$

H_c – altura da ponta do captor em relação ao teto, em m.

Considerando o comprimento do mastro igual a 3 m, o suporte do conjunto mastro-captor vale:

$$L_s = H_c - 3 = 19,18 - 3 = 16,18 \text{ m}$$

Como o comprimento do suporte é muito grande, serão considerados quatro pára-raios instalados em conformidade com a Figura 13.15, devendo o raio de proteção de cada um ser de:

$$R_{p2} = \sqrt{10^2 + 18,75^2} = 21,25 \text{ m}$$

$$H_c = \frac{21,25}{\text{tg}\alpha} = \frac{21,25}{\text{tg}55} = 14,87 \text{ m}$$

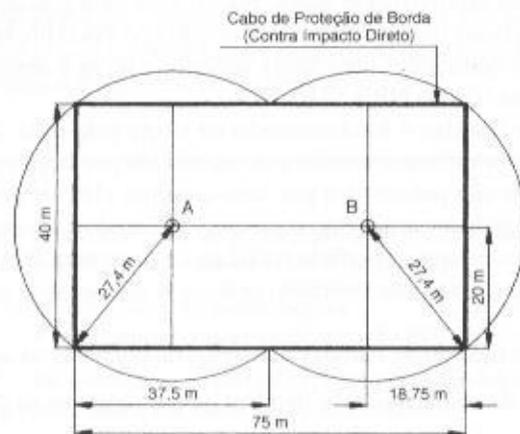


FIGURA 13.14
Vista superior da edificação da Figura 13.13

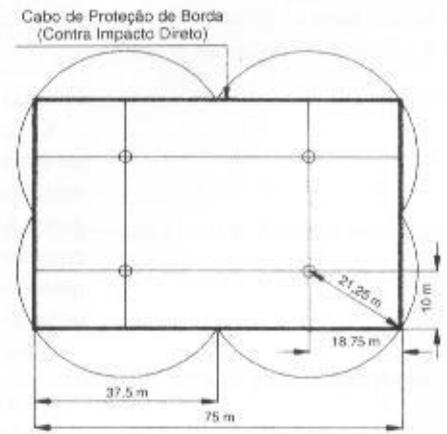


FIGURA 13.15
Vista superior da edificação da Figura 13.13

Logo, o comprimento do suporte é de:

$$L_c = H_c - 3 = 14,87 - 3 = 11,87 \text{ m}$$

O suporte de $L_c = 11,87 \text{ m}$ poderá ser constituído de uma torre treliçada em perfil metálico, fixando-se no seu topo um isolador de vidro temperado ou porcelana vitrificada, isolado para 10 kV.

Pode-se observar, através das Figuras 13.14 e 13.15, que todas as partes da construção estão cobertas pelas áreas de proteção formadas pelos pára-raios.

b) Número de condutores de descida

Pela Equação (13.7), tem-se:

$$D_{cd} = 20 \text{ m (Tabela 13.3 - nível de proteção III)}$$

$$P_{cd} = 2 \times 75 + 2 \times 40 = 230 \text{ m}$$

$$N_{cd} = \frac{P_{cd}}{D_{cd}} = \frac{230}{20} = 11,5 \rightarrow N_{cd} = 12 \text{ condutores}$$

A Figura 13.13 mostra a configuração de instalação dos condutores de descida.

c) Afastamento entre os condutores de descida

$$D_{cd} = \frac{P_{cd}}{N_{cd}} = \frac{230}{12} = 19,16 \text{ m}$$

d) Seção do condutor

A seção do condutor deve ser de $S_c = 16 \text{ mm}^2$ em cabo de cobre, segundo a Tabela 13.2.

d) Número de eletrodos de aterramento

De acordo com a Figura 13.7 o comprimento mínimo dos eletrodos de terra deve ser de $L_e = 5 \text{ m}$. Como no presente caso são 12 condutores de descida, serão finalmente utilizados 12 eletrodos verticais de 3 m cada, conectando-se cada conjunto de eletrodos na extremidade de cada condutor de descida.

13.7.2 Métodos de Faraday

Consiste em envolver a parte superior da construção com uma malha captora de condutores elétricos nus, cuja distância entre eles é função do nível de proteção desejado e dado pela Tabela 13.8 que estabelece a largura do módulo da malha de proteção, sendo que o comprimento do módulo não deve ser superior ao dobro da sua largura, ou seja:

$$L \leq K \times W \quad (13.8)$$

L – comprimento do módulo da malha dada na Tabela 13.8;

W – largura do módulo da malha;

K – fator de multiplicação, normalmente utilizado igual a 1,5.

O método de Faraday, ao contrário do método de Franklin, é indicado, na prática, para edificações com altura relativamente baixa, porém com uma grande área horizontal, nas quais seria necessária uma grande quantidade de captadores do tipo Franklin, tornando o projeto muito oneroso. No entanto, para edificações com altura superior a 60 m é obrigatório o emprego do método de Faraday, de acordo com a NBR 5416/01.

O método de Faraday é fundamentado na teoria pela qual o campo eletromagnético é nulo no interior de uma estrutura metálica ou envolvida por uma superfície metálica ou por malha metálica, quando são percorridas por uma corrente elétrica de qualquer intensidade. A maior proteção que se pode ter utilizando o método de Faraday é construir uma estrutura e envolvê-la completamente com uma superfície metálica de espessura não inferior a 0,50 m, o que obviamente não é uma solução de conteúdo prático, a não ser que a cobertura da edificação seja de telha metálica.

Para aplicar o método de Faraday, é necessário conhecer as seguintes prescrições:

- a abertura da malha é função do nível de proteção que se deseja adotar para uma particular estrutura;
- para se obter o mesmo nível de proteção oferecido pelo método de Franklin, estabelecer a largura mínima do módulo das malhas de proteção, segundo a Tabela 13.8;

TABELA 13.8

Largura do módulo da malha de proteção

Nível de Proteção	Largura do Módulo de Proteção (m)
I	5
II	10
III	10
IV	20

- quanto menor for a abertura da malha protetora, maior a proteção oferecida pelo método de Faraday;
- recomenda-se a instalação de captosres verticais com altura de 50 cm ao longo dos condutores que compõem a malha protetora;
- a distância entre os captosres anteriormente mencionados não deve ser superior a 8 m;
- recomenda-se que os usuários das estruturas protegidas pelo método de Faraday evitem utilizar equipamentos de tecnologia da informação próximos aos condutores de descida;
- o número de descidas pode ser determinado pelo método empregado na Seção 13.5.1.4;
- quando existir qualquer estrutura na cobertura que se projete a mais de 30 cm do plano da malha captora e constituída de materiais não-condutores, tais como chaminés, sistema de exaustão de ar etc., deve ser protegida por um dispositivo de captação conectado à malha captora;
- quando existir estrutura metálica na cobertura não conectada a um sistema aterrado, a estrutura deve ser conectada ao sistema captor, se ocorrer uma das seguintes condições:
 - a altura da estrutura acima do plano da malha captora for superior a 30 cm;
 - a estrutura estiver a uma distância igual ou superior a 50 cm de um dispositivo de captação;
 - a estrutura deve ter uma dimensão mínima na horizontal de 2 m;
 - a estrutura deve ter uma área mínima no plano horizontal de 1 m²;
- o aterramento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas pode ser também executado tanto no interior das fundações de concreto armado da edificação como através de malhas de aterramento não-naturais;
- pode-se usar durante a construção das fundações uma barra de aço galvanizado de seção circular com 8 mm de diâmetro. Alternativamente, pode-se empregar uma fita de aço galvanizado de dimensões 25 × 4 mm;
- deve-se evitar isolar as fundações contra a penetração de umidade, o que provocaria uma elevada resistência de contato com o solo natural, anulando, dessa forma a eficiência do sistema de aterramento.

O método de Faraday tem recebido ultimamente a preferência dos projetistas. É que, pelo método de Franklin, a interligação entre as hastes e os suportes dos captosres pode conduzir a uma malha no topo da construção de dimensões tais que resultam praticamente nas dimensões necessárias à aplicação do método de Faraday.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (13.3)

Considerar o Exemplo de Aplicação (13.2) e dimensionar um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas com base no método de Faraday.

- Dimensões da malha captora
 - Construção com nível de proteção III

De acordo com a Tabela 13.8, a largura do módulo da malha de proteção é de 10 m. Já o seu comprimento pode ser dado pela Equação (13.8), ou seja:

$$L \leq K \times W = 1,5 \times 10 = 15 \text{ m}$$

Logo as dimensões do módulo da malha protetora vale: 10 × 15 m.

- A área da construção vale:

$$S_{\text{con}} = 40 \times 75 \text{ m} = 3.000 \text{ m}^2$$

- b) Número de condutores da malha captora

- Na direção da maior dimensão da construção, segundo a Figura 13.16, o número de condutores da malha captora vale:

$$N_{\text{con}1} = \frac{75}{15} + 1 = 6 \rightarrow N_{\text{con}1} = 6 \text{ condutores}$$

- Na direção da menor dimensão da construção, o número de condutores da malha captora vale:

$$N_{\text{con}2} = \frac{40}{10} + 1 = 5 \rightarrow N_{\text{con}2} = 5 \text{ condutores}$$

- c) Número de condutores de descida

Conforme já calculado no exemplo anterior, tem-se:

$$N_{\text{cd}} = 12 \text{ condutores}$$

- d) Seção dos condutores da malha captora e de descida

$$S_c = 16 \text{ mm}^2 \text{ (condutor de cobre, conforme a Tabela 13.2)}$$

- e) Número de hastes verticais

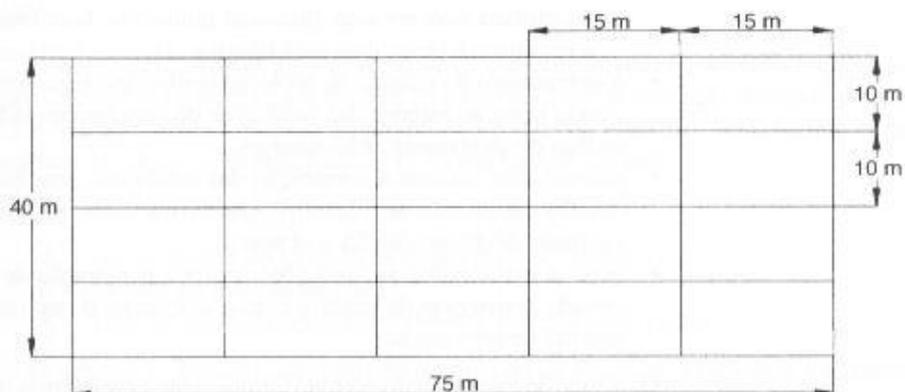
- Comprimento da malha captora

$$C_{\text{mo}} = 10 \times 6 + 75 \times 5 = 435 \text{ m}$$

$$N_{\text{hv}} = \left(\frac{75}{8} + 1 \right) \times 5 + \left(\frac{40}{8} + 1 \right) \times 6 = 87,8 \rightarrow N_{\text{hv}} = 88 \text{ hastes de } 50 \text{ cm ao longo da malha captora (uso opcional).}$$

A Figura 13.16 mostra o desenho da malha captora.

FIGURA 13.16
Malha captora

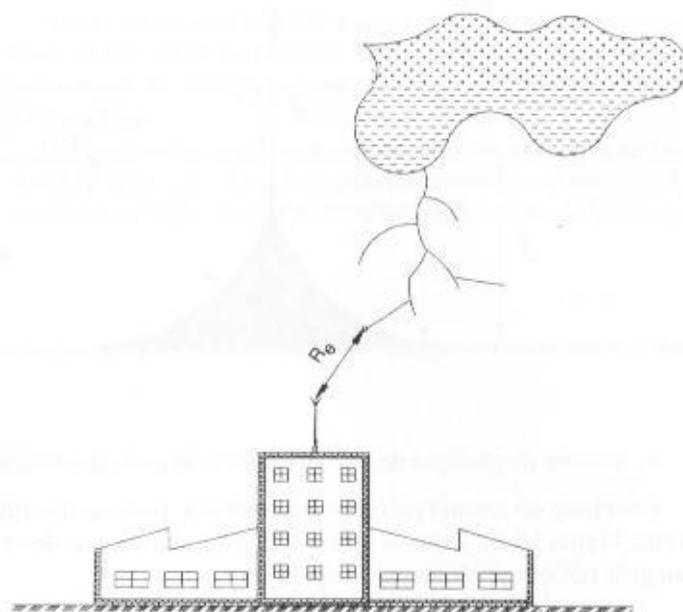


13.7.3 Método Eletrogeométrico

Também conhecido como método da esfera rolante, o método eletrogeométrico se baseia na delimitação do volume de proteção dos captores de um Sistema de Proteção de Descargas Atmosféricas, podendo ser utilizadas hastes, cabos ou mesmo uma combinação de ambos. É empregado com muita eficiência em estruturas de grande altura e/ou de formas arquitetônicas complexas. Dada a essa característica, o método eletrogeométrico tem bastante aplicação em subestação de potência de instalação exterior.

Com base na conceituação da formação de uma descarga atmosférica vista na Seção 13.2, o método eletrogeométrico se fundamenta na premissa de uma esfera de raio R_c com o centro localizado na extremidade do líder antes do seu último salto, conforme visto na Figura 13.17. Os

FIGURA 13.17
Determinação da distância do raio da esfera do modelo eletrogeométrico



pontos da superfície da referida esfera são o lugar geométrico que devem ser atingidos por uma descarga atmosférica.

Ao rolar a esfera fictícia sobre o solo e sobre o sistema de proteção se delimita a região em que ela não toque, formando, assim, a zona protegida.

A Figura 13.18 exemplifica essa conceituação básica.

O valor de R_e pode ser determinado a partir da Equação (13.9), desenvolvida pelo GT33 da CIGRE – Conferência Internacional de Grandes Redes Elétricas de Alta Tensão e apresentada na NBR 5419/01.

$$R_e = 2 \times I_{\max} + 30 \times (1 - e^{-I_{\max}}) \text{ m} \quad (13.9)$$

I_{\max} – valor máximo da corrente de crista do primeiro raio negativo, em kA.

Os valores de R_e são limitados em função do nível de proteção desejado, expressos na Tabela 13.9 (raio da esfera rolante), e da corrente de descarga atmosférica, I_{\max} , em seu valor de crista.

TABELA 13.9

Comprimento do raio R_e e da corrente de descarga em função do nível de proteção

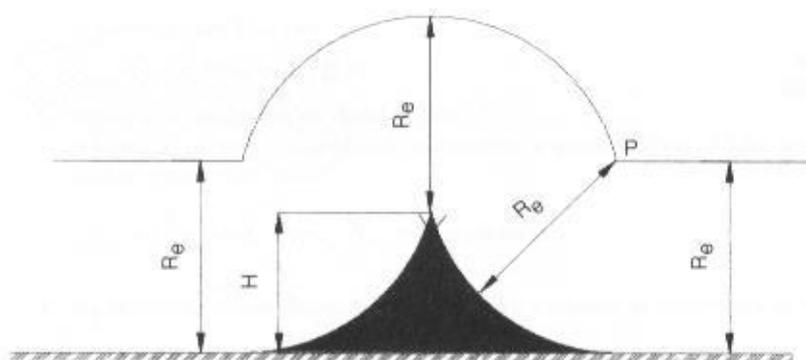
Nível de Proteção	Comprimento do Raio R_e (m)	Corrente de Descarga (kA)
I	20	3,7
II	30	6,1
III	45	10,6
IV	60	16,5

A aplicação do modelo eletrogeométrico implica dois diferentes casos:

a) Volume de proteção de um captor vertical quando a altura do captor H é inferior a R_e

Tomando-se o raio R_e , traçam-se uma reta horizontal paralela ao plano do solo e um segmento de círculo com centro no topo do captor. Com centro no ponto de interseção P e raio R_e , traça-se um segmento de círculo que tangencia o topo do captor e o plano do solo, conforme pode ser observado na Figura 13.18. O volume formado pela rotação em torno do captor da área hachurada representa o volume de proteção oferecido à estrutura.

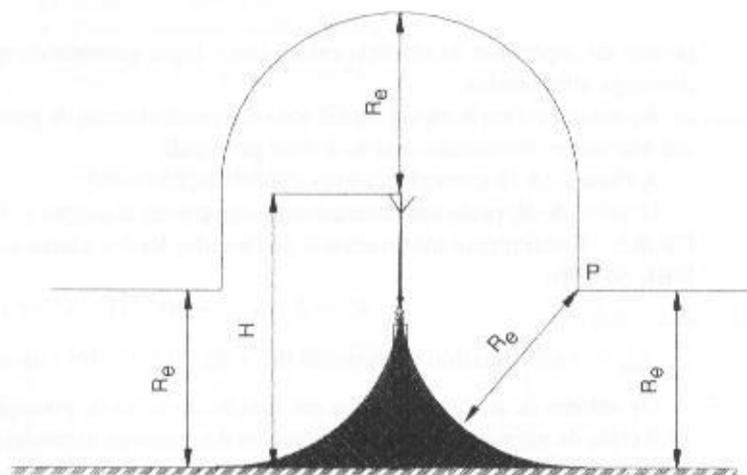
FIGURA 13.18

Volume de proteção para $H < R_e$ 

b) Volume de proteção de um captor vertical quando a altura H é superior a R_e

Com base no mesmo procedimento anterior, pode-se determinar o volume de proteção, conforme Figura 13.19. Deve-se observar que a estrutura excedente ao volume de proteção pode ser atingida por descargas atmosféricas laterais.

FIGURA 13.19

Volume de proteção para $H > R_e$ 

13.7.4 Método do Cone com Raio da Geratriz Definido pela Altura do Captor

É um dos métodos utilizados na proteção de subestações de instalação exterior devido a sua facilidade de aplicação.

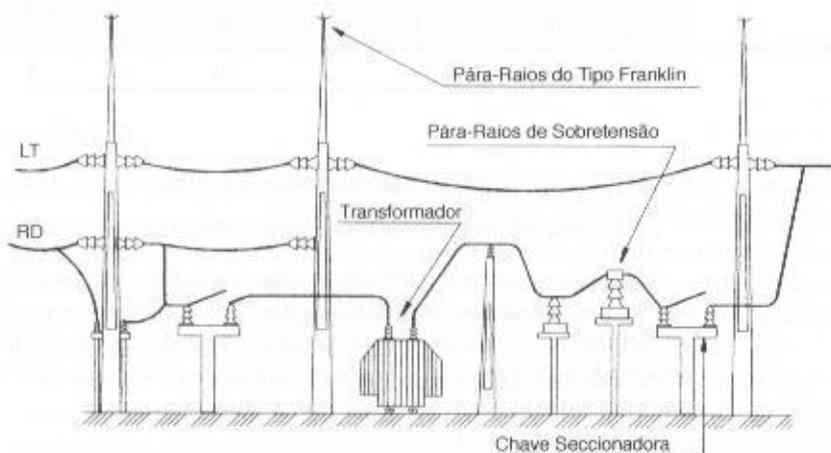


FIGURA 13.20

SPDA de subestação exterior

Assim como qualquer outra construção, as subestações estão sujeitas às descargas atmosféricas diretas sobre os pórticos, barramentos, equipamentos etc. Desta forma, deve-se projetar um sistema de proteção através de pára-raios de haste, capaz de oferecer a máxima segurança a toda a área.

É muito comum a utilização em subestações de instalação exterior de pára-raios do tipo Franklin, devido à disponibilidade das torres das estruturas existentes. A Figura 13.20 mostra os pára-raios montados no topo dos pórticos de uma subestação de instalação exterior.

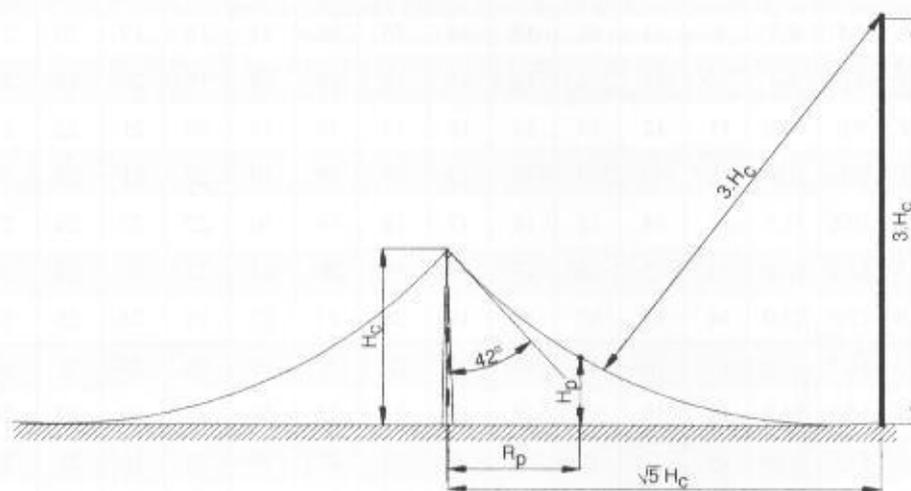


FIGURA 13.21
Cone com raio da geratriz definido pela altura do captor

O dimensionamento de um SPDA para uma subestação de potência de uso exterior deve seguir os seguintes procedimentos:

a) Zona de proteção

O pára-raios, neste caso, oferece uma zona de proteção limitada aproximadamente por um cone. O limite dessa zona de proteção é dado por um arco cujo raio é três vezes a altura do ponto do captor, H_c . O raio máximo de atuação R_p da proteção é igual a $\sqrt{5}$ vezes a altura anterior mencionada H_c . Portanto, o arco é tangente ao solo num ponto que dista $\sqrt{5} \times H_c$ da vertical que passa pelo pára-raios. A Figura 13.21 mostra o detalhe da proteção dada pelo pára-raios. A Equação (13.10) fornece o valor do raio máximo de proteção.

$$R_{pm} = \sqrt{5} \times H_c \tag{13.10}$$

R_{pm} – raio máximo de proteção.

Em algumas subestações utilizam-se, mesmo com menor frequência, cabos de guarda.

A determinação do raio de proteção R_p para que qualquer ponto esteja compreendido na zona de proteção dada pelo pára-raios pode ser feita através da Tabela 13.10, com base na altura da ponta do captor H_c e na altura do ponto considerado H_p a ser protegido.

TABELA 13.10

Altura do captor de um pára-raios do tipo Franklin (H_c)

Altura do Ponto a Ser Protegido H_p (m)																				
R_p (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1,8	2,4	4,0	4,8	6,0	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2	2,5	3,9	4,8	5,9	6,8	8	9	10	12	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
3	3,0	4,5	5,6	6,7	7,8	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
4	3,9	5,0	5,5	7,5	8,5	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
5	4,5	5,7	7,0	8,0	9,3	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
6	5,0	6,5	7,9	9,0	10,0	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
7	6,6	7,0	8,2	9,6	10,8	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	27
8	6,3	7,9	9,0	10,6	11,5	13	14	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25	25	27	28
9	7,0	8,3	10,0	11,0	12,0	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
10	7,5	9,0	10,6	12,0	13,0	14	15	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	30
11	8,0	9,7	11,0	12,3	13,6	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	26	27	28	29	30
12	8,5	10,0	11,9	13,0	14,2	16	16	17	18	19	21	23	24	25	26	27	28	29		
13	9,0	10,7	12,3	13,7	15,0	16	17	19	20	21	22	23	24	26	26	27	28	30		
14	9,7	11,4	13,0	14,3	15,6	17	18	19	20	22	23	24	25	26	27	29	30			
15	10,0	12,0	13,6	15,0	16,2	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30			
16	10,8	12,6	14,0	15,7	17,0	18	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30				
17	11,4	13,0	14,7	16,2	17,6	19	20	21	23	24	25	26	28	28	30					
18	11,9	13,9	15,3	16,8	18,2	20	21	22	23	24	26	27	28	29						
19	12,3	14,2	16,0	17,5	19,0	20	22	23	24	25	27	28	29	30						
20	12,9	14,9	16,5	18,0	19,6	21	22	23	25	26	27	28	30							
21	13,5	15,7	17,2	18,5	20,0	21	23	24	25	27	28	29								
22	14,0	16,0	17,8	19,2	20,8	22	24	24	26	27	29	30								
23	14,5	16,5	18,2	19,8	21,3	23	24	25	27	28	29									
24	14,0	17,2	18,5	20,2	22,0	23	25	26	27	29	30									
25	15,3	17,5	19,3	21,0	22,6	24	25	27	28	29										
26	16,0	18,3	20,0	21,5	23,2	25	26	27	29											
27	16,5	19,0	20,7	22,0	23,9	25	26	28	29											
28	17,0	19,5	21,3	22,8	24,5	26	27	29												
29	17,5	20,0	21,7	23,2	25,0	26	27	29												
30	18,0	20,5	22,3	24,0	25,7	27	29	30												

 R_p – distância do último ponto a vertical do pára-raios.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (13.4)

Considerar a subestação dada na Figura 13.22 e determinar o valor da altura a que deve ser instalado o pára-raios do tipo Franklin, sabendo-se que a corrente de descarga atmosférica vale 5 kA.

$H_p = 4,0$ m (altura do último ponto a ser protegido);
 $R_p = 8$ m (distância do último ponto a vertical do pára-raios).

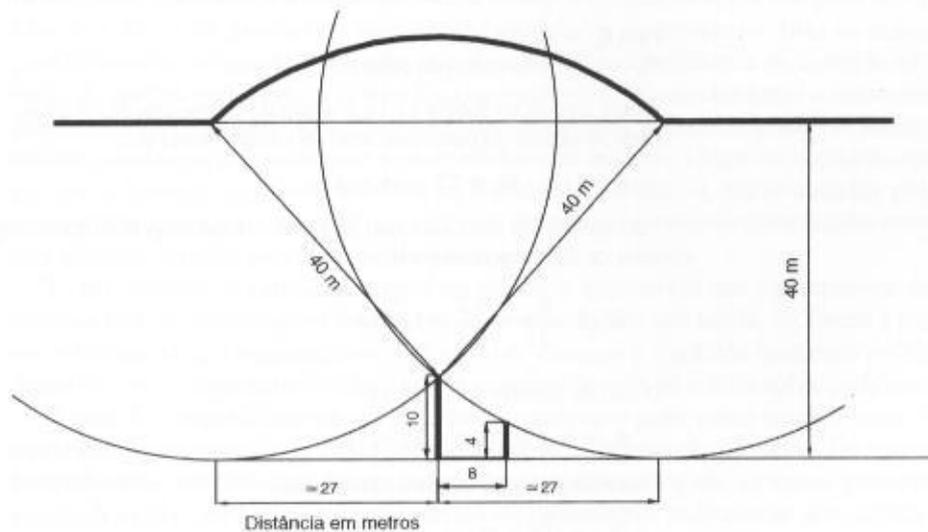
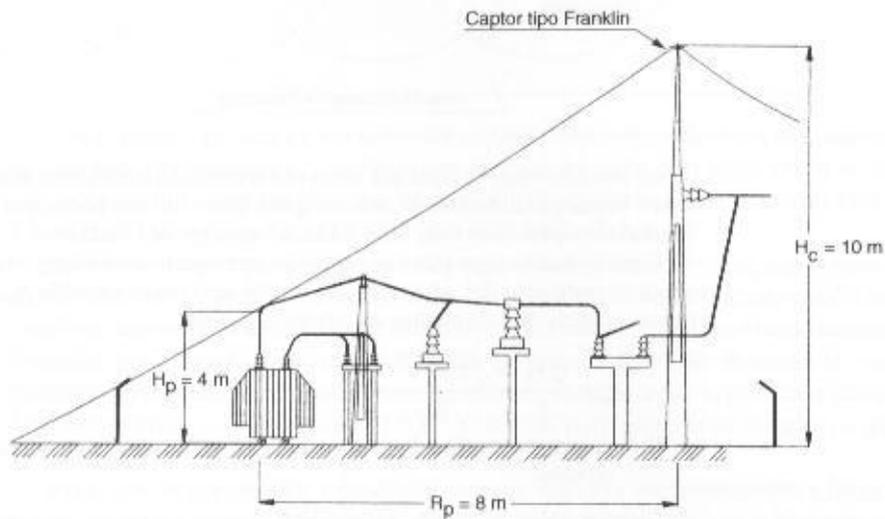
Pela Figura 13.22, a altura do captor vale $H_c = 10,0$ m.
 Aplicando a Equação (13.9), tem-se:

$$R_c = 2 \times I_{\max} + 30 \times (1 - e^{-I_{\max}})$$

$$R_c = 2 \times 5 + 30 \times (1 - e^{-5}) = 39,7 \cong 40$$

Plotando, assim, os valores dimensionais da subestação representada na Figura 13.22, em escala, na condição de $H < R_c$, pode-se perceber que os equipamentos estão protegidos pelo pára-raios dimensionado, conforme mostrado na Figura 13.23.

Ao se aplicar a Tabela 13.9, considerando o nível de proteção I, conforme requer o tipo de estrutura dada na Tabela 13.1, observa-se que o comprimento do raio de proteção é de 20 m para uma corrente de descarga de 3,7 kA. De acordo com a Figura 13.23, o equipamento que praticamente define a área de proteção está apenas a 8 m de distância da vertical do pára-raios, portanto, neste caso, dentro do volume de proteção desejado.

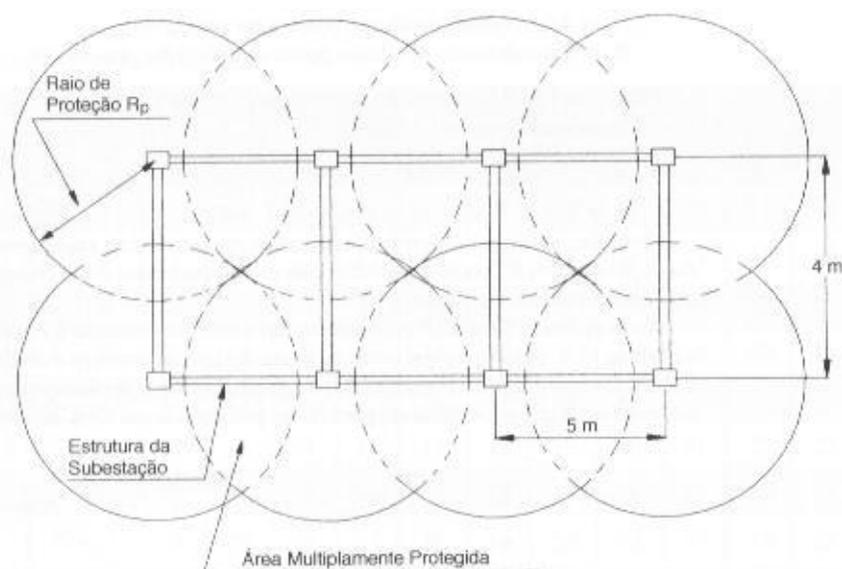


Em muitas aplicações práticas deseja-se saber qual o raio de atuação dos pára-raios a serem instalados em estruturas padronizadas e concebidas em função do melhor layout dos equipamentos e economicidade de projeto.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (13.5)

Considerando que a estrutura da Figura 13.24 representa a vista superior do barramento de uma subestação de instalação exterior, cuja disposição faz parte de um projeto padronizado, determinar a altura da ponta do

FIGURA 13.24
Proteção de uma estrutura de subestação de instalação exterior



captor dos pára-raios de sorte que todos os barramentos e estruturas estejam cobertos pela zona de proteção contra descargas atmosféricas. Sabe-se que a altura útil dos postes que compõem a estrutura na qual serão instalados os pára-raios é de 14 m. Utilizar o método de Franklin.

Considerando-se que todos os pontos do barramento devem ser protegidos, é necessário determinar uma altura de instalação dos pára-raios que resulte um raio de proteção R_p , cujos círculos sejam tangentes nos pontos centrais de cada módulo da estrutura, ou seja:

$$R_p = \frac{\sqrt{D}}{2} = \frac{\sqrt{5^2 + 4^2}}{2} = 3,2 \text{ m}$$

D – diagonal do retângulo que caracteriza a vista superior de um módulo qualquer da estrutura do barramento.

Como os cabos do barramento e as chaves estão fixados nas vigas que se amarram basicamente no topo dos postes de sustentação da estrutura, a ponta do captor deve estar a uma altura H_c de:

$$\begin{aligned} \text{Para } R_p &= 3,2 \text{ m} \\ H_p &= 14 \text{ m (altura útil do poste)} \end{aligned}$$

Então, através da Tabela 13.10, a altura do captor vale $H_{ci} = 17 \text{ m}$. Logo, o mastro do pára-raios deve ter comprimento de:

$$L_m = 17 - H_p = 17 - 14 = 3 \text{ m.}$$

Pelo método do cone com raio da geratriz definido pela altura do captor o valor H_{ci} em relação ao plano superior da estrutura deve ser de:

$$H_{ci} = \frac{R_p}{\sqrt{5}} = \frac{3,2}{\sqrt{5}} = 1,43 \text{ m}$$

O raio da geratriz do cone vale:

$$R_g = 3 \times H_{ci} = 3 \times 1,43 = 4,29 \text{ m}$$

O raio de proteção no plano do solo vale:

$$R_{ps} = \sqrt{5} \times H_{ci} = \sqrt{5} \times 1,43 = 3,2 \text{ m}$$

Aplicando o método de Faraday, a altura do captor em relação ao plano da estrutura deve ser de:

$$H_{ci} = L_m = \frac{R_p}{\text{tg} \alpha} = \frac{3,2}{\text{tg} 35^\circ} = 4,5 \text{ m}$$

O valor de H_{ci} em ambos os métodos corresponde ao próprio comprimento do mastro e captor, já que o plano que se deseja proteger é o nível do topo da estrutura. O nível de proteção requerido para esta subestação corresponde ao nível I, de acordo com a Tabela 13.1. Por conter mais de um pára-raios, deve-se acrescentar 10° aos 25° da Tabela 13.7, no caso do método de Faraday.