

# 14

## Sobretensões de Origem Atmosférica em Sistemas Elétricos

### 14.1 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica estão muitas vezes localizadas em áreas com elevadas densidades de descargas atmosféricas, estando portanto sujeitas a desligamentos não programados ocasionados por sobretensões de origem atmosférica.

Este Capítulo apresenta inicialmente alguns conceitos básicos relativos às descargas atmosféricas, incluindo uma descrição simplificada do fenômeno físico e as faixas de variação dos parâmetros mais importantes sob o ponto de vista da Engenharia. São também apresentados os conceitos de nível cerâmico e de densidade de descargas para terra e o procedimento para determinação do número médio anual de descargas diretas a que uma determinada linha ou estrutura está sujeita.

Em seguida são discutidos, separadamente, os principais mecanismos associados às sobretensões de origem atmosférica em linhas de transmissão e de distribuição de energia, bem como as principais técnicas que podem ser empregadas visando a melhoria do desempenho das mesmas frente a descargas atmosféricas.

Finalmente, aborda-se a questão referente à proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, sendo apresentados os critérios para avaliação de necessidade de instalação de proteção e os principais conceitos e procedimentos relacionados ao projeto de um sistema externo de proteção.

### 14.2 CONCEITOS BÁSICOS

A crescente preocupação das concessionárias com a melhoria da qualidade do fornecimento de energia tem tornado cada vez mais evidente a necessidade de se identificar as causas de perturbações nos sistemas elétricos e de se estudar a eficiência das técnicas a serem adotadas tendo em vista a minimização do problema. Essa situação decorre principalmente da utilização cada vez maior de equipamentos sensíveis a interferências e interrupções de curta duração, como computadores, e da própria mudança do comportamento dos consumidores, que se tornaram mais exigentes. Como consequência, tem-se verificado nos últimos anos um crescimento bastante acentuado da quantidade de estudos e pesquisas realizados nessa área, tendo em vista a busca de uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na questão e a determinação de soluções

técnica e economicamente viáveis, que proporcionem uma melhoria efetiva da qualidade da energia fornecida aos consumidores. Neste contexto aparecem com especial destaque as descargas atmosféricas, as quais são normalmente apontadas como responsáveis pela maior parte das interrupções não programadas das linhas de transmissão e de distribuição, mesmo em regiões com densidade de descargas para terra relativamente moderadas. De maneira geral as descargas atmosféricas são consideradas responsáveis por cerca de 70 % das interrupções em sistemas de transmissão e por aproximadamente 30 % dos desligamentos em redes de distribuição.

A incidência das descargas atmosféricas nos condutores de linhas de transmissão ou de distribuição (descargas diretas) ou em suas proximidades (descargas indiretas) pode dar origem a sobretensões transitórias de elevada amplitude que se propagam ao longo da linha. Se as amplitudes destas sobretensões excedem os níveis de suportabilidade do sistema, podem ocorrer descargas disruptivas, as quais evoluem para arcos de potência, trazendo como consequência o estabelecimento de faltas entre uma ou mais fases para a terra e a necessidade da atuação do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes para eliminar o problema. Embora a maior parte das interrupções decorrentes de descargas atmosféricas apresente duração inferior a 1 minuto, situações críticas podem ocorrer, por exemplo, no caso de indústrias que utilizem em seus processos produtivos equipamentos eletrônicos e sensíveis a perturbações momentâneas.

O desempenho de linhas de transmissão e redes de distribuição frente a descargas atmosféricas pode ser significativamente melhorado caso sejam entendidos os mecanismos de indução das sobretensões e empregadas técnicas eficazes para minimização dos problemas.

### 14.2.1 A Descarga Atmosférica

Muitas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de se obter maiores informações com relação às principais características das descargas atmosféricas, visto que este fenômeno é de natureza essencialmente aleatória. Pode-se citar, entre outros, o estudo experimental realizado no *Monte San Salvatore* em Lugano, Suíça, onde durante mais de duas décadas foram estudadas as correntes relativas à principal fase da descarga atmosférica (“return stroke”) em duas torres de 55 m de altura, utilizando resistores de medição (“shunts”). A análise dos dados permitiu o levantamento de curvas de frequência cumulativa de parâmetros de interesse de correntes positivas e negativas separadamente, tais como o valor de crista, tempo de frente, carga elétrica, taxa de crescimento, duração total e o intervalo de tempo entre “strokes” subseqüentes.

As características das correntes das descargas atmosféricas foram também estudadas através de uma estação localizada no *Empire State Building*, em New York, EUA. Na Itália, medições de correntes foram efetuadas em torres de televisão situadas no topo de

montanhas. Medições de correntes de descargas incidentes em estruturas elevadas foram também realizadas na Austrália, Tchecoslováquia, África do Sul, Suécia e Polônia. Em 1980 o Comitê de Estudo 33 do CIGRÈ (Conferência Internacional de Grandes Redes Elétricas de Alta Tensão) apresentou tabelas e curvas de distribuição de frequência cumulativa dos principais parâmetros das descargas, tendo em vista a aplicação em projetos de engenharia relacionados à proteção ou avaliação do desempenho de linhas de transmissão e de distribuição frente a descargas atmosféricas.

As descargas atmosféricas podem ocorrer entre nuvem e terra, entre nuvens ou entre pontos de uma mesma nuvem, sendo que esta última situação responde por mais de 50% dos casos. Entretanto, apenas as descargas para a terra podem provocar tensões de amplitude significativa em linhas de transmissão e de distribuição. Portanto esse é o tipo de descarga que será descrito neste item.

Uma descarga típica para a terra começa na nuvem e neutraliza cargas da ordem de dezenas de coulombs. Medições realizadas no interior das nuvens, através de balões, dos campos elétricos associados à neutralização de porções dessas cargas quando da ocorrência de descargas atmosféricas, permitiram a representação da nuvem através de uma estrutura dipolar. Essas medições mostraram que geralmente as cargas negativas estão posicionadas na parte inferior da nuvem, juntamente com uma pequena porção de cargas positivas. Essa distribuição induz o surgimento de cargas positivas no solo, conforme indicado na Figura 14.1.

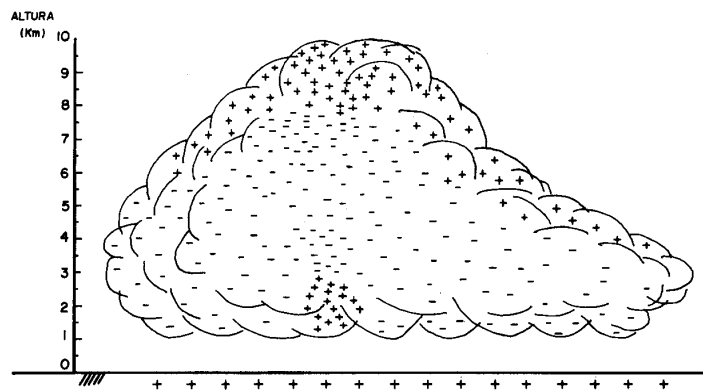


Fig. 14.1 – Distribuição típica das cargas elétricas no interior de uma nuvem tempestuosa.

Uma descarga preliminar no interior da nuvem, causada pela ruptura da rigidez dielétrica do ar, inicia o “stepped leader”, que se movimenta em direção à terra em degraus (daí o nome) distribuindo em um canal altamente ionizado as cargas negativas da base da nuvem, no caso do arranjo da Figura 14.1. Os degraus têm aproximadamente 1  $\mu$ s de duração e dezenas de metros de comprimento, sendo o intervalo médio entre eles em torno de 50  $\mu$ s. A corrente média se situa na faixa de 100 A a 1000 A e o potencial do

canal em relação à terra é da ordem de  $-1.10^8\text{V}$ . A velocidade média de propagação associada a essa etapa é de aproximadamente  $2.10^5\text{ m/s}$ . Durante este processo o canal pode sofrer ramificações. À medida que o “leader” se aproxima do solo o campo elétrico na superfície aumenta. Se este campo excede o gradiente crítico do ar, em torno de  $3.10^6\text{ V/m}$ , forma-se um “leader” ascendente, de polaridade positiva, que se propaga em direção ao “stepped leader”.

Quando ambos se encontram, a ponta do “stepped leader” é conectada ao potencial de terra. Ocorre então a fase do “return stroke”, cuja corrente se propaga para cima através do canal previamente ionizado com velocidade, ao nível do solo, da ordem de um terço da velocidade da luz no vácuo. As correntes na base do canal apresentam amplitudes típicas de 30 kA, com tempos de subida e até o meio valor, na cauda, em torno de 5  $\mu\text{s}$  e 50  $\mu\text{s}$ , respectivamente. Após o “return stroke” ter atingido a nuvem, a descarga termina. Entretanto, se ainda existirem cargas no topo do canal devido a descargas internas na nuvem, pode ocorrer a propagação de um “dart leader”, através do mesmo canal, da nuvem para a terra, que causará um “stroke”, subsequente. O “dart leader” se propaga de maneira contínua, com velocidade de aproximadamente  $3.10^6\text{ m/s}$ , e não apresenta ramificações. Aproximadamente 50 % das descargas para a terra são múltiplas, isto é, apresentam “strokes” subsequentes. O número médio de “strokes” por descarga é igual a 3, sendo que em geral o intervalo entre os “strokes” fica na faixa de 40 ms a 80 ms.

Convém ressaltar que o mecanismo descrito refere-se a descargas negativas, isto é, as cargas negativas da nuvem são canalizadas até a terra. O efeito é como se o “return stroke” levasse até a nuvem as cargas positivas do solo, neutralizando as cargas negativas depositadas no canal pelo “stepped leader”. O processo citado corresponde a mais de 90 % dos casos. Entretanto, descargas negativas também podem ser iniciadas através de um “leader” ascendente que parta de estruturas altas, tais como torres e edifícios, distribuindo em seu canal as cargas positivas do solo. Nesse caso, na fase correspondente ao “return stroke” as cargas negativas da nuvem são levadas até o solo.

As descargas positivas ocorrem quando cargas positivas da nuvem são descarregadas pelo “return stroke”. Essas descargas, que representam menos de 10 % dos casos, acontecem quando o “stepped leader” se inicia em regiões da nuvem com predominância de cargas positivas ou quando a descarga começa a partir de um “leader” ascendente que distribua em seu canal cargas negativas do solo.

## 14.2.2 Principais Parâmetros da Corrente da Descarga

A etapa de descarga atmosférica relativa ao “return stroke” é considerada a mais importante no tocante à proteção de sistemas elétricos, em virtude das amplitudes das correntes e das velocidades envolvidas no processo. Com base em medições realizadas em diversos países verificou-se que a probabilidade  $P(I)$  de que a corrente de uma

descarga negativa atinja amplitude superior a um certo valor  $I$  (em quiloampères) pode ser estimada pela expressão:

$$P(I) = \frac{100 \%}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (14.1).$$

Não foram consideradas, na composição dos dados que deram origem à expressão (14.1), medições efetuadas em estruturas com altura superior a 60 m, com a finalidade de tornar a distribuição mais representativa de situações práticas de engenharia. Além disso, nessa faixa de alturas a quantidade de descargas iniciadas através de um “leader” ascendente não chega a 10 % do total.

A Figura 14.2 e a Tabela 14.1 apresentam alguns parâmetros de frente de onda da corrente, os quais são definidos como se segue:

- $T_{10}$ : duração da frente expressa como o intervalo entre os instantes correspondentes a 10 % e 90 % do valor da primeira crista (o tempo de frente equivalente é igual a  $T_{10}/0,8$ );
- $T_{30}$ : duração da frente expressa como o intervalo entre os instantes correspondentes a 30 % e 90 % do valor da primeira crista (o tempo de frente equivalente é igual a  $T_{30}/0,6$ );
- $TAN_{10}$ : tangente à frente no ponto correspondente a 10% do valor da primeira crista;
- $S_{10}$ : taxa de crescimento entre os pontos correspondentes a 10 % e 90 % do valor da primeira crista;
- $S_{30}$ : taxa de crescimento entre os pontos correspondentes a 30 % e 90 % do valor da primeira crista;
- $TANG$ : máxima taxa de crescimento na frente.

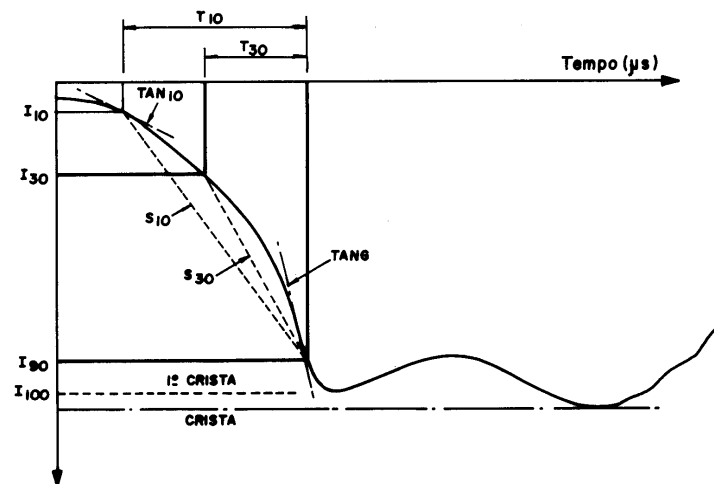


Fig. 14.2 – Parâmetros de frente da corrente – descarga negativa.

Tabela 14.1 – Parâmetros de frente da corrente.

PARÂMETRO	Número de dados	Unidade	Percentagem de casos que excedem o valor da tabela		
			95 %	50 %	5 %
“Return Stroke”					
T <sub>10</sub>	80	μs	1,8	4,5	11,3
T <sub>30</sub>	80	μs	0,9	2,3	9,8
TAN <sub>10</sub>	75	kA/μs	0,6	2,6	11,8
S <sub>10</sub>	75	kA/μs	1,7	5,0	14,1
S <sub>30</sub>	73	kA/μs	2,6	7,2	20,0
TANG	75	kA/μs	9,1	24,3	65,0
P <sub>1</sub> (1ª crista)	75	kA	12,9	27,7	59,5
Crista (P)	80	kA	14,1	31,1	68,5
“Strokes” Subseqüentes					
T <sub>10</sub>	114	μs	0,1	0,6	2,8
T <sub>30</sub>	114	μs	0,1	0,4	1,8
TAN <sub>10</sub>	108	kA/μs	1,9	18,9	187,4
S <sub>10</sub>	114	kA/μs	3,3	15,4	72,0
S <sub>30</sub>	114	kA/μs	4,1	20,1	98,5
TANG	113	kA/μs	9,9	39,9	161,5
P <sub>1</sub> (1ª crista)	114	kA	4,9	11,8	28,6
Crista (P)	114	kA	5,7	12,3	29,2

Uma corrente típica do “return stroke” atinge o valor máximo entre aproximadamente 4 μs e 6 μs e apresenta taxa de crescimento em torno de 7 kA/μs. Essa corrente atinge a metade do seu valor de crista, na cauda, em aproximadamente 50 μs. Já os “strokes” subseqüentes são caracterizados por correntes com taxas de crescimento muito maiores, estando o valor médio na faixa de 15 kA/μs a 20 kA/μs. Os tempos de frente equivalentes típicos são geralmente inferiores a 1 μs e os tempos até o meio valor, na cauda, normalmente são da ordem de 30 μs. Não há correlação entre os valores de crista das correntes do primeiro e dos “strokes” subseqüentes, mas na média a amplitude da corrente dos “strokes” subseqüentes é aproximadamente 40 % daquela do primeiro.

Os "Modelos de Engenharia", utilizados para determinação da corrente do "return stroke" no canal em função do tempo e da altura, possibilitam o cálculo dos campos elétrico e magnético associados à descarga, desde que se conheça a corrente na base e a sua velocidade de propagação ao longo do canal. Além disso, a velocidade com que a corrente se propaga é um parâmetro importante para a determinação das tensões induzidas em uma linha que esteja nas proximidades do local de incidência da descarga. Esse fato tem motivado a realização de várias pesquisas no sentido de se obter informações mais precisas e confiáveis a respeito deste parâmetro. Sabe-se que, a

exemplo da corrente, a velocidade decresce com a altura. Considerações teóricas levam à conclusão de que existe correlação entre a velocidade e a corrente, visto que ambas estão relacionadas à densidade linear de cargas e ao potencial em cada ponto do canal. Assim algumas expressões têm sido propostas procurando estabelecer uma ligação entre esses dois parâmetros. Utilizando uma câmera com movimento relativo entre o filme e as lentes, Idone e Orville registraram velocidades bidimensionais de 17 "strokes" subseqüentes. O termo "bidimensional" indica que a velocidade é obtida através da projeção do canal em um plano, o que implica na obtenção de um valor inferior ao verdadeiro. Os valores médios encontrados, ao nível do solo, foram de  $9,6 \cdot 10^7$  m/s para o "return stroke" e de  $1,2 \cdot 10^8$  m/s para os "strokes" subseqüentes. A faixa total de variação foi de  $2 \cdot 10^7$  m/s a  $2,4 \cdot 10^8$  m/s, e o erro máximo estimado como sendo inferior a 35 %. Idone e Orville realizaram posteriormente medições de velocidades tridimensionais, ao nível do solo, em descargas provocadas artificialmente, com o auxílio de foguetes. Os resultados encontrados, referentes a 56 "strokes" subseqüentes, mantiveram-se na faixa de  $6,7 \cdot 10^7$  m/s a  $1,7 \cdot 10^9$  m/s, com valor médio de  $1,2 \cdot 10^8$  m/s.

### 14.2.3 Descargas Diretas em Linhas e Estruturas

Para avaliação do desempenho de sistemas elétricos frente a descargas atmosféricas é de fundamental importância o conhecimento da densidade de descargas para terra ( $N_g$ ). É altamente recomendável que a medição desse parâmetro, definido como o número médio anual de descargas para terra por  $\text{km}^2$  em uma determinada região, seja feita diretamente, através de aparelhos ou sistemas projetados para essa finalidade. Entretanto, quando  $N_g$  não é conhecida, é procedimento usual relacioná-la com o nível cerâmico da região ( $T_d$ ), definido como o número de dias do ano com incidência de trovoadas, através da expressão

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (14.2).$$

A aplicação da equação (14.2) mostra, por exemplo, que em uma região com aproximadamente 70 dias por ano com incidência de trovoadas, como é o caso da cidade de São Paulo, tem-se em média cerca de 8 descargas por  $\text{km}^2$  por ano. As linhas que unem pontos com mesmo nível cerâmico são denominadas "linhas isocerâmicas".

A Figura 14.3 apresenta, em forma gráfica, a relação entre  $N_g$  e  $T_d$ . É importante ressaltar que grandes variações em  $N_g$  podem ocorrer de um ano para outro, de modo que o número obtido através da expressão acima corresponde ao valor médio referente a um período de observação superior a 10 anos. Destaca-se também que através de sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas como a RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas) é possível efetuar o levantamento de  $N_g$  de maneira muito mais confiável. Uma vez conhecida a densidade de descargas para terra da região, é possível estimar o número médio anual de descargas que incidem em uma determinada linha ou estrutura (descargas diretas).

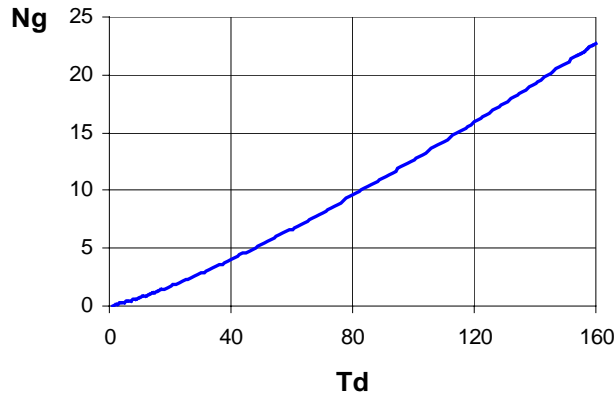


Fig. 14.3 - Relação entre a densidade de descargas para a terra ( $N_g$ ) e o nível cerâmico ( $T_d$ ).

Há muito tempo sabe-se que um condutor disposto horizontalmente a uma determinada altura atrai para si descargas atmosféricas que na sua ausência cairiam no solo, estabelecendo desse modo uma espécie de blindagem. A área protegida está intimamente relacionada a um parâmetro denominado distância de atração, cujo significado físico é a distância da ponta do "leader" em relação ao condutor, associada ao gradiente crítico responsável pela formação do "leader" ascendente neste último. Conforme mencionado anteriormente, o encontro dos dois líderes dá início à fase do "return stroke". A determinação da distância de atração tem sido objeto de diversos estudos teóricos e experimentais, tendo em vista a sua importância com relação ao projeto e verificação do desempenho de linhas aéreas frente a descargas atmosféricas. Considerações teóricas mostram que existe forte correlação entre a distância de atração e a amplitude da corrente do "return stroke", sendo que o "Modelo Eletrogeométrico" (detalhado no item 14.5.3.1) considera a seguinte relação:

$$r_s = 10 \cdot I^{0.65} \quad (14.3),$$

onde  $r_s$  representa a distância de atração, em metros, e  $I$  é o valor de crista da corrente, em quiloampères. Assim, se a distância perpendicular entre a linha e o canal do "leader" (Figura 14.4) for superior a um certo raio de atração  $R_a$ , a descarga atingirá o solo; caso contrário, incidirá na linha. O raio de atração é determinado conforme a equação:

$$R_a = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (14.4),$$

onde  $h$  corresponde à altura da linha e  $r_g$  se refere à distância de atração para o solo, normalmente adotada como uma fração da distância de atração. No caso de linhas de distribuição, o valor de  $r_g$  adotado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) é de 90 % de  $r_s$ . Embora um cálculo mais rigoroso do número de descargas



diretas em uma determinada linha deva levar em conta a dependência de  $R_a$  com a corrente da descarga, conforme a equação (14.4), normalmente utiliza-se um raio de atração médio, que considera a incidência média de descargas em linhas com altura inferior a 100 m. O raio de atração médio adotado pelo IEEE para avaliação do desempenho de linhas de transmissão e de distribuição de altura  $h$  (expressa em metros) frente a descargas atmosféricas é dado por:

$$R_a = 14 \cdot h^{0,6} \text{ (m)} \quad (14.5).$$

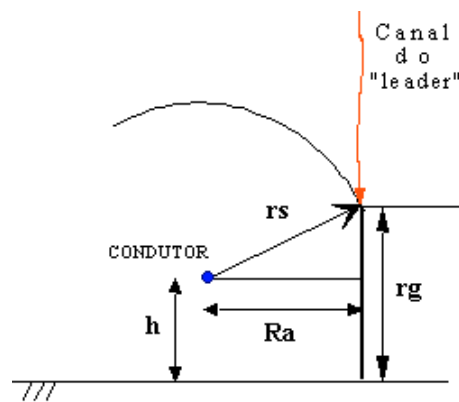


Fig. 14.4 - Determinação do raio de atração  $R_a$ .

$h$ : altura da linha;  $r_s$ : distância de atração;  $r_g$ : distância de atração para o solo.

Assim, utilizando-se a expressão (14.5) e desconsiderando o efeito de blindagem proporcionado por objetos altos nas proximidades, o número médio anual de descargas diretas ( $N$ ) em uma estrutura qualquer, com área de exposição  $A_e$ , pode ser estimado através da expressão

$$N = N_g \cdot A_e \quad (14.6).$$

A área de exposição de uma linha é  $A_e = (2 \cdot R_a + b)$ , onde  $b$  corresponde à distância horizontal entre os condutores externos. No caso de uma torre isolada,  $A_e = \pi \cdot R_a^2$ .

### 14.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão são usualmente definidas como aquelas com tensão nominal superior a 69 kV e altura maior que 10 m. Quando uma descarga atmosférica com corrente de amplitude  $I$  atinge uma das fases, a corrente injetada no condutor dá origem a duas ondas de tensão que se propagam pela linha, nos dois sentidos, e que podem ser estimadas através da expressão

$$V = Z_L \cdot \frac{I}{2} \quad (14.7),$$

onde  $Z_L$  representa a impedância característica da linha, que em geral assume valores na faixa de 400  $\Omega$  a 450  $\Omega$ . Quando uma dessas ondas chega em uma torre, a cadeia de isoladores fica submetida a uma tensão muito elevada, que se eventualmente for superior àquela que a cadeia suporta, acarretará uma descarga disruptiva, ou seja, um curto-circuito que poderá resultar em uma interrupção no fornecimento de energia.

Considerando que uma linha com tensão nominal igual a 350 kV suporta tensões impulsivas com amplitudes da ordem de 1090 kV, verifica-se, através da equação (14.7), que se o valor da impedância característica for igual a 450  $\Omega$ , uma descarga com corrente superior a 4,85 kA já basta para provocar uma sobretensão suficientemente alta para ocasionar uma descarga disruptiva. Por sua vez, a equação (14.1) indica que a probabilidade de uma descarga apresentar corrente com amplitude superior a 4,85 kA é de aproximadamente 99 %, ou seja, praticamente todas as descargas que incidirem nos condutores fase provocarão descargas disruptivas na linha. Por essa razão as linhas de transmissão são normalmente protegidas por um ou dois cabos guarda (também conhecidos por cabos pára-raios).

O cabo guarda é um condutor conectado à terra e instalado no topo da torre com o objetivo de atrair para si descargas atmosféricas que, na sua ausência, incidiriam diretamente nos condutores fase ocasionando sobretensões superiores àquelas que a linha suporta. Eventualmente uma descarga pode atingir um dos condutores fase mesmo no caso da linha estar protegida com o cabo guarda. Isso caracteriza uma "**falha de blindagem**" e o projeto da linha deve ser tal que esse tipo de situação ocorra apenas para correntes de baixa intensidade, inferiores à "corrente crítica", a qual é definida como a mínima corrente necessária para ocasionar uma sobretensão elevada o bastante para provocar descargas disruptivas nos isoladores. A Figura 14.5 mostra esquematicamente uma torre de linha de transmissão com dois cabos guarda.

Além da falha de blindagem, existe outra situação que pode resultar em desligamento da linha de transmissão. Quando uma descarga atinge a torre ou o cabo guarda, uma parcela da corrente fluirá através da torre, fazendo com que esta fique com potencial elevado em relação à terra. Se este potencial for suficientemente alto para que a diferença de potencial aplicada à cadeia de isoladores supere o valor da tensão suportável da mesma, ocorrerá uma descarga disruptiva, a qual é denominada "**backflashover**". Uma maneira de reduzir a ocorrência de "backflashovers" é diminuir o valor da impedância de aterramento da torre. Isso se deve ao fato de que, ao atingir a base da torre, a corrente sofre uma reflexão, produzindo uma onda de tensão ("tensão refletida") que irá se somar àquela que se desenvolve na cadeia de isoladores. Entretanto, essas duas ondas de tensão apresentam polaridades opostas, de modo que quanto maior for a amplitude da tensão "refletida", menor será a tensão total na cadeia. Como a amplitude da tensão refletida aumenta à

medida que diminui o valor da impedância de aterramento, pode-se dizer que quanto menor o valor desta, menor o número de interrupções da linha decorrentes de "backflashovers". A impedância de aterramento das torres é um dos parâmetros que mais afetam o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas devendo-se sempre, pelas razões expostas, procurar limitá-la aos valores mais baixos possíveis.

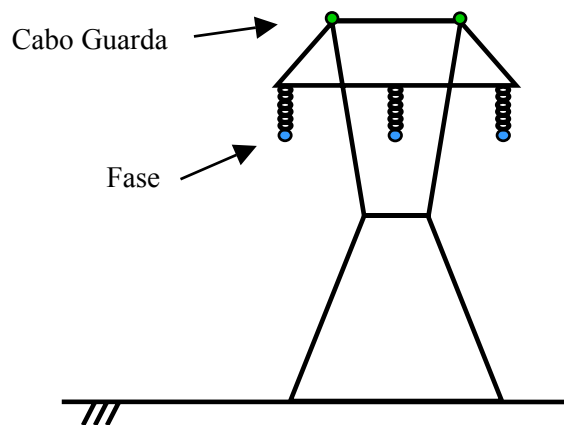


Fig. 14.5 - Torre de uma linha de transmissão com dois cabos guarda.

#### 14.4 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

As linhas de distribuição estão sujeitas a interrupções de fornecimento de energia tanto no caso de descargas diretas quanto no caso de descargas que atinjam algum ponto em suas proximidades (descargas indiretas). Embora seja tecnicamente possível tornar os sistemas completamente imunes a esses distúrbios, tal procedimento não é economicamente justificável e, na prática, admite-se um determinado risco de falhas.

Em função dos seus baixos níveis de suportabilidade, dificilmente uma linha de distribuição atingida por uma descarga direta deixará de sofrer uma interrupção. A instalação de cabo guarda e/ou de pára-raios ao longo da linha pode amenizar o problema, mas em geral a relação custo / benefício não é satisfatória, uma vez que para se obter uma melhoria significativa do desempenho da linha frente a descargas diretas faz-se necessário instalar pára-raios em praticamente todos os postes. Além disso, deve-se também reduzir os valores da resistência de terra e elevar o nível de suportabilidade da linha. Não obstante, tais soluções podem eventualmente ser adotadas em trechos muito expostos ou considerados muito importantes e para os quais se queira garantir um nível maior de confiabilidade.

Por outro lado, as descargas indiretas, que praticamente não representam problemas para as linhas de transmissão, são geralmente as principais responsáveis pelos desligamentos acidentais em linhas de classe igual ou inferior a 15 kV, em virtude dos seus altos índices de ocorrência. Mesmo quando as amplitudes das tensões induzidas não excedem o nível de suportabilidade do sistema, os transitórios provocados pelas descargas indiretas podem produzir, em equipamentos como transformadores, por exemplo, oscilações internas nas frequências naturais dos enrolamentos. Tais oscilações podem atingir valores muito superiores à tensão induzida na linha, chegando a danificar esses equipamentos. Por outro lado, o desempenho dos pára-raios das redes de distribuição também pode ser seriamente comprometido pelas tensões induzidas, pois apesar das correntes descarregadas geralmente apresentarem valores inferiores a 1 kA, a alta frequência de ocorrência e os curtos intervalos de tempo (em torno de 50 ms) entre as passagens das correntes subsequentes (no caso de descargas múltiplas) podem ocasionar solicitações térmicas demasiadamente excessivas, aumentando o índice de falhas e conseqüentemente elevando as taxas de defeitos dos transformadores a níveis inaceitáveis.

Existe um certo entendimento no que se refere à avaliação do desempenho de linhas quanto a descargas diretas. Entretanto, as tensões induzidas por descargas indiretas representam um fenômeno muito mais complexo. Em razão do montante dos investimentos realizados nas redes de distribuição, que freqüentemente representam algo em torno de 50 % de todo o capital investido em um sistema elétrico, e tendo-se em vista os elevados índices de danos aos equipamentos e interrupções de fornecimento de energia aos consumidores, torna-se essencial o entendimento do mecanismo de indução e a busca das soluções técnica e economicamente mais adequadas para melhoria da confiabilidade dos sistemas. As profundas divergências entre alguns dos principais modelos matemáticos existentes reforçam esse posicionamento, em vista da necessidade de se dispor de um modelo confiável, que proporcione maior segurança quando do direcionamento dos investimentos.

A título de ilustração, a Figura 14.6 apresenta comparações entre uma tensão induzida medida em um estudo experimental desenvolvido no Japão e as tensões calculadas de acordo com quatro modelos matemáticos: Chowdhuri-Gross, Liew-Mar, Rusck e ERM ("Extended Rusck Model"). Este último foi desenvolvido na Universidade de São Paulo e tem por base a teoria de Rusck, embora apresente uma série de modificações em relação ao modelo original que possibilitam a sua aplicação no caso de situações realistas, levando em consideração comprimentos finitos para a linha e o canal da descarga, o caso de descargas em estruturas altas, a ocorrência do "leader" ascendente, a presença do cabo guarda ou condutor neutro multiterrado e de equipamentos como transformadores e pára-raios. Ressalta-se que todos os cálculos apresentados na Figura 14.6 referem-se à mesma situação, na qual a descarga (corrente com amplitude de 9 kA) atingiu uma torre de 200 m de altura situada à distância de 200 m de uma linha não energizada com 820 m de comprimento e sem nenhum equipamento instalado. Observa-se claramente que a tensão calculada através do ERM apresenta, em relação às demais, melhor concordância com a tensão medida, tanto em termos de amplitude como de forma de onda. Várias

comparações envolvendo tensões induzidas por descargas naturais e também resultados obtidos em experimentos desenvolvidos em modelo em escala reduzida comprovaram a validade do ERM.

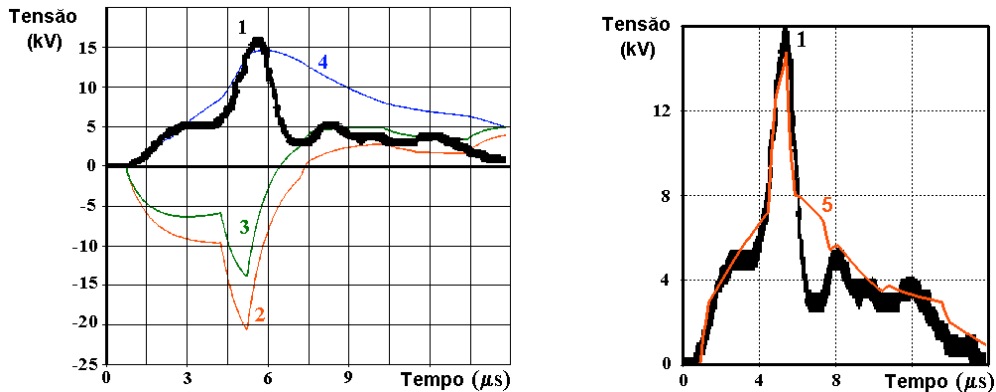


Fig. 14.6 - Tensões induzidas medida e calculadas de acordo com diferentes modelos.

- 1) Tensão medida
- 2) Tensão calculada (modelo de Chowdhuri-Gross)
- 3) Tensão calculada (modelo de Liew-Mar)
- 4) Tensão calculada (modelo de Rusck)
- 5) Tensão calculada (modelo ERM)

A amplitude da tensão induzida por uma descarga indireta em uma linha de distribuição desprovida de proteção depende de diversos fatores. Entretanto, os parâmetros de maior influência são a amplitude, o tempo de frente e a velocidade de propagação da corrente do "return stroke" e a distância da linha ao ponto de incidência da descarga. As amplitudes das tensões induzidas por descargas com afastamento em relação à linha inferior a 200 m podem frequentemente exceder o nível de tensão suportável dos sistemas de distribuição, que para sistemas classe 15 kV corresponde a aproximadamente 110 kV. Descargas mais distantes normalmente não representam problemas, salvo no caso de correntes com amplitudes muito elevadas (superiores a 100 kA).

A duração total da corrente não é importante, ao menos no que se refere ao valor máximo da tensão. Entretanto, correntes com tempos de cauda muito curtos podem ocasionar tensões bipolares. Da mesma forma, o efeito do comprimento do canal é, na grande maioria das vezes, sentido apenas após a tensão ter atingido o seu valor de crista. A tensão induzida varia ao longo da linha, atingindo seu valor máximo no ponto mais próximo ao local de incidência da descarga.

Sendo a altura da linha muito menor que o comprimento do canal, o campo elétrico total entre o condutor e o plano de terra é praticamente constante, de modo que a tensão induzida resulta proporcional à altura do condutor. A velocidade de propagação do

"return stroke" afeta as tensões induzidas de diferentes maneiras, dependendo do tempo de frente da corrente. Para correntes com tempos de frente curtos (inferiores a  $1 \mu\text{s}$ ), a um aumento da velocidade corresponde um aumento da tensão, enquanto que para tempos de frente mais longos ocorre o oposto.

No que tange à polaridade, na maior parte dos casos as tensões induzidas são unipolares, com polaridade contrária à das cargas depositadas no canal durante a fase do "stepped leader". Assim, a grande frequência de casos de tensões induzidas com polaridade positiva, verificada em trabalhos experimentais, decorre do fato de que em mais de 90 % das descargas para a terra as cargas do canal apresentam sinal negativo. As ondas bipolares observadas ocasionalmente, em sua grande maioria com pico inicial negativo e com amplitude inferior à do positivo, são satisfatoriamente explicadas pela ocorrência de "leaders" ascendentes ou pelo efeito da resistividade do solo.

Vários métodos podem ser empregados para melhorar o desempenho de sistemas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Um deles diz respeito à utilização de religadores e disjuntores a vácuo com ciclos de religamento automáticos. Os disjuntores a vácuo, embora mais dispendiosos, apresentam vantagens em relação aos disjuntores a óleo, tais como aberturas mais rápidas e menor necessidade de manutenção, proporcionando assim melhor coordenação com os elos fusíveis, aumento do número de ciclos de religamento e, conseqüentemente, redução da quantidade de interrupções sustentadas.

O aumento da densidade de pára-raios por quilômetro de linha também é uma alternativa eficaz para diminuição dos níveis de desligamentos provocados pelas descargas atmosféricas. A instalação de pára-raios a cada 300 m em linhas de classe 15 kV reduz de modo considerável as amplitudes das tensões induzidas, a ponto de praticamente eliminar as faltas causadas por descargas indiretas, particularmente no caso de baixos valores de resistência de terra. O aumento da suportabilidade das redes de distribuição para 300 kV reduz substancialmente o número de desligamentos decorrentes de descargas indiretas e isso tem motivado algumas concessionárias de energia a alterar suas estruturas substituindo, em alguns casos, em regiões com alto índice cerâmico, os postes de concreto por postes de madeira. Atualmente a maior parte das concessionárias de energia elétrica japonesas utilizam cabos guarda nas linhas de distribuição, objetivando protegê-las contra as sobretensões induzidas por descargas indiretas. Deve-se ressaltar, porém, que a eficácia do cabo guarda está intimamente relacionada à redução das distâncias entre os pontos de aterramento e dos valores das resistências de terra. Outro ponto a ser destacado é que a presença do condutor neutro tem efeito semelhante ao do cabo guarda, provocando redução das tensões induzidas em relação ao caso de uma linha sem neutro.

A título de ilustração, a Figura 14.7 compara as tensões induzidas fase-terra no ponto médio de uma linha de distribuição de 10 m de altura e 5 km de comprimento por uma descarga atmosférica que incide a 50 m de distância deste ponto, considerando três situações distintas. A corrente da descarga tem forma de onda triangular com amplitude

de 50 kA, tempo de frente de 3  $\mu$ s e tempo até o zero de 150  $\mu$ s e se propaga ao longo do canal com velocidade igual a 30 % da velocidade da luz no vácuo. O solo é admitido condutor perfeito e o comprimento do canal é igual a 3 km. Foram considerados os seguintes casos:

- 1) linha sem neutro e sem pára-raios;
- 2) linha com o condutor neutro à altura de 7 m e aterrado a cada 300 m, sendo o valor da resistência de terra igual a 50  $\Omega$ ;
- 3) linha com neutro à altura de 7 m e com pára-raios de distribuição típicos instalados a cada 300 m, sendo o valor da resistência de terra igual a 50  $\Omega$ .

Admite-se, nos casos (2) e (3), que o ponto de incidência da descarga é equidistante aos pontos de aterramento mais próximos, ou seja, que a descarga ocorre em frente ao ponto médio entre dois aterramentos. Os cálculos foram efetuados através do ERM.

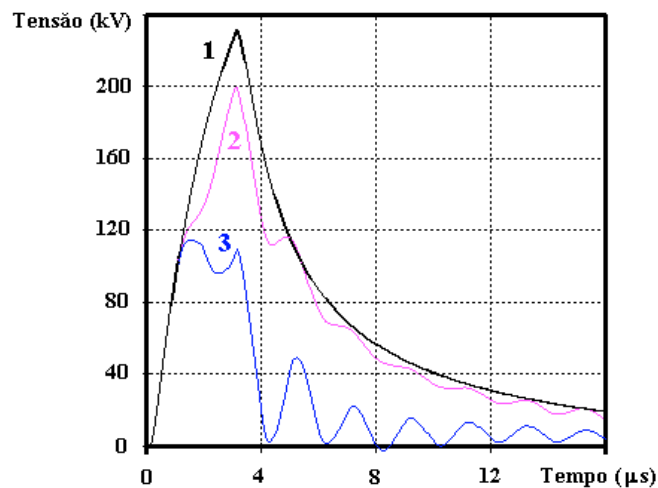


Fig. 14.7 - Tensões induzidas (fase-terra) em linhas com diferentes configurações.  
1) linha sem neutro 2) linha com neutro 3) linha com neutro e com pára-raios

Em que pese os resultados apresentados na Figura 14.7 corresponderem a uma situação específica, observa-se que a presença do neutro provoca uma redução de aproximadamente 14 % na amplitude da tensão induzida em relação à situação de referência (linha sem neutro e sem pára-raios). Essa redução, no entanto, é muito mais acentuada quando se considera, além do condutor neutro, a presença de pára-raios na linha, quando chega a cerca de 50 % em relação à situação de referência.

Ressalta-se novamente que são muitos os parâmetros que afetam as tensões induzidas. No caso da avaliação do efeito do cabo guarda (ou do condutor neutro), deve-se levar em conta a altura do mesmo, as distâncias entre os pontos de aterramento, o valor da

resistência de terra e a indutância do condutor que conecta o cabo guarda (ou neutro) à terra (condutor de descida). Além disso, as posições relativas entre o ponto onde se deseja determinar a tensão, o local de incidência da descarga e o ponto de aterramento mais próximo também influenciam de modo significativo a tensão induzida na linha, tanto em termos de amplitude como de forma de onda. Caso a linha esteja protegida através de pára-raios, deve-se considerar também as características básicas dos mesmos, ou seja, existência ou não de centelhador e, em caso positivo, o valor da tensão disruptiva, bem como o comportamento dinâmico do bloco, isto é, a forma como a tensão entre os terminais do pára-raios varia no tempo em função da corrente que flui através do mesmo.

Em função da complexidade do fenômeno e do grande número de parâmetros com influência significativa nas tensões induzidas por descargas atmosféricas, a avaliação da eficácia de uma determinada alternativa de proteção só pode ser feita com base em um grande número de simulações computacionais. Dadas as diferenças observadas entre os resultados provenientes de diferentes modelos teóricos, torna-se evidente a importância de que tais simulações sejam efetuadas por meio de métodos de validade comprovada com base em diversas comparações entre resultados teóricos e experimentais, considerando diferentes situações. Finalmente, cumpre ressaltar que, embora todas as técnicas citadas conduzam a melhorias do desempenho das redes de distribuição, aspectos econômicos devem ser também considerados para a definição do método de proteção mais adequado, através da análise das relações custo / benefício correspondentes a cada alternativa.

## 14.5 PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS

Além dos distúrbios em sistemas elétricos, as descargas atmosféricas podem provocar danos em sistemas de telecomunicações, aparelhos eletro-eletrônicos, estruturas, árvores, além de incêndios, mortes de pessoas e animais, etc. É possível reduzir a probabilidade de ocorrência desses danos e minimizar as suas conseqüências através da utilização de sistemas de proteção contra descargas.

A decisão de proteger uma estrutura contra as descargas atmosféricas pode ser uma exigência legal (definida, no Brasil, pelos códigos de obras municipais), uma precaução do proprietário para evitar prejuízos ou ainda uma exigência das companhias de seguro. Se o código de obras de uma dada localidade não especificar quais estruturas devem obrigatoriamente ser protegidas, deve-se empregar o método preconizado pela Norma Brasileira NBR 5419 - Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas. A Norma fixa as condições exigíveis ao projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) de estruturas, pessoas e instalações no seu aspecto físico dentro do volume protegido. A Norma se aplica a estruturas comuns, utilizadas para fins comerciais, industriais, agrícolas, administrativos ou residenciais, e a algumas estruturas especiais, como chaminés de grande porte, tanques contendo líquidos ou gases



inflamáveis, antenas externas e guindastes. Assim como normas de outros países, a NBR 5419 estabelece critérios e métodos de proteção com base em modelos que combinam teoria e experiência prática.

É importante ressaltar, contudo, que a complexidade do fenômeno das descargas atmosféricas limita a precisão dos modelos existentes para prever o seu comportamento. Dessa forma, o SPDA não assegura a proteção total da estrutura, de pessoas e de bens, mesmo que o projeto esteja de acordo com o procedimento indicado na Norma, fato que tem motivado o desenvolvimento de vários estudos teóricos e experimentais na busca de modelos mais adequados e de técnicas mais eficazes, que proporcionem uma melhor garantia de proteção. Por outro lado, também é certo que, se as orientações da NBR 5419 referentes ao projeto e instalação do SPDA forem seguidas, os riscos de acidentes e de danos materiais diminuem consideravelmente.

São apresentados, nos itens subseqüentes, os principais conceitos e procedimentos relativos às técnicas de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Enfatiza-se, no entanto, que a leitura cuidadosa da norma NBR 5419 é absolutamente indispensável para o projeto de um SPDA.

#### **14.5.1 Avaliação da Necessidade de Proteção**

Existem várias situações nas quais a necessidade de proteção contra descargas atmosféricas é evidente, como o caso de locais de grande afluência de público ou onde são prestados serviços públicos essenciais. Da mesma forma, a proteção também se faz necessária no caso de estruturas isoladas ou situadas em áreas com alta densidade de descargas atmosféricas. Estruturas com altura superior a 25 m ou de valor histórico ou cultural também devem ser protegidas. Para estruturas especiais com riscos inerentes de explosão, como aquelas contendo gases ou líquidos inflamáveis, a NBR 5419 prescreve o mais alto nível de proteção contra descargas atmosféricas. Em outras situações, contudo, o sistema de proteção pode não ser exigido.

O primeiro passo na avaliação da necessidade de instalação de um SPDA diz respeito à determinação do número médio anual de vezes em que a estrutura é atingida por descargas atmosféricas. Esse cálculo é feito através do produto da densidade média anual de descargas para terra da região ( $N_g$ ) pela sua área de exposição ( $A_e$ ), conforme indicado na expressão (14.6). Caso a densidade  $N_g$  não seja conhecida, pode-se estimá-la com base no nível cerâmico da região, através da equação (14.2). A NBR 5419 apresenta um mapa das linhas isocerâmicas do Brasil.

A área de exposição da estrutura ( $A_e$ ) corresponde à área obtida a partir da sua vista superior, afastando-se do perímetro da mesma o valor da sua altura no ponto considerado. A equação (14.8) e a Figura 14.8 ilustram o procedimento para determinação da área de exposição de uma estrutura de comprimento  $L$ , largura  $W$  e altura  $h$ .

$$A_e = L.W + 2.h.(L + W) + \pi.h^2 \quad (14.8).$$

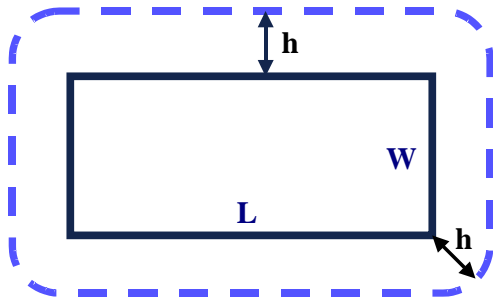


Fig. 14.8 - Área de exposição de uma estrutura de dimensões  $W \times L$  e altura  $h$ .

Considerando que  $N_g$  representa o número médio anual de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado, na equação (14.6) a área de exposição deve ser fornecida em quilômetros quadrados. Caso a área seja expressa em metros quadrados, o número médio anual de descargas que incidem diretamente na estrutura ( $N$ ) pode ser estimado através da equação

$$N = N_g.A_e.10^{-6} \quad (\text{descargas / ano}) \quad (14.9).$$

A avaliação da necessidade ou não de instalação de um SPDA deve considerar, além do risco de exposição, o tipo de ocupação, material, conteúdo e localização da estrutura e a topografia da região. A NBR 5419 atribui um determinado peso a cada um desses fatores de ponderação, conforme apresentado nas tabelas 14.2 a 14.6.

Tabela 14.2 - Fator A: Tipo de ocupação da estrutura.

TIPO DE OCUPAÇÃO	FATOR A
Casas e outras estruturas de porte equivalente	0,3
Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa *	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 (igrejas, pavilhões, teatros, museus, exposições, lojas de departamentos, correios, estações, aeroportos, estádios esportivos)	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades	1,7

\* a NBR 5419 estabelece os requisitos para instalação de antenas.

Tabela 14.3 - Fator B: Tipo de construção da estrutura.

TIPO DE CONSTRUÇÃO	FATOR B
Estrutura de aço revestida, com cobertura não metálica *	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 palha	1,0
Estrutura de madeira, ou revestida de madeira, com qualquer cobertura, exceto metálica ou palha	1,4
Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples, com cobertura metálica	1,7
Qualquer estrutura com teto de palha	2,0

\* estruturas de metal aparente que sejam contínuas até o nível do solo estão excluídas desta tabela porque requerem apenas um subsistema de aterramento.

Tabela 14.4 - Fator C: Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas.

CONTEÚDO E EFEITOS	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*	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

\* instalação de alto valor ou materiais vulneráveis a incêndios e às suas conseqüências.

Tabela 14.5 - Fator D: Localização da estrutura.

LOCALIZAÇÃO	FATOR D
Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (grandes cidades ou florestas)	0,4
Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar	1,0
Estruturas completamente isoladas ou que ultrapassam, no mínimo, duas vezes a altura das estruturas ou árvores próximas	2,0

Tabela 14.6 - Fator E: Topografia da região.

TOPOGRAFIA	FATOR E
Planície	0,3
Elevações moderadas, colinas	1,0
Montanhas entre 300 e 900m de altura	1,3
Montanhas acima de 900m de altura	1,7

A avaliação da necessidade de instalação do SPDA é feita a partir da determinação do parâmetro  $N_{df}$

$$N_{df} = N.A.B.C.D.E \quad (14.10),$$

utilizando-se o seguinte critério:

- $N_{df} \geq 10^{-3}$  (1 em 1.000): a estrutura requer um SPDA, pois o risco (frequência média anual de danos) é considerado inaceitável;
- $N_{df} \leq 10^{-5}$  (1 em 100.000): a estrutura dispensa um SPDA (os riscos são em geral, considerados aceitáveis), a menos que existam outros fatores preponderantes.

Se o valor de  $N_{df}$  estiver compreendido entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$ , a conveniência de um SPDA deve ser definida através de acordo entre projetista e usuário, devendo entretanto haver razões bem fundamentadas para justificar uma eventual decisão de não instalação do sistema de proteção.

### 14.5.2 Componentes de um SPDA e Níveis de Proteção

Todo SPDA é constituído pelos seguintes subsistemas:

- **subsistema de captadores:** visa a interceptação das descargas atmosféricas, reduzindo ao mínimo a probabilidade da estrutura ser atingida;
- **subsistema de descidas:** destina-se a conduzir a corrente da descarga atmosférica desde o subsistema captor até o subsistema de aterramento. Este elemento pode também estar embutido na estrutura;
- **subsistema de aterramento:** tem a função de conduzir e dispersar a corrente da descarga atmosférica na terra, reduzindo ao mínimo a probabilidade de tensões de toque e de passo perigosas. Este elemento também pode estar embutido na estrutura.

Todos os subsistemas devem ter capacidade térmica e resistência mecânica suficientes para suportar o aquecimento e os esforços eletromecânicos resultantes da passagem da corrente da descarga, bem como boa suportabilidade à corrosão.

Quando o afastamento entre os subsistemas de captadores e de descidas e o volume a proteger é suficiente para reduzir a probabilidade de centelhamentos perigosos, o SPDA é denominado **isolado**. Ao contrário, quando a instalação desses subsistemas é tal que a corrente da descarga pode entrar em contato com o volume a proteger, o SPDA é denominado **não isolado**.

O posicionamento do SPDA deve ser cuidadosamente estudado no estágio de projeto da edificação, tentando-se aproveitar os elementos condutores da própria estrutura. Esse procedimento facilita a construção de uma instalação totalmente integrada, melhora o aspecto estético, aumenta a eficiência do sistema de proteção e minimiza os custos. Quando um dos componentes da estrutura desempenha uma função de proteção contra descargas atmosféricas apesar de não ser instalado com essa finalidade, é denominado **componente natural** de um SPDA. Exemplos de componentes naturais são coberturas metálicas usadas como captadores, pilares metálicos ou armaduras de aço do concreto utilizadas como condutores de descida e armaduras de aço das fundações utilizadas como eletrodos de aterramento.

A **eficiência de interceptação** é definida como a relação entre a frequência média anual de descargas atmosféricas interceptadas e a frequência  $N$  sobre a estrutura, ao passo que a **eficiência de dimensionamento** é definida como a relação entre a frequência média anual de descargas atmosféricas interceptadas sem causar danos à estrutura e a frequência  $N$  sobre a estrutura. Por sua vez, a **eficiência de um SPDA** é definida como a relação entre a frequência média anual de descargas atmosféricas que não causam danos, interceptadas ou não pelo SPDA, e a frequência  $N$  sobre a estrutura.

A eficiência com a qual um SPDA protege uma estrutura contra os efeitos das descargas atmosféricas é expressa através do **nível de proteção**. A NBR 5419 estabelece 4 níveis de proteção, os quais estão relacionados com o tipo de estrutura e as consequências das descargas atmosféricas, conforme indicado a seguir:

- **NÍVEL I** - estruturas nas quais uma falha do sistema de proteção pode ocasionar interrupção inaceitável de serviços públicos, risco de incêndio, explosão ou falha de operação com consequências perigosas para a instalação, seus arredores e para o meio ambiente. Exemplos: estações de telecomunicação, usinas elétricas, refinarias, postos de combustíveis, fábricas de fogos ou munição, indústrias químicas, usinas nucleares e laboratórios bioquímicos;
- **NÍVEL II** - estruturas nas quais uma falha do sistema de proteção pode ocasionar risco de pânico, falha do sistema de alarme contra incêndio, perda de patrimônio cultural insubstituível, dificuldade de resgate de pessoas imobilizadas, efeitos indiretos em pessoas em tratamento intensivo, perda de comunicação e de dados. Exemplos: teatros, escolas, igrejas, áreas esportivas, lojas de departamentos, bancos, companhias comerciais, museus, sítios arqueológicos, hospitais, casas de repouso e prisões;

- **NÍVEL III** - estruturas de uso comum, nas quais os danos decorrentes de falhas do sistema de proteção são normalmente limitados a objetos no ponto de impacto ou no caminho do raio. Exemplos: residências, escritórios, fazendas e estabelecimentos agropecuários com estruturas de madeira e indústrias em geral;
- **NÍVEL IV** - estruturas construídas com material não inflamável, com pouco acesso de pessoas e com conteúdo também não inflamável. Exemplos: depósitos, em concreto armado, alvenaria ou estrutura metálica, de produtos agrícolas não inflamáveis.

### 14.5.3 Subsistema de Captores

Neste item são descritos os três métodos que, dependendo das dimensões da estrutura, podem ser utilizados para o projeto do subsistema de captação: Método Franklin, Modelo Eletrogeométrico e Método Faraday (condutores em malha ou Gaiola de Faraday). Os captores podem ser de cobre, alumínio ou aço galvanizado (a quente ou embutido em concreto), com seções mínimas de  $35 \text{ mm}^2$ ,  $70 \text{ mm}^2$  e  $50 \text{ mm}^2$ , respectivamente.

Destaca-se que quaisquer elementos condutores expostos que possam ser atingidos por descargas atmosféricas, como coberturas metálicas sobre o volume a ser protegido, mastros ou outros elementos condutores salientes nas coberturas, calhas de recolhimento de águas pluviais, tubulações metálicas (exceto gás), armaduras de aço interligadas nas estruturas de concreto armado, etc., são captores naturais. Tais elementos devem ser considerados como parte do SPDA, desde que cumpram plenamente os requisitos estabelecidos pela NBR 5419. Por sua vez, os subsistemas de descidas e de aterramento independem do subsistema de captores.

#### 14.5.3.1 Método Franklin

O Método Franklin, também conhecido como Método do Ângulo de Proteção, define o volume de proteção de uma haste vertical como o de um cone com ângulo do vértice igual ao ângulo de proteção  $\alpha$ , como indicado na Figura 14.9. O raio da circunferência da base do cone é denominado raio de atração ( $R_a$ ). No caso dos condutores horizontais suportados por hastes verticais, o volume de proteção é obtido deslocando-se horizontalmente o cone de proteção entre as duas hastes.

O ângulo de proteção depende da altura do captor e do nível de proteção. As relações envolvendo esses parâmetros são apresentadas na Tabela 14.7. Nota-se que, para um mesmo nível de proteção, o ângulo de proteção diminui à medida que aumenta a altura do captor. Assim, para o nível de proteção III o ângulo correspondente a um captor de até 20 m de altura é de  $45^\circ$ , ao passo que para alturas entre 31 m e 45 m o ângulo diminui para  $25^\circ$ . Observa-se também que para o nível de proteção I a aplicação do Método

Franklin é restrita a captosres com altura de até 20 m, enquanto que para o nível IV o método pode ser aplicado a captosres de até 60 m de altura.

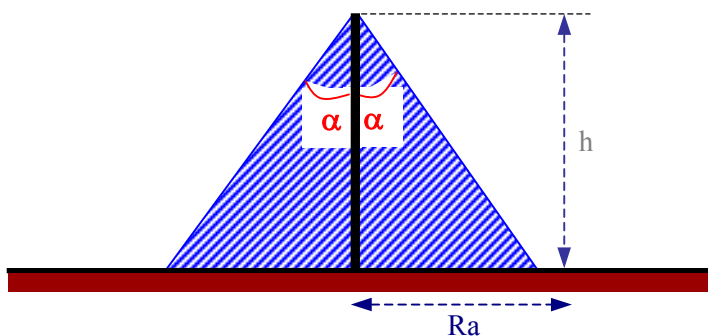


Fig. 14.9 - Volume de proteção de uma haste de altura  $h$  ( $\alpha$ : ângulo de proteção).

Tabela 14.7 - Ângulo de proteção.

Nível de proteção	Altura do captor				
	até 20m	21 m a 30 m	31 m a 45 m	46 m a 60 m	> 60m
I	25°	1)	1)	1)	2)
II	35°	25°	1)	1)	2)
III	45°	35°	25°	1)	2)
IV	55°	45°	35°	25°	2)

1) Somente o Modelo Eletrogeométrico e o Método de Faraday são aplicáveis.

2) Somente o Método Faraday é aplicável.

### 14.5.3.2 Modelo Eletrogeométrico

Também chamado de Método da Esfera Rolante ou Fictícia, trata-se da ferramenta mais moderna para o cálculo do volume de proteção dos captosres de um SPDA, sejam eles constituídos por hastes, cabos ou uma combinação de ambos. O Modelo Eletrogeométrico foi concebido a partir de diversos estudos teóricos e experimentais, tendo sido desenvolvido inicialmente para avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Sua aplicação se estende a estruturas com até 60 m de altura, sendo particularmente útil no caso de construções com formas arquitetônicas complexas.

Conforme mencionado no item 14.2.1, as descargas mais frequentes são as nuvem-terra negativas, nas quais o "stepped leader" se desloca em direção ao solo em passos sucessivos, induzindo na superfície cargas elétricas positivas cuja quantidade cresce à medida que se aproxima do solo. Quando a densidade de cargas em alguma árvore,

estrutura ou ponto da superfície é tal que o campo elétrico ultrapassa um certo valor crítico, forma-se um "leader" ascendente, que se propaga em direção ao "stepped leader". O raio atinge o solo ou a estrutura no local de onde partiu o "leader" ascendente, geralmente o ponto mais próximo da extremidade do "stepped leader". Por essa razão o trajeto da descarga não é necessariamente vertical, o que explica os casos de estruturas altas atingidas lateralmente. Portanto, uma esfera com centro na extremidade do "stepped leader" e com raio igual ao comprimento dos seus passos, antes do último salto, é o lugar geométrico dos pontos que podem ser atingidos pela descarga. O raio da esfera corresponde à distância de atração e depende da corrente prospectiva da descarga. O primeiro ponto a ser tocado pela esfera, seja na estrutura ou no solo, será atingido pela descarga. A aplicação desse modelo às estruturas é feita admitindo-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- somente são consideradas as descargas nuvem-terra negativas;
- o "stepped leader" é vertical e não apresenta ramificações;
- o raio da esfera é igual à distância de atração;
- a descarga final se dá para o objeto aterrado mais próximo da extremidade do "stepped leader", independentemente da sua massa ou das condições de aterramento;
- as hastes verticais e os condutores horizontais têm o mesmo poder de atração;
- a probabilidade de ser atingida a terra ou uma estrutura aterrada é a mesma.

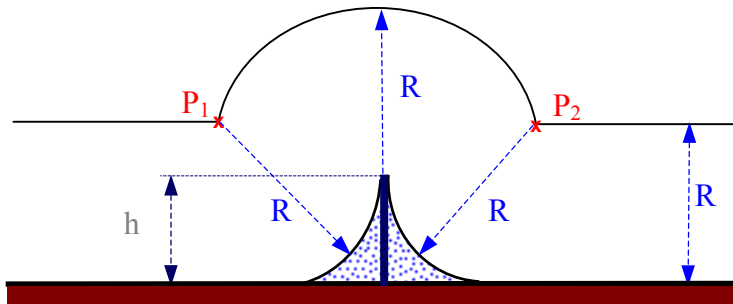
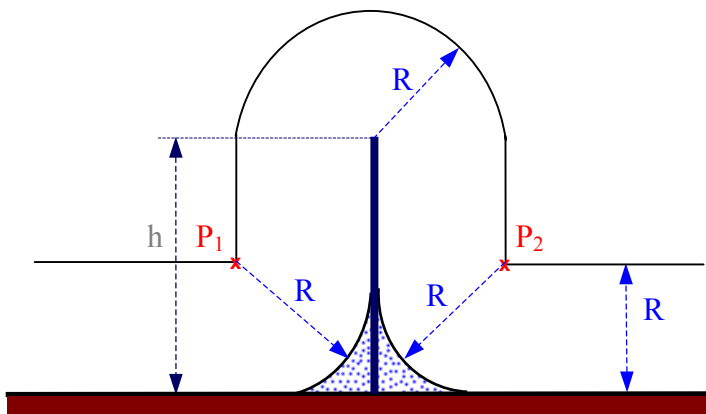
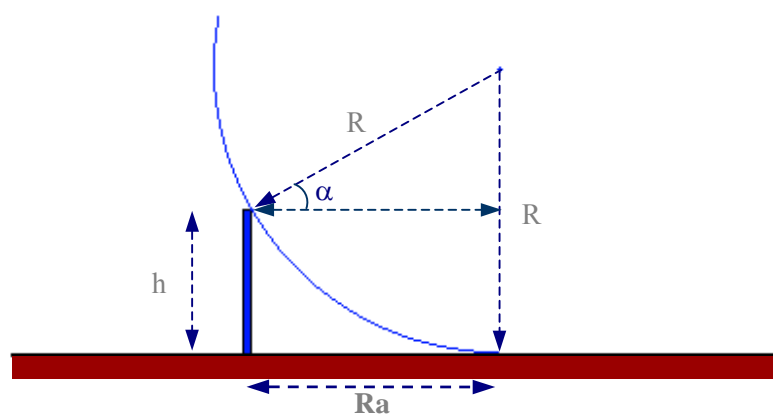
A Tabela 14.8 apresenta os valores do raio da esfera (R) prescritos pela NBR 5419 em função do nível de proteção.

Tabela 14.8 - Raio da esfera fictícia (R) em função do nível de proteção.

Nível de Proteção	I	II	III	IV
R (m)	20	30	45	60

A determinação do volume protegido por uma haste vertical de altura H é feita traçando-se inicialmente uma reta paralela ao plano de terra a uma distância igual ao raio da esfera fictícia; com centro na extremidade da haste traça-se um arco de circunferência de raio R que determina na reta anterior dois pontos ( $P_1$  e  $P_2$ ). Traçam-se a seguir, a partir desses pontos, dois novos arcos de circunferência, ambos com raio R, desde a extremidade da haste até o solo. A área protegida pela haste é definida pela área compreendida entre esses dois arcos e o solo, conforme indicado na Figura 14.10. Sendo a simetria de revolução, o volume de proteção é obtido girando-se a figura em  $180^\circ$  em relação à haste. O volume de proteção correspondente a uma haste com comprimento superior ao raio da esfera fictícia é mostrado na Figura 14.11. Nesse caso o raio de atração ( $R_a$ ) corresponde ao raio R da esfera fictícia. A Figura 14.12 ilustra o método de obtenção do raio de atração para uma haste com altura h.



Fig. 14.10 - Volume de proteção de uma haste de altura  $h < R$ .Fig. 14.11 - Volume de proteção de uma haste de altura  $h > R$ .Fig. 14.12 - Determinação do raio de atração  $R_a$ .

O raio de atração  $R_a$  é obtido a partir da expressão

$$R_a = R \cdot \cos \alpha \quad (14.11),$$

onde

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{R-h}{R}\right) \quad (14.12).$$

### 14.5.3.3 Método Faraday

Este método se baseia no princípio de que, se a corrente se distribui uniformemente na superfície de uma estrutura, é nulo o campo no interior da mesma. Tal situação corresponde, por exemplo, a uma estrutura com teto e paredes metálicas. Captadores em malha consistem em uma rede de condutores dispostos horizontalmente ou no plano inclinado sobre o volume a proteger, ao passo que a Gaiola de Faraday é formada por uma rede de condutores envolvendo todos os lados do volume a proteger. A Tabela 14.9 apresenta a largura máxima do módulo da malha em função do nível de proteção. O módulo da malha deve constituir um anel fechado com comprimento não superior ao dobro de sua largura. A Figura 14.13 apresenta um exemplo de aplicação do Método Faraday com as dimensões máximas da malha correspondentes ao nível de proteção I.

Tabela 14.9 - Largura do módulo da malha (subsistema de captadores).

Nível de proteção	Largura máxima do módulo da malha (m)
<b>I</b>	5
<b>II</b>	10
<b>III</b>	10
<b>IV</b>	20

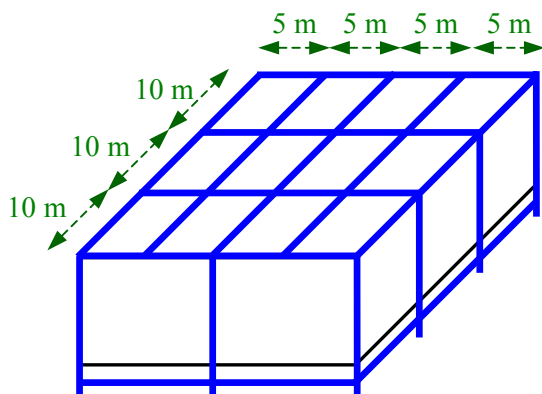


Fig. 14.13 - Exemplo de aplicação do Método Faraday (dimensões máximas da malha correspondentes ao nível de proteção I).

### 14.5.4 Subsistema de Descidas

Após terem sido captadas, as correntes das descargas atmosféricas devem ser conduzidas ao subsistema de aterramento através do subsistema de descidas. Os condutores podem ser de cobre, alumínio ou aço galvanizado (a quente ou embutido em concreto) com seções mínimas de 16 mm<sup>2</sup>, 25 mm<sup>2</sup> e 50 mm<sup>2</sup>, respectivamente, no caso de estruturas com altura de até 20 m. No caso de estruturas mais altas as seções mínimas devem ser iguais às dos condutores do subsistema de captadores. Além de suportar térmica e mecanicamente as correntes e os respectivos esforços dinâmicos e resistir às intempéries e à corrosão, o subsistema de descidas deve garantir que não haja descargas laterais nem risco para as pessoas que estejam nas proximidades.

Estruturas metálicas de torres, postes e mastros constituem descidas naturais até a base das mesmas, dispensando a necessidade de condutores de descida paralelos ao longo de sua extensão. Porém, em construções de alvenaria ou de qualquer outro tipo sem armadura metálica interligada, deve ser implantado um SPDA com descidas externas que podem ser embutidas.

No caso de SPDAs isolados devem ser previstas as seguintes quantidades mínimas de condutores de descida, salientando-se que o espaçamento entre estes e as instalações metálicas do volume a proteger não deve ser inferior a 2 m:

- um ou mais mastros separados: um condutor de descida para cada mastro não condutor;
- um ou mais condutores horizontais separados: um condutor de descida na extremidade de cada condutor horizontal;
- rede de condutores: um condutor de descida para cada estrutura de suporte não condutora.

Para o caso de SPDAs não isolados, os condutores de descida devem ser colocados ao longo do perímetro do volume a ser protegido, sendo que seus espaçamentos médios não devem ultrapassar os valores indicados na Tabela 14.10. Caso o número mínimo de condutores assim determinado seja inferior a dois, devem ser instaladas duas descidas.

Tabela 14.10 - Espaçamento médio entre os condutores de descida não naturais em função do nível de proteção.

Nível de proteção	Espaçamento médio (m)
<b>I</b>	10
<b>II</b>	15
<b>III</b>	20
<b>IV</b>	25

Os condutores de descida não naturais devem ser interligados através de condutores horizontais, formando anéis. O primeiro anel deve ser feito no aterramento, o segundo até 4 m do solo e os seguintes a cada 20 m de altura. Os condutores de descida devem ser instalados a uma distância mínima de 0,5 m de portas, janelas e outras aberturas e devem ser fixados a cada metro de percurso. Deve-se levar em consideração também o material da parede onde os mesmos serão fixados, conforme especificado na NBR 5419.

Os condutores de descida devem ser retilíneos e verticais, de modo a prover o trajeto mais curto possível para a terra, bem como devem estar protegidos contra danos mecânicos até a altura mínima de 2,5 m acima do nível do solo. Exceto no caso de descidas naturais com perfis metálicos, não se admite nenhum tipo de emenda, salvo na interligação entre o condutor de descida e o condutor de aterramento.

Para construções com concreto protendido, os cabos sujeitos a protensão não podem fazer parte do SPDA. Por sua vez, as armaduras de aço interligadas das estruturas de concreto armado podem ser consideradas condutores de descida naturais, desde que sejam satisfeitas as condições estabelecidas pela NBR 5419. Para construções em concreto armado pode ser implantado um SPDA com descidas externas ou podem ser utilizadas como descidas as próprias armaduras do concreto, desde que os testes de continuidade resultem em valores de resistência inferiores a  $1 \Omega$ .

### 14.5.5 Subsistema de Aterramento

Os condutores do subsistema de aterramento são chamados de eletrodos, os quais podem ser de cobre ou de aço galvanizado (a quente ou embutido em concreto), com seções mínimas de  $50 \text{ mm}^2$  e  $80 \text{ mm}^2$ , respectivamente. Para que o subsistema de aterramento cumpra a sua finalidade - dissipar no solo as correntes das descargas sem provocar sobretensões perigosas -, o tipo e as dimensões do arranjo são mais importantes que o valor da resistência de terra. Recomenda-se, contudo, que no caso de eletrodos não naturais o valor da resistência seja de até aproximadamente  $10 \Omega$ .

Podem ser utilizados como eletrodos de aterramento condutores em anel, condutores horizontais radiais e hastes verticais ou inclinadas. A NBR 5419 prescreve as condições em que as armaduras de aço das fundações das estruturas podem ser utilizadas como eletrodos de aterramento natural.

No caso de estruturas com perímetro inferior a 25 m e solos com resistividade de até  $100 \Omega \cdot \text{m}$ , cada condutor de descida deve ser conectado a pelo menos um eletrodo distinto com comprimento mínimo estabelecido pela NBR 5419 em função do nível de proteção e da resistividade do solo. Já para estruturas com perímetro superior a 25 m o aterramento deve ser realizado obrigatoriamente através de eletrodos em anel ou embutidos nas fundações.

### 14.5.6 Sistema Interno de Proteção

O sistema interno de proteção contra descargas atmosféricas consiste em um conjunto de dispositivos destinados a reduzir os efeitos elétricos e magnéticos das correntes, como incêndios, explosões e choques elétricos, no interior do volume a proteger. A medida mais eficaz para reduzir tais riscos é a **equalização de potencial**, a qual é obtida mediante o uso de condutores interligando o SPDA, a armadura metálica da estrutura, as instalações metálicas, as massas e os condutores dos sistemas elétricos de potência e de sinal dentro do volume a proteger. Eventualmente essas ligações podem incluir dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

Para evitar que as tensões geradas ao longo dos condutores de descida provoquem centelhamentos perigosos quando uma ligação equipotencial não puder ser efetuada, a distância de separação entre os condutores do SPDA e as instalações metálicas, massas e demais condutores deve ser superior à **distância de segurança**. Esta distância depende do comprimento do condutor de descida compreendido entre o ponto em que se considera a proximidade e o ponto mais próximo da ligação equipotencial, do nível de proteção, da configuração dimensional e do material de separação.

A NBR 5419 especifica os procedimentos para se efetuar as ligações equipotenciais e para determinação da distância de segurança.

### 14.5.7 Inspeção

A inspeção de um SPDA visa assegurar que:

- o mesmo está conforme o projeto e todos os seus componentes se encontram em bom estado, com as conexões firmes e livres de corrosão;
- o valor da resistência de terra é compatível com o arranjo do sistema de aterramento e com a resistividade do solo e pode ser calculado a partir da estratificação do solo, com uso de um programa adequado;
- todas as novas instalações acrescentadas posteriormente à instalação original estão integradas no volume a proteger.

A inspeção deve ser realizada durante a construção da estrutura e após a instalação ou a realização de qualquer modificação ou reparo no SPDA, bem como no caso do mesmo ser atingido por alguma descarga. Anualmente deve ser efetuada uma inspeção visual. A periodicidade das inspeções completas depende do tipo de instalação, variando de 5 anos para estruturas destinadas a fins residenciais, comerciais, administrativos, agrícolas ou industriais (sem risco de incêndio ou explosão) a 1 ano para estruturas contendo munição

ou explosivos e locais expostos a corrosão atmosférica severa. No caso de estruturas destinadas a grandes concentrações públicas, indústrias contendo áreas com risco de explosão e depósitos de material inflamável, as inspeções devem ser efetuadas a cada 3 anos. A NBR 5419 prescreve a seqüência das inspeções e a documentação técnica que deve ser mantida no local ou em poder dos responsáveis pela manutenção do SPDA.

### 14.5.8 Exemplo de Aplicação

Vamos projetar o SPDA externo da estrutura residencial, de alvenaria, com dimensões indicadas na Fig. 14.14. A estrutura conta com antena externa (altura de 1,5 m) e se encontra em terreno plano, sem árvores em suas proximidades. A estrutura está localizada na cidade de São Paulo, cujo nível cerâmico é de 70 dias de trovoada/ano.

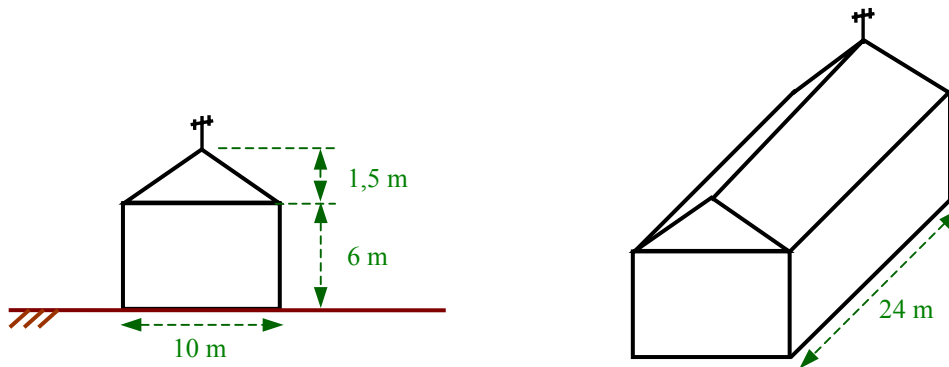


Fig. 14.14 - Estrutura a ser protegida.

O primeiro passo consiste na avaliação da necessidade de proteção, conforme indicado no item 14.5.1. A área de exposição da estrutura é determinada com base na Fig. 14.15, ou seja:

$$A_e = 24 \cdot 10 + 2 \cdot 6 \cdot (24 + 10) + \pi \cdot 6^2 + 2 \cdot (10 \cdot 1,5/2) \approx 776 \text{ m}^2.$$

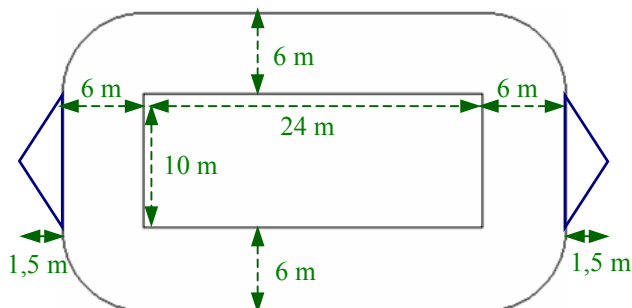


Fig. 14.15 - Determinação da área de exposição da estrutura indicada na Fig. 14.14.

A densidade média anual de descargas é obtida através da equação (14.2):

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} = 0,04 \cdot 70^{1,25} \approx 8,1 \text{ descargas / (km}^2 \cdot \text{ano)}.$$

Determina-se em seguida o número médio anual de descargas que incidem diretamente na estrutura, através da equação (14.9):

$$N = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6} = 8,1 \cdot (776) \cdot 10^{-6} \approx 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ descargas diretas / ano}.$$

Os fatores de ponderação são obtidos a partir das tabelas 14.2 a 14.6:

A = 0,7 (casa com antena externa);

B = 1,0 (estrutura de alvenaria com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha);

C = 0,3 (residência comum);

D = 1,0 (localizada em área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar);

E = 0,3 (terreno plano).

A avaliação da necessidade de instalação do SPDA é feita a partir da determinação do parâmetro  $N_{df}$  (equação (14.10))

$$N_{df} = N \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E = 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot (0,7) \cdot (1,0) \cdot (0,3) \cdot (1,0) \cdot (0,3) \approx 0,4 \cdot 10^{-3}.$$

Como o valor de  $N_{df}$  está compreendido entre  $10^{-5}$  e  $10^{-3}$ , o SPDA só não será instalado se houver razões bem fundamentadas para justificar tal decisão, o que não é o caso.

Vale ressaltar que o projeto dos subsistemas de descidas e de aterramento independe do subsistema de captação, para o qual existem várias alternativas. Estas variam com o nível de proteção, a altura escolhida para os captadores e a geometria da estrutura (relação entre comprimento e largura). A decisão acerca da melhor opção está relacionada ao custo associado a cada alternativa, embora a importância do fator estético seja, em muitas situações, preponderante. Vamos considerar neste caso o nível de proteção III para a estrutura, conforme os critérios apresentados no item 14.5.2, e definir inicialmente os subsistemas de descidas e de aterramento para em seguida compararmos os resultados referentes aos três métodos de dimensionamento do subsistema de captação.

De acordo com a Tabela 14.10 o espaçamento médio entre os condutores de descida não deve ser superior a 20 m. Assim, sendo o perímetro da estrutura igual a 68 m, para que este requisito seja atendido serão necessários pelo menos quatro condutores de descida, os quais devem ser instalados em cada um dos cantos da estrutura. Uma opção é o condutor de cobre, que, conforme visto no item 14.5.4, deve ter seção mínima de  $16 \text{ mm}^2$ . Embora mais caro que o alumínio e o aço galvanizado a quente, o cobre é mais resistente às intempéries.

No que concerne ao subsistema de aterramento, deve ser utilizada a configuração em anel, visto que o perímetro da estrutura é superior a 25 m. Conforme item 14.5.5, o aterramento pode ser realizado através de um condutor de cobre com seção mínima de  $50 \text{ mm}^2$  contornando a estrutura e interligando todas as descidas.

Para o projeto do subsistema de captação pelos métodos Franklin e Eletrogeométrico vamos considerar hastes com 1,5 m de altura. Destaca-se que a antena, que deve sempre ser aterrada, funciona como um captor natural.

### Método Franklin

Através da Tabela 14.7 verifica-se que o ângulo de proteção correspondente é de  $45^\circ$ , o que equivale a dizer que o raio de atração de cada captor é igual a 1,5 m. Conseqüentemente, para proteger a estrutura são necessárias 45 hastes (incluindo a antena), dispostas como indicado na Figura 14.16. Nesta figura podem também ser visualizadas as interligações dos captores, três das quatro descidas e parte do anel de aterramento. A Figura 14.17 mostra que, com esse arranjo, toda a estrutura se encontra dentro do volume de proteção do SPDA.

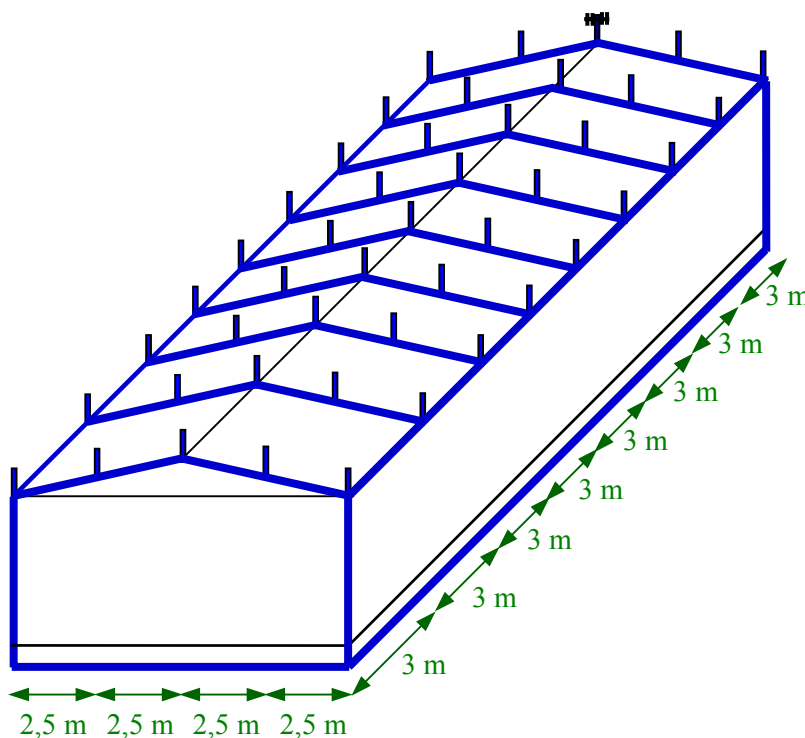


Fig. 14.16 - Posicionamento dos captores (1,5 m de comprimento) para proteção da estrutura de acordo com o Método Franklin.



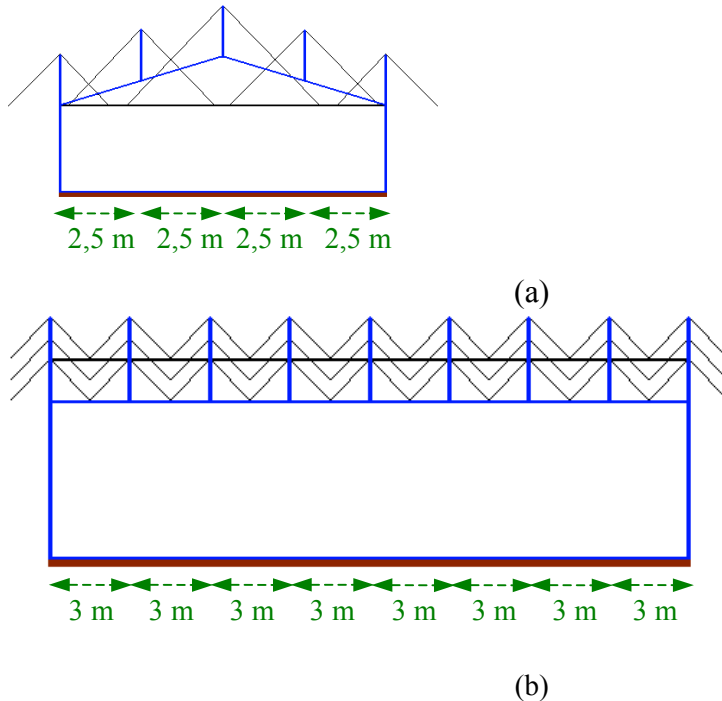


Fig. 14.17 - Verificação do volume de proteção de acordo com o Método Franklin.  
a) vista frontal b) vista lateral

#### Modelo Eletrogeométrico

Conforme indicado na Tabela 14.8, o raio  $R$  da esfera fictícia é igual a 45 m para o nível de proteção III. O ângulo  $\alpha$  (Figura 14.12) é calculado através da expressão (14.12):

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{R-h}{R}\right) = \arcsen\left(\frac{45-1,5}{45}\right) \approx 75,2^\circ,$$

podendo-se então, através da equação (14.11), determinar o raio de atração correspondente:

$$R_a = R \cdot \cos\alpha = 45 \cdot \cos(75,2^\circ) \approx 11,5 \text{ m.}$$

Nota-se que nesse caso o raio de atração é bem superior àquele correspondente ao Método Franklin, de modo que a quantidade de captosres pode ser substancialmente reduzida, conforme mostrado na Figura 14.18. Embora, assim como no caso anterior, um condutor em forma de anel deva ser instalado na periferia do teto, duas hastes (uma das quais a antena) separadas de 23 m são suficientes para proteger a estrutura, conforme pode ser verificado através da Figura 14.19.

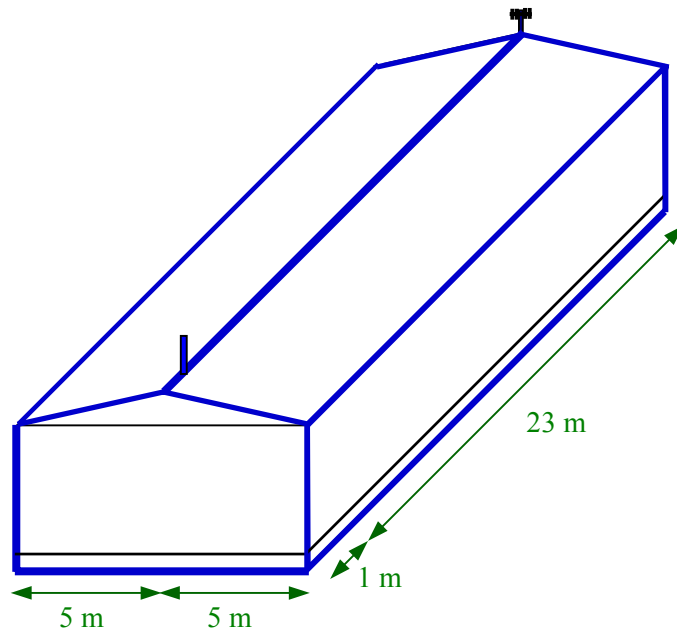


Fig. 14.18 - Posicionamento dos captores (1,5 m de comprimento) para proteção da estrutura de acordo com o Modelo Eletrogeométrico.

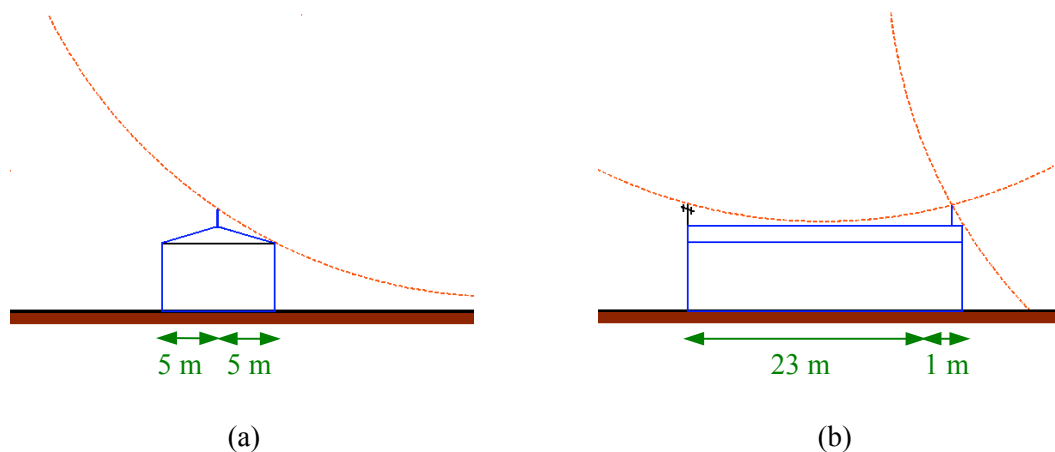


Fig. 14.19 - Verificação do volume de proteção de acordo com o Modelo Eletrogeométrico (raio da esfera fictícia  $R = 45$  m).  
 a) vista frontal      b) vista lateral

Método Faraday:

De acordo com a Tabela 14.9, a largura máxima do módulo da malha correspondente ao nível de proteção III é de 10 m, logo o seu comprimento não deve ser superior a 20 m.

Considerando então as dimensões da estrutura em questão ( $10 \times 24 \text{ m}^2$ ), verifica-se que cada módulo deverá ter  $10 \times 12 \text{ m}^2$ , como mostrado na Figura 14.20.

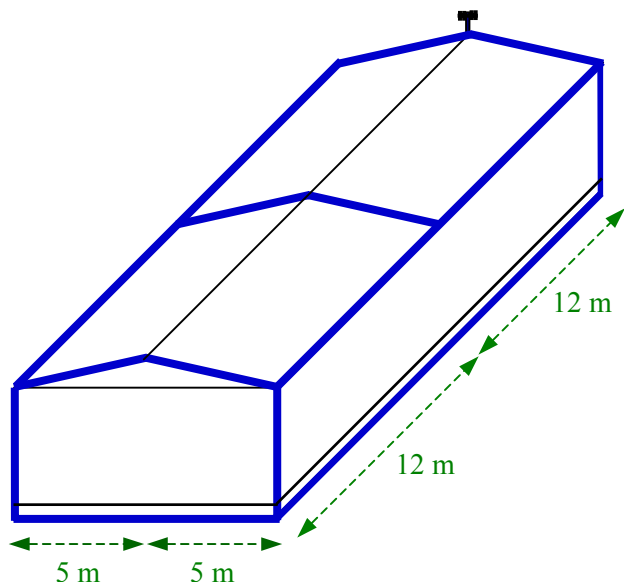


Fig. 14.20 - Posicionamento dos captores para proteção da estrutura de acordo com o Método Faraday.

#### Comentários

Conforme pôde-se observar, o Método Franklin prevê menor eficiência para os captores que o Modelo Eletrogeométrico, ou seja, especifica um número bem maior de hastes para proteger a mesma estrutura. O Método Franklin, que se baseia apenas em resultados de observação, já não é previsto pelas normas de países como Estados Unidos e Dinamarca, e tende a desaparecer. O Modelo Eletrogeométrico conduz, em geral, a custos mais baixos no caso de estruturas de grandes dimensões. Por sua vez, o Método Faraday proporciona uma proteção mais adequada sob o ponto de vista estético e pode apresentar menores custos no caso de pequenas construções, além de ser o único aplicável no caso de estruturas com altura superior a 60 m.

#### **Referências Bibliográficas**

- [1] NBR 5419 - Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas (Norma Técnica ABNT), 2001.
- [2] LEITE, D. M. **Proteção contra descargas atmosféricas**. 3. ed. São Paulo, Oficina de Mydia, 1997.