

Silvério Visacro Filho

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

uma abordagem de engenharia



Artliber
EDITORA

Descargas Atmosféricas

uma abordagem de engenharia

Copyright© 2019 by Artliber Editora Ltda.

Revisão:
Rosa Symanski

Foto de Capa:
Carlos Roberto - Jornal Hoje em Dia -

Capa e composição eletrônica:
Espaço Editorial

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Visacro Filho, Silvério
Descargas atmosféricas: uma abordagem de
engenharia /
Silvério Visacro Filho. --
São Paulo: Artliber Editora, 2005.

Bibliografia.

1. Descargas elétricas 2. Descargas elétricas -
Proteção 3. Eletricidade atmosférica 4. Raios -
Proteção I. Título

05-5580

CDD-621.317

Índices para catálogo sistemático:

1. Descargas atmosféricas : Proteção : Engenharia 621.317

2019

Todos os direitos desta edição reservados à
Artliber Editora Ltda.
Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3.294
05083-010 - São Paulo - SP - Brasil
Tel.: (11) 3641-3893
info@artliber.com.br
www.artliber.com.br

ÍNDICE

Capítulo I - Introdução	17
1. Considerações preliminares	17
2. Conceito básico	18
3. Efeitos principais das Descargas	20
4. Breves considerações de ordem histórica	20
5. Generalidades	22
Capítulo II - Aspectos do ambiente elétrico do planeta	23
1. Considerações preliminares	23
2. O ambiente elétrico do planeta Terra	23
2.1 Características elétricas da Terra	23
2.2 O circuito elétrico global	23
2.3 O processo de eletrificação de nuvens	30
Capítulo III - Descrição fundamental do fenômeno físico	35
1. Considerações preliminares	35
2. O mecanismo básico de estabelecimento da Descarga Atmosférica	35
2.1 Indução de cargas elétricas	35
2.2 Descargas elétricas em meios gasosos	36
2.3 O Poder das Pontas	37

3. Mecanismo básico de estabelecimento das descargas atmosféricas	37
3.1 Transferência de carga para o solo: a descarga negativa	37
3.2 As descargas negativas subseqüentes	44
3.3 A descarga positiva	46
3.4 A descarga bipolar	47
4. A componente contínua da corrente de descarga	48
5. Aspectos complementares	48
6. Considerações finais	52
Capítulo IV - Tipificação das descargas atmosféricas e nomenclatura	53
1. Considerações preliminares	53
2. Tipificação de Descargas	53
2.1 Tipificação pelo percurso da descarga	53
2.2 Tipificação pela direção de propagação do canal precursor da descarga	55
2.3 Tipificação pelo sinal da carga transferida para o solo	56
3. Comentários preliminares sobre a freqüência de ocorrência	58
4. Nomenclatura	58
Capítulo V - Caracterização dos parâmetros de descarga	65
1. Considerações preliminares	65
2. Parâmetros de freqüência de incidência geográfica	65
3. Parâmetros físicos da descarga atmosférica	74
3.1 Forma de onda da corrente de descarga	74
3.1.1 Introdução	74
3.1.2 Ondas típicas de corrente: curvas média e mediana	74
3.1.3 Representação da onda de corrente pela curva dupla exponencial	77
3.1.4 Representação da onda de corrente pela curva de Heidler	79
3.1.5 Peculiaridades da forma das ondas originais individuais	81
3.2 Amplitude da corrente de descarga	82
3.3 Carga transferida por descarga	84
3.4 Os parâmetros de tempo típicos da onda de descarga	85
3.4.1 Tempo de frente de onda	86
3.4.2 Tempo de meia onda	89
3.4.3 Tempo de duração total de descarga	90
3.5 Derivada máxima	91
3.6 Energia por unidade de resistência	92
4. Considerações finais sobre os parâmetros de descarga	93

Capítulo VI - Medição e detecção de parâmetros de descarga	97
1. Considerações preliminares	97
2. Medição direta da corrente de descarga	98
2.1 Introdução	98
2.2 Transdutores mais empregados para registro da onda de corrente	98
2.3 Medição de descargas naturais através de torres “instrumentadas”	101
2.4 Descargas artificiais induzidas por foguetes	105
2.5 Emprego de Elos Magnéticos para detecção do valor de pico da corrente	110
2.6 Considerações genéricas sobre as técnicas de medição direta	113
3. Medição indireta de parâmetros de descarga	114
3.1 Introdução	114
3.2 Comentários preliminares: efeitos indiretos das descargas utilizados na sua medição	114
3.3 Medição tradicional de parâmetros de incidência	116
3.3.1 Nível cerâmico	116
3.3.2 Contadores de descarga	118
3.4 Os sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas	121
3.4.1 Introdução aos sistemas terrestres de localização de descargas	121
3.4.2 Princípios fundamentais das técnicas de detecção e localização	123
3.4.2.1 Técnica de Indicação de Direção — “DF”	124
3.4.2.2 Técnica da Diferença no Tempo de Chegada — “ToA”	126
3.4.2.3 Técnica Interferométrica	127
3.4.3 Sistemas de detecção em operação	128
3.4.4 Discriminação dos tipos de descargas e estimativa de parâmetros	130
3.5 A rede brasileira de detecção	130
3.6 Outros tipos de detecção indireta de descargas: uso de satélites e de radar	132
 Capítulo VII - Efeitos de maior interesse das descargas atmosféricas e aspectos de segurança	 137
1. Introdução	137
2. A descarga direta	138
2.1 Considerações gerais	138
2.1.1 Influência do parâmetro energia por unidade de resistência	138
2.1.2 Influência do parâmetro valor de pico da corrente de descarga	141
2.2 A incidência direta de descarga em linhas de transmissão	143
3. Descarga indireta ou próxima	144
3.1 Considerações preliminares	144

3.2 A tensão induzida em linhas por descargas atmosféricas	146
4. Aspectos de segurança	147
4.1 Introdução	147
4.2 Caracterização dos acidentes típicos associados a descargas atmosféricas	147
4.3 Situações de exposição de risco	153
4.4 Medidas preventivas	155
5. A incidência direta de descargas em linhas de transmissão	157
5.1 Generalidades	157
5.2 Mecanismo de ruptura de isolamento em linha sem cabo de blindagem: o “flashover”	158
5.3 Mecanismo de interrupção numa linha blindada: o “back-flashover”	161
5.3.1 Considerações preliminares	161
5.3.2 Parâmetros de influência na amplitude da sobretensão resultante	165
5.3.3 Medidas preventivas	176
5.3.4 A solicitação por incidência a meio de vão	177
5.3.5 Considerações quanto aos aspectos quantitativos	178
6. Fundamentos de tensão induzida por descargas atmosféricas	179
6.1 A importância do efeito Tensão Induzida	179
6.2 Considerações preliminares sobre o fenômeno Tensão Induzida	179
6.3 Modelos de corrente de retorno	181
6.3.1 Dinâmica de estabelecimento da corrente de retorno	181
6.3.2 Principais modelos de corrente de retorno	187
6.4 Campos gerados pela corrente de retorno	190
6.5 O acoplamento eletromagnético entre canal de descarga e linha	192
6.6 Principais modelos de acoplamento	195
6.7 A dinâmica do fenômeno tensão induzida	196
6.7.1 Estabelecimento do efeito	196
6.7.2 Parâmetros de influência na forma e na amplitude da tensão induzida	199
6.8 Tensões induzidas em sistemas de energia e comunicação	204
7. Efeitos das descargas na rede aérea de distribuição de energia elétrica	205
7.1 Considerações preliminares	205
7.2 Efeito da tensão induzida no circuito de média tensão	207
7.3 Transferência de surtos da rede primária para a rede de baixa tensão através do transformador de distribuição	212
Capítulo VIII - Princípios de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas	217
1. Considerações preliminares	217

2. Conceito fundamental de sistemas de proteção de estruturas	217
3. Modelos de incidência	219
3.1 Modelo eletrogeométrico (EGM)	219
3.2 O modelo de progressão do líder	229
4. Filosofias de sistemas de proteção	232
4.1 Filosofia “Franklin”	234
4.2 Filosofia “Gaiola de Faraday”	237
5. Componentes naturais do SPDA	240
6. Sistemas híbridos	242
7. Considerações complementares	243
Capítulo IX - Referências bibliográficas	247

DESCRIÇÃO FUNDAMENTAL DO FENÔMENO FÍSICO

1 - Considerações preliminares

No capítulo anterior foram considerados aspectos objetivos relativos ao ambiente elétrico da Terra, necessários à compreensão do fenômeno Descarga Atmosférica. No presente capítulo se evolui para a descrição do mecanismo básico de estabelecimento da Descarga e, nos capítulos seguintes, procede-se à caracterização de seus parâmetros e efeitos.

Neste capítulo, o objetivo fundamental refere-se ao entendimento das questões físicas associadas às descargas atmosféricas, à natureza dos fenômenos considerados. Assim, não existe preocupação com a quantificação de grandezas, tópico reservado para capítulos posteriores.

2 - Fenômenos básicos envolvidos no estabelecimento da descarga atmosférica

2.1 - Indução de cargas elétricas

É uma propriedade física muito conhecida a capacidade das cargas elétricas de induzirem cargas de sinal contrário em corpos condutores.

Assim, a base da nuvem fortemente carregada com cargas negativas é

capaz de induzir no solo sob sua sombra uma distribuição de cargas positivas de mesma intensidade, gerando um forte campo elétrico na região intermediária entre nuvem e solo, com valores elevados da diferença de potencial associada.

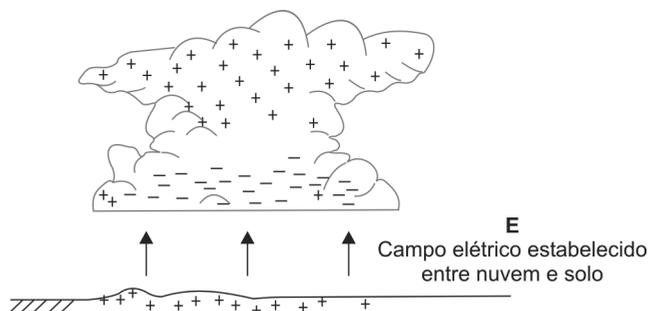


Figura 3.1 - Campo induzido entre nuvem e solo pelo carregamento da base da nuvem

O efeito dos centros de cargas positivas presentes na parte superior da nuvem não é sentido na superfície da Terra, pois estes estão muito mais distantes do solo que os centros de carga negativa localizados na base da nuvem. Ademais, as cargas negativas promovem uma blindagem com relação a esse efeito.

2.2 - Descargas elétricas em meios gasosos

Quando campos elétricos intensos são desenvolvidos num meio dielétrico (isolante) gasoso, pode ocorrer um processo físico associado à liberação dos elétrons das camadas mais externas dos átomos que compõem o material, dando origem a uma descarga elétrica (ou faísca). O fenômeno de ocorrência de tais processos em meios gasosos é designado Mecanismo de Townsend.

Cada meio dielétrico possui uma característica que expressa a capacidade de suportabilidade do meio ao campo elétrico sem que ocorram processos disruptivos. Tal propriedade é conhecida como *rigidez dielétrica* do meio material. Corresponde ao valor máximo de campo elétrico suportável pelo material sem que ele perca suas características isolantes. Quando tal valor de campo é ultrapassado, ocorre o “arrancamento” dos elétrons dos orbitais mais externos dos átomos que compõem o material, provendo o meio dos elétrons livres responsáveis pela corrente de descarga. No caso do ar, a rigidez dielétrica vale aproximadamente 3 MV/m.

2.3 - O poder das pontas

Uma outra propriedade física genericamente conhecida constitui-se no chamado *poder das pontas*. Fundamentalmente, nos corpos condutores carregados eletricamente, esta propriedade traduz a tendência das cargas elétricas se concentrarem nas extremidades do corpo. Uma importante consequência desse efeito consiste no aumento do campo elétrico nessas extremidades, em relação às outras partes do corpo. É esta propriedade que explica o fato dos processos de ruptura do isolamento no entorno dos corpos eletricamente carregados terem início em suas pontas, dando a origem a canais disruptivos que partem das extremidades do corpo.

3 – Mecanismo básico de estabelecimento das descargas atmosféricas

3.1 - Transferência de carga para o solo: a *descarga negativa*

Para facilitar o posterior detalhamento dos diversos aspectos envolvidos no fenômeno descarga atmosférica, neste item é introduzido, de forma simplificada, o mecanismo de evolução de uma descarga que transfere carga negativa da nuvem para o solo.

Uma nuvem, carregada com cargas elétricas negativas em sua base, induz no solo abaixo de sua sombra um acúmulo de cargas de sinal contrário, com o estabelecimento de uma enorme diferença de potencial entre sua base e a superfície do solo. O valor desta diferença de potencial pode ser muito elevado (várias centenas de megavolts) e o campo elétrico correspondente igualmente intenso, sobretudo, junto à base da nuvem e à superfície do solo. Em algumas condições, o campo elétrico, em determinadas regiões internas na base da nuvem, atinge valores superiores à rigidez dielétrica do ar, determinando a ocorrência de uma descarga elétrica intensa, que constitui um canal ionizado de plasma, cujo comprimento se estende por várias dezenas de metros. Neste canal de características condutoras, acumula-se uma grande quantidade de cargas negativas provenientes da região circunvizinha da nuvem, ionizada negativamente. O acúmulo de cargas resulta no aumento do campo elétrico nas extremidades do canal, o que tende a gerar descargas consecutivas semelhantes à inicial, e configura uma longa coluna de plasma. Tal coluna, carregada negativamente, tende a ser impelida para baixo, na região externa à nuvem (Figura 3.2).

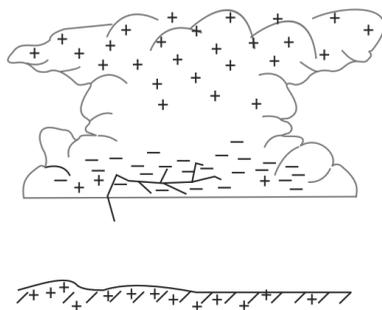


Figura 3.2 - O aparecimento do canal precursor de descarga na base da nuvem

Novamente ocorre o afluxo de cargas negativas para o canal, provenientes da região ionizada na base da nuvem. Devido ao poder das pontas, o campo elétrico na extremidade inferior da coluna fica muito intenso e pode gerar uma nova descarga. Esta tem comprimento da ordem de 50 m e sua direção segue, aproximadamente, a orientação do campo elétrico local, cujo sentido prioritário aponta verticalmente do solo para a nuvem. No plasma do canal desta nova descarga, repete-se o processo de acúmulo de cargas negativas providas pela região inferior da nuvem. Esse processo pode alimentar uma nova descarga com a mesma característica da anterior. Fica estabelecido o chamado *canal precursor de descarga*.

Se permanecerem as condições necessárias de intensidade de campo elétrico, este canal pode evoluir por passos da ordem de 50 m, devido a novas descargas disruptivas subseqüentes, a cada intervalo da ordem de 50 ms. Em alguns casos são constituídas ramificações neste canal descendente, que evolui em direção ao solo (Figura 3.3).

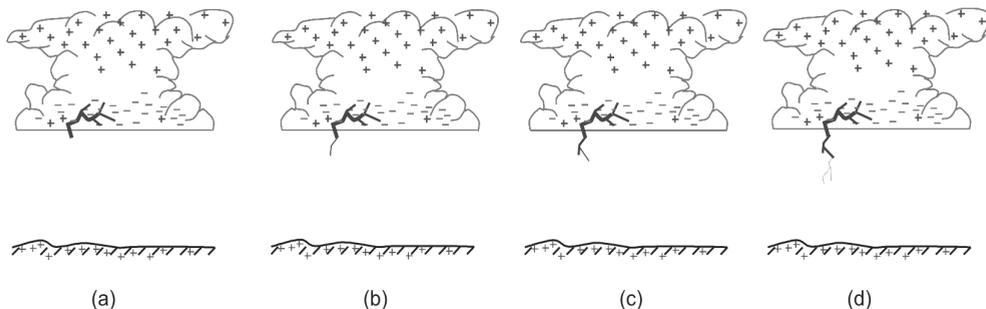


Figura 3.3 - A evolução por passos do canal precursor de descarga

À medida que este canal carregado negativamente se aproxima do solo, na região abaixo do canal, aumentam a densidade das cargas positivas induzidas na superfície do solo e o campo elétrico associado. Quando o canal descendente

alcança distâncias de poucas centenas de metros da superfície do solo, dependendo das características do relevo local, o campo no solo torna-se tão intenso, que pode dar origem a descargas elétricas ascendentes. Estas podem ter extensão de várias dezenas de metros e seguem aproximadamente a direção do campo elétrico médio local, que aponta para cima. Num processo semelhante ao descrito anteriormente para a descarga descendente, o canal (ou canais) ascendente pode evoluir por passos, através de descargas disruptivas consecutivas.

Caso o canal descendente e um dos canais ascendentes “concorrentes” atinjam uma distância crítica inferior a determinado limite (associado ao valor da carga acumulada no canal descendente) pode ocorrer uma descarga que os interliga por meio de um salto final (figura 3.4).

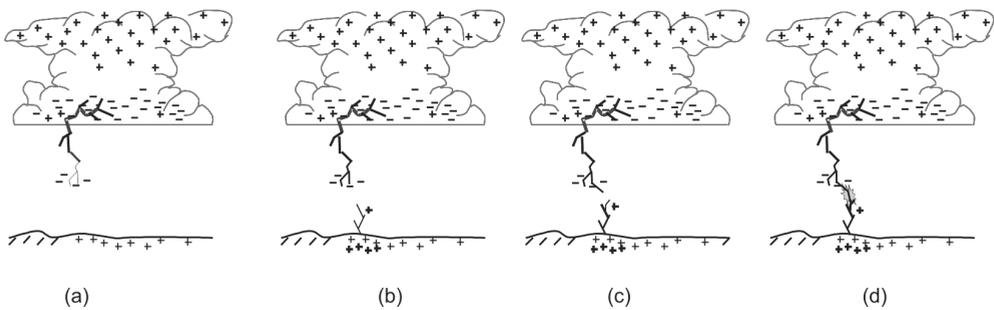


Figura 3.4 - O processo de conexão dos canais ascendente e descendente (*attachment*) com o salto final

No momento em que ocorre o fechamento (conexão) do canal entre nuvem e solo, é estabelecida uma onda de corrente de alta intensidade, a chamada *corrente de retorno* (*return stroke current*), como ilustra a figura 3.5. Esta se propaga pelo canal, a partir do ponto de conexão dos canais ascendente e descendente, neutralizando as cargas ali acumuladas, e dando origem a uma onda de corrente na base do canal, similar àquela apresentada na Figura 1.1.

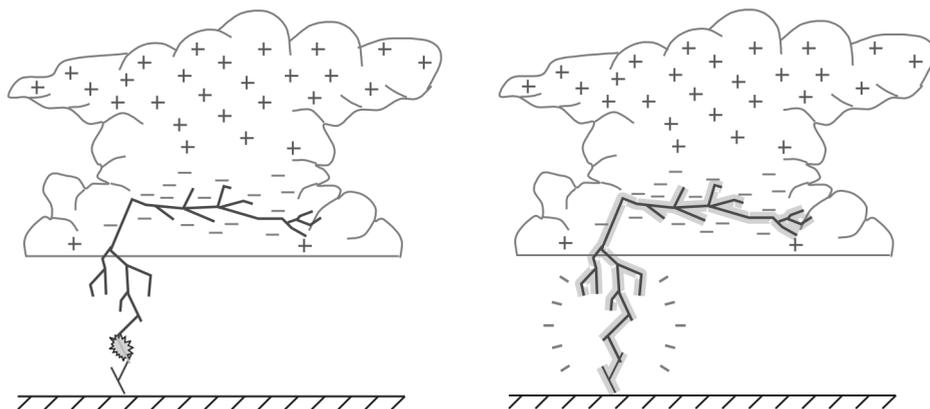


Figura 3.5 - A corrente de retorno e os efeitos luminoso e sonoro associados

O fluxo da corrente de descarga pelo canal ionizado, correspondente ao percurso da descarga, gera aquecimento intenso e um efeito luminoso, *o relâmpago*. Este aquecimento resulta também na expansão do ar circunvizinho ao canal e ao conseqüente deslocamento de uma onda sonora no ar, *o trovão*. O efeito luminoso é percebido quase instantaneamente por um observador distante, pois se propaga com a velocidade da luz ($v_{\text{luz}} = 300.10^6 \text{ m/s}$). O efeito sonoro é percebido posteriormente, após o tempo de propagação da onda sonora até o observador, que se processa a uma velocidade muito menor ($v_{\text{som}} = 343 \text{ m/s}$) e pode ser ouvido a distâncias usualmente limitadas à ordem de 10 km.

Em função da diferença nos tempos de propagação da luz gerada pelo relâmpago e do som do trovão ($t = d/v_{\text{som}}$), é possível se estimar com relativa facilidade a distância do ponto de incidência de uma descarga a um observador qualquer. A percepção do relâmpago é praticamente imediata, pois o tempo de propagação é mínimo, da ordem de microssegundos, em função da imensa velocidade da luz [$t = d/v_{\text{luz}} = d/(3 \times 10^8) \cong d \cdot 3,33 \cdot 10^{-3} \mu\text{s}$]. Uma vez percebido o relâmpago, deve ser iniciada a cronometragem do tempo, a qual deve ser encerrada no instante em que se ouve o trovão. Cada segundo cronometrado corresponde a uma distância aproximada de 340 m ($t = d/v_{\text{som}} \therefore d = t \cdot 340 \text{ m}$). Assim, para se conhecer a distância entre ponto de incidência e o observador, basta multiplicar os segundos medidos por esse valor.

Mesmo com os elementos providos apenas por esta consideração de caráter preliminar quanto à formação da descarga, já existem fundamentos para clarear cinco questões importantes, motivo freqüente de interpretação equivocada do fenômeno:

- A carga que se desloca no canal é sempre negativa e corresponde ao movimento de elétrons livres, devido à maior mobilidade destes em relação aos íons, que possuem inércia muito maior. Assim, na formação do canal descendente negativo, são os elétrons que se deslocam para baixo ao longo do canal que evolui. No canal ascendente, a carga positiva que se desloca para cima, em realidade, é o resultado do deslocamento físico de elétrons para baixo. Quando o canal se fecha pelo encontro dos canais ascendente e descendente, a onda de corrente que se propaga é constituída pelo fluxo de elétrons para baixo. Evidentemente, para a representação convencional da corrente em engenharia, a qual não reflete o deslocamento físico da carga, adota-se o sentido contrário àquele do deslocamento dos elétrons.
- Não é correta a idéia de que a corrente de descarga seja aquela provida a partir da transferência de carga da nuvem para o solo *após o fechamento do canal*. Em realidade, a corrente de descarga é fundamentalmente provida pelo simples descarregamento da carga acumulada ao longo do canal antes do fechamento deste. De qualquer forma, esta carga é transferida da nuvem ao canal, num processo relativamente lento, durante a evolução do canal precursor de descarga e, portanto, é provida pela nuvem *anteriormente ao fluxo da corrente de retorno*. Ao final, tem-se a transferência de carga negativa da nuvem para o solo, embora o processo não seja posterior à conexão.
- A carga armazenada ao longo do canal, responsável pelo campo elétrico que dá sustentação à evolução do canal precursor de descarga, não fica depositada no núcleo de plasma do canal, o qual possui um raio de apenas uns poucos centímetros. Em realidade, a carga fica acumulada num envelope de Corona desenvolvido no entorno do núcleo. Tal envelope é constituído a partir da ionização do ar circunvizinho ao canal, devido ao campo elétrico muito intenso na superfície do núcleo. Esse envelope de Corona pode ser muito amplo e seu raio médio pode ultrapassar dez metros para descargas intensas. A corrente de retorno é constituída, principalmente, a partir da neutralização das cargas existentes nesse envelope.
- A idéia de que a descarga “cai” em determinado local, numa perspectiva passiva de processos elétricos ao nível do solo quanto à incidência, não é provida de fundamento. Em realidade, o fluxo de corrente de descarga procede após a ocorrência de um canal ascendente

que pode se “fechar” com o canal descendente a várias dezenas de metros ou a poucas centenas de metros da superfície do solo, dependendo do relevo local. Isto denota a possível influência dos processos elétricos ao nível do solo sobre a descarga, em seu estágio final. Tal aspecto é determinante, inclusive, com relação à definição do ponto de incidência da descarga no solo: o canal descendente define a macrorregião de incidência e o canal ascendente a localização exata no interior dessa região.

- Com relação ao fluxo da corrente no canal, após o fechamento deste, deve ser ressaltada a propagação da onda de corrente nas duas direções, a partir do ponto de conexão entre os canais descendente e ascendente. A direção da corrente (convencional) positiva é para cima, mas sua propagação se dá nos dois sentidos, para cima e para baixo, a partir do ponto de conexão dos canais ascendente e descendente. Para certos fenômenos originados da descarga, os efeitos podem ser diferentes daqueles que ocorreriam, caso fosse considerado que a corrente de retorno se propagasse para nuvem a partir da superfície do solo.

Nos parágrafos anteriores deste item foi descrita a evolução de um processo no qual ocorreu o fechamento do canal de plasma, envolto por um envelope de Corona, que, através do seu descarregamento, transfere carga negativa da nuvem para o solo, configurando uma descarga atmosférica. O processo descrito pode ser enriquecido com uma série de considerações particulares, apresentadas na seqüência deste texto.

Para que o canal precursor continue evoluindo, não basta que o campo elétrico na extremidade do canal seja intenso o suficiente para quebrar a rigidez dielétrica do ar, com ocorrência do efeito corona. É também necessário que o campo elétrico médio ao longo do percurso no qual o eventual passo de descarga pode se estender (extensão da ordem de 50 m), alcance um valor que sustente a evolução do fenômeno. Este valor se aproxima de 0,6 MV/m ^[279].

Pode acontecer que, durante a evolução do canal precursor da descarga, após alguns estágios de desenvolvimento deste canal, não exista tal sustentação de campo elétrico suficiente para que o processo evolua. Neste caso, o processo simplesmente se esvaece, com a dissipação do canal. Nessa condição, não havendo o fluxo da corrente de retorno, os típicos efeitos luminoso e sonoro da descarga atmosférica não são praticamente percebidos.

Nos casos em que o canal precursor progride e o canal descendente chega próximo ao solo, o aumento do campo na superfície da Terra pode dar origem a um ou vários canais ascendentes que evoluem para cima. De certa forma, tais canais são concorrentes entre si na perspectiva daquele que primeiro alcança a *distância crítica de salto* em relação ao canal descendente e que, portanto, irá configurar o caminho de descarga para o solo. Em alguns casos, pode ocorrer o fechamento praticamente simultâneo entre o canal descendente e dois ou mais canais ascendentes, configurando uma descarga bifurcada próxima ao solo.

Outro aspecto, que merece citação, refere-se particularmente ao processo de descarregamento das ramificações do canal de descarga. As cargas ali acumuladas são também neutralizadas pela corrente de retorno, o que justifica a luminosidade intensa que emana desses ramos, observada nos relâmpagos. Alguns autores sugerem que o descarregamento destas ramificações seja responsável pelo segundo pico, usualmente observado nas formas de onda das correntes de descarga atmosférica registradas (vide Figura 1.1). Em função da natureza da constituição do canal descendente através de passos, segundo um desenvolvimento aleatório, usualmente, o canal de descarga apresenta tortuosidades em seu percurso, que pode, ainda, ter inclinação significativa (percurso médio não vertical).

É também importante destacar as diferenças existentes entre dois processos muito distintos: a formação do canal precursor da descarga e o fluxo da corrente de retorno no canal constituído. Sobretudo, é notável a diferença nos tempos envolvidos em tais processos. A velocidade de evolução do canal precursor de descarga é muito pequena quando comparada à velocidade de propagação da corrente de retorno ao longo do canal (aproximadamente cem vezes menor). Enquanto a evolução do canal precursor de descarga se processa com uma velocidade inferior a 10^6 m/s, a corrente de retorno se propaga com velocidade muito superior, maior que $1/3$ da velocidade da luz (10^8 m/s).

O tempo para a constituição do canal tem a ordem de dezenas de milésimos de segundo, dependendo da extensão do canal. Este tempo pode ser estimado, observando-se que cada passo da ordem de 50 m, atribuído às descargas elétricas consecutivas, ocorre a intervalos da ordem de $50 \mu\text{s}$ e consome cerca de $1 \mu\text{s}$ no estabelecimento da descarga elétrica disruptiva. Caso se assuma um percurso de 5 km para o canal e uma trajetória vertical, o percurso iria requerer cerca de 100 passos consecutivos (descargas elétricas)

e um tempo da ordem de 5 ms ($100 \times 50 \mu\text{s}$). Como mencionado, tal intervalo é muito superior ao tempo consumido no percurso da frente da onda de corrente pelo canal de descarga ($\sim 50 \mu\text{s}$), na mesma condição. Ao se considerar a trajetória real do canal, que inclui tortuosidades e uma parcela significativa de deslocamento na horizontal, a extensão real do percurso pode ser muito superior, implicando tempos típicos para a constituição integral do canal da ordem de 20 ms.

3.2 - As descargas negativas subseqüentes

Em algumas situações, após o fluxo da corrente de retorno, cessam os processos de transferência de carga negativa para a Terra, correspondentes à descarga. No entanto, na maior parte das vezes (cerca de 80% dos casos) pode haver seqüência nos processos elétricos, com a ocorrência de novas descargas através do mesmo canal, após o término da corrente de retorno. Tais descargas são alimentadas por outros centros de cargas negativas da nuvem. Tal ocorrência pode suceder até para um intervalo de tempo limite da ordem de 100 ms depois do final da primeira corrente de retorno, após o qual, o canal ionizado se dissipa e praticamente não deixa rastros.

Nestes casos, possivelmente devido à maior mobilidade das cargas negativas, outros centros de carga na base da nuvem, localizados em regiões próximas ao canal, podem passar a suprir cargas negativas para o canal previamente ionizado, por meio de uma corrente reduzida, designada *corrente de recarregamento do canal ionizado* (*dart leader current*). Essa corrente tem amplitude limitada, com valor representativo em torno de 500 A (usualmente variável entre 100 A e alguns kA). Ao fluir por tempos da ordem de 2 ms pelo canal, esta corrente é capaz de armazenar no canal uma carga de valor próximo a 1 C. Após o recarregamento do canal, pode ocorrer uma *descarga subseqüente*, conforme indicado na Figura 3.6, que transfere tal carga para o solo, através de uma corrente de retorno. Este processo pode se repetir sucessivamente e, embora nos casos em que ocorra, o faça, em média, por três vezes consecutivas, já foram registradas ocorrências com mais de vinte descargas subseqüentes.

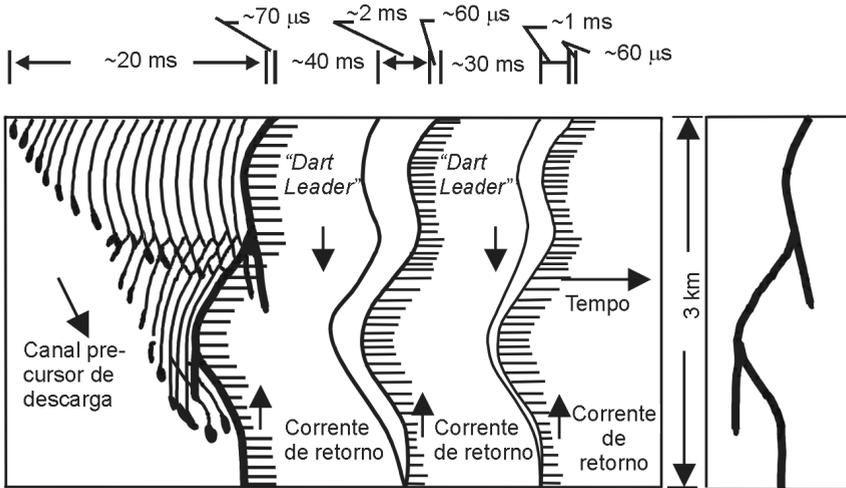


Figura 3.6 - Evolução no tempo dos processos até uma descarga subsequente (adaptado^[19])

Em princípio, as descargas subsequentes podem usar integralmente ou apenas parcialmente o canal constituído pela primeira descarga negativa. Isto explica a observação, em alguns casos, de pontos de incidência de descargas subsequentes no solo a distâncias superiores a 2 km.

A Figura 3.7 ilustra a evolução no tempo dos processos elétricos a partir do aparecimento da coluna carregada na base de uma nuvem até a ocorrência de uma descarga subsequente.

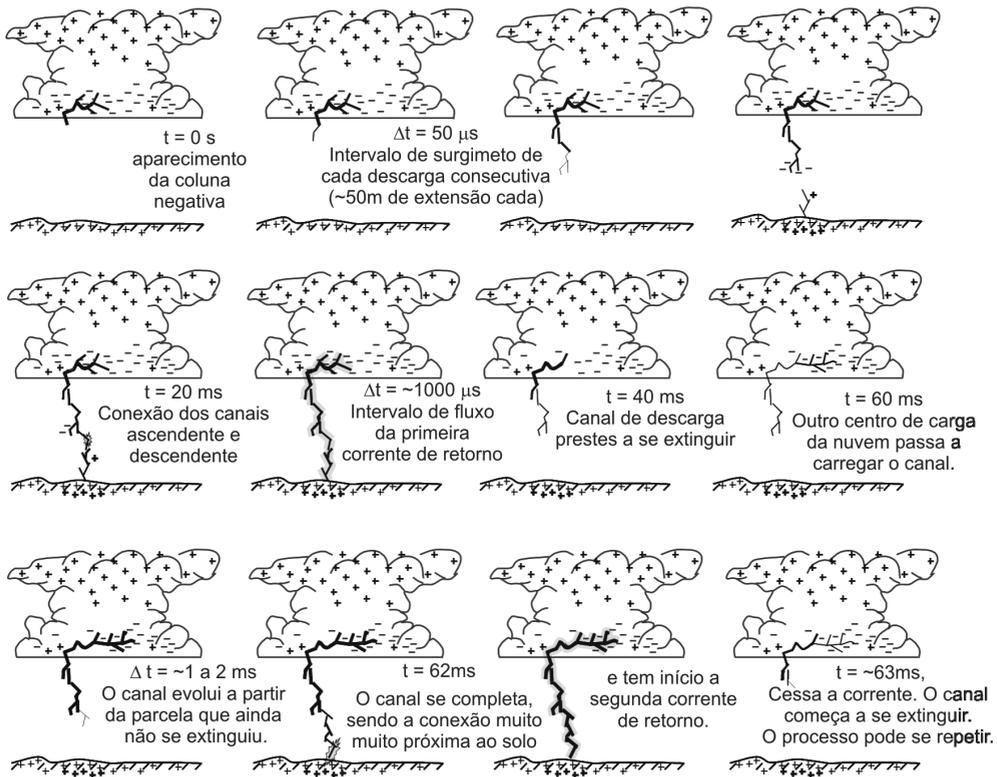


Figura 3.7 - Evolução no tempo dos processos até uma descarga subsequente

A natureza das descargas negativas subsequentes confere características próprias à sua corrente de retorno. Tal corrente é usualmente menos intensa e muito mais rápida (menor tempo de frente de onda) do que a corrente de retorno da primeira descarga negativa. O processo de carregamento do canal é menos violento do que a formação do canal precursor da primeira descarga. Por outro lado, quando ocorre o fechamento do canal, a corrente de retorno subsequente já encontra o canal num estágio de pré-ionização, em decorrência do fluxo anterior da corrente de retorno da primeira descarga e do fluxo recente da corrente de recarregamento do canal. Isso reduz a impedância do canal para a onda de corrente que se propaga e, possivelmente, é responsável pela maior rapidez da frente de onda.

3.3 - A descarga positiva

A configuração elétrica da nuvem de tempestade mostra uma região superior extensa carregada positivamente e blindada da Terra pela base ne-

gativa. Porém, essa configuração é dinâmica, sendo influenciada inclusive pelos fortes ventos responsáveis pelo deslocamentos da nuvem. Em diversas situações, ocorre um deslocamento maior da parte superior da nuvem, deixando a descoberto partes da nuvem carregadas positivamente. Sobretudo quando existem no solo partes elevadas junto à lateral da nuvem, por questão de relevo (montanhas por exemplo), podem ocorrer descargas que interligam tais partes da nuvem ao solo, com transferência de carga positiva para a terra, como ilustra a Figura 3.8.

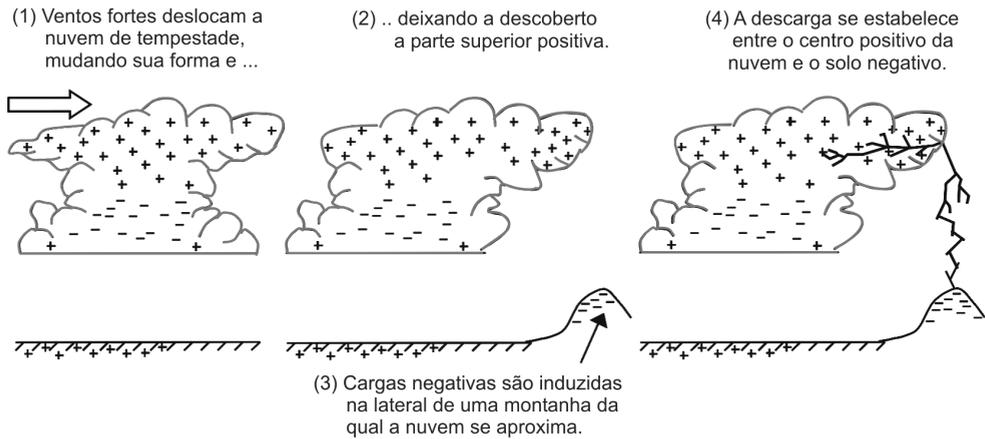


Figura 3.8 - Representação do processo de estabelecimento de uma descarga positiva

Assim, um canal descendente positivo pode evoluir a partir de um centro de cargas positivas e um canal ascendente negativo pode evoluir a partir do solo. Da eventual conexão de ambos pode ocorrer a descarga positiva para o solo.

As características deste tipo de descarga a tornam mais rara que as negativas e lhe conferem maior intensidade e forma de ondas de corrente com variações mais lentas. Usualmente, a descarga positiva ocorre quando a parte superior da nuvem carregada positivamente fica deslocada da base negativa, deixando de ser blindada em relação a estruturas terrestres, sendo mais freqüente na presença de objetos altos posicionados sobre elevações. Por esse motivo, a direção de incidência de descargas tende a apresentar maior inclinação no caso das descargas positivas (percurso do canal menos vertical).

3.4 - A descarga bipolar

Em alguns poucos casos, os registros de corrente de descargas at-

mosféricas mostram um comportamento particular da onda medida, no qual esta apresenta uma oscilação do sinal de corrente. Inicialmente, ocorre o fluxo de uma corrente negativa, segundo a forma típica da primeira onda de descarga negativa. Entretanto, após esta se anular, passa a fluir pelo canal uma corrente positiva, também com formato impulsivo. Alguns pesquisadores atribuem a designação de *Descarga Bipolar* a tal evento. Explicam sua ocorrência admitindo que a extremidade superior do canal de uma descarga originalmente negativa encontra um canal conectado a um centro de carga positivo na nuvem. Assim, a carga positiva deste último canal se descarrega pelo canal conectado à terra, caminho original da descarga negativa.

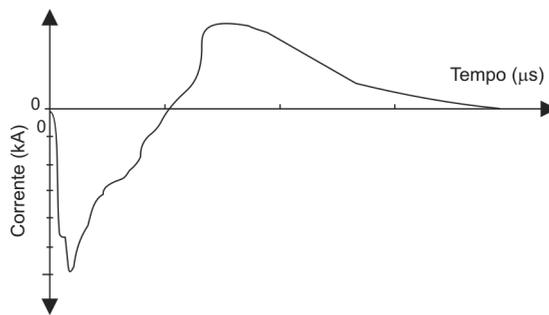


Figura 3.9 - Forma da onda de corrente de uma descarga bipolar

4 - A componente contínua da corrente de descarga

Durante a ocorrência de descargas atmosféricas, em muitos casos, ocorre o fluxo pelo canal de descarga de uma corrente reduzida, da ordem de algumas dezenas a poucas centenas de Âmperes. Apesar de reduzida, a corrente pode durar de algumas dezenas a centenas de milissegundos. Por conseguinte, a carga transferida por tal corrente pode ser muito elevada, gerando efeitos térmicos intensos, capazes de causar danos nos corpos aos quais se conecta o canal de descarga^[15].

A componente contínua ocorre mais usualmente após o fluxo da corrente de retorno, mas pode anteceder o início desta corrente ou fluir durante os intervalos entre múltiplas correntes de retorno das descargas subseqüentes.

5 - Aspectos complementares

Com relação aos mecanismos de estabelecimento das descargas atmos-

féricas, um aspecto que merece melhor elaboração consiste no desenvolvimento dos canais ionizados de plasma, cuja ocorrência materializa o canal de descarga. Os conceitos que permitem tal elaboração são desenvolvidos numa seqüência de passos, representados nas Figuras 3.10 e 3.11.

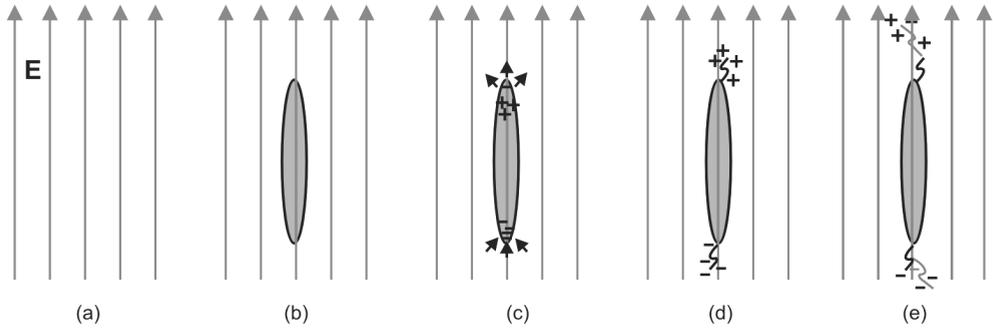


Figura 3.10 - Estabelecimento de canais disruptivos bipolares a partir de corpos condutores colocados em região de campo elétrico muito intenso

Na condição indicada em (a) na Figura 3.10, existe um campo elétrico muito intenso numa região constituída por material dielétrico gasoso (como o ar). Tal campo é representado nas figuras pelas setas. A colocação de um corpo condutor longo nessa região (b) resulta no deslocamento dos elétrons livres do corpo na direção oposta ao campo. Esse deslocamento gera um excesso de elétrons na ponta inferior do corpo e uma escassez na ponta superior, resultando no carregamento bipolar das extremidades, indicado em (c). Em decorrência do acúmulo de cargas no local, em cada extremidade há uma intensificação do campo. Tal intensificação resulta da superposição do campo elétrico original e do campo adicional gerado pelas cargas acumuladas nas extremidades. Se o campo resultante ultrapassar a rigidez dielétrica do meio gasoso, podem ser estabelecidos processos disruptivos nas extremidades, que criam canais ionizados, como indicado em (d). A extensão desses canais (de alguns centímetros a muitos metros) depende da intensidade do campo que gerou o processo disruptivo.

Em relação ao meio circundante, os canais disruptivos nas extremidades do corpo têm características condutoras, pois são constituídos de matéria superaquecida rica em elétrons e íons positivos, resultantes do processo de ionização das moléculas do meio isolante (“arrancamento” e aceleração dos elétrons dos orbitais mais externos dos átomos desse meio). Sob ação do campo elétrico intenso, tais cargas são deslocadas para as

extremidades do corpo condutor, as quais, nesse estágio, correspondem às pontas dos canais disruptivos gerados (d). Ali, o acúmulo de cargas é novamente responsável pela intensificação do campo elétrico local. Disso pode resultar a ocorrência de novos processos disruptivos, com o alongamento do canal ionizado, como mostra o item (e) da figura. Este processo pode ter seqüência, com a ocorrência de descargas elétricas consecutivas que materializam um canal ionizado que se alonga a partir das extremidades do corpo, enquanto houver sustentação de intensidade de campo elétrico. Fica estabelecido um *processo bipolar de evolução do canal ionizado*.

Por outro lado, em condições de campo elétrico muito intenso, mesmo na ausência de um corpo condutor, um processo semelhante pode ocorrer. Nesse caso, se o campo excede a rigidez dielétrica do isolamento pode ser estabelecido um arco elétrico (canal ionizado) local, como indicado no item (a) da Figura 3.11. O próprio canal, com suas características condutivas em relação ao meio gasoso circundante, atua como o corpo condutor. Os elétrons produzidos pela ruptura e os íons positivos resultantes se deslocam para as extremidades opostas do canal sob a ação do campo elétrico. Ao se concentrarem nas extremidades do corpo, tais cargas promovem a intensificação do campo local, que pode dar origem a novas descargas elétricas, com o alongamento do canal ionizado, num processo muito semelhante ao anterior (item b da Figura 3.11).

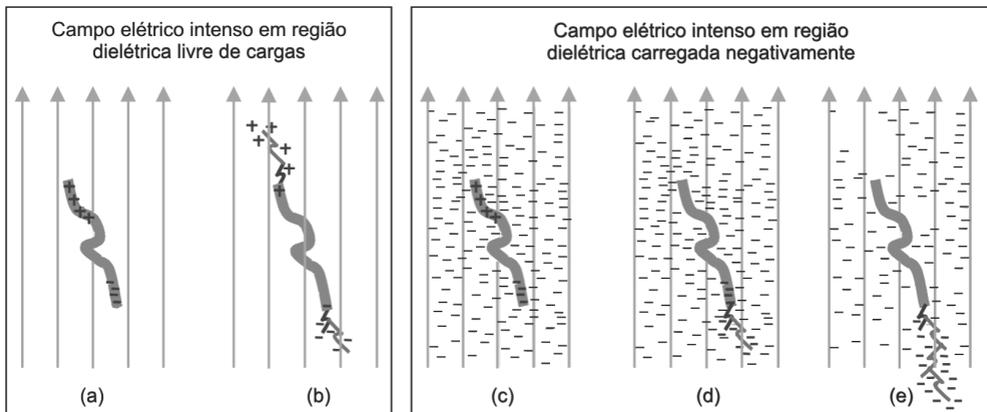


Figura 3.11 - Estabelecimento de canais disruptivos iniciados em região de campo intenso e altamente ionizada negativamente

Interessa também analisar uma condição um pouco diferente daquela representada nos itens (a) e (b) da Figura 3.11. Trata-se de uma condição similar àquela existente no interior da nuvem de tempestade, onde além do intenso campo elétrico, resultante da separação dos centros de cargas de sinal contrário na nuvem, existe uma distribuição local de cargas negativas no meio isolante. Nesta condição, quando o campo local ultrapassa a rigidez dielétrica do meio material, é estabelecido um canal ionizado (c), num processo semelhante ao indicado em (a). Também neste caso, sob a ação do campo elétrico as cargas resultantes do processo de ionização se deslocam para as extremidades.

Porém, diferentemente da situação anterior, os íons positivos gerados no processo disruptivo são neutralizados pelas cargas negativas que migram do entorno do canal. Assim, o canal resultante do processo disruptivo tem apenas uma das extremidades com excesso de cargas, no caso negativas (d). Nessa extremidade, há intensificação do campo e pode ocorrer uma nova descarga elétrica que alonga o canal para baixo. Enquanto os íons positivos gerados no processo disruptivo são neutralizados por cargas negativas que se deslocam das imediações do canal, os elétrons resultantes do processo de ionização se concentram na extremidade inferior alongada do canal. Estes são impelidos não apenas pelo efeito do campo elétrico de fundo, mas também pela força de repulsão gerada pelas cargas negativas do local. Isto promove a intensificação do campo e pode gerar descargas elétricas consecutivas, enquanto houver sustentação de campo elétrico para tal.

O mecanismo descrito nos itens (c), (d) e (e) da figura anterior resumem um processo que resulta em dois efeitos fundamentais para a evolução do canal precursor de descarga: *a evolução do canal ionizado e a transferência das cargas existente na região dielétrica do centro de cargas negativas para o canal.*

Havendo sustentação de campo, vai ocorrendo o alongamento do canal, que, desta forma, pode constituir uma coluna ionizada, que extrapola a região do centro de carga. Nessa região, o campo elétrico tende a ser inferior. Porém, passa a atuar um outro efeito importante, *o poder das pontas*. Como o canal se estende da região ionizada para o exterior desta, há uma tendência natural das cargas negativas da região circundante ao canal, no centro de cargas, se deslocarem para a extremidade do canal. Tal processo pode compensar a redução aparente do campo elétrico original quando o canal se afasta do centro de cargas e gerar uma intensidade de campo elétrico suficiente para dar sustentação à evolução do canal.

De forma bastante simplificada, mas consistente, os processos descritos neste item explicam o início e a evolução dos processos disruptivos que materializam o canal de descarga e que transferem a carga da base da nuvem para o canal, de onde, posteriormente, tal carga é transferida para o solo, através do fluxo da corrente de retorno.

6 - Considerações finais

Neste capítulo, realizou-se uma introdução ao fenômeno Descarga Atmosférica. Nos próximos capítulos é apresentado um tratamento mais elaborado e detalhado do tema, segundo a abordagem didática que busca cumulativamente complementar o conhecimento sobre o fenômeno.

EFEITOS DE MAIOR INTERESSE DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E ASPECTOS DE SEGURANÇA

1 - Introdução

Além da complexidade física que envolve a formação e evolução do fenômeno descarga atmosférica, este ainda apresenta natureza aleatória, o que dificulta a sua análise. Para sua caracterização foram definidos certos parâmetros físicos, cuja distribuição estatística é determinada a partir dos dados de correntes registradas em estações de medição de descargas ou de dados derivados de outros métodos de medição, como foi considerado no capítulo anterior.

A ocorrência de descargas atmosféricas promove um conjunto de efeitos que afetam diversos processos físicos, químicos e biológicos no ambiente do planeta. Neste capítulo serão considerados alguns dos efeitos nefastos do fenômeno, associados às descargas nuvem-solo, que afligem mais diretamente a vida na superfície da Terra. Tais efeitos configuram condições de risco, comprometendo a segurança dos seres vivos, a integridade de estruturas e a operação de sistemas elétricos, eletrônicos e de comunicação.

Nesse contexto, no presente capítulo, são considerados alguns dos efeitos mais importantes decorrentes da incidência direta de descargas e aqueles induzidos nas proximidades dos pontos de incidência. Após uma abordagem preliminar do tema, são introduzidos os tipos mais relevantes de soli-

citação associados a descargas diretas e indiretas e são realçados os parâmetros de maior influência na definição da severidade do efeito resultante. Complementarmente, em função do interesse que despertam nas aplicações em engenharia, foram selecionados quatro tópicos para detalhamento em itens específicos. O primeiro refere-se aos *aspectos de segurança associados à incidência de descarga*. Sua abordagem inclui a apresentação de recomendações destinadas a minimizar as condições de risco em algumas situações típicas de exposição. O segundo tópico trata dos efeitos decorrentes da *incidência direta de descargas em linhas de transmissão*, com a explicação dos mecanismos de solitação que, eventualmente, resultam no desligamento da linha. Em seguida, no terceiro tópico apresenta-se uma abordagem do fenômeno *tensão induzida por descargas atmosféricas*, na qual são contemplados os fundamentos do fenômeno, incluindo uma introdução aos *modelos de corrente de retorno*. Para concluir, no último tópico, são considerados aspectos básicos relativos aos *efeitos das descargas nas redes aéreas de distribuição de energia elétrica*.

2 – A descarga direta

2.1 - Considerações gerais

Os efeitos de maior severidade do fenômeno decorrem da incidência direta da descarga sobre a vítima. Nesse caso, ao atingir seres vivos, prédios, estruturas e sistemas elétricos, os raios podem gerar destruição, incêndio e, eventualmente, morte.

Na perspectiva da influência das características da descarga na intensidade do efeito resultante, dois parâmetros se destacam: a *energia por unidade de resistência* e o *valor de pico da corrente*.

2.1.1 - Influência do parâmetro energia por unidade de resistência

O primeiro parâmetro permite estabelecer a dimensão da energia transferida para a vítima quando esta é percorrida pela corrente de descarga. Em conjunto com o valor de pico da corrente, o parâmetro *energia por unidade de resistência* constitui fator determinante de morte imediata de seres vivos atingidos diretamente. A Figura 5.19 indica um valor mediano da ordem de $5 \cdot 10^4$ A²s para esse parâmetro, no caso das descargas negativas (primeira descarga),

que constituem a grande maioria das descargas nuvem-solo. A ordem de grandeza da impedância do corpo humano ao percurso da corrente de descarga é estimada entre 300 e 600 Ω . Ao atingir uma vítima, cuja resistência fosse admitida como de 500 Ω , a corrente de descarga seria capaz de transferir-lhe aproximadamente 2,5.10⁴ kJ (500 A²s x 5.10⁴ Ω). Ora, se for admitido um tempo da ordem de 0,5 s para a duração do pulso da corrente de descarga, isto corresponderia à dissipação de uma potência média de 50.000 kW (2,5.10⁴ kJ/0,5 s). Esta potência é cerca de 10.000 vezes superior à potência de um chuveiro elétrico residencial, sendo suficiente para causar uma parada cardiorrespiratória e, eventualmente, a carbonização de tecidos da vítima.

As mortes por incidência direta de descarga são freqüentes tanto para seres humanos quanto para animais. Embora no Brasil não existam estatísticas oficiais sobre este tipo de morte, estima-se que ocorram entre 100 e 300 mortes por ano no país, motivadas por incidência de descargas. No período de chuvas de janeiro e fevereiro do ano de 2001, apenas os casos registrados pela imprensa indicavam aproximadamente uma morte por dia. A Figura 7.1 ilustra um tipo de ocorrência muito comum, responsável por um número considerável de mortes no Brasil, todos os anos: a incidência direta de descargas em pessoas que praticam futebol durante tempestades.

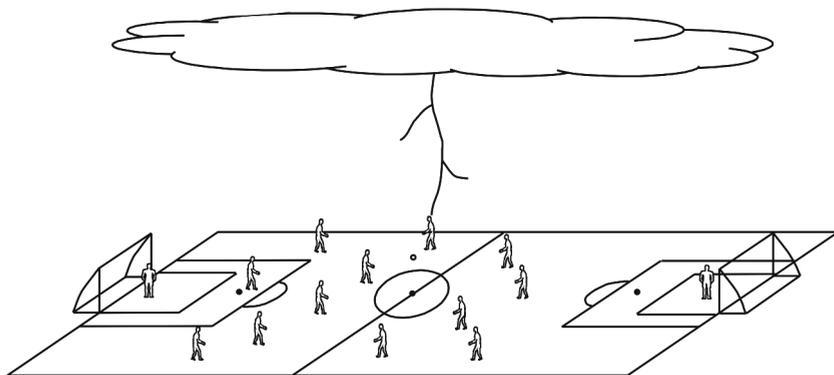


Figura 7.1 - Ocorrência comum: jogador de futebol atingido por descarga direta em área descampada e elevada

A potência dissipada pela corrente de descarga é também suficiente para causar danos importantes em estruturas e componentes de sistemas elétricos. Nos países das regiões temperadas do planeta, onde são comuns edificações de madeira, é grande o número de incêndios ocasionados por incidência direta de descarga nas mesmas. Ali são também freqüentes os in-

cêndios em florestas, provocados por raios durante o início de tempestades, dada a típica combustibilidade das madeiras locais (sobretudo o *pinus*). Em edificações de alvenaria e concreto, muitas vezes são observados sinais de destruição decorrentes da incidência de descarga, sobretudo em quinas de edifícios altos (Figura 7.2).



Figura 7.2 - Danos em árvore e em edificação devido à incidência de descarga atmosférica

Um tópico de pesquisa recente refere-se aos danos causados em cabos tipo OPGW (*Optical Ground Wire*) por correntes de descarga direta. Tais cabos estão posicionados sobre os condutores energizados das linhas de transmissão, com a finalidade de blindá-los quanto à incidência de eventuais descargas atmosféricas. Estes cabos contêm uma parte externa constituída de condutores de liga de alumínio, que envolvem uma blindagem metálica, em cujo interior está posicionado um conjunto de fibras ópticas para transmissão de informação. Este é um meio eficiente de comunicação, que tira proveito do percurso pré-existente da linha de transmissão. Os primeiros cabos desse tipo, que substituíram os tradicionais cabos de blindagem de fios de aço, tinham diâmetro relativamente elevado. Por isto eram muito afetados por correntes de descarga, dada a menor densidade de corrente associada e a melhor capacidade de dissipação do calor gerado pela corrente de descargas incidentes. A evolução no projeto dos cabos OPGW determinou a redução de seus diâmetros. A partir daí, passaram a ser verificados danos freqüentes nesses cabos quando da incidência de descargas, com ruptura de tentos (condutores enlaçados no núcleo do cabo). Em alguns casos, verifica-se a destruição da camada protetora das fibras ópticas e até a ruptura total do cabo (Figura 7.3)

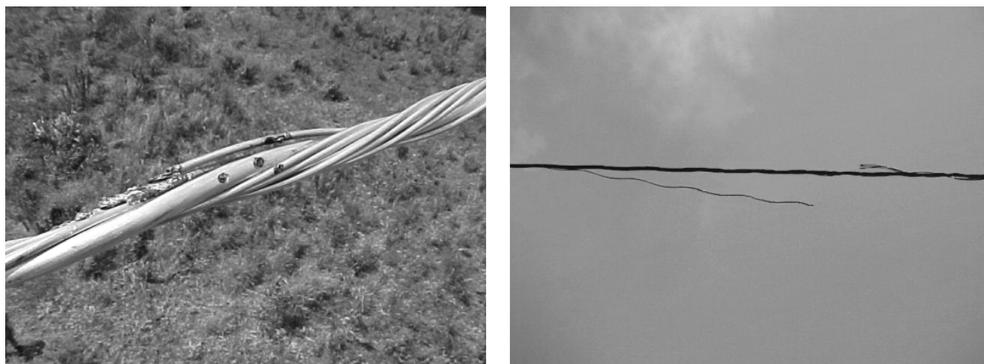


Figura 7.3 - Ruptura de tentos em cabos OPGW devido à incidência de descarga

Nesse tipo de ocorrência, além do efeito da parcela impulsiva da corrente (à qual está associado o valor de pico), exerce um papel fundamental a energia dissipada pela componente contínua da corrente de descarga e, também, a transmissão do calor gerado no plasma do canal de descarga para o cabo. Embora essa componente contínua tenha valor reduzido (da ordem de 50 a 600 A), pode durar um longo período de tempo (até 1 s) e a energia correspondente pode alcançar valores muito elevados, suficientes para fornecer uma contribuição importante para a eventual fusão da cobertura metálica do cabo.

2.1.2 - Influência do parâmetro valor de pico da corrente de descarga

O parâmetro *valor de pico da corrente* de descarga influencia, sobretudo, na definição do nível da sobretensão resultante em sistemas atingidos por descarga. Tal sobretensão pode, em muitos casos, ser capaz de ocasionar a ruptura do isolamento do sistema.

Quando o condutor de uma linha de transmissão é atingido por uma descarga, a amplitude da sobretensão resultante neste é aproximadamente proporcional ao valor de pico da corrente. A Figura 7.4 apresenta uma ilustração desse tipo de ocorrência, mostrando a incidência de uma descarga em um condutor energizado da linha monofásica não blindada.

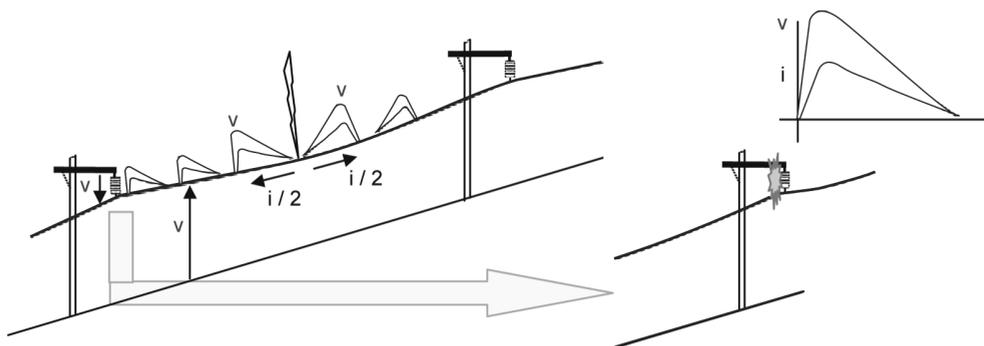


Figura 7.4 - Ondas de sobretensão associadas a descarga numa linha não blindada

Para fins de ilustração, considera-se a incidência de uma descarga na linha, cuja corrente tenha valor de pico de 40 kA. Admitindo-se um valor de 300Ω para a impedância de surto da linha, a amplitude da sobretensão que se propaga ao longo da linha se aproxima de 6 MV ($40 \text{ kA}/2 * 300 \Omega$). Esse valor é muito superior à suportabilidade do isolamento das linhas de transmissão convencionais. Assim, logo que a onda de sobretensão alcança a primeira estrutura de suporte (torre metálica), o isolador, que separa o condutor energizado da torre (eletricamente conectada ao solo), fica submetido a tal sobretensão. Esta deve promover o rompimento do isolamento, com o estabelecimento de um arco elétrico (superficial ou volumétrico) através do isolador que suporta a fase.

O valor de pico de corrente é também capaz de influenciar numa outra condição típica de risco: a elevação de potencial no solo. Na incidência de uma descarga numa estrutura aterrada ou mesmo diretamente no solo, a corrente de descarga flui para a terra, estabelecendo no solo uma elevação de potencial em relação a pontos distantes (terra remoto). Tal elevação de potencial é usualmente designada GPR (*grounding potential rise*). Fica, também, estabelecida uma distribuição de potenciais na superfície do solo, nas proximidades do ponto de injeção de corrente. O valor máximo do GPR é praticamente proporcional ao valor de pico da corrente injetada no solo, podendo ser determinado pelo produto deste, pela impedância de aterramento, vista do ponto de incidência da corrente ($\text{GPR}_M = Z_p \cdot I_p$). Igualmente, o gradiente do potencial estabelecido no solo, como parcela do potencial resultante, é aproximadamente proporcional ao valor da corrente. Ora, um ser vivo presente ao local pode ficar submetido a uma diferença de potencial elevada, se duas partes distintas de seu corpo estiverem em contato com o solo em pontos diferentes (por exemplo os pés).

Para fins de avaliação quantitativa, a Figura 7.5 ilustra a situação de incidência de uma corrente de descarga, de valor de pico 50 kA, sobre uma estrutura conectada ao solo por um aterramento concentrado (hemisfério equivalente de raio 1 m), de impedância 100Ω . Isso resultaria num valor máximo para a elevação de potencial da ordem de 5 MV. Mesmo a uma distância de 10 m do ponto de incidência, um indivíduo estaria sujeito a uma tensão de passo (diferença de potencial entre dois pontos distantes 1 m na superfície do solo) da ordem de 45 kV. No caso de animais de porte (como cavalos e vacas), onde a separação entre patas é maior, esta diferença de potencial poderia ser muito superior.

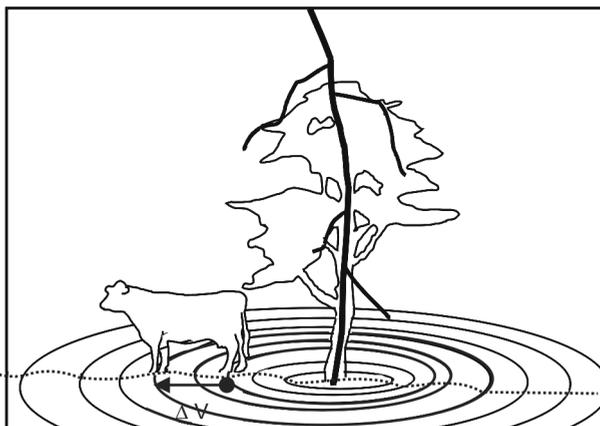


Figura 7.5 - Animal submetido a diferença de potencial devido à incidência de uma descarga próxima

Mesmo para correntes impulsivas de curta duração como aquelas das descargas atmosféricas, tal diferença de potencial pode promover a circulação pelo corpo da vítima de correntes com intensidade capaz de gerar fibrilação ventricular e, eventualmente, morte. São raros os registros de morte de seres humanos atribuídos a descarga próxima. No entanto, é muito comum o relato da morte de gado em pastos, por ocorrências dessa natureza. Em alguns casos, reporta-se a morte simultânea de vários animais, particularmente na situação em que os mesmos se encontram abrigados próximos a árvores, durante tempestades.

2.2 - A incidência direta de descarga em linhas de transmissão

Uma ocorrência específica de muito interesse prático refere-se à incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. A exten-

são elevada das linhas e a usual altura pronunciada em relação ao solo determinam uma área de incidência muito ampla. Isto torna significativa a probabilidade de ocorrência de descarga direta na linha. Esta questão adquire maior importância especialmente nos sistemas elétricos de potência existentes no Brasil. Em função da distância comumente elevada entre as fontes geradoras de energia (usinas hidrelétricas) e os maiores centros de consumo, as linhas de transmissão locais são muito longas. Tal aspecto acarreta a possibilidade elevada de desligamento dessas linhas por solicitação de seus isoladores devido a sobretensões de origem atmosférica.

O desligamento de uma linha acarreta sérios problemas de ordem econômica e social. A falta de alimentação de energia pode motivar a interrupção de processos produtivos industriais em toda uma macrorregião. Pode, também, comprometer os aparatos de saúde e segurança das grandes cidades, quando debilita a operação dos sistemas básicos hospitalar, policial e de defesa civil (corpo de bombeiros, por exemplo). Esse contexto confere um caráter estratégico às linhas de transmissão e torna muito estritas as suas expectativas de desempenho.

As descargas atmosféricas constituem o principal fator de desligamento não programado de linhas de transmissão. Segundo estatísticas das concessionárias de energia, são responsáveis por cerca de 70% dos desligamentos dos sistemas de transmissão.

A relevância para a engenharia deste tipo de ocorrência motiva a consideração do assunto num item específico neste capítulo, onde são considerados os aspectos técnicos relativos aos mecanismos de estabelecimento de sobretensão nos isoladores da linha em decorrência da incidência de descarga direta, que pode eventualmente determinar o seu desligamento.

3 - Descarga indireta ou próxima

3.1 - Considerações preliminares

A despeito da maior severidade dos efeitos gerados pela incidência direta, a probabilidade deste tipo de ocorrência é relativamente reduzida. Os efeitos mais freqüentes decorrentes das descargas atmosféricas são aqueles induzidos por uma descarga incidente nas proximidades da vítima (ser, estrutura ou sistema). Esta é usualmente designada *descarga indireta* ou *próxima*.

Ao ser estabelecida uma descarga nuvem-solo, as características do fluxo da corrente de retorno pelo canal, que apresenta variação muito rápida no tempo, determina a constituição de uma onda eletromagnética que se irradia a partir do canal, como ilustra a Figura 7.6. Cada elemento de corrente ao longo do comprimento do canal atua como uma fonte de campo eletromagnético.

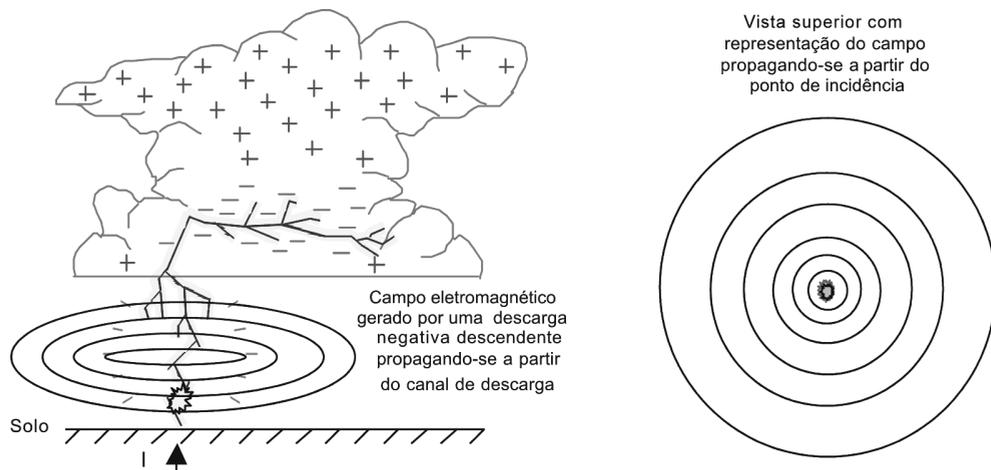


Figura 7.6 - Onda eletromagnética irradiada pela corrente de retorno

Ao “iluminar” corpos ou estruturas, a onda eletromagnética é capaz de induzir efeitos nessas “vítimas”. Tais efeitos podem se expressar através da absorção da energia irradiada, causando interferência eletromagnética, ou pela geração de tensão induzida em percursos condutores fechados (*loops*) e em corpos condutores iluminados pela onda eletromagnética.

Estes efeitos decorrentes da incidência do campo eletromagnético gerado pela descarga têm sua intensidade condicionada pela *taxa de crescimento da corrente de retorno na frente de onda* ou pelos dois parâmetros associados: *o valor de pico da corrente e seu tempo de frente de onda*.

A intensidade do campo eletromagnético e da tensão induzida em corpos condutores é aproximadamente proporcional à derivada da corrente de retorno, que constitui a fonte do campo. Embora os efeitos de irradiação possam eventualmente causar danos, usualmente estes ficam restritos à interferência eletromagnética em sistemas de baixo nível de tensão de operação, como por exemplo, os sistemas de comunicação. Nestes, tais efeitos podem constituir fonte de corrupção dos dados transmitidos. Muito mais importantes são as tensões induzidas em linhas de distribuição de energia elétrica e

de comunicação, que podem alcançar valores elevados (da ordem de centenas de quilovolts), dependendo da distância do ponto de incidência à linha. Mesmo para distâncias da ordem de 200 m, o valor da tensão induzida pode ser elevado, ultrapassando a ordem de 100 kV.

3.2 - A tensão induzida em linhas por descargas atmosféricas

Um dos efeitos mais relevantes das descargas atmosféricas consiste nas tensões induzidas pela corrente que flui pelo canal ionizado constituído entre nuvem e solo durante o estabelecimento da descarga. Apesar da maior severidade do efeito da incidência direta de descargas, a probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas próximas é muito superior. Assim, a indução de tensões em linhas ou em corpos condutores longos estendidos na superfície terrestre devido à incidência em região próxima à linha é muito mais freqüente. Isso explica porque esse efeito é tão importante para sistemas de baixa e média tensão.

As tensões induzidas constituem a mais importante fonte de distúrbios em sistemas elétricos e eletrônicos de média e baixa tensão. As sobretensões associadas são responsáveis pela maior parte dos desligamentos das linhas de distribuição de energia elétrica e pelos danos causados em redes elétricas e eletrônicas de nível de tensão reduzido, como as de telecomunicações.

Por outro lado, as sobretensões induzidas por descargas próximas das redes de distribuição e de telecomunicações se disseminam no sistema, ao propagar-se ao longo dos seus condutores. Assim, tais redes podem atuar como agente de introdução dos correspondentes surtos atmosféricos nas unidades consumidoras alimentadas, sendo capaz de ali causar danos. A disseminação nas unidades consumidoras de equipamentos digitais (naturalmente dotados de baixo nível de isolamento), torna essas cargas extremamente susceptíveis a danos por surtos atmosféricos, introduzidos no ambiente do consumidor através de linhas de comunicação e de alimentação de energia.

Este quadro justifica a necessidade de um conhecimento apurado sobre o fenômeno “tensão induzida” e suas conseqüências, para subsidiar a definição das práticas de engenharia capazes de evitar os efeitos danosos associados. A complexidade do fenômeno e a influência neste dos parâmetros de descarga, notoriamente de natureza aleatória, determinam dificuldades consideráveis no estudo dos aspectos relativos à intensidade e forma do

fenômeno e, por conseguinte, na definição das práticas e procedimentos de proteção contra o mesmo. Tal cenário enseja o tratamento específico do fenômeno apresentado mais adiante neste capítulo.

4 - Aspectos de segurança

4.1 - Introdução

Os riscos à segurança de seres vivos em decorrência da incidência de descargas atmosféricas são preocupantes. Considera-se que as descargas atmosféricas constituem-se no fenômeno climático natural responsável pelo maior número de mortes no planeta, logo após as enchentes. No Brasil não existem estatísticas oficiais sobre o número de mortes por descarga, mas estima-se que a cada ano entre 100 e 300 pessoas sejam mortas, devido à incidência de descargas. Em alguns países tais estatísticas são realizadas. No caso da França, por exemplo, os dados apontam um número médio da ordem de 15 mortes por ano devido a descargas^[52]. Considerando-se as diferenças entre as áreas territoriais, entre as densidades demográficas e entre os índices de incidência de descargas locais, parece razoável uma expectativa superior a 150 mortes por ano no Brasil.

Apesar de sua natureza aleatória, é possível minimizar esse número de acidentes se forem entendidas as situações críticas de exposição a riscos por descargas, identificados os mecanismos que determinam a morte e forem projetadas medidas preventivas adequadas. Tais aspectos são considerados nos próximos tópicos.

4.2 - Caracterização dos acidentes típicos associados a descargas atmosféricas

As mortes ou ferimentos causados pelas descargas decorrem do fluxo de corrente pelo corpo humano. É possível caracterizar as ocorrências típicas que determinam a circulação da corrente de descarga (ou de parcela da mesma) pelo corpo. Tais acidentes podem ser separados em dois tipos: aqueles associados à incidência direta de descargas e aqueles em que a corrente de uma descarga próxima é transmitida por um corpo condutor e submete seres posicionados a alguma distância do ponto de incidência. Muitas vezes, condutores de redes de energia e comunicação e corpos metálicos longos, como cercas de

arame, são responsáveis por tal transferência de corrente. Algumas situações típicas de acidente por descarga, associados à incidência direta, são representadas na Figura 7.7 e são comentadas em seguida.

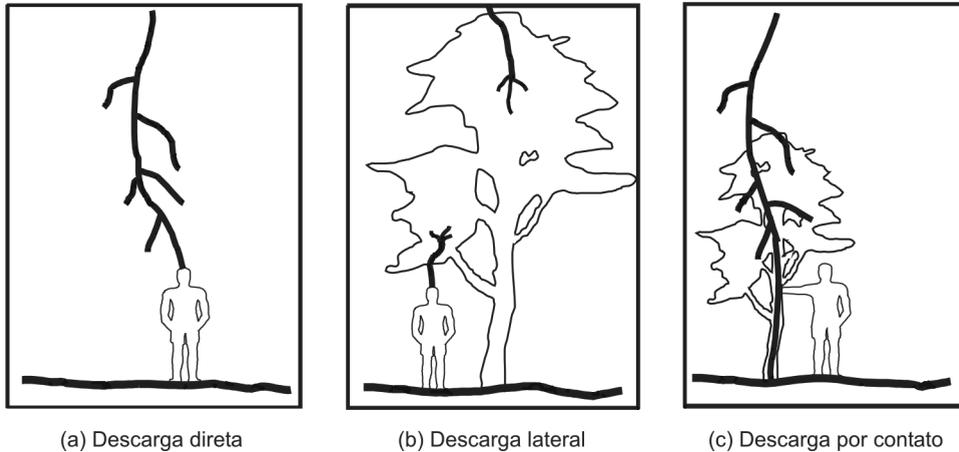


Figura 7.7 - Situações típicas dos acidentes por descarga direta (adaptado^[52])

Na Tabela 7.1, estão compilados os resultados de uma investigação muito consistente, realizada por um pesquisador japonês^[130]. No seu estudo, Kitagawa apresenta as estatísticas relativas a 65 casos investigados de incidência de descargas. Estas afetaram seres humanos no Japão e foram registradas num período de 30 anos. Em tais casos, ocorridos entre 1968 e 1998, são consideradas as situações típicas da ocorrência e os eventos decorrentes.

Tabela 7.1 - Estatísticas relativas a 65 casos de incidência de descarga^[130]

Tipo de acidente	Número de descargas	Pessoas Mortas	Pessoas feridas severamente	Outras Pessoas afetadas
Descarga direta	36	28	8	48
Descarga lateral	18	14	10	62
Múltipla incidência	8	9	4	59
Acidentes internos	3	0	0	3
Total	65	51	22	172

Na seqüência deste tópico, são consideradas as situações típicas de acidente, que são comentadas, fazendo-se referência aos dados da Tabela 7.1:

- **Descarga direta** (*direct flash*)

Na incidência de uma descarga direta sobre um ser humano, valores muito elevados de corrente impulsiva podem circular pelo corpo da vítima. A corrente se distribui parcialmente pelo interior do corpo (corrente volumétrica) e parcialmente pela superfície do mesmo.

As correntes volumétricas são responsáveis por eventuais paradas cardiorrespiratórias, capazes de causar a morte. As correntes superficiais se manifestam na forma de descargas sobre a superfície do corpo e, usualmente, causam apenas queimaduras, embora as mesmas possam ser intensas em alguns casos. A distribuição relativa destas correntes depende da relação entre as impedâncias dos dois percursos (volumétrico e superficial) e pode ser influenciada pelo estado do corpo da vítima no instante da ocorrência. Por exemplo, as vestes da vítima podem influenciar nesta distribuição, aumentando a parcela da corrente superficial, principalmente se estiverem molhadas pela chuva ou, eventualmente, estiverem em estado de boa condutividade devido ao suor do corpo.

Como mostra a Tabela 7.1, em 36 casos de acidente com incidência direta houve morte de 28 pessoas (78%) e 8 pessoas ficaram gravemente feridas. Outras pessoas foram afetadas pelo acidente, mas com efeitos não significativos, por não estarem no caminho da corrente de descarga.

Um aspecto interessante relatado em algumas situações refere-se ao fato de que, na ocorrência de descargas superficiais na vítima, em vários casos, não há morte. Aparentemente, a impedância dos arcos constituídos na superfície do corpo fica muito reduzida em relação àquela do corpo e drena a maior parte da corrente, evitando que a corrente volumétrica atinja valores capazes de ocasionar paradas cardiorrespiratórias. Os arcos funcionam aproximadamente como um dispositivo de proteção (tipo pára-raios), colocado em paralelo com o corpo. Assim, em muitos casos, a vítima pode sobreviver, a despeito de eventuais queimaduras.

- **Descarga lateral** (*side flash*)

Quando uma descarga incide sobre objetos elevados (por exemplo, árvores), em seu percurso para o solo a corrente de retorno pode procurar caminhos de menor impedância, inclusive através do estabelecimento de arcos no ar, que conectam objetos de boa condutividade em contato com o solo.

Nessa situação típica, é comum ocorrerem descargas elétricas no ar, fechando um circuito entre árvores atingidas e o corpo de pessoas e animais abrigados sob estas. Essas “faíscas” podem saltar de um ramo acima da vítima para sua cabeça ou do tronco lateral para o corpo da vítima posicionada ao lado.

Coincidentemente, também nesse tipo de ocorrência, a tabela indica a morte de um número de pessoas que representa 78% dos casos de acidentes, como na incidência direta. Nos 18 acidentes descritos, constam 14 pessoas mortas, 10 severamente feridas e 62 apenas afetadas pelos acidentes.

A gravidade desse tipo de acidente decorre da semelhança de sua natureza com aquela da descarga direta, pois, em ambos os casos, a vítima é percorrida por uma parcela significativa da corrente principal de descarga.

• **Descarga por contato**

A descarga por contato ocorre quando a vítima está em contato direto com um corpo que constitui caminho de eventual corrente de descarga, no percurso da mesma para o solo. Uma parte da corrente pode ser drenada para o solo através do corpo da vítima. No caso de uma pessoa em contato com o tronco de uma árvore atingida por uma descarga, seria um processo muito semelhante ao da descarga lateral, diferindo desta pela inexistência de arco entre o tronco e a vítima. Nesse caso, é até mais perigosa que a descarga lateral. Constituem também exemplos desse tipo de ocorrência os acidentes por contato com estruturas elevadas atingidas por descarga, como mastros, e ainda com cercas metálicas.

A severidade do acidente fica condicionada à intensidade da corrente que percorre o corpo da vítima. A distribuição relativa da corrente de descarga entre o corpo da vítima e o objeto contactado depende da relação entre as impedâncias para o solo dos dois percursos. A parcela da corrente que percorre o corpo da vítima (e o risco correspondente) é tanto menor quanto mais reduzida for a impedância do percurso de corrente em paralelo com a vítima.

• **Descarga para múltiplos pontos**

Esta designação específica é atribuída a um tipo de ocorrência, que acomete simultaneamente diversas vítimas, incluindo descarga direta para mais de uma vítima, e usualmente descargas laterais para vítimas próximas

daquelas atingidas diretamente. A Figura 7.8 ilustra uma ocorrência deste tipo. As vítimas A e B são atingidas por ramos diferentes da descarga. Uma hipótese possível para tal ocorrência é que canais ascendentes concorrentes tenham sido constituídos a partir das duas vítimas e, dada a proximidade destes, ambos se conectaram ao canal descendente. A figura mostra também a ocorrência de descarga lateral entre a vítima B atingida diretamente e outra vítima próxima, C. A descarga para pontos múltiplos ocorre usualmente em situações em que um grupamento de pessoas se expõe em áreas descampadas ou em locais elevados. No caso da figura, um grupo de pessoas estava escalando uma montanha e, no momento da descarga, encontrava-se justamente sobre a crista de um morro. Descargas laterais, como aquela representada entre a pessoa atingida e outra próxima (B e C), são relatadas sobretudo em caso de solos de muito alta resistividade.

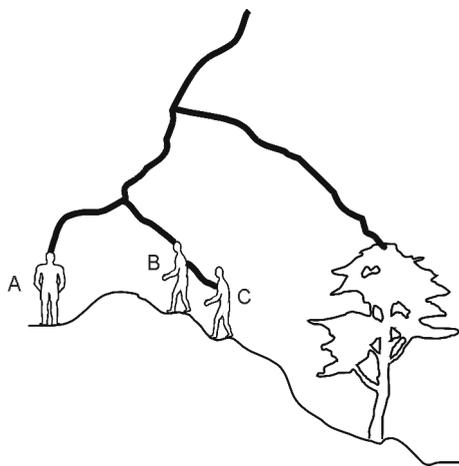


Figura 7.8 - Ilustração de uma descarga para múltiplos pontos (adaptado^[131])

• Acidente por tensão de passo

Ao incidir em estruturas elevadas, em corpos e objetos em geral, ou diretamente no solo, a corrente de descarga é injetada neste meio, sendo ali dispersada. Ao se distribuir no solo, a corrente promove uma elevação de potencial no solo e estabelece uma distribuição de potenciais na superfície deste, que pode submeter pessoas eventualmente próximas ao local. Como indica a Figura 7.9, uma pessoa pode ficar submetida à diferença de potencial por ter contato com o solo em dois pontos que possuem potenciais diferentes. A diferença de potencial pode promover o percurso de corrente pelo corpo humano e, eventualmente, ocasionar parada cardiorrespiratória.

Aparentemente, não existem registros oficiais da morte de pessoas por tensão de passo associada a descargas, embora sejam comuns relatos de desfalecimentos decorrentes deste tipo de acidente, usualmente seguido de recuperação dos sentidos. Por outro lado, é comum o relato da morte de animais, muitas vezes de um grupo, sobretudo em situação na qual os mesmos estão abrigados sob árvores, em momento de tempestade.

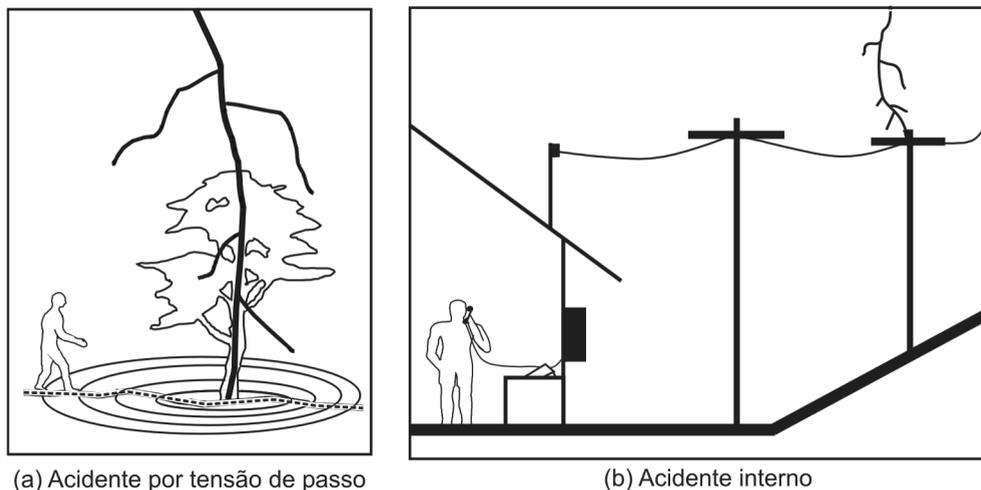


Figura 7.9 - Acidentes por tensão de passo ou por tensão transferida (adaptado^[52])

Esse tipo de acidente é freqüentemente relatado nas ocorrências em que há incidência direta de descarga numa vítima próxima de outras pessoas. Nessa situação são comuns a morte da pessoa atingida diretamente e o desfalecimentos de pessoas próximas.

São também comuns os designados “acidentes internos”. Estes são promovidos, sobretudo, pela introdução no ambiente interno a edificações de surtos de corrente e tensão transmitidos pelas linhas de alimentação de energia e de comunicação. São também motivados pela incidência direta de descarga nas edificações e pela subsequente transferência da corrente para o solo através das partes metálicas existentes na edificação (dutos, cabos de energia, condutores ligados a antenas, etc.). A Figura 7.9 (b) ilustra um exemplo de tal condição. No caso mostrado, os surtos podem ser gerados por incidência direta de descarga na linha ou por tensão nela induzida por descarga próxima. Estes se propagam ao longo dos condutores da linha, alcançando as edificações alimentadas. Kitagawa relata que, em 3 acidentes desse tipo registrados no Japão, houve salto de descarga elétrica de componentes do sistema de energia residencial (por exemplo, tomadas) para moradores

que se encontravam próximos aos mesmos, em momento de tempestades com raios. É muito raro o registro de mortes, nesses casos.

4.3 - Situações de exposição de risco

É possível identificar algumas situações muito comuns de exposição em momento de tempestades, consideradas de risco quanto à incidência de descargas. Tais situações de exposição devem ser evitadas e são apresentadas a seguir:

- campos abertos em geral, áreas planas, praias, margem de rios;
- alto de montanhas ou cristas de colinas;
- campos de esportes amplos (de golfe e de futebol, por exemplo);
- cavalgar ou guiar motos e bicicletas;
- em rio, dentro de canoa ou nadando;
- no mar, em barco de madeira ou nadando;
- árvores isoladas; tocar ou estar próximo de qualquer árvore;
- tendas e grutas;
- portar objetos elevados (mesmo que sejam isolantes), como varas de pescar e canos longos;
- entrar em contato ou ficar próximo de corpos metálicos (capazes de transferir potenciais ou correntes associadas a descargas), como cercas, eletrodutos, condutores de sistemas de energia e comunicação, e, mesmo, tocar em objetos, aparelhos e dispositivos conectados a tais redes;
- etc.

Através da análise das situações de exposição apresentadas, é possível denotar as condições críticas, que caracterizam o risco.

Num conjunto de situações, em função de sua posição, o corpo da vítima se destaca como estrutura superior em relação ao ambiente local, tornando-a um ponto preferencial de incidência de descarga. Eventualmente, ao portar objetos elevados, a vítima realça sua condição de destaque. Nessas situações, a vítima “funciona” como um elemento captor.

Em realidade, pela descrição apresentada anteriormente para o mecanismo de evolução da descarga, pode se perceber que, nessas situações, quando um canal descendente se aproxima do solo, existe uma probabilidade maior do canal ascendente induzido ser formado a partir da vítima, que passa a se constituir em ponto preferencial de incidência em relação às redondezas.

Noutro conjunto de situações, ao se posicionar próxima de pontos preferenciais de incidência (como árvores, mastros etc.), a vítima se sujeita ao risco de servir de percurso de corrente, seja por descarga lateral ou por contato. Sujeita-se, ainda, a ser submetida a tensões de passo geradas pela corrente de descarga. Nessa situação, vale comentar, particularmente, as ocorrências relativas à incidência de descargas em pessoas abrigadas no interior de casas de madeira e tendas. A altura maior em relação às redondezas faz da casa e da tenda pontos preferenciais de incidência. No entanto, como tais estruturas não possuem condutores capazes de atuarem como captosres e de direcionarem a corrente de eventual descarga para o solo, as mesmas podem ser vazadas pela corrente de descarga, que pode, inclusive, atingir uma vítima abrigada no interior da casa ou tenda.

A referência à condição “estar nadando” tem uma justifica particular. Ocorrendo uma descarga próxima, o fluxo da sua corrente que se dispersa na água tende a se concentrar no corpo da vítima, que tem resistividade inferior àquela da água. A impedância da pele, que é usualmente responsável por limitar o fluxo da corrente pelo corpo humano, fica muito reduzida na condição de corpo molhado ou de alto valor de tensão aplicada. Nesta situação, ainda que não cause a morte, o fluxo da corrente pelo corpo pode ocasionar parada cardiorrespiratória ou promover condição de pânico, que leve a vítima à morte por afogamento.

No caso de grutas, que têm usualmente suas paredes constituídas de rocha de alta resistividade, a justificativa pode ser um pouco diferente. Muitas vezes, uma vítima ali abrigada, fica com sua cabeça próxima ao teto da gruta. Em caso de incidência de uma eventual descarga no solo sobre a gruta, o fluxo da corrente de descarga pode encontrar um percurso de menor impedância ao fechar um arco para a cabeça da vítima, completando um circuito pelos pés da mesma.

4.4 - Medidas preventivas

De uma forma geral, é possível prevenir acidentes com descargas, simplesmente evitando-se configurar as situações de risco, em momentos de tempestade.

Alguns procedimentos podem ser sistematizados neste sentido, para serem adotados em momentos de tempestades:

- Não constituir ponto de destaque em relação ao relevo próximo. Evitar carregar objetos elevados ou qualquer corpo que facilite a constituição de um canal ascendente;
- Estando em campo aberto, e não sendo prudente se deslocar para não se constituir em ponto de destaque, agachar e aguardar o momento em que, reduzida a tempestade, seja possível procurar abrigo;
- Sendo possível, procurar abrigar-se internamente em estruturas naturalmente protegidas, como carros, ônibus, barcos metálicos e edifícios construídos com estruturas metálicas ou concreto armado (todos funcionam como uma gaiola de Faraday) ou propositadamente protegidas com sistemas de proteção, conforme descrito no próximo capítulo;
- Deve ser evitado abrigar-se sob árvores isoladas (ou outros pontos preferenciais de incidência). O abrigo sob floresta é mais seguro e, nesse caso, deve se procurar uma posição equidistante das árvores mais próximas, onde deve se permanecer agachado durante o período crítico de tempestade;
- A antiga recomendação de deitar-se no solo, quando em local aberto, é atualmente substituída pela sugestão de permanecer agachado, com os pés e tronco próximos (Figura 7.10) para minimizar diferenças de potenciais às quais o corpo possa ficar submetido, em caso de eventual descarga próxima;



Figura 7.10 - Posição recomendada quando em campo aberto durante tempestades (adaptado^[52])

- Evitar atividades, como o alpinismo, que exponham o corpo à possibilidade de fluxo de corrente em caso de incidência (Figura 7.11);

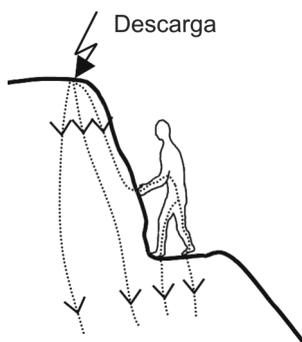


Figura 7.11 - Fluxo de parcela da corrente de descarga pelo corpo (adaptado^[131])

- Evitar permanecer com o corpo dentro da água e, estando em barco de madeira ou canoa, evitar ser ponto de destaque ou se localizar próximo deste (por exemplo, do mastro);
- Em momentos de tempestade, evitar tomar banho e usar aparelhos eletrodomésticos (incluindo o telefone conectado à rede) e, ainda, evitar ficar muito próximo aos componentes das redes internas de energia e comunicação. Não há perigo de choque no uso de telefones celulares ou sem fio, durante as tempestades;
- Uma prática recomendada para proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis é desligá-los da tomada, pois, quando o mesmo é solicitado por um transitório associado a descarga atmosférica, o isolamento do interruptor não suporta a sobretensão associada, rompendo-se e deixando o aparelho susceptível ao surto.

Concluindo o item 4 deste capítulo, referente aos aspectos de segurança, vale ressaltar o número muito elevado de acidentes com descargas atmosféricas registrados todos os anos. Algumas ocorrências, como a morte de crianças durante jogos de futebol em momento de tempestade, são muito comumente relatadas. Infelizmente, muitos apenas se apercebem do risco após o acometimento de um ente próximo por tal fatalidade. A despeito do desconforto e limitações decorrentes de alguns dos procedimentos recomendados, em alguns países, a taxa de mortalidade devido a descargas foi reduzida à metade, através de campanhas educativas que enfatizam tais procedimentos.

5 - A incidência direta de descargas em linhas de transmissão*

5.1 - Generalidades

O desempenho do sistema de transmissão é medido por meio de índices que expressam a qualidade da energia suprida às cargas. Tais índices consideram o número e duração das interrupções de serviço. Consoante as características da linha, são definidos limites aceitáveis do número de desligamentos por trecho de linha. A Tabela 7.2 mostra índices considerados aceitáveis por concessionárias brasileiras para consumidores comuns, em função do nível de tensão da linha. A busca por uma melhor qualidade para a energia fornecida tem levado a uma tendência de maior rigor, indicando a adequação de limites bem inferiores aos indicados. Nesta perspectiva, particularmente para as linhas de nível tensão superior a 100 kV, uma taxa entre 0,1 e 1 desligamento/100 km/ano seria considerada boa e uma taxa entre 1 e 5 seria considerada média. Para linhas de 69 kV, uma taxa de até 5 desligamentos/100 km/ano seria considerada aceitável.

Na Tabela 7.2 são também indicados os valores mínimos da tensão suportável ao impulso (NBI ou TSI) para o nível de tensão da linha, bem como os valores mais usuais de NBI, superiores aos mínimos devido ao emprego de maior número de discos na cadeia de isoladores.

* O texto do item 5 “A incidência direta de descargas em linhas de transmissão” teve co-autoria do Dr. Amilton Soares Jr., que contribuiu com o autor na elaboração do conteúdo.

Tabela 7.2 - Índices de desligamentos por nível de tensão (isoladores: vidro e porcelana)

Nível de tensão de operação da linha (kV)	Valor mínimo da Tensão Suportável ao Impulso: NBI (kV)	Valor usual de TSI ou NBI (kV)	Número máximo de desligamentos : d (d/ 100km/ano)
69	380	450	10-15
138	650	850	10
230	975	1.200	5
345	1.240	1.350	2-3
500	1.612	1.750	1-2

As longas extensões das linhas de transmissão determinam uma probabilidade elevada de incidência direta de descargas atmosféricas nestas, com possibilidade de desligamento em decorrência da solicitação dos isoladores pelas sobretensões associadas. O caráter estratégico das linhas para o fornecimento de energia e a verificação de que as descargas são a sua principal causa de desligamento sugerem a necessidade de entendimento pleno dos mecanismos determinantes do desligamento devido à solicitação por descarga. A compreensão desses mecanismos pode subsidiar a definição e a aplicação das práticas adequadas de proteção para minimizar o número de desligamentos, restringindo-o aos índices aceitáveis para o nível de tensão da linha.

Na prática, em muitas situações é difícil assegurar tais índices, sobretudo quando as linhas atravessam regiões que possuem elevados índices de densidade de incidência e solos de alta resistividade.

Fundamentalmente, o desligamento da linha de alta tensão devido a descargas pode decorrer de dois tipos de ocorrências: a incidência direta nos cabos energizados e a incidência nos cabos de blindagem. Os mecanismos associados a cada ocorrência são considerados a seguir.

5.2 - Mecanismo de ruptura de isolamento em linha sem cabo de blindagem: o "flashover"

O mecanismo de ruptura do isolamento associado à incidência direta de descarga numa linha é designado *descarga disruptiva no isolamento (flashover)*. Para avaliar os aspectos básicos desse mecanismo, considera-se o caso ele-

mentar de uma linha monofásica sem cabo de blindagem, isolada da terra pelos isoladores da torre. Uma descarga de corrente impulsiva, de valor de pico I_p , incide na linha, como ilustra a Figura 7.12.

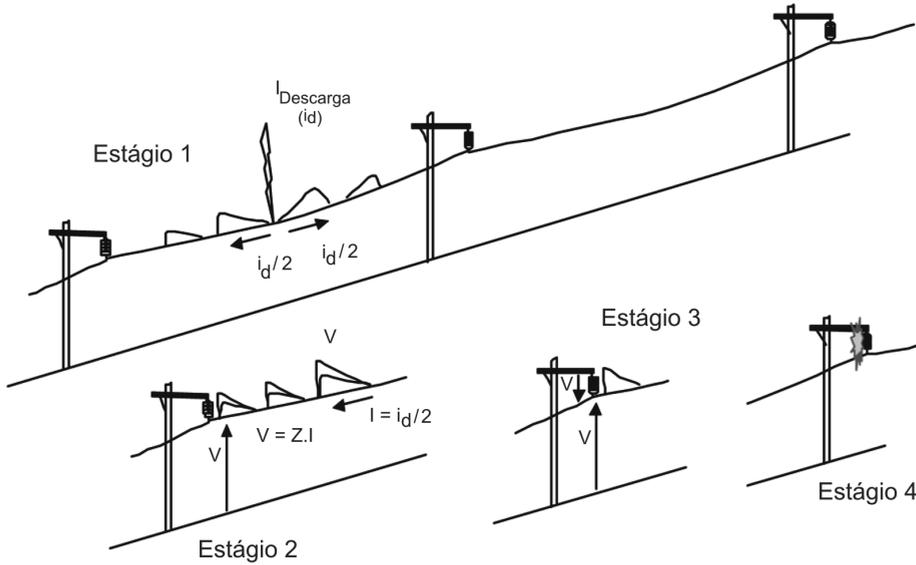


Figura 7.12 - Sobretenção resultante em linha não blindada atingida por descarga

Conforme o estágio primeiro da figura, quando a descarga incide na linha, a corrente de retorno se divide em duas parcelas de amplitudes aproximadamente iguais ($I_p/2$). Para cada lado da linha se propaga uma onda de corrente, cuja amplitude vale aproximadamente metade da corrente incidente.

A linha de transmissão pode ser representada por sua impedância de onda Z_L $\{Z_L = [(R + j\omega L)/G + j\omega C]^{1/2}\}$. Nesta expressão, R , L , C e G representam respectivamente os parâmetros por unidade de comprimento da linha: resistência, indutância, capacitância e condutância. O termo ω representa a frequência angular ($\omega = 2\pi f$). Para a propagação de ondas impulsivas rápidas ou de alta frequência em linhas aéreas, a impedância de onda se aproxima da impedância de surto da linha Z_s [$Z_s = (L/C)^{1/2}$].

Associada a cada onda de corrente que se propaga, tem-se uma onda de tensão (ou sobretenção, dado o usual valor muito elevado de sua amplitude). Assim, a cada ponto ao longo da linha está associada uma onda de corrente e outra de tensão. A onda de tensão corresponde à integral do campo elétrico do solo até a superfície do condutor imediatamente acima (vide o

segundo estágio da figura) e sua amplitude pode ser aproximada pelo produto da impedância de surto pela amplitude da onda de corrente ($V_p = Z_s \cdot I_p$), onde o índice “p” indica o valor de pico.

As ondas de corrente e tensão se propagam ao longo da linha. Ao alcançarem a primeira estrutura aterrada, o isolador que separa o condutor energizado da estrutura (eletricamente conectada ao solo) fica submetido à onda de sobretensão, conforme ilustrado no terceiro estágio da figura.

Em muitos casos, em função de seu valor elevado, a sobretensão pode ser capaz de promover a ruptura do isolamento, com estabelecimento de um arco elétrico conectando o condutor e a estrutura aterrada (quarto estágio). O arco elétrico constitui-se usualmente num arco superficial de contornamento do isolador através do ar ou mais raramente num arco volumétrico, que pode destruir o isolador.

Através do arco, a corrente de descarga flui em direção ao solo e cessa após um breve período de tempo, devido à sua natureza impulsiva e de curta duração. Contudo, em muitas situações, o arco elétrico pode se manter, sustentado pela própria tensão de operação da linha. Para se estabelecer um arco elétrico, com o rompimento a rigidez dielétrica do ar, é necessária a aplicação de um valor muito elevado de tensão sobre o isolador. Porém, uma vez estabelecido o arco, o valor da impedância no seu percurso é reduzido e uma tensão de amplitude relativamente discreta pode ser capaz de manter um nível de corrente suficiente para assegurar a ionização da região correspondente ao percurso do arco e, logo, para sustentá-lo.

Mantendo-se o arco, configura-se um curto-circuito. Este pode ter natureza muito destrutiva para o sistema, pois a corrente de baixa frequência do sistema de energia passa a fluir pelo arco em direção ao solo. Nesses casos, após um determinado período limite de fluxo da corrente de curto-circuito através do arco, o sistema de proteção, cujos relés são sensibilizados por esta corrente, deve atuar, causando o desligamento da linha.

Para fins de ilustração, admite-se a incidência de uma descarga diretamente sobre a fase da linha. Assume-se 30kA como o valor de pico da corrente. Considera-se que a linha tenha uma impedância de onda da ordem de 400 Ω . Estima-se que o valor de pico da sobretensão estabelecida se aproxime de 6 MV [(30 kA/2) * 400 Ω]. As ondas de sobretensão e de corrente se propagam ao longo da linha, sujeitas a atenuação relativamente discreta de

suas amplitudes, e chegam à estrutura aterrada (poste ou torre) que sustenta os isoladores conectados ao condutor da linha. Tais isoladores é que promovem o isolamento entre o condutor energizado da linha e a terra. Como mostra a Tabela 7.2, o nível de isolamento da cadeia de isoladores frente a sobretensões impulsivas varia consideravelmente, dependendo do nível de tensão da linha e das particularidades de projeto. Os valores correspondentes têm ordem inferior a 5 kV para linhas de distribuição de baixa tensão, de 95 a 300 kV para linhas de média tensão e de várias centenas a alguns milhares de quilovolts para linhas de alta tensão. Ora, em qualquer dos casos considerados, o nível da sobretensão resultante, gerada pela descarga (6 MV), é muito superior à suportabilidade do isolamento. Por conseguinte, deve ocorrer o rompimento do isolamento, com o estabelecimento de um arco elétrico (superficial ou volumétrico) através dos isoladores que suportam a fase.

A principal prática de proteção para se evitar que se suceda o quadro descrito consiste na colocação de cabos de blindagem sobre os condutores energizados (condutores de fase). Tais cabos, também designados cabos de terra ou cabos pára-raios, são conectados eletricamente às estruturas e ao solo através de aterramentos elétricos. O emprego de cabos de blindagem é prática usual para linhas de nível de tensão de operação superior a 69 kV. Especificamente no caso das linhas de 69 kV, o emprego (ou não) desses cabos depende da filosofia adotada por cada concessionária de energia, sendo comuns as duas situações.

Contudo, vale comentar que, mesmo com a adoção desta prática, pode ainda se verificar a ruptura de isolamento e decorrente curto-circuito. Esta questão é especificamente detalhada na próxima seção.

5.3 - Mecanismo de disrupção numa linha blindada: o "back-flashover"

5.3.1 - Considerações preliminares

A Figura 7.13 ilustra a representação de uma linha de transmissão trifásica, ali incluídos dois cabos de blindagem, e indica a incidência de uma descarga sobre um deles. Tais cabos são posicionados sobre os condutores das fase, segundo uma configuração geométrica que objetiva assegurar a interceptação de eventuais descargas, que, na ausência dos mesmos, poderiam incidir diretamente sobre os condutores das fase. Os cabos de

blindagem são ligados ao solo em cada estrutura, seja por conexão elétrica à estrutura (no caso de torres metálicas) ou através de cabos de descida conectados ao aterramento da linha (no caso de postes de madeira ou concreto). Desta forma, direcionam para o solo as correntes de eventuais descargas incidentes.

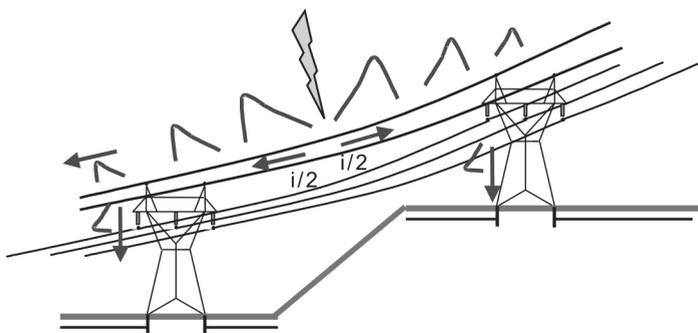


Figura 7.13 - Linha trifásica blindada atingida por descarga

Ao evitar a incidência direta de descargas no cabo fase, os condutores de blindagem previnem os efeitos de ruptura de isolamento descritos na seção anterior (*flashover*). Eventualmente, mesmo com tais precauções, pode ocorrer a falha do isolamento da linha, mas segundo um mecanismo de natureza diversa daquele já descrito: o “*backflashover*”. Neste texto sugere-se a adoção do termo *descarga disruptiva de retorno* para designar tal mecanismo.

Nos parágrafos seguintes é apresentada a explicação simplificada e objetiva dos mecanismos envolvidos no estabelecimento da sobretensão nos isoladores da linha, devido à incidência de descarga nos cabos de blindagem. Uma abordagem mais elaborada pode ser apreciada em outras referências^[211,214,209,208].

Na explicação que se segue, são adotadas duas estilizações, apresentadas na Figura 7.14, que a simplificam e denotam com maior nitidez os efeitos descritos. Primeiramente, a onda de corrente de descarga é aproximada por uma onda triangular. Adicionalmente a estrutura da torre da linha de transmissão é representada por um elemento vertical, tendo em sua base uma barra para representar o seu aterramento elétrico.

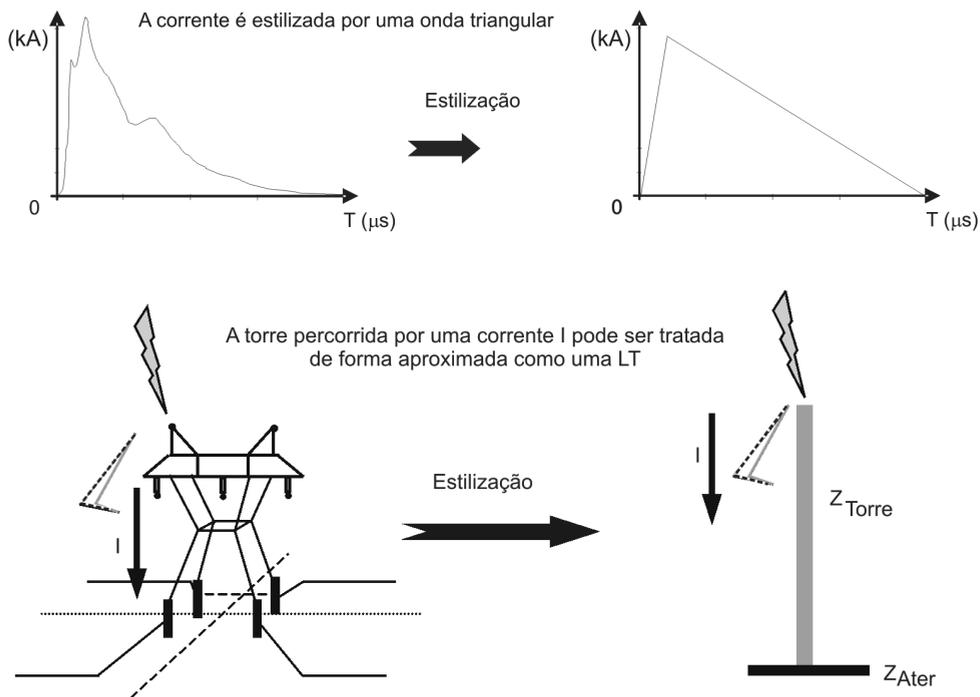


Figura 7.14 - Estilização da onda de corrente e da torre da linha de transmissão

As análises apresentadas no decorrer deste item são dedicadas à avaliação da amplitude da sobretensão resultante no topo da torre, quando da incidência de descarga. Em realidade, o parâmetro que realmente interessa, como elemento determinante da ruptura do isolamento, constitui-se na amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Esta cadeia sustenta os condutores das fases, separando-os eletricamente da estrutura metálica da torre. Por outro lado, pode ser verificado que existe uma relação praticamente proporcional entre as sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores e no topo da torre, como indicado em item posterior deste capítulo.

Para fins de simplificação das análises, optou-se por proceder à análise da influência de vários fatores na amplitude da sobretensão no topo da torre, tendo em conta que os resultados das avaliações são diretamente aplicáveis à sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores, em decorrência da citada relação de proporcionalidade.

Ainda antecedendo à consideração objetiva do problema em foco, vale tecer alguns comentários básicos sobre a propagação de ondas de tensão e corrente em linhas de transmissão. Estes são apresentados nos dois próximos parágrafos.

Como mostra a Figura 7.15, ao incidir numa linha, longe das estruturas, a onda de corrente se divide em duas parcelas aproximadamente iguais, que se propagam para lados opostos. Associada a cada onda de corrente, também se propaga ao longo da linha uma onda de tensão. A amplitude desta onda de tensão é dada aproximadamente pelo produto da onda de corrente pela impedância de surto da linha (Z_s), sendo tal impedância correspondente à impedância de onda da linha para condições de alta frequência.

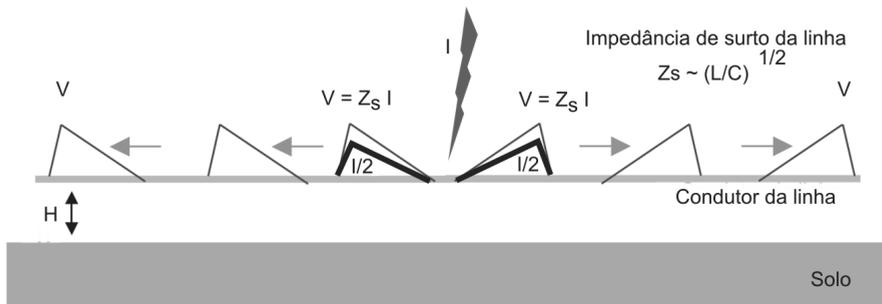


Figura 7.15 - Propagação das ondas de corrente e tensão ao longo da linha

Em algumas situações pode haver descontinuidade da impedância de surto da linha a partir de determinado ponto. Isso ocorre, por exemplo, se as características do condutor forem modificadas, ou mesmo quando uma impedância concentrada, cujo valor seja diferente da impedância de surto, está conectada à linha. Nesta situação, apenas uma parcela da onda de sobretensão é transmitida além daquele ponto, sendo a parcela restante refletida. Isto significa que tal parcela passa a se propagar em sentido contrário àquela da onda incidente no ponto. Esta condição está representada na Figura 7.16.

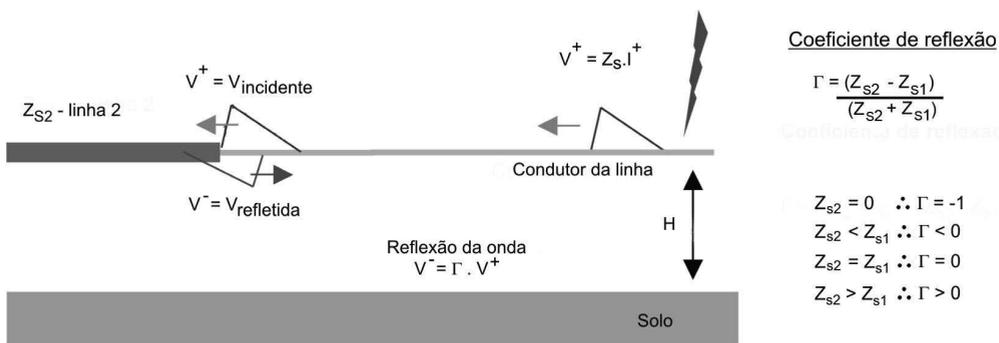


Figura 7.16 - Reflexão da onda de tensão numa descontinuidade ao longo da linha

No ponto de descontinuidade, a onda de tensão refletida (V^-) é definida através de um *coeficiente de reflexão* Γ , cujo valor é obtido em função da relação entre as impedâncias de surto das duas linhas [$\Gamma = (Z_{s2} - Z_{s1}) / (Z_{s2} + Z_{s1})$]. O índice “1” se refere à linha na qual a onda incidente se propaga.

Quando o valor do coeficiente é nulo (correspondendo à condição de igualdade das impedâncias de surto nos dois lados da interface), não há reflexão e a onda de tensão incidente (V^+) continua se propagando além da descontinuidade, sendo integralmente transmitida. Na figura, é indicado o comportamento do coeficiente de reflexão, em função da relação entre as duas impedâncias de surto. Se a impedância de surto a partir da descontinuidade é inferior àquela da primeira linha, o coeficiente de reflexão é negativo, indicando que, além da onda de tensão possuir uma parcela refletida propagando em sentido contrário ao da onda incidente, a amplitude dessa onda tem sinal contrário àquela da onda incidente. Caso a impedância de surto da segunda linha tenha valor superior àquela da primeira linha, há também reflexão e a onda refletida tem sinal igual ao da onda incidente.

A onda de tensão resultante em qualquer ponto P da linha é constituída pela superposição das ondas incidente (V^+) e refletida (V^-), tendo em conta eventuais defasamentos no tempo entre tais ondas ($V = V^+ + V^-$).

5.3.2 - Parâmetros de influência na amplitude da sobretensão resultante

Retornando ao caso concreto de interesse desta análise, ao incidir sobre o cabo de blindagem da linha, a descarga dá origem a uma onda de corrente para cada lado, que se propaga até alcançar uma estrutura aterrada. Como mostra a Figura 7.13, ali, a corrente se divide. Uma parcela menor da corrente continua seguindo pelos cabos pára-raios e a maior parte desce pela estrutura em direção ao solo. Para fins de ilustração, considera-se uma corrente de valor de pico 40 kA, incidente no meio do vão da linha. De uma das parcelas que se propagam resulta o fluxo de uma corrente pela torre mais próxima, cujo valor de pico vale 15 kA.

Para analisar as sobretensões desenvolvidas, admite-se que a torre é representada por uma impedância de surto (Z_{Torre}) de valor 120 Ω . Assume-se que o aterramento conectado à base da torre seja um elemento concentra-

do, representado por sua impedância (Z_{Ater}). Admite-se o fluxo da corrente de 15 kA pela torre (onda incidente), conforme o esquema representado na Figura 7.14.

À parcela da onda de corrente incidente que percorre a torre em direção ao solo está associada uma onda de tensão. Esta é obtida pelo produto da impedância de surto da torre pela onda de corrente, como ilustra a Figura 7.17 para uma corrente estilizada.

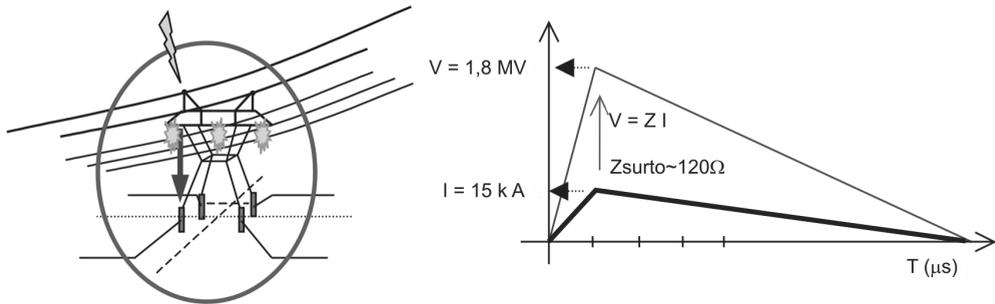


Figura 7.17 - Onda de tensão incidente: propagação do topo da torre em direção ao solo

Caso o aterramento apresente um valor de impedância igual àquele da impedância de surto da torre, não há reflexão e a onda de tensão resultante no topo da torre constitui-se na própria onda incidente. Como mostra o gráfico da figura anterior, a amplitude da onda de tensão seria de 1,8 MV ($V^+ = Z_{Torre} \cdot I^+$).

Considerando um aterramento com valor de impedância inferior àquele da impedância de surto da torre, quando a onda de tensão alcança o solo, encontra uma descontinuidade de impedância, havendo reflexão negativa naquele ponto. A Figura 7.18 ilustra tal processo, na hipótese particular de um valor nulo para a impedância de aterramento (caso ideal). Nessa hipótese, após um tempo de trânsito pela torre (τ), a onda sofre uma reflexão total ($\Gamma = -1$), em função do valor nulo da impedância de aterramento. A onda refletida tem a mesma amplitude da onda incidente, mas sinal contrário ($V^- = \Gamma \cdot V^+$), e trafega subindo pela torre até alcançar o topo, após um tempo de trânsito igual ao de descida.

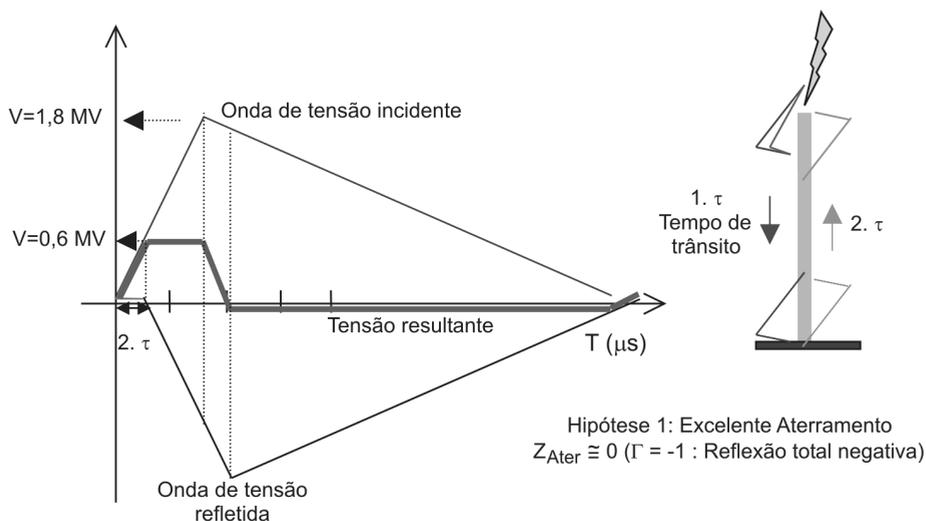


Figura 7.18 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $Z_{Ater} = 0 \Omega$)

A onda total de tensão resultante no topo da torre é aquela obtida pela superposição das ondas incidente e refletida. Tal onda está indicada em traço mais forte na Figura 7.18. Percebe-se que, até que a onda refletida alcance o topo, após um intervalo de tempo igual ao dobro do tempo de trânsito (2τ), a onda resultante é idêntica à onda incidente. A partir desse instante, como as duas ondas apresentam a mesma taxa de crescimento, mas sinais contrários, o crescimento da onda é anulado. O valor alcançado em 2τ permanece como a diferença entre as ondas incidente e refletida até que a onda incidente atinja seu valor de pico. Daí, o valor da tensão começa a decrescer, pois passa a prevalecer o crescimento negativo da onda refletida, havendo a redução da amplitude da onda resultante até que a onda refletida também alcance seu valor de pico. A partir desse ponto, a amplitude da onda resultante se aproxima de zero.

Assim, o efeito da reflexão negativa da onda de tensão no aterramento foi promover uma sensível redução na amplitude da sobretensão no topo da torre (de 1,8 MV na condição de incidência sem reflexão para 0,6 MV na condição de reflexão total).

O tempo de trânsito (τ) é muito importante na definição da amplitude da sobretensão resultante. Ele determina o valor da redução da mesma, na medida em que define o instante em que a onda de tensão incidente tem seu crescimento “grampeado”. Tal intervalo de tempo pode ser aproximada-

mente calculado dividindo-se a altura da torre pela velocidade da luz (velocidade de propagação da onda de tensão em direção ao solo). No caso de uma torre de 30 m, tal tempo tem a ordem de $0,1 \mu\text{s}$. O grameamento da onda de tensão ocorre para o dobro deste tempo, portanto, após $0,2 \mu\text{s}$. Percebe-se que tal intervalo de tempo é usualmente bem inferior ao tempo de frente de ondas de corrente de descargas reais e, por conseguinte, das correspondentes ondas de tensão. Assim, o efeito da reflexão deve ser sentido antes que a onda de sobretensão alcance seu valor de pico.

Em realidade, a análise apresentada reflete o comportamento primário da onda de tensão. Uma análise detalhada deveria considerar ainda efeitos secundários associados às reflexões sucessivas que ocorrerem no alto da torre e no aterramento. No entanto, tais reflexões não são tão significativas na definição da amplitude da onda de tensão, não sendo aqui computadas, para fins de simplificação das explicações.

Na situação usual de aplicação, os valores da impedância de aterramento das torres são inferiores à tensão de surto da linha, variando mais comumente entre 5 e 30Ω , dependendo da resistividade do solo. Quando estes valores mais realistas são considerados para a impedância de aterramento, a redução da amplitude da sobretensão devido à reflexão negativa é atenuada, em relação à hipótese de valor nulo para a impedância do aterramento. A Figura 7.19 ilustra tal condição.

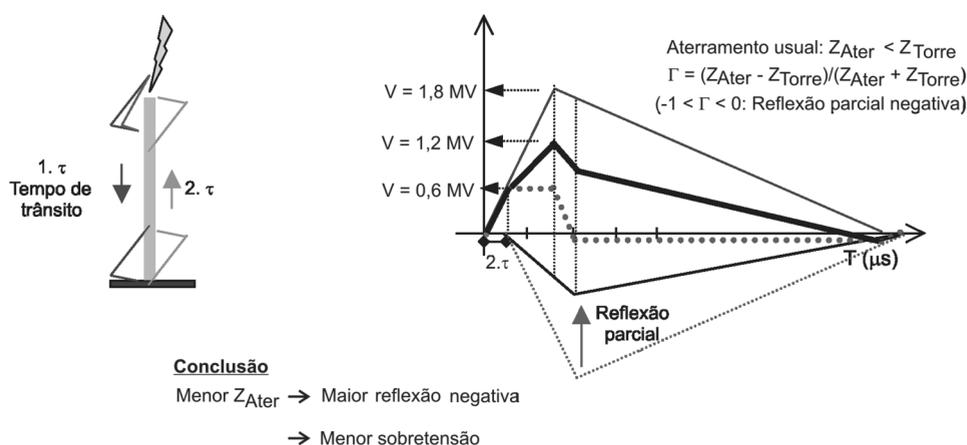


Figura 7.19 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $0 < Z_{Ater} < Z_{Torre}$)

PRINCÍPIOS DE SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

1 - Considerações preliminares

No capítulo anterior foram apresentados alguns dos mais importantes efeitos das descargas atmosféricas, na perspectiva do interesse prático das aplicações em engenharia. Para proteção contra tais efeitos, existem sistemas específicos e dispositivos, capazes de assegurar determinados níveis de imunidade. Neste capítulo são considerados os aspectos conceituais mais relevantes dos sistemas de proteção de estruturas contra a incidência de descargas atmosféricas (SPDA).

2 - Conceito fundamental de sistemas de proteção de estruturas

A incidência direta de descargas sobre estruturas (edificações e instalações físicas, como subestações de energia e indústrias, dentre outras) pode promover danos e outras conseqüências, em decorrência da potência dissipada pelo fluxo da corrente em partes da estrutura. A Figura 7.2 ilustra este aspecto e mostra a destruição gerada na quina de uma edificação de alvenaria devido a este tipo de evento. Muitas vezes, em edificações de madeira, a incidência resulta em incêndio. Em alguns casos, a incidência direta numa

estrutura pode promover o fluxo de correntes destrutivas por partes condutoras eventualmente existentes no local, inclusive nas instalações elétricas e eletrônicas.

Um SPDA tem por objetivo básico evitar a incidência direta de raios na estrutura protegida, através da constituição de pontos preferenciais de incidência para as descargas que eventualmente atingiriam a estrutura na ausência do sistema. Para realizar tal objetivo, além de captar a eventual descarga, o SPDA deve ser capaz de direcionar o fluxo da corrente associada diretamente para o solo, segundo percursos definidos, constituídos pelos condutores do sistema de proteção.

O princípio básico do sistema de proteção consiste na definição de pontos (corpos) de destaque na estrutura, que possuem muito maior probabilidade de iniciarem a constituição de canais ascendentes quando um canal precursor de descarga se aproxima da estrutura. Tais corpos, conectados diretamente ao solo por condutores metálicos, devem também constituir caminhos de menor impedância para a corrente de descarga no percurso desta em direção ao solo, evitando o fluxo da corrente pelas partes da estrutura.

Para cumprir seu objetivo, um SPDA é composto por elementos, com funções distintas. Os *captors* são elementos metálicos que constituem pontos preferenciais de incidência. Os *condutores de distribuição de corrente* direcionam o fluxo da corrente de uma eventual descarga incidente para o aterramento. O *aterramento elétrico* é constituído por eletrodos metálicos enterrados no solo para a dispersão da corrente de eventual descarga para esse meio.

A configuração física destes elementos depende da filosofia e tipo de sistema de proteção. Os detalhes relativos aos procedimentos para o projeto de um sistema de proteção de estruturas contra descargas podem ser encontrados na norma 5419 da ABNT^[277], incluindo aspectos construtivos e de especificação.

Neste texto são considerados os conceitos e aspectos fundamentais relativos a tais sistemas, muitos dos quais determinam o formato dessa norma.

Este capítulo não considera as questões relativas à proteção interna, que incluem as práticas de equipotencialização e de aplicação de protetores de surto nas instalações elétricas e eletrônicas internas à estrutura.

3 - Modelos de incidência

As filosofias de proteção de estruturas foram elaboradas a partir dos modelos de incidência. Estes constituem descrições simplificadas e objetivas do processo final de conexão dos canais ascendente e descendente, que configura o canal de descarga. De forma mais elaborada ou simplificada, tais modelos permitem definir o local de maior probabilidade de incidência das descargas descendentes, decorrentes de canais que se aproximam do solo ou de descargas ascendentes que se originam de estruturas terrestres.

Dentre tais modelos destaca-se o chamado *Modelo Eletrogeométrico – EGM (Electric Geometric Model)*, considerado a seguir.

3.1 - Modelo eletrogeométrico (EGM)

O EGM fundamenta-se no conceito do *Raio de Atração* (R_a). Este se constitui na distância estimada entre um canal descendente e a estrutura terrestre, a partir da qual ocorrerá eventual fechamento do percurso pela conexão entre o canal descendente e o canal ascendente que se origina na estrutura terrestre. Admite-se que, caso tal distância seja alcançada, haja grande probabilidade de incidência na estrutura.

Através de experimentos laboratoriais com modelos em escala reduzida, de registros fotográficos e de filmagens da incidência de descargas reais em torres “instrumentadas”, foram desenvolvidas relações empíricas que relacionam o raio de atração com o valor de pico da corrente de descarga (I_p). A maior parte destas expressões tem a forma $R_a = A \cdot I_p^B$, sendo A e B constantes empíricas, e fornece resultados muito similares. A Tabela 8.1 indica algumas destas relações.

Tabela 8.1 - Expressões sugeridas na literatura para cálculo do raio de atração

Referência	Expressão R_a (m), I_p (kA)
Brown, Whitehead [62]	$R_a = 7,1 (I_p)^{0,75}$
Love [32], Anderson [3]	$R_a = 10 (I_p)^{0,65}$
Armstrong [53]	$R_a = 6,7 (I_p)^{0,8}$
Norma 5419 ABNT [277]	$R_a = 2 \cdot I_p + 30 (1 - e^{-I_p})$

Na Tabela 8.2 são indicados os valores estimados do raio de atração para diferentes valores de pico da corrente de descarga, através da aplicação das expressões $R_a = 10 (I_p)^{0,66}$ e $R_a = 2 (I_p) + 30 (1 - e^{-I_p})$, esta última recomendada na norma NBR5419 para cálculo desse parâmetro.

Tabela 8.2 - Valores estimados do raio de atração em função da corrente de descarga

Valor de pico da corrente (kA)	$R_a = 2. (I_p) + 30. (1 - e^{-I_p})$ (m)	$R_a = 10 (I_p)^{0,66}$ (m)
5	40	29
10	50	46
15	60	60
20	70	72
30	90	94
50	130	132
100	230	209

A adoção do conceito do raio de atração torna possível a nítida definição de regiões de incidência. É fácil ilustrar tal aspecto para o caso específico de linhas de transmissão, como mostra a Figura 8.1. Ali, considera-se a linha constituída por três condutores energizados (cabos das fases) e um condutor de blindagem (ou cabo pára-raios: G). A figura apresenta a análise da proteção da linha especificamente para a incidência de uma corrente de descarga de valor de pico 10 kA, ao qual está associado um raio de atração de 46 m, conforme a Tabela 8.2. Na figura estão traçadas circunferências de raio igual ao raio de atração (R_a), centradas sobre o eixo de cada um dos condutores da linha. Está também traçada uma linha horizontal, cuja distância ao solo é igual ao raio de atração. Tais circunferências e linha correspondem ao corte respectivamente de superfícies cilíndricas (em cujo eixo localizam-se os condutores) e do plano paralelo à superfície do solo, definidos ao longo da linha de transmissão.

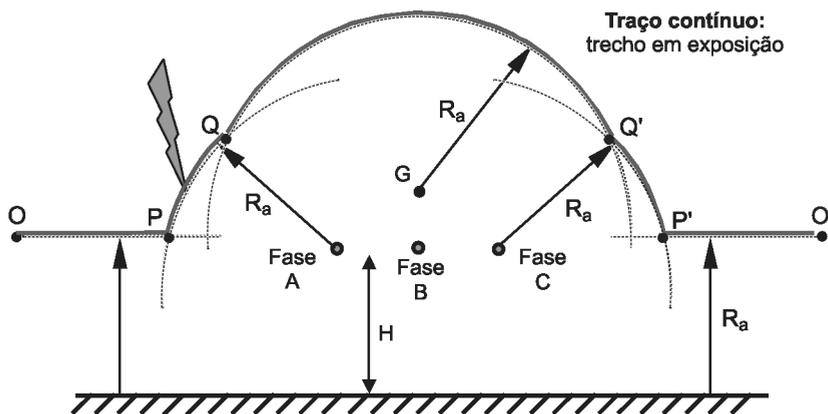


Figura 8.1 - Representação esquemática da aplicação do Modelo Eletrogeométrico para proteção de uma linha de transmissão: definição de regiões de proteção através do raio de atração

A curva contínua $OPQQ'P'O'$ foi traçada sobre os pontos mais externos das circunferências e da linha horizontal. Estes constituem os primeiros pontos de contato de qualquer eventual canal descendente de descarga que se aproxime da linha. Cada trecho desta curva está associado ao condutor da linha (ou ao solo) para o qual a extremidade do canal apresenta a menor distância (igual ao raio de atração). Nesse trecho, a distância aos demais condutores ou ao solo é superior ao raio de atração. Por conseguinte, caso um canal de descarga se aproxime da linha, chegando primeiro àquele trecho, tem-se a expectativa de sua conexão ao condutor associado, pois tal condutor apresenta a menor distância ao canal. É dele que deve partir o canal ascendente ao qual se conecta o canal descendente.

Como indica a figura, se um canal alcançar o trecho PQ , a descarga deve incidir no condutor da fase A. Desta forma, a chegada de um canal descendente a um dos trechos OP , PQ , QQ' , $Q'P'$, $P'O'$ (nesta ordem) define a incidência de descarga respectivamente no solo, na fase A, no condutor de blindagem, na fase C e no solo. Nota-se que a fase B está totalmente blindada para o raio de atração considerado (ou respectiva amplitude de corrente: 10 kA). Entretanto, as fases A e C estão expostas à incidência direta de descarga, a despeito da presença do cabo pára-raios.

A Figura 8.2, a seguir, denota como a amplitude de corrente afeta a blindagem dos condutores energizados da linha. À esquerda considera-se uma corrente de descarga inferior (5 kA), que corresponde ao raio de atração de 29 m. À direita considera-se a blindagem para uma corrente de descarga de 20 kA ($R_a = 72$ m).

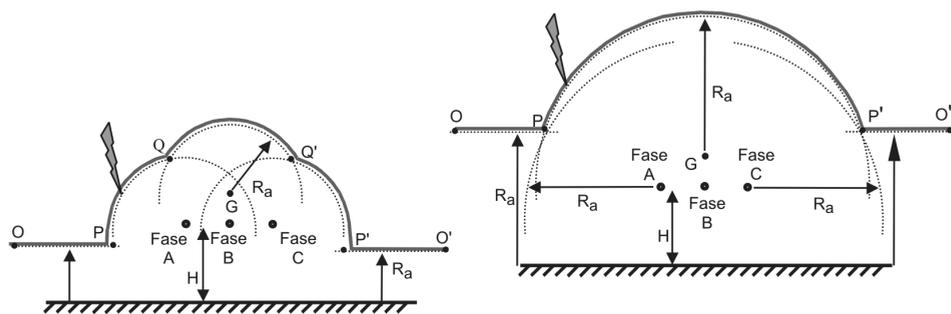


Figura 8.2 - Efeito da amplitude de corrente na blindagem da linha

Na condição de menor corrente (e, portanto, de menor raio de atração) há substancial aumento dos trechos PQ e P'Q', com o significativo crescimento da probabilidade de incidência nas fases A e C, em relação à condição considerada na Figura 8.1. A fase B permanece integralmente blindada, pois a distância do seu condutor à superfície externa da figura é bem superior ao raio de atração. Caso fossem consideradas descargas de menor amplitude de corrente e a distância entre os condutores energizados fosse superior, tal fase poderia ficar exposta à incidência direta de descargas. Nesse caso, poderiam ser necessários dois cabos pára-raios para assegurar a blindagem do condutor central.

Por outro lado, a figura à direita mostra que para uma corrente superior a 20 kA, ocorre a blindagem integral de todas as fases. Os trechos PQ e P'Q' foram integralmente suprimidos com o crescimento do raio de atração e, no caso de aproximação de um canal descendente, a descarga deve se conectar diretamente ao cabo pára-raios ou ao solo.

O objetivo da Figura 8.2 é ressaltar que o traçado que determina o condutor de incidência é definido para cada valor de corrente de descarga. No caso da maior amplitude, os condutores energizados ficam totalmente blindados, não havendo expectativa de incidência de descarga nos mesmos. Por outro lado, à medida que a amplitude da corrente é reduzida, tal blindagem vai sendo diminuída. Este aspecto justifica a afirmativa de que *a probabilidade de falha de blindagem de um sistema de proteção é tanto maior quanto menor for a amplitude da corrente da descarga.*

Na prática, ao projetar-se a proteção de uma linha de transmissão, é definida a amplitude mínima de corrente para a qual se admite a incidência direta nas fases. Assume-se que o sistema seja capaz de suportar as sobreten-

sões geradas por descargas com a amplitude de corrente inferior a esse limiar (usualmente entre 3 e 5 kA para linhas de alta tensão). Definido este valor de corrente, verifica-se o correspondente raio de atração e promove-se o posicionamento adequado do(s) cabo(s) pára-raios, deslocando-o(s) e posicionando-o(s) para que não haja falha de blindagem para correntes superiores a esse limiar. Na maior parte das linhas, cujos condutores energizados são dispostos em configuração horizontal (em relação ao solo) são necessários dois cabos pára-raios para assegurar blindagem contra essas menores correntes de descarga. A solução deste problema é relativamente simples, pois este pode ser formulado analiticamente^[13].

A ilustração do conceito do Modelo Eletrogeométrico de incidência através de sua aplicação à proteção de linhas de transmissão decorre simplesmente da maior facilidade de explicá-lo nesta aplicação. Em função da simetria axial da geometria da linha, o problema se resume ao plano bidimensional e pode ser processado sobre a figura determinada pelo corte da linha em qualquer plano transversal ao seu percurso. Numa situação mais genérica, como no caso de edificações, onde tal simetria não existe, os mesmos princípios devem ser usados, mas segundo uma abordagem tridimensional.

Como evidenciado, o fundamento do Modelo Eletrogeométrico se assenta no conceito de Raio de Atração. Neste contexto parece prudente tecer algumas considerações objetivas com relação a esse parâmetro.

Na realidade, não parece natural a existência de uma relação direta entre o raio de atração e o valor de pico de uma corrente de descarga. Em princípio, a definição de uma distância a partir da qual ocorreria uma descarga entre o canal descendente e uma estrutura aterrada estaria associada, sobretudo, à diferença de potencial entre a extremidade do canal descendente e o solo. É esta diferença de potencial que estabelece um valor médio de campo elétrico no percurso, capaz de sustentar a evolução do estágio final dos canais ascendente e descendente até a conexão destes. Nesse sentido, a carga acumulada no canal descendente (sobretudo em sua extremidade) é um parâmetro muito mais significativo para expressar a relação com o raio de atração. Por outro lado, verifica-se a existência de uma forte correlação entre a carga acumulada no canal e o valor de pico da corrente conseqüente da eventual conexão dos canais. E, por sua vez, na perspectiva de aplicação em engenharia de proteção, não se pode negar o interesse prático em se expressar uma relação desta natureza diretamente a partir da amplitude da

corrente de descarga. Tais aspectos justificam a formulação do raio de atração como função dessa corrente.

Neste mesmo contexto, deve ser ressaltada a natureza muito simplificada da formulação do raio de atração, que ignora as etapas do processo de conexão entre canais, cuja consideração deveria contemplar dois outros conceitos intermediários envolvidos no processo: a *distância de indução do canal ascendente* e a *distância de salto final*. A Figura 8.3 ilustra os conceitos relativos a tais distâncias.

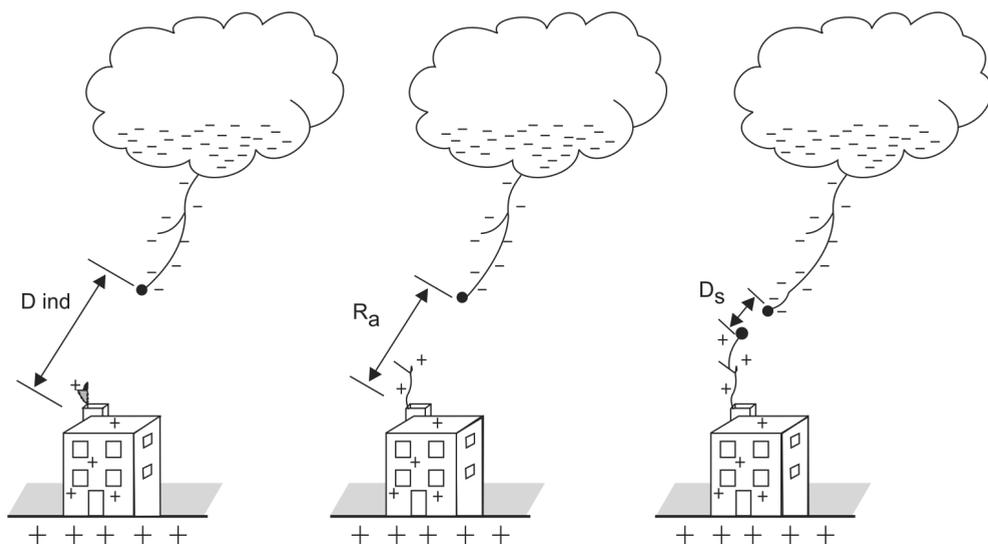


Figura 8.3 - Distâncias referidas no processo de conexão dos canais

Na figura, o desenho à esquerda mostra o instante em que o canal descendente induz o surgimento de um canal ascendente no ponto da estrutura onde o campo elétrico induzido pelas cargas do canal é mais intenso. A distância correspondente entre a extremidade do canal descendente e tal ponto na estrutura é designada *distância de indução do canal ascendente* (D_{ind}).

Após esse estágio, naturalmente continua a ocorrer a evolução dos canais descendente e ascendente. O desenho na posição intermediária da figura ilustra a situação em que o canal descendente alcança uma distância do ponto da estrutura onde se originou o canal ascendente para a qual há uma condição de grande probabilidade de conexão dos canais (para a intensidade de carga acumulada no canal ou correspondente amplitude de corrente de descarga posterior). A distância correspondente é o designado *Raio de Atração* (R_a). Note-se que a indução de um canal ascendente não assegura a

conexão dos canais. Isto sugere que o valor do raio de atração é inferior à distância de indução do canal ascendente. A Figura 8.4 mostra a condição em que um canal descendente que se aproximava do solo induziu vários canais ascendentes em torres de telecomunicações próximas. Apenas um dos três canais induzidos logrou conectar-se ao canal descendente, dando origem à descarga. Os demais se dissiparam, após a o fluxo da corrente de retorno na torre atingida. Embora tenha sido alcançada a distância de indução do canal ascendente para as três torres, a descarga se materializou apenas para aquela torre cuja extremidade alcançou primeiro uma distância igual ao raio de atração em relação ao canal descendente.

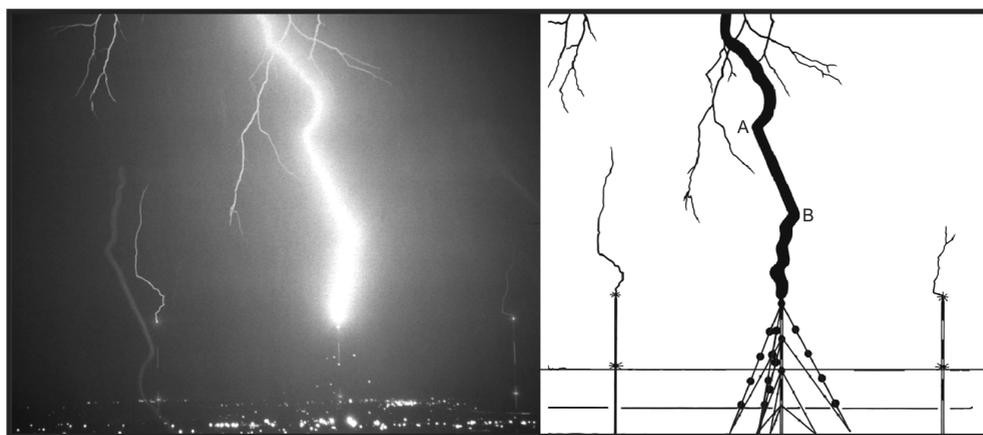


Figura 8.4 - Indução de canais ascendentes que não se conectam ao canal descendente: fotografia e esquema [cortesia de Phil Krider]

A *Distância de Salto Final* (D_s) corresponde à distância crítica entre canal descendente e o ascendente, a partir da qual ocorre o fechamento do percurso entre eles, através do salto de um arco elétrico (descarga elétrica) final. Naturalmente tal distância é bem inferior ao raio de atração.

É evidente que o valor dos três parâmetros (R_a , D_{ind} , D_s) depende da carga existente no canal descendente ou, equivalentemente, da corrente subsequente gerada pelo descarregamento desta carga, após a conexão dos canais.

Na literatura inglesa os termos “*Striking Distance*” e “*Attractive Radius*” são usados para designar o raio de atração. Em algumas obras particulares, o primeiro termo é também utilizado para se referir à distância de indução do canal ascendente, o que causa certa confusão.

Além da característica muito simplificada da formulação do raio de atração, vale também realçar a natureza de sua aplicação no Modelo Ele-

trogeométrico. Na realidade, os fenômenos analisados têm caráter aleatório, sendo prudente preservar a perspectiva probabilística dos resultados gerados pelo método. Por outro lado, é justamente neste aspecto que reside o grande atrativo da aplicação desta metodologia em engenharia de proteção e a sua consistência. O conceito de raio de atração resume etapas intermediárias do processo, indicando diretamente a distância entre o canal descendente e a estrutura terrestre, nos casos de eventual conexão dos canais e conseqüente descarga. A caracterização destas etapas na perspectiva de aplicação é inviável com o nível de conhecimento atual.

Na busca do aprimoramento da metodologia, foram desenvolvidas expressões que tentam computar outros efeitos que exercem influência na definição do raio de atração, incluindo as características da estrutura a ser atingida, como sua altura (H). Neste contexto, foram propostas algumas expressões simplificadas que incluem a altura da estrutura em relação ao solo. A Tabela 8.3 indica uma expressão deste tipo proposta por Eriksson, desenvolvida para fins de aplicação na proteção de linhas de transmissão.

Tabela 8.3 - Expressão para o raio de atração incluindo o efeito da altura da estrutura

Referência	Expressão R_a (m), I_p (kA), H (m)
Erikson [29, 109, 108]	$R_a = H^{(0,66 + 2 \cdot I_p \cdot 10^{-4})} \cdot I_p^{0,64}$

Na Tabela 8.4, ilustra-se o efeito da altura da estrutura no raio de atração, considerando-se diferentes níveis de corrente, pela aplicação da expressão anterior. Os resultados são comparados com aqueles providos por outra fórmula tradicional, que ignora tal efeito.

Tabela 8.4 - Efeito da altura da estrutura no valor do raio de atração

Valor de pico da corrente (kA)	Ra (m) 10 (I _p) ^{0,66}	Altura H(m)	R _a (m) $R_a = H^{(0,66 + 2 \cdot I_p \cdot 10^{-4})} \cdot I_p^{0,64}$
5	29	10	13
		20	20
		40	32
		80	51
10	46	10	20
		20	32
		40	50
		80	79
20	72	10	31
		20	50
		40	79
		80	125
50	132	10	57
		20	91
		40	145
		80	230

No contexto de sua aplicação prática na proteção de estruturas contra a incidência direta de descargas, os procedimentos para implementação do chamado *Modelo Eletrogeométrico* são organizados em duas metodologias distintas, conforme o ponto de referência para emprego do raio de atração.

Na primeira metodologia, o raio é considerado na perspectiva dos prováveis pontos de incidência na estrutura. A partir de cada um desses pontos é determinada uma superfície, construída ao circular-se o raio de atração, no entorno do ponto. Quando esta superfície é alcançada por um canal descendente, fica definido o ponto de incidência. O emprego de tal metodologia foi ilustrado no caso da linha de transmissão (Figuras 8.1 e 8.2). Numa abordagem mais geral, para estruturas sem simetria axial, o princípio deve considerar a constituição de esferas fictícias a partir dos pontos prováveis de incidência, dispostas no espaço tridimensional.

A segunda metodologia, um pouco mais elaborada, é desenvolvida na perspectiva das possíveis posições alcançadas pela extremidade do canal

descendente em sua aproximação da estrutura, sendo designada *Método das Esferas Rolantes*.

A cada amplitude de corrente está associado um raio de atração específico que define uma esfera centrada em cada posição admitida para a extremidade do canal descendente. Tal esfera é deslocada (rolada) sobre a superfície da estrutura cuja proteção se projeta. Assim, o centro da esfera cobre todas as possíveis posições que a extremidade de um eventual canal descendente poderia ocupar ao se aproximar da estrutura. Os pontos tocados pela superfície da esfera, ao deslocá-la sobre a estrutura, indicam os locais prováveis de incidência. A Figura 8.5 ilustra a aplicação desta metodologia numa perspectiva bidimensional (segundo um dos planos verticais que cortam a estrutura).

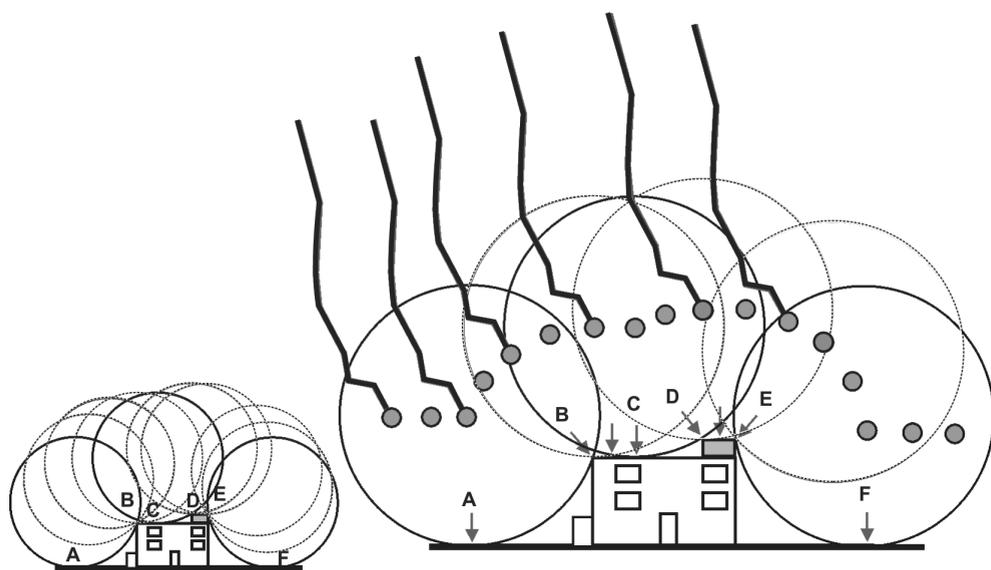


Figura 8.5 - Representação esquemática do Modelo Eletrogeométrico: aplicação do método das esferas rolantes

Na ilustração à esquerda é indicada a rolagem da esfera. O detalhe à direita mostra as posições consecutivas ocupadas pelo centro da esfera, enquanto esta é rolada sobre a estrutura, também indicando a posição ocupada pela extremidade do canal descendente que se aproxima da estrutura, quando tal extremidade atinge a distância de um raio de atração da edificação.

Para o raio de atração considerado, há vários pontos da estrutura expostos à incidência direta de descargas. Quando o centro da esfera ocupa posições correspondentes a abscissas externas ao segmento AF, a incidência

deve se dar diretamente no solo. No entanto, para posições entre A e F, ficam expostas a quina esquerda da edificação, uma parte da laje, as quinas da caixa d'água sobre a laje e, ainda, a parte superior desta caixa.

Para proteger a edificação, o projetista deve atuar posicionando, de forma otimizada, elementos condutores do sistema de proteção contra descargas, de forma a evitar que pontos da estrutura sejam tocados pelas esferas. Na Figura 8.6 está indicado que a estrutura pode ficar totalmente protegida através do posicionamento de uma haste metálica condutora sobre a caixa d'água e de uma outra haste sobre a mureta da cobertura da edificação, na lateral esquerda. Tais elementos provêm blindagem total da estrutura (no plano bidimensional), para o mesmo raio de atração da figura anterior.

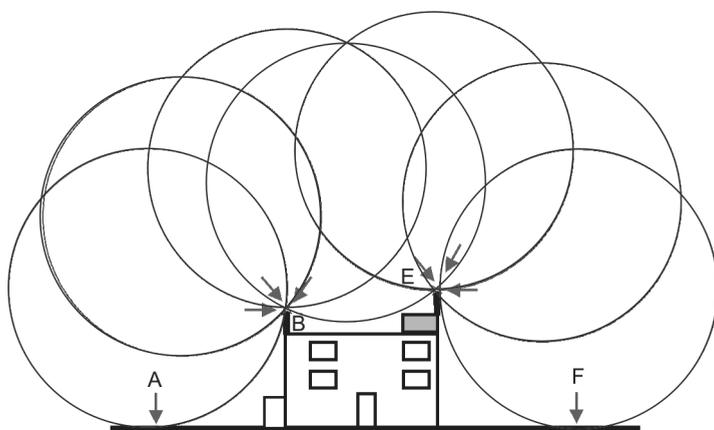


Figura 8.6 - Avaliação da proteção da edificação pela aplicação do método das esferas rolantes

Para se assegurar a proteção integral da estrutura, é necessário aplicar o deslocamento tri-dimensional da esfera. Se a cobertura da edificação tem um formato retangular, deve ser contemplada a proteção em todas as direções, incluindo aquela da diagonal (maior distância). Também precisa ser considerada a eventual presença de corpos sobre a cobertura, como antenas receptoras e outros.

Assim, o Método das Esferas Rolantes constitui simplesmente uma aplicação particular do Modelo Eletrogeométrico de incidência.

3.2 - O modelo de progressão do líder

O Modelo de Progressão do Líder (Leader Progression Model)^[92,93] foi desenvol-

vido como uma abordagem mais elaborada que buscava transpor as limitações associadas às simplificações do EGM e as dificuldades de se computar os efeitos do relevo e da altura das estruturas na definição da proteção. Seus idealizadores, os engenheiros italianos Dellera e Garbagnati, tinham especial interesse na utilização do método para subsidiar as práticas de proteção de linhas de transmissão contra a incidência direta de descargas atmosféricas.

A idéia fundamental desse modelo de incidência consiste na representação da evolução do canal descendente por passos consecutivos, correspondentes às descargas elétricas que materializam o canal de descarga.

Considera-se que para cada nova descarga elétrica ocorrer nesse processo, dois eventos devem se verificar: o campo elétrico na extremidade do canal e o campo elétrico médio num comprimento da ordem de dezenas de metros (que, eventualmente, corresponderia ao percurso de uma nova descarga elétrica) devem ultrapassar determinados limiares pré-estabelecidos.

Assim, a cada passo são avaliadas as condições de continuidade do processo de constituição do canal. Verifica-se a existência (ou não) de uma nova descarga elétrica consecutiva e sua direção. Se os limiares são excedidos, é traçado o percurso de um novo segmento de plasma na direção indicada, cujo comprimento é definido pelo valor do campo médio calculado.

Para realizar tal avaliação, a cada nova descarga elétrica, é simulada a distribuição de cargas resultantes no sistema constituído pela nuvem, o solo e o canal precursor, através do conhecido Método de Simulação de Cargas (MSC)^[207], com particular atenção para a carga concentrada na extremidade do canal. Os campos elétricos resultantes são calculados a partir da distribuição de cargas resultante. A cada passo, é verificado novamente se os limiares de campo elétrico são excedidos para que haja sustentação da evolução do processo. Cada novo passo corresponde a uma nova simulação.

Quando o canal descendente se aproxima do solo, passa também a ser observada a condição para evolução de um canal ascendente a partir do solo, localizando-se os pontos preferenciais de início destes canais. A partir daí, a evolução de ambos os canais é monitorada até a eventual conexão destes.

A aplicação deste método, muito mais elaborado que o EGM, permitiu que se alcançasse uma perspectiva bem mais apurada da proteção de estruturas por meio da realização sistemática de análises de sensibilidade em

relação aos parâmetros de influência (relevo, configuração da linha etc.). A Figura 8.7 mostra alguns aspectos desta aplicação e ilustra o efeito do relevo na incidência de descargas na linha de transmissão.

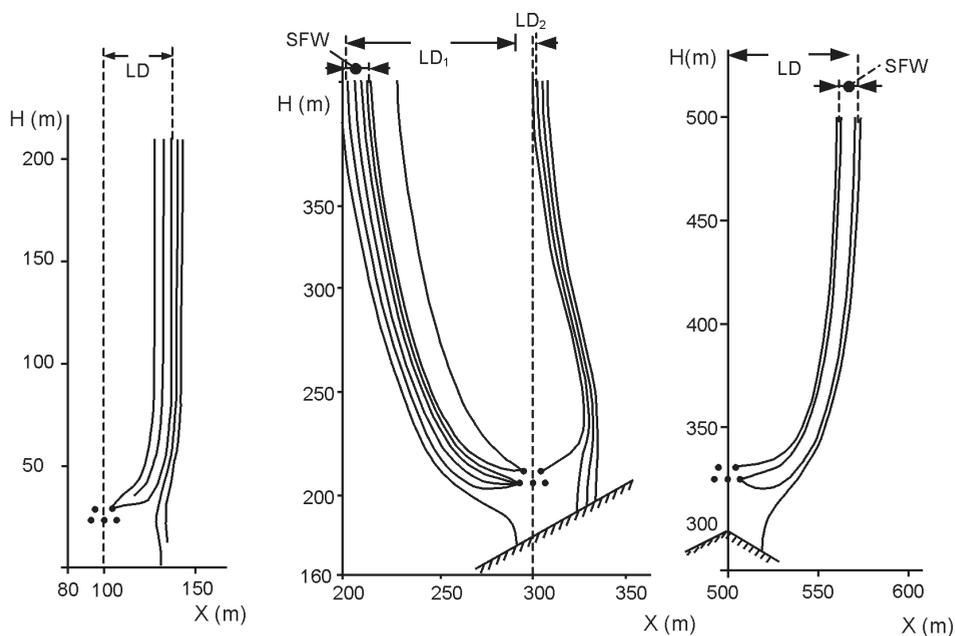


Figura 8.7 - Ilustração da aplicação do método de progressão do líder^[92,93]

Nessa figura, a ilustração à esquerda mostra que, numa região plana, a linha trifásica está totalmente protegida (blindada) por dois cabos pára-raios, para a condição simulada. Canais descendentes que, numa altura acima de 200 m, têm sua extremidade a uma distância do eixo da linha superior à distância lateral (LD) incidem diretamente no solo. Aqueles canais cuja extremidade está posicionada a distância inferior incidem diretamente no cabo de blindagem.

O posicionamento da mesma linha numa situação de relevo acidentado implica em uma condição muito diferente de incidência. Passa a existir uma faixa de falha de blindagem (SFW : *shielding failure width*), que corresponde à faixa das posições ocupadas pela extremidade de canais descendentes que, ao evoluírem, incidiriam nas fases. Isto é ilustrado tanto para o posicionamento da linha na encosta de uma colina, quanto ao longo da crista da colina. Em ambos os casos, considerando o nível de corrente de descarga assumido na simulação, seriam necessários o deslocamento e o posicionamento otimizado dos cabos pára-raios para prevenir a existência de falha de blindagem.