

CADERNO TÉCNICO

PROJETO DE SISTEMAS
DE PROTEÇÃO CONTRA
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
(NBR 5419/2015)



AEASC

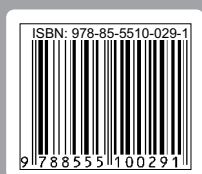
R696p

Rodrigues, José Francisco.

Projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (NBR 5419/2015) / José Francisco Rodrigues, Douglas Barreto. -- São Carlos : EIRELI, 2018. 60 p.

Caderno Técnico -- Associação dos Engenheiros, Arquitetos e Agrônomos de São Carlos.

1. Projetos de engenharia. 2. Descargas elétricas. 3. Sistemas de energia elétrica - Proteção. I. Título.



CDD - 620.0042 (20a)
CDU - 621.315.17

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária da UFSCar

Título: **Projeto de sistemas de proteção
contra descargas atmosféricas**

Número ISBN: 978-85-5510-029-1

Autores:

Prof. Dr. José Francisco Rodrigues
Prof. Dr. Douglas Barreto

Projeto gráfico

Inka Estúdios/São Carlos-SP
(16) 3201-5551

PROF. DR. JOSÉ FRANCISCO RODRIGUES

Possui graduação em Engenharia Elétrica obtida na Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo (1978), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1985), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1993) e Livre-Docência na área de Transmissão de Energia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Bauru/UNESP em 1997.

Atualmente é professor adjunto aposentado da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho no campus de Bauru, professor no Centro Universitário UNICEP - São Carlos/SP e avaliador do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais - I NEP/MEC desde 2000. Tem atuado na engenharia elétrica, com ênfase em geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, como também nos seguintes temas: aterramento elétrico, eficiência energética, tensões induzidas, fontes alternativas de energia elétrica e ensino em engenharia. Realiza projetos e assessorias de instalações elétricas em todas as áreas de atividades; residencial, predial, comercial, industrial e rural.

PROF. DR. DOUGLAS BARRETO

Graduado em Engenharia Civil (UAM 2004) e Tecnologia Construção Civil pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1983), Mestrado em Building Services Engineering - Heriot-Watt University (1990), Doutorado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo (1998); e Pós-Doutorado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC - Lisboa - Portugal em 2010. É Professor Adjunto IV do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, na ênfase Sistemas Construtivos. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Construção Civil, atuando principalmente nos seguintes temas: Sistemas Prediais Hidráulicos Sanitários e de Eletricidade, Sustentabilidade do Ambiente Construído com foco no uso racional da água e energia nas edificações.

Sumário

1 APRESENTAÇÃO	8
2 INTRODUÇÃO	9
3 A NORMA BRASILEIRA SOBRE SPDA	10
3.1 ABRANGÊNCIA DA NORMA	11
3.2 O CONTEÚDO DA NORMA E SUAS PARTES	12
3.2.1 Parte 1 - Princípios gerais	12
3.2.2 Parte 2 - Gerenciamento de risco	12
3.2.3 Parte 3 - Danos físicos a estruturas e perigos à vida	13
3.2.4 Parte 4 - Sistemas elétricos e eletrônicos internos nas estruturas	13
4 FUNDAMENTOS SOBRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	14
4.1 FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS	14
4.2 A ORIGEM DOS RAIOS	17
4.3 DANOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	19
4.4 FORMA DE ONDA DO RAIO E ÍNDICE CERÁUNICO	20
5 REQUISITOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO	22
5.1 EFEITOS NAS ESTRUTURAS DEVIDO ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	22
5.1.1 Fontes, Tipos de Danos e Perdas	22
5.2 RISCO E COMPONENTES DE RISCO	23
5.2.1 Definições das Componentes de Risco	24
5.2.2 Equação básica dos componentes de risco	25
5.2.3 Determinação da área de exposição equivalente A	26

1. APRESENTAÇÃO

A norma NBR 5419 - Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas - SPDA (ABNT 2015), após vários anos em revisão entrou em vigor em 2015 e incorporou várias questões novas, que a tornaram mais abrangente no quesito de proteção, abrangendo o conceito de análise de risco do Sistema a ser adotado, entre outros aspectos relativos à segurança à vida e ao patrimônio.

A versão anterior da norma NBR 5419, de 2005, continha 42 páginas e tinha como base a IEC61024:1998. Já a versão de 2015 contém 366 páginas distribuídas em quatro partes, e tem como base a IEC62305:2010, consistindo numa ampliação significativa.

Sem dúvida muito conteúdo para ser entendido, assimilado e utilizado. Este Caderno Técnico tem como base a estrutura das partes constituintes da norma revisada, relacionando-se os principais parâmetros e quesitos possibilitando a assimilação desses conceitos apresentados na nova versão da Norma.

Assim, este Caderno tem com o objetivo apresentar de maneira sintética os conteúdos abordados pela Norma e suas partes, além dos fundamentos e aspectos conceituais, dimensionais e projetuais de modo que se possa atualizar o conhecimento sobre os SPDAs segundo a Norma ABNT NBR 5419/2015.

O conteúdo foi elaborado pelo Prof. Dr. José Francisco Rodrigues, engenheiro eletricista, com muitos anos de experiência na área de sistemas de proteção e contou também com a colaboração do Prof. Dr. Douglas Barreto, engenheiro civil, especialista em sistemas prediais. E, além da experiência acumulada, se dedicaram a estudar detalhadamente a nova versão da Norma para produzir este Caderno Técnico.

Os autores destacam que não foi objetivo esgotar todos os assuntos abordados na Norma e suas Partes, mesmo por que são muitos e extensos, não sendo possível uma síntese. Outrossim, foi elaborado um texto com o intuito de tratar o projeto de SPDA de acordo com a nova versão da Norma, sendo que há momentos que o assunto está na Parte 1, ora na Parte 2, e sempre que necessários transita-se pelas quatro partes da Norma, mantendo-se a continuidade na aplicação dos conceitos e prescrições normativas para o projeto de SPDA.

A AEASC, com apoio do CREA-SP, edita esse Caderno Técnico, que se destina a todos os profissionais das engenharias civil e elétrica que buscam novos conhecimentos e especialização de modo a atualizar e capacitar numa área específica e tão importante que é a proteção à vida humana e ao patrimônio.

2. INTRODUÇÃO

O homem, receoso dos dias de tempestades com trovoadas, procurou ao longo de sua existência, proteção contra as descargas atmosféricas.

Como não se pode evitar que o raio caia sobre a estrutura, deve-se empregar técnicas de proteção que disciplinem o escoamento do raio para a terra, minimizando, ou mesmo evitando, seus efeitos danosos à estrutura, pessoas, equipamentos, etc.

A filosofia dos diversos métodos de proteção existentes contra descarga atmosférica é produzir uma blindagem na estrutura protegida, de modo a evitar que o raio cause danos diretos.

Os efeitos indiretos não estão totalmente protegidos e cada caso deve ser examinado de modo a produzir a melhor proteção individual possível.

Por isso, sempre há a necessidade de se analisar a devida proteção às estruturas (casas, galpões, etc.) de modo que haja o menor risco possível de exposição e maior proteção, tanto da estrutura em si; como de seus usuários contra os efeitos de eventuais descargas atmosféricas que possam atingir a estrutura.

O conhecimento acumulado e a técnica experienciada juntam-se em uma série de requisitos e parâmetros em normas técnicas a fim de estabelecer um documento orientativo das condições necessárias para se garantir as condições de segurança necessária aos usuários de edificações (estruturas) e ao patrimônio.

Outrossim, o entendimento dos conteúdos das normas técnicas é exigido dos profissionais e como há uma constante evolução do conhecimento e conseqüente reflexo nos requisitos, sempre há a necessidade de rever, compreender e mesmo aprender como as novas condições refletem no processo de projeto dos SPDA.

Conjugando-se a necessidade de proteção à vida humana e animal e, aos conceitos e técnicas normalizadas o profissional realiza o projeto adequado, cumprindo a função primordial, que é a garantir a segurança com o mínimo de risco.

3. A NORMA BRASILEIRA SOBRE SPDA

O assunto sobre proteção contra descargas atmosféricas, SPDA, é abordado em nível internacional em vários encontros e conferências que reúnem especialistas de diversos países no esforço de melhorar e atualizar normas existentes identificando novas tecnologias e procedimentos que permitam o avanço e garantia na proteção das estruturas e vida.

Pode-se citar algumas normas internacionais como a norma inglesa a BS 6651 de 1999 denominada de “Code of Practice for Protection of Structures Against Lightning”. A Suíça ASE 4022 de 1987 - “Installations de Protection Contre la Foudre”. A norma norte-americana NFPA78 de 1986 - “Lightning Protection Code”.

A norma internacional é a IEC 62305-2:2010 - “Lightning Protection”, que serviu de referência para a atualização da norma no Brasil, que é a ABNT NBR-5419/2015, “Proteção contra descargas atmosféricas”, que é composta por quatro partes, respectivamente:

Parte 1: Princípios gerais; **Parte 2:** Gerenciamento de risco; **Parte 3:** Danos físicos a estruturas e perigos de vida e **Parte 4:** Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.

Segundo Modena, J. (2010), para se chegar à versão 2015, a norma brasileira teve muitas versões anteriores sendo possível estabelecer uma linha do tempo da norma, conforme apresentado no Quadro 1, a seguir, juntamente com os documentos que serviram de base:

Quadro 1 - Linha do tempo da Norma. Fonte: Modena, J (2010)

Ano	Norma	Texto base	Qtd. Páginas
1950	NB165	Belgas	6
1970	NB165	Americanos	7
1977	NBR5419	NB165:1970 e IEC	16
1993	NBR5419	IEC1024:1990	27
2001	NBR5419	IEC61024:1998	33
2005	NBR5419	IEC61024:1998	42
2015	NBR5419	IEC62305:2010 - Partes 1 a 4	366

Sem dúvida a evolução da Norma Brasileira retrata a evolução da técnica e conhecimento ao longo desses 65 anos, onde vários textos base foram utilizados como referência.

Neste período as cidades expandiram consequentemente a área exposta às descargas atmosféricas também, não se esquecendo de que a área rural apresenta

um perfil totalmente diferente, em decorrência das muitas atividades, devido ao agronegócio, que passaram a exigir mais cuidado em relação à segurança do patrimônio físico e dos rebanhos.

3.1 ABRANGÊNCIA DA NORMA

A adoção das medidas de proteções preconizadas na ABNT NBR-5419/2015 resultam eficazes na redução dos riscos associados às descargas atmosféricas, para tanto é necessário compreender as relações entre as partes da NBR-5419/2015 que, conforme ilustrado na figura 1, a seguir, são as seguintes:

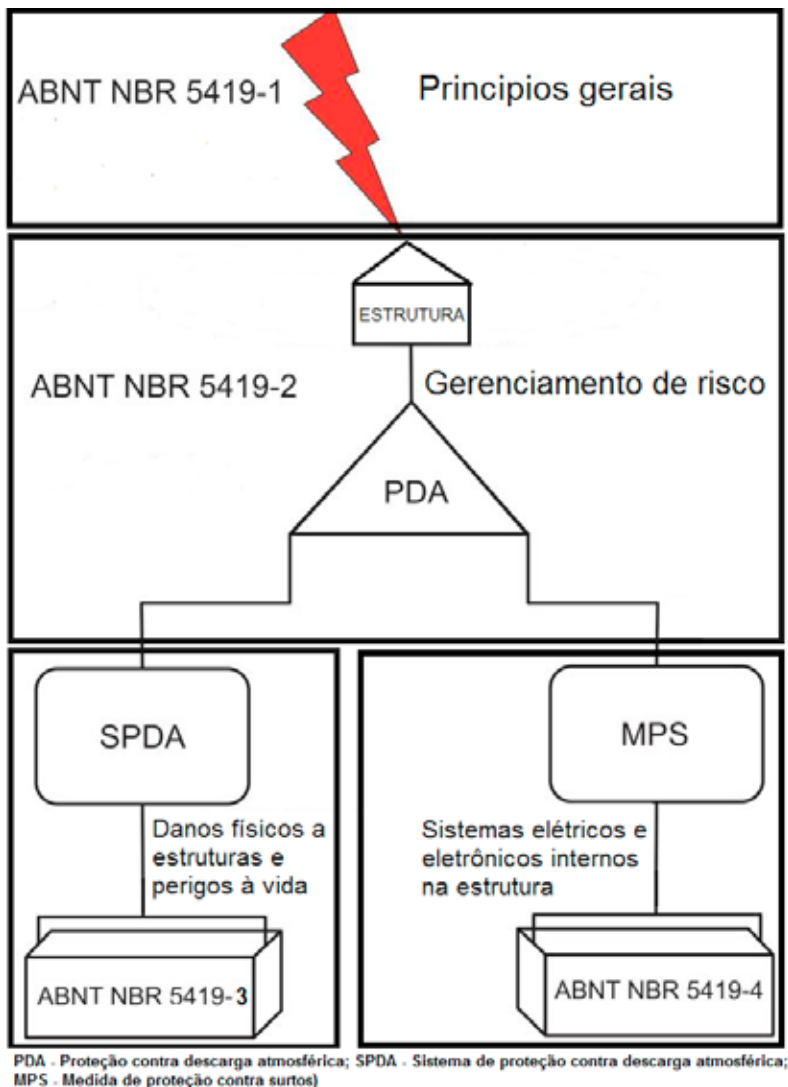


Figura 1 - Relações das partes da NBR-5419. Fonte: adaptado de ABNT - NBR 5419: 2015

3.2 O CONTEÚDO DA NORMA E SUAS PARTES

A norma, em sua versão de 2015, como já apresentado, desdobra-se em quatro partes distintas e interconectadas, de modo a subsidiar os profissionais na escolha e projeto do modo mais adequado de proteção contra as descargas atmosféricas. A seguir discorre-se sucintamente sobre o conteúdo de cada uma das partes da norma.

3.2.1 Parte 1 - princípios gerais

esta parte da Norma estabelece os requisitos necessários para a definição da proteção contra descargas atmosféricas, oferecendo os subsídios para o projeto a ser desenvolvido.

No escopo da Norma está explícito de que não contempla "sistemas ferroviários; veículos, aviões, navios e plataformas off-shore; tubulações subterrâneas de alta pressão; tubulações e linhas de energia e de sinal colocados fora da estrutura".

A Parte 1 da Norma contempla oito capítulos, nos quais se podem conhecer os aspectos gerais que norteiam o assunto sobre as descargas atmosféricas, os danos causados; a necessidade da proteção e os critérios e medidas a serem adotados. Os capítulos abrangem: escopo; referências normativas; termos e definições; parâmetros da corrente da descarga atmosférica; danos devidos às descargas atmosféricas; necessidade e vantagem econômica da proteção contra descargas; medidas de proteção; critérios básicos para proteção de estruturas.

Além desses capítulos, a Norma tem cinco anexos, de caráter informativo, que detalham as especificidades de aplicação dos parâmetros exigidos e permitem um maior entendimento e aprofundamento dos assuntos relativos à proteção contra descargas. Nomeadamente os anexos intitulam-se: A - Parâmetros da corrente das descargas atmosféricas; B - Equação da corrente da descarga atmosférica em função do tempo para efeito de análise; C - Simulação da corrente da descarga atmosférica com a finalidade de ensaios; D - Parâmetros de ensaio para simular os feitos da descarga atmosférica sobre os componentes do SPDA; E - Surtos devidos às descargas atmosféricas em diferentes pontos da instalação.

3.2.2 Parte 2 - gerenciamento de risco

A Parte 2 da Norma estabelece os requisitos para a análise de risco em uma estrutura devido às descargas atmosféricas, oferecendo os subsídios para a escolha das medidas de proteção apropriadas considerando o risco igual ou abaixo do limite tolerável para a configuração avaliada.

Esta parte da Norma compõe-se de seis capítulos, contendo informações acerca dos componentes de riscos e sua análise para a definição do tipo e seleção das medidas de proteção em função das circunstâncias consideradas na estrutura e entorno. Os capítulos tratam respectivamente: escopo; referências normativas; termos, definições, símbolos e abreviaturas; interpretação dos termos; gerenciamento de risco; análise dos componentes do risco.

Contém também cinco anexos, informativos, que explicam as questões envolvidas na análise e gerenciamento de risco, sendo os seguintes anexos: A - Análise do número anual N de eventos perigosos; B - Avaliação da probabilidade P_x de danos; C - Análise da quantidade de perda L_x; D - Avaliação de custos das perdas; E - Estudo de caso.

3.2.3 Parte 3 - danos físicos a estruturas e perigos à vida

Nesta parte da Norma são abordados os requisitos dos SPDA com foco na proteção de seres vivos e contra lesões causadas pelas tensões de toque e passo que ocorrem na circunvizinhança do SPDA quando da descarga atmosférica.

O conteúdo da Parte 3 é aplicável para: projeto, instalação e manutenção de SPDA sem limite de altura. Bem como para o estabelecimento de medidas de proteção contra as lesões aos seres vivos, causadas pelas tensões de toque e passo oriundas das descargas em um SPDA.

Esta parte da Norma contém oito capítulos, com informações acerca dos componentes do SPDA, sistemas externos e internos, manutenção e proteção aos seres vivos. Os capítulos tratam respectivamente: escopo; referências normativas; termos, definições, sistema de proteção contra descargas atmosféricas - SPDA; sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas; sistema interno de proteção contra descarga atmosférica; manutenção, inspeção e documentação de um SPDA; Medidas de proteção contra acidentes com seres vivos devido às tensões de passo e de toque.

Nos seis anexos informativos contidos na Norma, estão as explicações e os detalhes das especificidades dos componentes do SPDA. Os anexos são: A - Posicionamento do subsistema de captação; B - Seção mínima da blindagem do cabo de entrada de modo a evitar centelhamento perigoso; C - Divisão da corrente da descarga atmosférica entre os condutores de descida; D - Informação adicional para SPDA no caso de estruturas com risco de explosão; E - vago; F - Ensaio de continuidade elétrica das armaduras.

3.2.4 Parte 4 - Sistemas elétricos e eletrônicos internos nas estruturas

Na Parte 4 da Norma destacam-se as medidas adicionais de proteção para os sistemas elétricos e eletrônicos, visto que são muito sensíveis e as descargas atmosféricas são eventos que liberam muita energia, liberando centelhas causadas por surtos conduzidos ou induzidos e pelos efeitos dos campos eletromagnéticos oriundo da corrente de descarga e que podem provocar danos em tais equipamentos.

Esta Parte da Norma é aplicável para: projeto, instalação, inspeção, manutenção, e ensaios de sistemas de proteção elétricos eletrônicos (MPS - Medidas de Proteção contra Surtos) com vistas à redução de danos permanentes internos à estrutura por conta da ocorrência de surtos (Impulsos eletromagnéticos).

Está ressaltado na Norma, que as medidas sugeridas “não cobrem a proteção total contra interferências eletromagnéticas”, porém as informações contidas nesta Parte da Norma, “podem reduzir de forma satisfatória os danos aos equipamentos”.

A Parte 4 da Norma é formada por nove capítulos, com informações sobre o projeto e instalação das medidas de proteção contra surto (MPS). Nesses capítulos estão tratados: escopo; referências normativas; termos, definições, projeto e instalação das medidas de proteção contra surtos; aterramento e equipotencialização; blindagem magnética e roteamento de linhas, coordenação de DPS; interfaces isolantes; gerenciamento de MPS.

Adicionalmente esta Parte da Norma contém quatro anexos informativos tratando de: A - Bases de avaliação do ambiente eletromagnético em uma ZPR (Zona de Proteção contra Raios); B - Implementação de MPS para uma estrutura existente; C - Seleção e instalação de um Sistema coordenado de DPS (Dispositivo de Proteção contra Surto); D - Fatores a considerar na seleção dos DPS.

4. FUNDAMENTOS SOBRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

4.1 FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS

O termo descarga atmosférica designa genericamente as descargas que ocorrem dentro das nuvens (as intra-nuvens) entre duas nuvens próximas (as inter-nuvens), entre nuvens e terra; e entre solo e nuvens, conforme ilustrado nas figuras 2, 3, 4 e 5.



(Photo credit: Bidgee)

Figura 2 - Descarga entre nuvens e terra. Fonte: <https://lightning.nsstc.nasa.gov/primer/primer2.html>. Acesso em 20 de dezembro, 2017



Image of intra-cloud lightning (Photo credit: Sebastien D'ARCO)

Figura 3 - Descarga intra-nuvens. Fonte: <https://lightning.nsstc.nasa.gov/primer/primer2.html>. Acesso em 20 de dezembro, 2017



Figura 4 - Descarga solo e nuvens.

Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cloud_to_ground_lightning.jpg#file. Acesso em 20 de dezembro, 2017. (By Rotareneg (Own work) [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons)



Figura 5 - Descarga entre - nuvens. Fonte: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/types/>

É interessante observar que os aparelhos ou dispositivos usados para proteção contra os efeitos das descargas atmosféricas são designados por para raios sugerindo que deveríamos usar o termo “raios” para as descargas entre nuvem e terra que são aquelas para as quais são construídos esses aparelhos e dispositivos.

A formação de cargas nas nuvens é um fenômeno que se constitui de um vasto campo de pesquisa. Há algumas representações e teorias para representar e explicar a formação das cargas e o modelo das nuvens.

Uma delas é a seguinte: A Terra é um grande condutor esférico eletrizado negativamente com carga avaliada em -580 kC (Coulomb), portanto tem excesso de cargas negativas. As correntes de ar ascendentes carregam grande quantidade de umidade. Esta umidade, encontrando nas regiões mais altas uma temperatura baixa, se condensa formando várias gotículas de água, que ficam suspensas no ar.

Estas gotículas aglomeram-se formando gotas maiores e, pela influência da gravidade, começam a cair. Ao caírem encontram outras gotículas, aumentando o seu tamanho. Assim, a gota já tendo um tamanho considerável e o solo da terra sendo negativo, é induzida na gota de água cargas positivas na parte inferior, e cargas negativas na parte superior, indicado na figura 6.



Figura 6 - Gota d'água caindo. Fonte: Kindermann, G. (2003)

A gota aumenta de tamanho até ficar com um diâmetro de aproximadamente 5mm, tornando-se instável e fragmentando-se em várias gotículas menores. No momento da fragmentação há formação de íons positivos na parte inferior e negativos na parte superior, visto na figura 7.

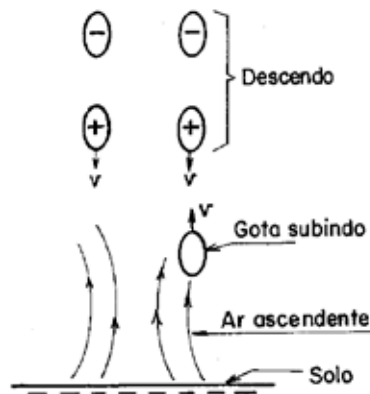


Figura 7 - Fragmentação da gota. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Os íons positivos encontram grande quantidade de gotículas d'água arrastadas pelo ar ascendente. A gota ascendente (neutra), durante o choque, entrega elétrons aos íons positivos descendentes. Desta maneira a gota ascendente se torna positiva e o íon fica neutralizado. Observar estágios I e II na figura 8.

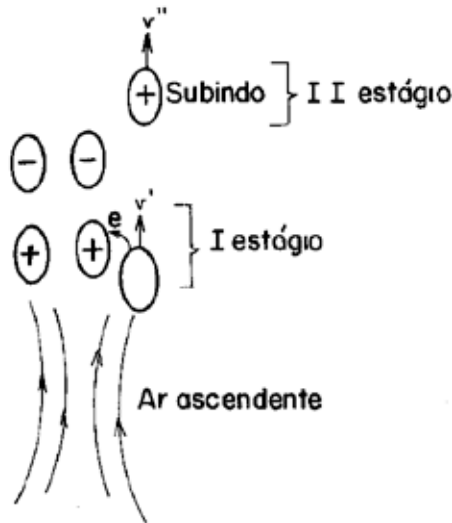


Figura 8 - A Gota subindo fica positiva. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Como estas gotas ascendentes (agora positivas) estão dotadas de grande energia cinética, conseguem subir até a parte superior da nuvem. Os íons negativos resultantes da fragmentação de uma grande gota descem até parar, subindo em seguida, também arrastados pelo ar ascendente. Como estes íons negativos tem menor energia cinética que as gotículas positivas, elas aglomeram-se na parte inferior da nuvem, ficando carregada negativamente na parte inferior e positivamente na superior, conforme indica a figura 9. Desta forma, a nuvem seria representada por um enorme bipolo com cargas positivas na parte superior e as negativas na inferior. Esse bipolo teria uma altura de 3 a 10 km e extensão de alguns km².

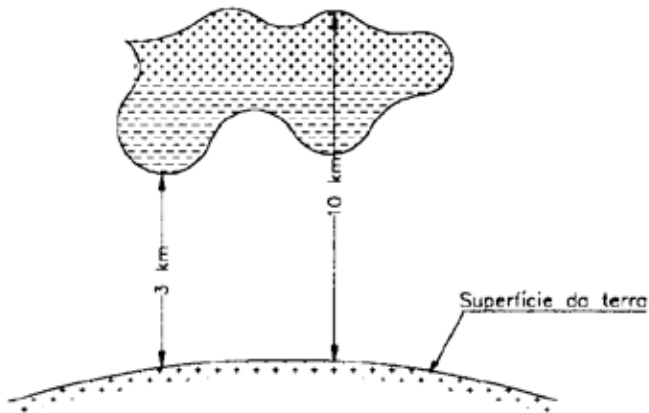


Figura 9 - Polaridades da nuvem e da superfície da terra. Fonte: Mamede Filho, J. (2017)

4.2 A ORIGEM DOS RAIOS

A nuvem carregada induz no solo cargas positivas que ocupam uma área correspondente ao tamanho da nuvem. Como a nuvem é arrastada pelo vento, a região de cargas positivas no solo acompanha o deslocamento da mesma, formando praticamente uma sombra de cargas positivas que segue a nuvem, indicado na figura 10.

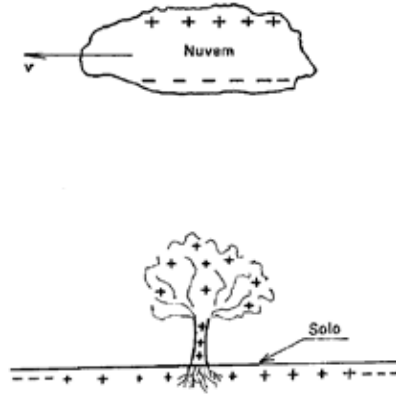


Figura 10 - Indução de cargas positivas no solo. Fonte: Kindermann, G. (2003)

No deslocamento, as cargas positivas induzidas vão escalando árvores, pessoas, pontes, edifícios, para-raios, morros, etc., ou seja, o solo sob a nuvem fica com carga positiva. Entre a nuvem e a terra formam-se diferenças de potenciais que variam de 10 a 1000 kV, sendo que a nuvem se encontra entre 300 a 5000 metros de altura. Note-se que para a descarga se efetuar não é necessário que o gradiente de tensão (campo elétrico) seja superior à rigidez dielétrica de toda a camada de ar entre nuvem e o solo, bastando, para isto, um campo elétrico bem menor. Isto é explicado pelo fato do ar entre a nuvem e a terra não ser homogêneo, pois contém grande quantidade de impurezas, umidade e ar ionizado, que estão em constante agitação. Com isto, o ar entre a nuvem e a terra fica muito “enfraquecido”, e um campo elétrico menor já é suficiente para que o raio consiga perfurar o ar e descarregar na terra, provocando a queda do raio.

A primeira carga a se movimentar, na maioria das vezes vinda da base de uma nuvem, é a Carga Líder ou Líder Escalonado. É chamada assim porque desce em etapas ou escalas, em intervalos de tempo quase uniformes. Algumas cargas seguem novos caminhos fora do canal principal, criando ramificações em muitos pontos, tentando se aproximar das cargas positivas do solo mostrado na figura 11.

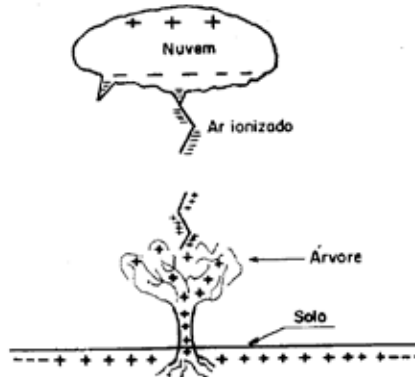


Figura 11 - Túneis Ionizados. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Note-se que os galhos das árvores formam pontas, que acumulam cargas elétricas, propiciando assim a ionização do ar. Quando os dois túneis estão perto, a rigidez dielétrica do ar é vencida, formando o raio piloto (líder), descarregando parte da carga da nuvem para o solo numa velocidade de 1500 km/seg. Depois de formado o raio piloto, existe entre a nuvem e a terra um túnel (canal) de ar ionizado, de baixa resistência elétrica, isto é, a nuvem está literalmente curto-circuitada a terra. Deste modo ocorre o raio principal, ou descarga de "retorno", que vai da terra para a nuvem através do túnel ionizado, com uma velocidade de 30.000 km/seg. No raio de retorno, as correntes são elevadíssimas, da ordem de 10 kA a 200 kA. Após estas duas descargas, pode existir uma terceira, de curta duração, com correntes de 100 a 1.000 ampères. Estas três descargas formam o chamado raio, que acontece em frações de microssegundos, dando a impressão da existência de apenas uma descarga. As descargas que, como as descritas acima, se originam da parte da nuvem com cargas negativas são chamados raios negativos, acreditando-se que 90% das descargas a terra são desse tipo. A figura 12 ilustra as etapas da ocorrência de uma descarga.

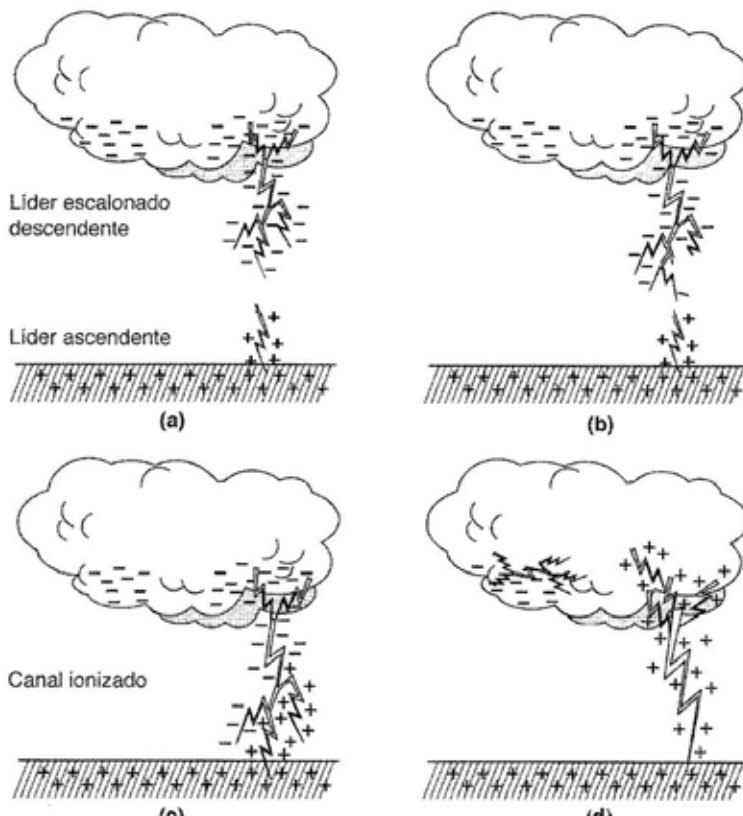


Figura 12 - Etapas de formação do raio. Fonte: Creder, H. (2016)

Existe além do já descrito, o raio de múltiplas descargas, isto é, nuvens grandes precisam de várias descargas para se descarregarem.

4.3 DANOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas atingem a superfície terrestre desde tempos remotos até hoje. Segundo Pinto, Jr (2011), “no Brasil, país com maior incidência de tempestades no mundo, dentre as cerca de 500 mil tempestades anuais, 1% corresponde a tempestades severas ou intensas, que se caracterizam por condições extremas de vento, raios e precipitações. Com o aquecimento global a ocorrência dessas tempestades tende a aumentar nas próximas décadas”.

Segundo FERREIRA, C.F., et al (2017), estima-se que cerca de 5% a 10% dos acidentes com raios sejam fatais, sendo a parada cardiorrespiratória a maior causa de mortalidade, o que torna o atendimento imediato de suma importância. As queimaduras são poucas e geralmente leves. Ainda segundo os autores, “Outras morbidades são hemorragias intracranianas, confusão, paralisia, dores, cegueira transitória, catarata, perfuração timpânica, além de traumas, como fraturas, deslocamentos e contusões, provocadas pela onda de impacto”.

As figuras 13 e 14 apresentam respectivamente danos causados por descargas atmosféricas em estruturas (internas e externas), e em animais e humanos.



I - Descarga em um quadro de eletricidade



II - Descarga na cobertura de uma casa

Figura 13 - Danos causados em estruturas devido às descargas atmosféricas. Fonte: Almeida Jr, H. F. (2016)



I - Queimaduras em animal



II - Queimaduras em humano

Figura 14 - Danos causados em animais e humanos devido às descargas atmosféricas. Fonte: Almeida Jr, H. F. (2016)

Os mesmos autores apontam que o “tratamento e as lesões são diferentes daquelas provocadas pelos acidentes por corrente elétrica comum, com recuperação lenta e presença de sequelas neuropsicológicas como memória debilitada, dificuldade de concentração, distúrbios de sono e alterações de personalidade, especialmente maior labilidade e agressividade”.

Como se pode observar nas figuras os danos provocados aparentemente são de pequena envergadura, mesmo porque a intenção é apresentar os danos nas estruturas e nas pessoas e animais. Evidentemente ocorrem danos de maiores proporções que ceifam patrimônio e vidas devido às descargas atmosféricas.

Como exemplo pode-se citar a notícia veiculada pelo jornal Folha de São Paulo (JFSP, 2018), por meio de seu colaborador Eduardo Schiavon, reportando o acidente ocorrido na cidade de Pedregulho - SP onde “ao menos 84 bois morreram” em decorrência de descarga atmosférica. O “prejuízo estimado é de pelo menos R\$ 300 mil”. Os animais teriam sido atingidos pelo menos por um raio ao se abrigarem da tempestade embaixo de árvores, quando presumivelmente ocorreu uma descarga. A figura 15, a seguir apresenta uma imagem do local.



Figura 15 - Animais desfalecidos sob árvore atingida por raio (FONTE: Jornal FSP, 2018)

4.4 FORMA DE ONDA DO RAIO E ÍNDICE CERÁUNICO

Uma grande preocupação é saber a forma do impulso (inrush) da corrente de descarga do raio, que escoia entre nuvem e terra ou entre nuvens.

Da literatura específica (por exemplo: NBR-5419/2015-Parte1) e após exaustivas análises de sucessão de fotografias e registros oscilográficos, pode-se modelar a forma geral da onda do impulso da descarga para ser utilizada em estudos analíticos. A duração do raio é de aproximadamente de 200 ms, sendo sua subida, isto é, sua frente de onda, muito rápida, na ordem de 1,2 ms, e o tempo de meia amplitude na cauda de 50 ms, conforme indica a figura 16.

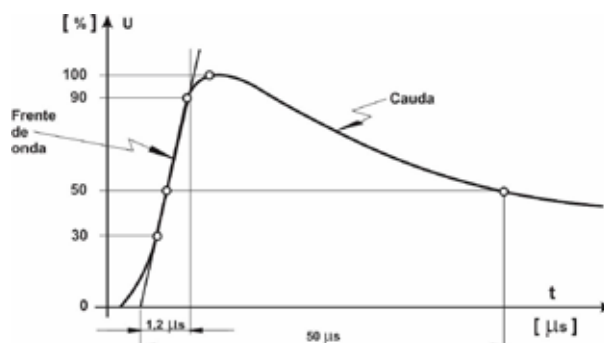


Figura 16 - Forma de onda do raio. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Em termos de efeito e danos, basta considerar o raio até o seu período de meia cauda. Isto porque, se o equipamento a ser protegido sobreviver ao raio até a meia cauda, o restante do período da cauda final será mais suave e mais tranquilo.

Deve-se observar que os seres humanos não estão acostumados a perceber fisicamente a dimensão do tempo do raio. Esta duração, que é da ordem de 200 ms, é ínfima, praticamente imperceptível em relação à noção de nossa dimensão de tempo.

Por exemplo, uma piscada de olho humano dura 100 ms, ou seja, o intervalo de uma piscada (1 piscada) comporta 500 raios (1 piscada = 100 ms/200 ms = 500 raios).

Portanto, o tempo de uma piscada, corresponde ao tempo de 500 raios padrões. Estatisticamente, ocorrem raios com tempos distintos, mas os raios com longa duração são raios atípicos.

O índice ceráunico (TD) é um parâmetro que indica o número de dias de tempestades (trovoadas) por ano em uma determinada localidade.

Este dado é mais realista quando se tem registro de muitos anos. O observador deverá registrar as tempestades dentro de sua localidade. A distância estimada da ação do observador é de um círculo com raio de 20 km.

Registrando todos os índices ceráunicos em um mapa, e ligando os pontos de igual intensidade, obtêm-se as linhas de mesmo índice, isto é, índices isoceráunicos ou mapa isoceráunico. O quadro 2, apresenta os índices ceráunicos de algumas cidades do Brasil.

Quadro 2 - Índices Ceráunicos de Algumas Cidades no Brasil (TD). Fonte: <https://www.inpe.br/>

Localidades	Média	Localidades	Média
Porto Real (RJ)	142	Jaú (SP)	106
Bauru (SP)	20	Santos (SP)	93
Florianópolis (SC)	54	São Paulo (SP)	38
São J. dos Campos (SP)	92	Rio de Janeiro (RJ)	24
São Carlos (SP)	71	Cuiabá (MT)	90

A densidade de descargas atmosféricas para a terra é quantidade de raios que caem em uma determinada região durante o período de um ano.

O índice utilizado é o NG, isto é Densidade por km² durante um ano. Por exemplo, o NG de uma determinada região é: NG = 12 raios/km²/ano

No Brasil, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), por meio do Grupo de Eletricidade Atmosférica, disponibiliza os dados de NG de duas formas: por meio de mapas impressos ou por consulta direta no site do INPE1.

Se o mapa não estiver disponível, a NBR-5419/2015 da ABNT também indica para esta relação à utilização da equação (1).

$$N_G = 0,1x(TD) \quad \text{Eq.(1)}$$

Por exemplo, para se obter a densidade de descargas atmosféricas que caem na cidade de São Carlos, no estado de SP:

$$N_G = 0,1 \times (71), \text{ logo}$$

$$N_G = 7,1 \text{ raios/km}^2/\text{ano}$$

5. REQUISITOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO

5.1 EFEITOS NAS ESTRUTURAS DEVIDO ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A descarga atmosférica que atinge uma estrutura pode causar danos à própria estrutura e a seus ocupantes e conteúdos, incluindo falhas nos sistemas internos. Os danos e falhas podem se estender também às estruturas vizinhas e podem ainda envolver o ambiente local. A extensão dos danos e falhas na vizinhança depende das características das estruturas e da descarga atmosférica.

Cada tipo de dano relevante para a estrutura a ser protegida, sozinho ou em combinações com outros pode, em consequência produzir diferentes perdas. O tipo de perda que pode ocorrer depende das características do objeto.

5.1.1 Fontes, tipos de danos e perdas

As fontes são distintas pela região ou local do ponto de impacto e estão descritas a seguir:

- **S1: descargas atmosféricas na estrutura;**
- **S2: descargas atmosféricas perto da estrutura;**
- **S3: descargas atmosféricas na linha;**
- **S4: descargas atmosféricas perto da linha.**

Para aplicações práticas é usual distinguir entre três tipos básicos de danos os quais aparecem como consequência das descargas atmosféricas, quais sejam:





- **D1: danos às pessoas devido a choque elétrico;**
- **D2: danos físicos;**
- **D3: falhas de sistemas eletroeletrônicos**

Os seguintes tipos de perdas devem ser levados em consideração:

- **L1: perda da vida humana (incluindo ferimentos permanentes);**
- **L2: perda de serviço ao público;**
- **L3: perda de patrimônio cultural;**
- **L4: perda de valores econômicos (estrutura, conteúdo, e perdas de atividades).**

O quadro3, a seguir, apresenta as fontes as relações entre fontes, danos e perdas, juntamente com as restrições aplicáveis.

Quadro 3 - Fontes de danos, tipos de danos e tipos de perdas para diferentes pontos de impacto da descarga atmosférica (Adaptado de ABNT NBR 5419:2015)

Ponto de Impacto	Fonte	Dano	Perda
Na estrutura 	S1	D1	L1. L4 ^(a)
		D2	L1, L2,L3, L4
		D3	L1 ^(b) , L2, L4
Nas proximidades de uma estrutura 	S2	D3	L1 ^(b) , L2, L4
Nas linhas elétricas ou tubulações conectadas à estrutura 	S3	D1	L1. L4 ^(a)
		D2	L1, L2,L3, L4
		D3	L1 ^(b) , L2, L4
Nas proximidades de linhas elétricas ou tubulações metálicas 	S4	D3	L1 ^(b) , L2, L4

(a) Somente para propriedades onde pode haver perdas animais

(b) Somente para estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas nas quais falhas em sistemas internos colocam a vida humana diretamente em perigo

5.2 RISCO E COMPONENTES DE RISCO

O risco, R, é um valor relativo a uma provável perda anual média. Para cada tipo de perda que pode aparecer na estrutura, o risco resultante deve ser avaliado.

Os riscos a serem avaliados em uma estrutura são os seguintes:

- **R1: risco de perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes);**
- **R2: risco de perda de serviço público;**
- **R3: risco de perda de patrimônio cultural;**
- **R4: risco de perda de valores econômicos.**

Onde cada risco R é composto pela soma de seus componentes, conforme a seguir indicado:

- $R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1}^{(1)} + R_{M1}^{(1)} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1}^{(1)} + R_{Z1}^{(1)}$
- $R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z1}$
- $R_3 = R_{B3} + R_{V3}$
- $R_4 = R_{A4}^{(2)} + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4}^{(2)} + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4}$

Observam-se algumas restrições nos riscos computados, quais são: (1) somente para estruturas com risco de explosão e para hospitais com equipamentos elétricos para salvar vidas ou outras estruturas quando a falha dos sistemas internos imediatamente possa pôr em perigo a vida humana; e (2) somente para propriedades onde animais possam ser perdidos.

As definições de cada um dos componentes de riscos estão no próximo item, e salienta-se que os cálculos dos riscos apresentados (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) são bastante trabalhosos se forem realizados com equipamentos manuais, como calculadoras.

Em vista disso, alguns softwares e planilhas foram desenvolvidos (com base na NBR-5419/2015), que fazem os cálculos, onde por meio de simulação mostram os resultados dos riscos e pela definição das medidas de proteção necessárias apontam o os resultados para que os que os riscos se enquadrem em valores toleráveis.

5.2.1 Definições das componentes de risco

Componente de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas na estrutura:

- R_A : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido a tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora nas zonas até 3m ao redor dos condutores de descidas. Perdas do tipo L1 e L4 (quando a estrutura contiver animais (gado), por exemplo).
- R_B : componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente. As perdas são L1, L2, L3 e L4.
- R_C : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP (Pulso eletromagnético devido às descargas atmosféricas). Componente de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto da estrutura:
- R_M : componente de risco relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP.

Componente de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura:

- R_U : componente relativo a ferimentos
- R_V : componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão)
- R_W : componente devido a falhas do sistema interno causados por sobretensões.
- Componente de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura:
 - R_Z : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta.

A figura 17 indica a relação entre risco, dano e perda e no Quadro 4 a composição dos riscos.

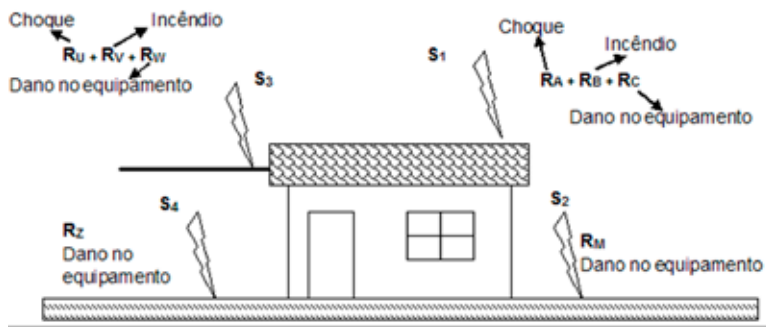


Figura 17 - Relação entre Risco, Dano e Perda. (Adaptado de ABNT NBR 5419:2015)

Quadro 4 - Composição de Riscos

Fonte de danos	Descarga atmosférica na estrutura			Descarga atmosférica perto da estrutura	Descarga atmosférica em uma linha conectada à estrutura			Descarga atmosférica perto de uma linha conectada à estrutura
	S1			S2	S3			S4
Componente de risco	RA	RB	RC	RM	RU	RV	RW	Rz
Risco para cada tipo de perda								
R1	•	•	• ^(a)	• ^(a)	•	•	• ^(a)	• ^(a)
R2		•		•		•	•	•
R3		•				•		
R4	• ^(b)	•	•	•	• ^(b)	•	•	•

(a) Somente para estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas nas quando as falhas em sistemas internos possam colocar em perigo a vida humana.

(b) Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos

5.2.2 Equação básica dos componentes de risco

Cada componente de risco R_A , R_B , R_C , R_M , R_U , R_V , R_W e R_z , como mencionado anteriormente, pode ser expressa pela seguinte equação geral:

$$RX = NX \cdot PX \cdot LX \quad \text{Eq. (2)}$$

onde:

NX é o número de eventos perigosos por ano;

PX é a probabilidade de dano à estrutura;

LX é a perda consequente.

O número de eventos perigosos por ano NX é calculado pela expressão (3) a seguir:

$$NX = N_G \cdot A \cdot 10^{-6} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde:

N_G é a densidade de descargas para o solo por km² por ano;

A é a área de exposição equivalente da estrutura.

A densidade de descargas para o solo por km² por ano (NG) é calculada pelos mapas impressos ou pelo link do INPE ou ainda conforme a equação (1).

A determinação da área de exposição equivalente da estrutura (A) está apresentada no item a seguir.

5.2.3 Determinação da área de exposição equivalente A

Para estruturas isoladas em solos planos, a área de exposição equivalente A é a área definida pela intersecção entre a superfície do solo com uma linha reta de inclinação 1 para 3 a qual passa pelas partes mais altas da estrutura (tocando-a nestes pontos) e rotacionando ao redor dela. A determinação do valor de A pode ser obtida graficamente ou matematicamente.

No caso de uma estrutura retangular, conforme indica a figura 18, a área de exposição equivalente é dada pela equação:

$$A = L \cdot W + 2 \cdot (3 \cdot H) \cdot (L + W) + \pi \cdot (3 \cdot H)^2 \quad \text{Eq.(4)}$$

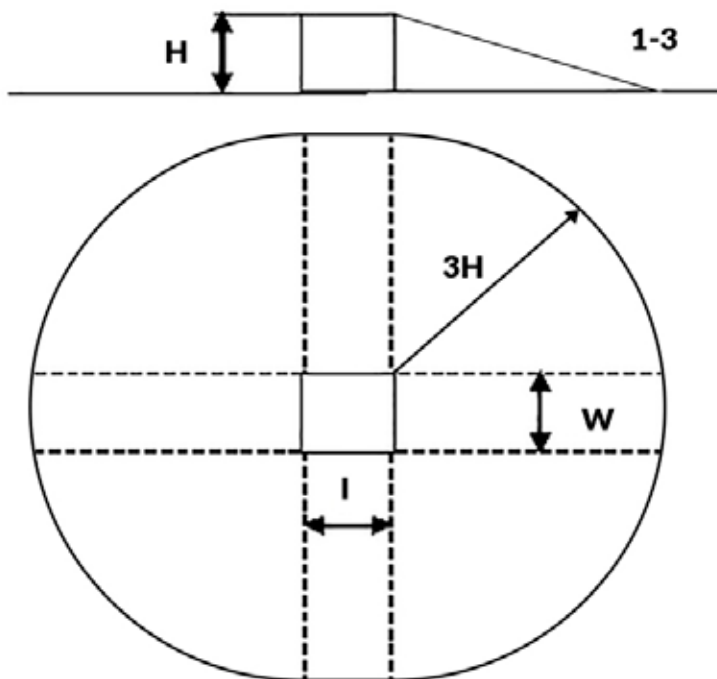


Figura 18 - Área de exposição equivalente A de uma estrutura isolada. Fonte: ABNT - NBR-5419:2015 - Parte 2 (pág. 32)

Se a estrutura tiver uma forma complexa, como saliências elevadas na cobertura conforme ilustrado na figura 19, pode ser adotado um método gráfico para avaliar A, conforme indicado na figura 20.

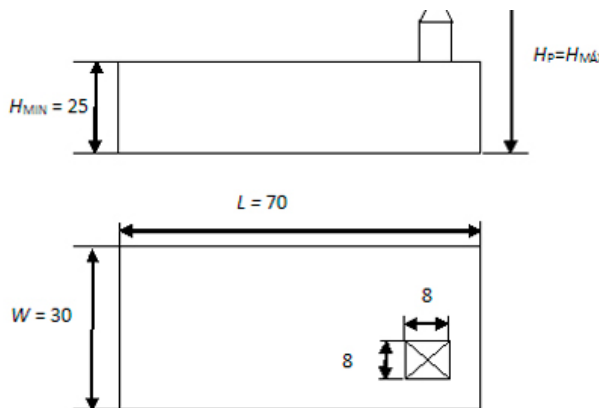


Figura 19 - Estrutura com forma complexa

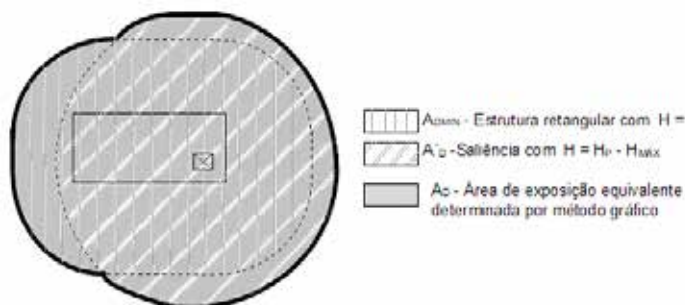


Figura 20 - Diferentes métodos para determinar a área de exposição equivalente para uma dada estrutura. Fonte: ABNT - NBR-5419:2015 - Parte 2 págs. 33 e 34

Um valor aproximado aceitável para a área de exposição equivalente é o maior valor entre a área de exposição equivalente A_{MIN} avaliada pela equação (4), tomando a altura mínima H_{MIN} da estrutura, e a área de exposição equivalente atribuída à saliência elevada na cobertura A'_D . Por meio da equação (5) pode-se calcular A' :

$$A' = p \cdot (3 \cdot HP)^2 \quad \text{Eq.(5)}$$

onde:

HP é a altura da saliência.

P_x (Probabilidade de dano à estrutura)

L_x (Perda Consequente)

Por sua vez P_x é calculado através do Anexo B da ABNT NBR-5419-2:2015 e L_x pelo Anexo C da ABNT NBR-5419-2:2015.

5.3 NECESSIDADE DA PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A necessidade de um objeto ser protegido contra descargas atmosféricas deve ser avaliada de modo a reduzir as perdas de valor social L_1 , L_2 e L_3 .

A proteção contra descargas atmosféricas é necessária se o risco R (R_1 a R_3) for maior que o risco conhecido como risco tolerado R_T , ou seja, ($R > R_T$).

Recomenda-se que o risco de perdas de valor econômico (risco R_4) seja avaliado sempre que a vantagem econômica de proteção contra descargas atmosféricas for considerada (ver item 6.2 da ABNT NBR-5419-2:2015).

5.4 RISCO TOLERÁVEL RT

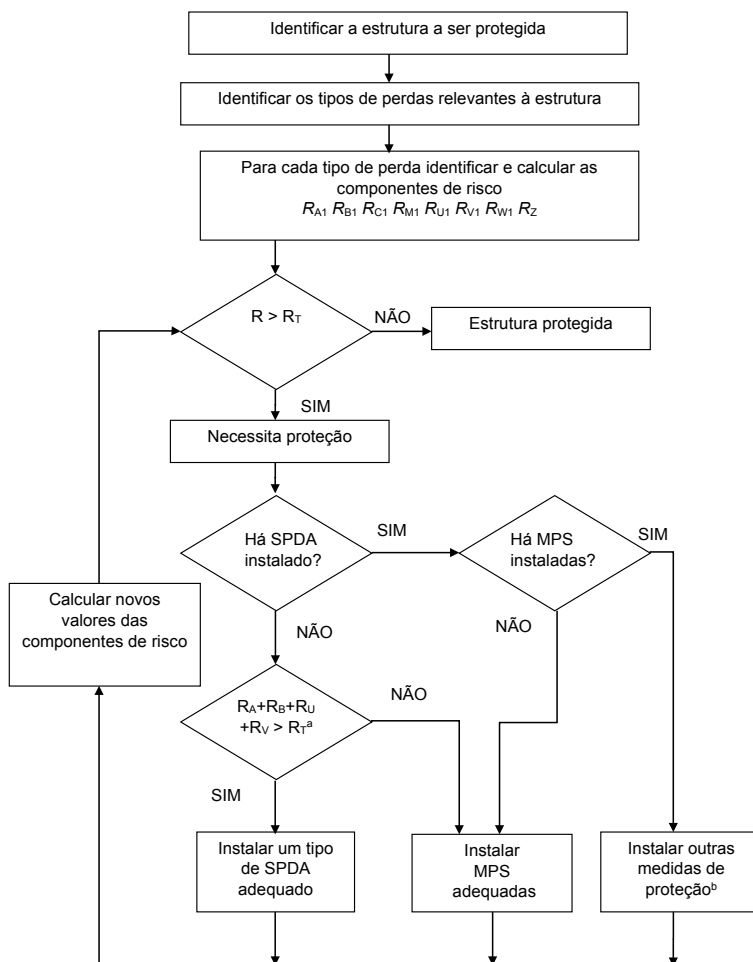
Os valores representativos de risco tolerável RT, onde as descargas atmosféricas envolvem perdas de vida humana ou perda de valores sociais ou culturais, são fornecidos na tabela 1.

Tabela 1 - Valores típicos de risco tolerável RT

Tipo de perda		R_T
L_1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	10^{-5}
L_2	Perda de serviço ao público	10^{-3}
L_3	Perda de patrimônio cultural	10^{-4}

O procedimento para avaliar a necessidade de proteção está apresentado no fluxograma da figura 21, a seguir.

5.5 CRITÉRIOS BÁSICOS PARA PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS



^a - Se $R_A+R_B < R_T$, um SPDA completo não é necessário; neste caso DPS de acordo com a ABNT NBR 5419-4 são suficientes.

^b Ver Tabela 3 da NBR 5419-2

Figura 21 - Fluxograma do procedimento para decisão da necessidade da proteção e para selecionar as medidas de proteção Fonte: ABNT - NBR-5419:2015 - Parte 2 pág. 22

Uma proteção ideal para estruturas é envolver completamente a estrutura a ser protegida por uma blindagem contínua perfeitamente condutora, aterrada e de espessura adequada, e, além disso, providenciar ligações equipotenciais adequadas e para as linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram na estrutura nos pontos de passagem pela blindagem.

Na prática, porém, a aplicação de tais medidas para se obter total proteção é frequentemente inviável.

As medidas de proteção adotadas para reduzir os danos e perdas relevantes, devem ser projetadas para um conjunto definido de parâmetros das correntes de descargas atmosféricas, frente às quais é requerida a proteção, conforme o nível de proteção contra as descargas atmosféricas.

5.6 NÍVEIS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (NP)

Para efeitos da ABNT NBR-5419/2015 são considerados quatro níveis de proteção contra descargas atmosféricas (I a IV). Para cada NP é fixado um conjunto de parâmetros máximos e mínimos das correntes das descargas atmosféricas.

A tabela 2, apresentada a seguir, é um extrato (parcial) e fusão das tabelas 3, 4 e 5 da ABNT NBR-5419-1: 2015. Nela são apresentados os parâmetros especificados da corrente de pico (IP), carga efetiva transferida para a terra (Q), tempos de subida e meia amplitude na cauda (T₁/T₂) e taxa média de subida da corrente (di/dt). Nas últimas duas linhas são dadas as probabilidades das descargas terem parâmetros menores ou maiores que os máximos e mínimos especificados.

Tabela 2 - Valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas correspondentes aos níveis de proteção (NP)

Parâmetro		Unidade	Nível de proteção (NP)			
			I	II	III	IV
IP, máx.	1+	kA	200	150	100	
Q, máx.	1+	C	100	75	50	
T ₁ /T ₂	1+	μs/μs	10/350			
IP, máx.	1-	kA	100	75	50	
di/dt, máx.	1-	kA/μs	100	75	50	
T ₁ /T ₂	1-	μs/μs	1/200			
IP, máx.	SS	kA	50	37,5	25	
di/dt, máx.	SS	kA/μs	200	150	100	
T ₁ /T ₂	SS	μs/μs	0,25/100			
Ip, min.		kA	3	4	10	16
Probabilidade do parâmetro ser menor que o máximo especificado			0,99	0,98	0,95	0,95
Probabilidade do parâmetro ser maior que o máximo especificado			0,99	0,97	0,91	0,84

Os parâmetros são obtidos das distribuições da corrente da descarga e correspondem às descargas nuvem-terra descendentes. Os símbolos 1+, 1- e SS na tabela 3

correspondem, respectivamente, ao primeiro impulso de descarga positiva, primeiro impulso de descarga negativa e impulso subsequente. Os níveis de proteção podem ser caracterizados conforme indica a tabela 3.

Tabela 3 – Níveis de proteção

Proteção Contra Descargas Atmosféricas	
Nível de Proteção	Caracterização da Proteção
I	Nível Máximo
II	Nível Médio
III	Nível Moderado
IV	Nível Normal

Quanto maior a caracterização da proteção requerida, maior é a quantidade de elementos usados na instalação, como no Nível I de proteção.

5.7 CLASSES DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As características de um SPDA são determinadas pelas características da estrutura a ser protegida e pelo nível de proteção considerado para descargas atmosféricas.

A tabela 4, a seguir, apresenta as quatro classes de SPDA (I a IV) definidas na norma e que correspondem aos níveis de proteção para descargas atmosféricas indicadas na tabela 3 do item anterior.

Tabela 4 - Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe de SPDA

Nível de Proteção	Classe de SPDA
I	I
II	II
III	III
IV	IV

A classe do SPDA requerido deve ser selecionada com base em uma avaliação de risco (ver ABNT NBR 5419-2: 2015)

6. PROJETO DO SISTEMA SPDA

Quanto maior for a sintonia e a coordenação entre os projetos e execuções a serem protegidas e do SPDA, melhores serão as soluções adotadas possibilitando otimizar custo dentro da melhor solução técnica possível. Preferencialmente, o próprio projeto da estrutura deve viabilizar a utilização das partes metálicas desta, como componentes naturais do SPDA.

A armadura de aço dentro de estruturas de concreto armado pode ser considerada eletricamente contínua, atendidas as devidas exigências normativas para tal.

6.1 SISTEMA EXTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O SPDA externo é projetado para interceptar as descargas atmosféricas diretas à estrutura, incluindo as descargas laterais as estruturas, e conduzir a corrente da descarga atmosférica do ponto de impacto a terra. O SPDA externo tem também a finalidade de dispersar esta corrente na terra sem causar danos térmicos ou mecânicos, nem centelhamentos perigosos que possam iniciar fogo ou explosões.

Na maioria dos casos, o SPDA externo pode incorporar partes da estrutura a ser protegida. Um SPDA externo isolado deve ser considerado quando os efeitos térmicos e de explosão no ponto de impacto, ou nos condutores percorridos pela corrente da descarga atmosférica, puderem causar danos à estrutura ou ao seu conteúdo. Exemplos típicos incluem estruturas com paredes ou cobertura de material combustível e áreas com risco de explosão e fogo.

Componentes naturais feitos de materiais condutores, os quais devem permanecer dentro ou na estrutura definitivamente e não podem ser modificados, por exemplo, armaduras de aço interconectadas estruturando o concreto armado, vigamentos metálicos da estrutura, etc., podem ser utilizadas como componentes naturais do SPDA, desde que cumpram os requisitos específicos da Norma. Outros componentes metálicos que não forem definitivos à estrutura devem ficar dentro do volume de proteção ou incorporados complementarmente ao SPDA.

A tendência do raio é ir para a terra, conforme já mencionado anteriormente, portanto, a utilização de diversas técnicas tem como objetivo facilitar este caminho da melhor maneira possível.

Com este objetivo, um SPDA é constituído por 3 subsistemas, ou seja, subsistema de captação, subsistema de descida e subsistema de aterramento.

Estes três sistemas devem ser adequadamente combinados de modo a cumprir suas finalidades, ou seja, proteger estruturas, seres humanos, equipamentos, instalações elétricas e eletrônicas, etc.

Os subsistemas de captação podem ser compostos por qualquer combinação dos seguintes elementos:

- hastes (incluindo os mastros);
- condutores suspensos;
- condutores em malhas

A ilustração na figura 22, a seguir apresenta um captor de raios.

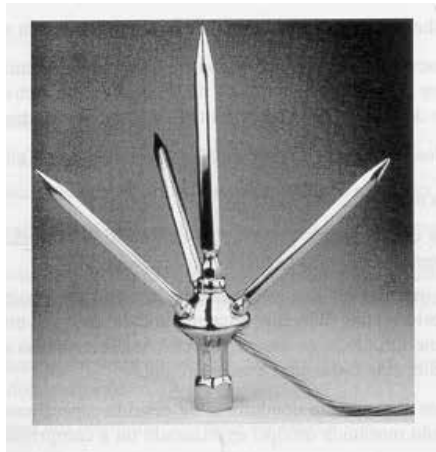


Figura 22 - Captor. Fonte: Mamede Filho, J. (2017)

A proteção contra descargas atmosféricas é realizada por métodos que possuem como diferença fundamental a definição do volume de proteção. Com base neste fato, pode-se utilizar os seguintes métodos:

- Método do ângulo de proteção (Franklin);
- Método das malhas (Faraday);
- Método da esfera rolante (Eletrogeométrico).

Ressalta-se que o método das malhas é adequado em todos os casos.

O método do ângulo de proteção (Franklin) é adequado para edificações em formato simples, mas está sujeito aos limites de altura dos captores indicados na figura 23 (até 60 m).

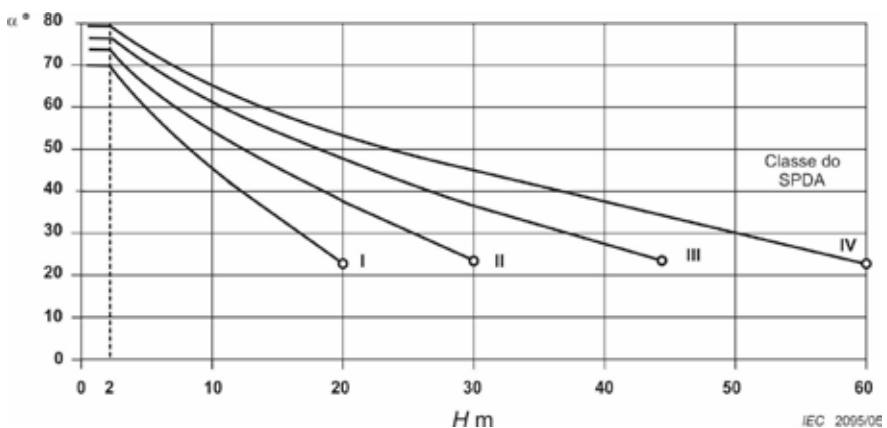


Figura 23 - Ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA (Adaptado de ABNT-NBR 5419:2015 Parte 3, pág. 11)

Nos itens seguir estão apresentados e detalhados os três métodos de proteção contra descargas elétricas.

6.2 MÉTODO DO ÂNGULO DE PROTEÇÃO OU DE FRANKLIN

Este método foi proposto por Benjamin Franklin, e consiste em se determinar o volume de proteção propiciado por um cone (ver figura 18), cujo ângulo de geratriz com a vertical varia segundo a classe do SPDA desejada e a altura da construção, indicado na tabela 5.

Tabela 5 - Valores máximos dos raios da esfera rolante, tamanho da malha e ângulo de proteção correspondente à classe do SPDA (Adaptado de ABNT-NBR 5419:2015 Parte 3, pág. 10)

Classe do SPDA	Método de Proteção		
	Raio da esfera rolante - R_e (m)	Máximo afastamento dos condutores da malha (m)	Ângulo de proteção α°
I	20	5 x 5	Ver figura 23
II	30	10 x 10	
III	45	15 x 15	
IV	60	20 x 20	

6.2.1 Volume de proteção

O para-raios oferece uma proteção por um cone cujo vértice corresponde à extremidade superior do captor e cuja geratriz faz um ângulo α com a vertical, propiciando um raio de base do cone de valor dado pela equação (6), conforme se observa na figura 24.

$$R_p = H_c \cdot \text{tg } \alpha$$

Eq. (6)

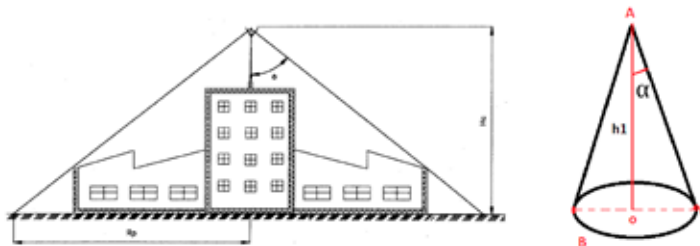


Figura 24 - Volume de proteção com uma haste. (Adaptado de ABNT-NBR 5419:2015 Parte 3, pág. 31)

A figura 25 indica o volume de proteção proporcionado por um mastro para duas alturas diferentes.

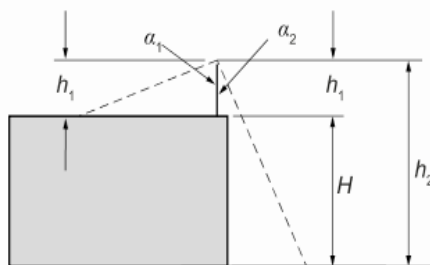


Figura 25 - Volume de proteção provido por um mastro para duas alturas diferentes Fonte: ABNT-NBR 5419:2015 Parte 3, pág. 32)

O ângulo de proteção α_1 corresponde à altura h_1 do mastro, sendo esta a altura acima da superfície da cobertura da estrutura a ser protegida; o ângulo α_2 corresponde à altura $h_2 = h_1 + H$, com o solo sendo o plano de referência. O ângulo α_1 está relacionado com h_1 e o ângulo α_2 está relacionado com h_2 .

Pode existir também o caso de condutores horizontais suportados por hastes verticais e o volume obtido é o de dois meio cones e de um ângulo sólido que tem como aresta o condutor horizontal e como ângulo o ângulo de proteção. Este volume de proteção raramente é obtido na prática, pois o condutor horizontal é um cabo tensionado pelos suportes verticais e que descreve uma catenária (curva) que depende de seu próprio peso e da tensão com a qual for esticado. Um condutor horizontal fixo à duas hastes, considerado em ângulo de proteção de “ β ” graus, são ilustrados nas figuras 26 e 27.

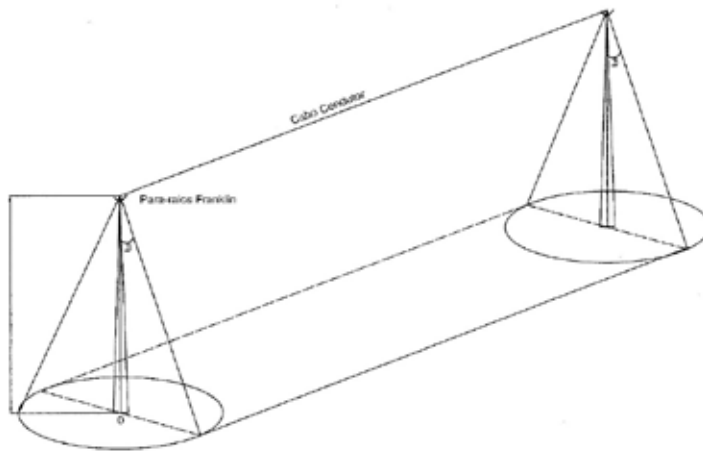


Figura 26 - Volume de proteção de condutor horizontal. Fonte: Mamede Filho, J. (2017)

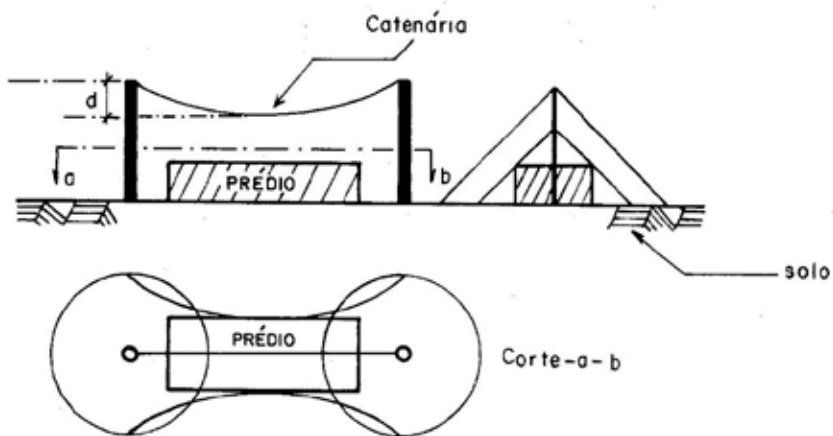


Figura 27 - Condutor horizontal em forma de catenária. Fonte: Kindermann, G. (2003)

6.2.2 Número de condutores de descida

As descidas devem estar distribuídas ao longo de todo perímetro da construção, com distâncias de acordo com a classe do SPDA desejada e dada na tabela 6.

Tabela 6 - Valores típicos de distância entre os condutores de descida e entre anéis condutores de acordo com a classe de SPDA

Classe do SPDA	Distâncias (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20

NOTA: É aceitável que o espaçamento dos condutores de descidas tenha no máximo 20% além dos valores acima.

Um condutor de descida deve ser instalado, preferencialmente, em cada canto saliente da estrutura, além dos demais condutores impostos pela distância de segurança calculada.

Os condutores de descida devem ser instalados de forma exequível e que formem uma continuação direta dos condutores do sistema de captação. Os mesmos devem ser instalados em linha reta e vertical constituindo o caminho mais curto e direto para a terra. A formação de laços deve ser evitada.

Para melhor distribuição das correntes das descargas atmosféricas devem ser consideradas interligações horizontais com os condutores de descida, ao nível do solo, e em intervalos entre 10 a 20 m de altura de acordo com a tabela 6, para condutores de descida construídos em SPDA convencional.

Os condutores de descida de um SPDA não isolado podem ser posicionados na superfície ou dentro da parede se a mesma é feita de material não combustível, caso a parede seja feita de material prontamente combustível e a elevação de temperatura dos condutores de descida for perigosa, estes devem ser instalados de forma a ficarem distantes da parede, pelo menos 0,1 m.

O número mínimo de descidas pode ser calculado pela expressão abaixo, não se admitindo um número de descidas inferior a 2 (número mínimo de descidas especificado para um SPDA estabelecido pela NBR-5419/2015).

$$N_{cd} = P_{pc}/D_m$$

eq (7)

onde:

N_{cd} – número de condutores de descida;

P_{pc} – perímetro da construção;

D_m – distâncias obtidas da tabela 6

A figura 28 ilustra esquematicamente os condutores de descida de um estabelecimento agropecuário (classe de SPDA IV).

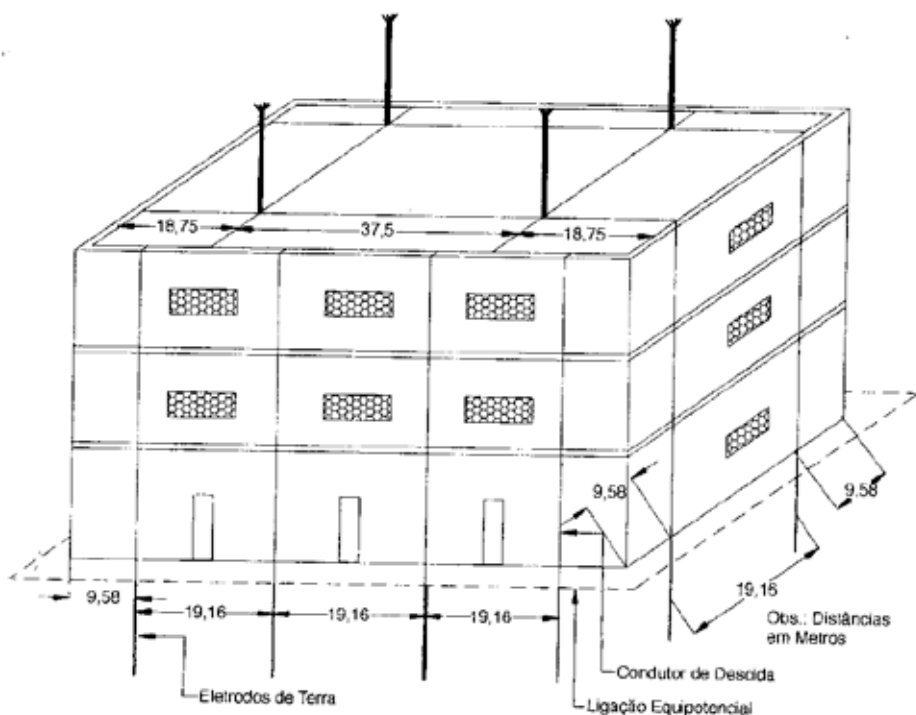


Figura 28 - Elementos de proteção contra descargas atmosféricas e condutores de descida. Fonte: Mamede Filho, J. (2017)

6.2.3 Componentes naturais de descida

As seguintes partes da estrutura podem ser consideradas como condutores naturais de descida:

- a. as instalações metálicas, desde que:
 - a continuidade elétrica entre as várias partes seja feita de forma durável de acordo com 5.5.2 (ABNT NBR-5419/2015);
 - suas dimensões sejam no mínimo iguais ao especificado na tabela 7 para condutores de descida normalizados. Tubulações contendo misturas inflamáveis ou explosivas não podem ser consideradas como um componente natural de descida se as gaxetas nos acoplamentos dos flanges não forem metálicas ou se os laços dos flanges não forem apropriadamente conectados;
- b. as armaduras das estruturas de concreto armado eletricamente contínuas, desde que atenda as condições da norma para tal;
- c. o vigamento de aço interconectado da estrutura, desde que atenda as condições da norma para tal;
- d. elementos da fachada, perfis e subconstruções metálicas das fachadas, desde que atenda as condições da norma para tal.

A figura 29, a seguir, apresenta alguns aspectos de um SPDA estrutural.

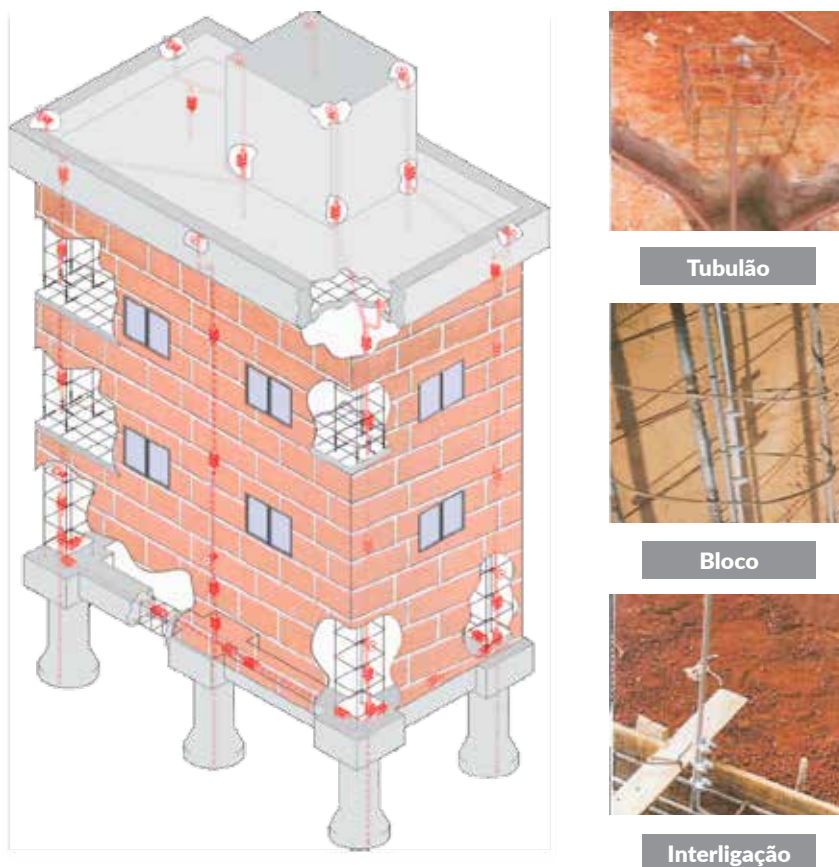


Figura 29 - SPDA Estrutural. Fonte: Termotécnica (2003)

6.2.4 Conexões de ensaio

Nas junções entre cabos de descida e eletrodos de aterramento, uma conexão de ensaio deve ser fixada em cada condutor de descida, exceto no caso de condutores de descidas naturais combinados com os eletrodos de aterramento natural (pela fundação).

No primeiro caso, com o objetivo de ensaio, o elemento de conexão deve ser capaz de ser aberto apenas com o auxílio de ferramenta. Em uso normal ele deve permanecer fechado e não pode manter contato com o solo.

6.2.5 Seção dos condutores dos subsistemas de captação e descida

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

A seção mínima dos condutores é dada conforme o tipo de material utilizado, ilustrada na tabela 7, de acordo com a NBR-5419/2015.

Tabela 7 – Material, configuração e área de seção mínima dos condutores de captação, hastes captoras e condutores de descidas (Fonte: Adaptado de ABNT – NBR 5419:2015 Parte 3, pág. 21)

Material	Configuração	Área de seção mínima (mm ²)	Comentário
Cobre	Fita maciça	35	Espessura 1,75 mm
	Arredondado maciço ^d	35	Diâmetro 6 mm
	Encordoado	35	Diâmetro de cada fio da cordoalha 2,5 mm
	Arredondado maciço ^b	200	Diâmetro 16 mm
Alumínio	Fita maciça	70	Espessura 3,0 mm
	Arredondado maciço ^d	70	Diâmetro 9,5 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,5 mm
	Arredondado maciço ^b	200	Diâmetro 16 mm
Aço Cobreado IACS 630% ^e	Encordoado	50	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,0 mm
	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8 mm
Alumínio Cobreado IACS 64%	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,6 mm
Aço galvanizado à quente ^a	Fita maciça	50	Espessura 2,5 mm
	Arredondado maciço	50	Diâmetro 8 mm
	Encordoado	50	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm
	Arredondado maciço ^b	200	Diâmetro 16 mm
Aço inoxidável ^c	Fita maciça	50	Espessura 2,0 mm
	Arredondado maciço ^d	50	Diâmetro 8 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm
	Arredondado maciço ^b	200	Diâmetro 16 mm

- a.** Recobrimento à quente (fogo) deve ser conforme a ABNT NBR 6323
- b.** Aplicável somente a mini captoras. Para aplicações onde esforços mecânicos, por exemplo: força do vento, não forem críticos, é permitida a utilização de elementos com diâmetro mínimo de 10 mm e comprimento de 1 metro.
- c.** Composição mínima AISI 304 ou composto por: cromo 16%, níquel 8%, carbono 0,07%
- d.** Espessura, comprimento e diâmetro indicados na tabela referem-se aos valores mínimos sendo admitida uma tolerância de 5%, exceto para o diâmetro dos fios das cordoalhas cuja tolerância é de 2%
- e.** A cordoalha cobreada deve ter uma condutividade mínima de 30% IACS (International Annealed Copper Standard)

Nota 1 - Sempre que os condutores desta tabela estiverem em contato com o solo é importante que as prescrições da Tabela 7 da Norma NBR 5419 - Parte 3 sejam atendidas

Nota 2 - Esta tabela não se aplica aos materiais utilizados como elementos naturais de um SPDA

6.2.6 Subsistema de aterramento

Quando se tratar da dispersão da corrente da descarga atmosférica para a terra, o método mais importante de minimizar qualquer sobretensão potencialmente perigosa é estudar e aprimorar a geometria e as dimensões do subsistema de aterramento. Deve-se obter a menor resistência de aterramento possível, compatível com o arranjo do eletrodo, a topologia e a resistividade do solo no local.

Sob o ponto de vista de proteção contra descargas atmosféricas, uma única infraestrutura de aterramento integrada é preferível e adequada para todos os propósitos, ou seja, o eletrodo deve ser comum e atender à proteção contra descargas atmosféricas, sistemas de energia elétrica e sinal (telecomunicações, TV a cabo, dados, etc.).

Recomenda-se evitar a utilização de materiais diferentes em um mesmo subsistema de aterramento. A tabela 8 - apresenta as configurações e dimensões mínimas dos condutores do subsistema de aterramento.

Tabela 8 - Material, configuração e dimensões mínimas de eletrodo de aterramento. Fonte: Adaptado de ABNT - NBR 5419:2015 Parte 3, pág. 22

Material	Configuração	Dimensões mínimas ^f		Comentário ^f
		Eletrodo cravado (diâmetro)	Eletrodo não cravado	
Cobre	Encordoado ^c	-	50 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3 mm.
	Arredondado maciço ^d	-	50 mm ²	Diâmetro 8 mm.
	Fita maciça	-	50 mm ²	Espessura 2 mm
	Arredondado maciço ^b	15 mm	-	-
	Tubo	20 mm	-	Espessura de parede 2 mm
Aço galvanizado à quente	Arredondado maciço ^{a,b}	16 mm	Ø 10 mm	-
	Tubo ^{a,b}	25 mm	-	Espessura de parede 2 mm
	Fita maciça ^a	-	90 mm ²	Espessura 3 mm
Aço Cobreado	Encordoado	-	70 mm ²	-
	Arredondado maciço ^d	12,7 mm	70 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,45 mm
	Encordoado ^g	-	-	-
Aço inoxidável ^e	Arredondado maciço	15 mm	Ø 10 mm	Espessura mínima 2 mm
	Fita maciça	-	100 mm ²	-

- a.** Recobrimento à quente (fogo) deve ser conforme a ABNT NBR 6323
- b.** Aplicável somente a mini captores. Para aplicações onde esforços mecânicos, por exemplo: força do vento, não forem críticos, é permitida a utilização de elementos com diâmetro mínimo de 10 mm e comprimento de 1 metro.
- c.** Composição mínima AISI 304 ou composto por: cromo 16%, níquel 8%, carbono 0,07%
- d.** Espessura, comprimento e diâmetro indicados na tabela referem-se aos valores mínimos sendo admitida uma tolerância de 5%, exceto para o diâmetro dos fios das cordoalhas cuja tolerância é de 2%
- e.** Sempre que os condutores desta tabela estiverem em contato com o solo é importante que as prescrições desta Tabela.
- f.** A cordoalha cobreada deve ter uma condutividade mínima de 30% IACS (International Annealed Copper Standard)
- g.** Esta tabela não se aplica aos materiais utilizados como elementos naturais de um SPDA

Para subsistemas de aterramento, na impossibilidade do aproveitamento das armaduras das fundações, o arranjo a ser utilizado consiste em condutor em anel, externo à estrutura a ser protegida, em contato com o solo por pelo menos 80% do seu comprimento total, ou elemento condutor interligando as armaduras descontínuas da fundação (sapatas). Estes eletrodos de aterramento podem também ser do tipo malha de aterramento. Devem ser consideradas medidas preventivas para evitar eventuais situações que envolvam tensões superficiais perigosas, conforme indica a figura 30.

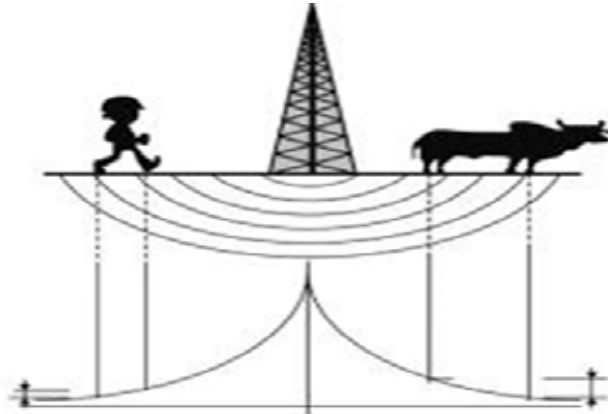


Figura 30 – Tensões de passo. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Embora 20% do eletrodo convencional possa não estar em contato direto com o solo, a continuidade elétrica do anel deve ser garantida ao longo de todo seu comprimento.

Para o eletrodo de aterramento em anel ou interligando a fundação descontínua, o raio médio r_e da área abrangida pelos eletrodos não pode ser inferior ao valor l_1 :

$$r_e \geq l_1$$

$$\text{Eq.(8)}$$

onde l_1 é representado na figura 31 de acordo com o SPDA classe I, II, III e IV.

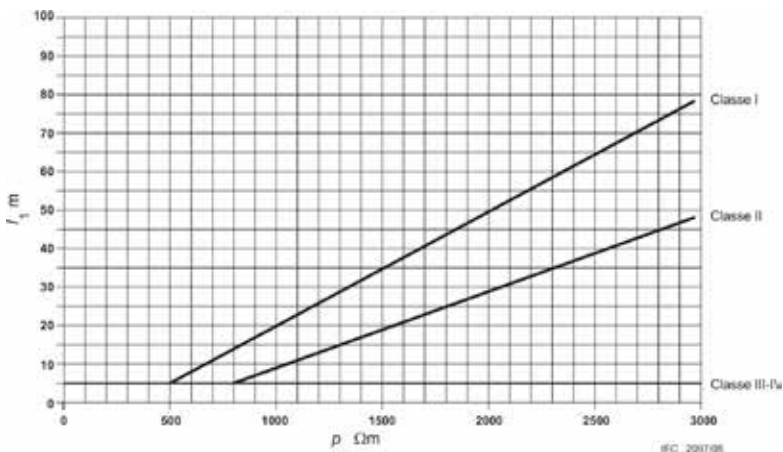


Figura 31 – Comprimento mínimo dos eletrodos de aterramento (l_1). Fonte: Adaptado de ABNT - NBR 5419:2015 Parte 3, pág. 18

Eletrodos adicionais, quando necessários podem ser conectados ao eletrodo de aterramento em anel e devem ser localizados o mais próximo possível dos pontos onde os condutores de descida forem conectados.

O eletrodo de aterramento em anel deve ser enterrado na profundidade mínima de 0,5 m e ficar posicionado à distância aproximada de 1 m ao redor das paredes externas.

Eletrodos de aterramento devem ser instalados de tal maneira a permitir sua inspeção durante a construção.

No caso da impossibilidade técnica da construção do anel externo à edificação, este pode ser instalado internamente. Para isto devem ser tomadas medidas visando minimizar os riscos causados por tensão superficiais (ver seção 8 da NBR 5419-3: 2015).

6.2.7 Exemplo 1

Conhecidas as dimensões do prédio do estabelecimento agropecuário representado na figura 32, projetar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. A vista superior para duas condições de cálculo está indicada na figura 26a e 26b. A altura do prédio é de 20 m e a resistividade do solo vale 500 W.m.

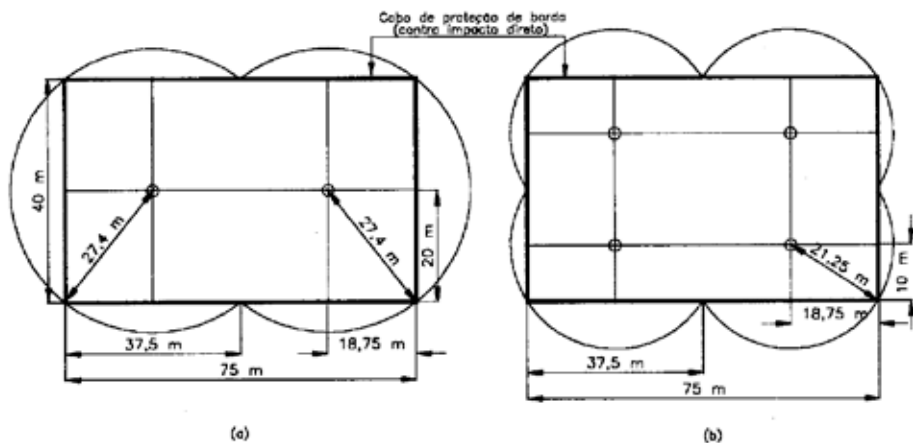


Figura 32 - Vista superior da edificação da figura 22. Fonte: Mamede Filho, J. (2017)

Solução:

a) Volume de proteção

Considerando-se somente dois para-raios instalados nos pontos indicados na figura 26a acima, o raio de proteção no teto, de cada um deve ser de:

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

Conforme já mencionado, o raio de proteção pelo método de Franklin é calculado pela expressão:

$$R_{pt} = Hc \times \text{tg}\alpha$$

Para um estabelecimento agropecuário (Classe IV de SPDA), através da figura 17, uma altura $Hc = 20\text{ m}$ e um ângulo $\alpha = 54^\circ$, pode-se calcular o raio de proteção na cobertura do estabelecimento, resultando em:

$$R_{pt} = H_c \times \operatorname{tg}\alpha = 20,0 \times \operatorname{tg}(54^\circ) = 20,0 \times 1,428 = 27,52 \text{ m}$$

Portanto, resulta em um raio de proteção que cobre toda a área da cobertura.

Se for utilizado um mastro de 3 m, o suporte do conjunto mastro-captor vale:

$$L_c = H_c - 3,0 = 20,0 - 3,0 = 17,0 \text{ m}$$

Como o comprimento do suporte é muito grande, serão considerados quatro para-raios instalados de conformidade com a figura 26b acima, devendo o raio de proteção de cada um ser de:

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

Novamente, para Classe IV do SPDA, na figura 17, agora com uma altura $H_c = 10 \text{ m}$ e um ângulo $\alpha = 65^\circ$, o raio de proteção na cobertura do estabelecimento resulta em:

$$R_{pt} = H_c \times \operatorname{tg}\alpha = 10,0 \times \operatorname{tg}(65^\circ) = 10,0 \times 2,144 = 21,44 \text{ m.}$$

Logo, o raio de proteção resultante protege toda a área da cobertura.

A altura do suporte será de:

$$L_c = H_c - 3,0 = 10,0 - 3,0 = 7,0 \text{ m}$$

O suporte L_c de 7,0 m poderá ser constituído de uma torre treliçada em perfil metálico, fixando-se no seu topo um isolador de vidro temperado ou porcelana vitrificada, isolado para 10 kV.

Pode-se observar através da figura 26b anterior que todas as partes da construção estão cobertas pelas áreas de proteção formadas pelos para-raios.

b) O número de condutores de descidas será dado por:

Da tabela 6 e Classe do SPDA IV, resulta $D_m = 20 \text{ m}$, e o perímetro da construção será:

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

Logo, $N_{cd} = 230/20 = 11,5 \approx 12$ condutores.

c) Afastamento entre os condutores de descida

$$E_m = P_{pc}/N_{cd} = 230/12 = 19,16 \text{ m}$$

d) Seção do condutor

A seção do condutor de descida deve ser de 35 mm² em cabo de cobre, segundo a tabela 9.

e) Comprimento total de eletrodos de aterramento

De acordo com a equação (8) e figura 31, o raio médio r_e da área abrangida pelos eletrodos deve ser maior ou igual a 5 m. A área do prédio é igual a 3000 m² (75m x 40m), assim resulta para o raio médio r_e equivalente dessa área 30,9 m. Como o perímetro dos condutores do sistema de aterramento é igual a 230 m, o comprimento desses condutores atende os 30,9 m calculados. Além disso, serão utilizados 12 eletrodos verticais de 3 m cada, conectando-se cada conjunto de eletrodos na extremidade de cada condutor de descida.

6.2.8 Elementos principais da instalação

Apresenta-se na figura 33, a interconexão dos elementos principais que compõem uma instalação de um para-raios tipo Franklin e na figura 34 um prédio que utiliza materiais combustíveis na parede.

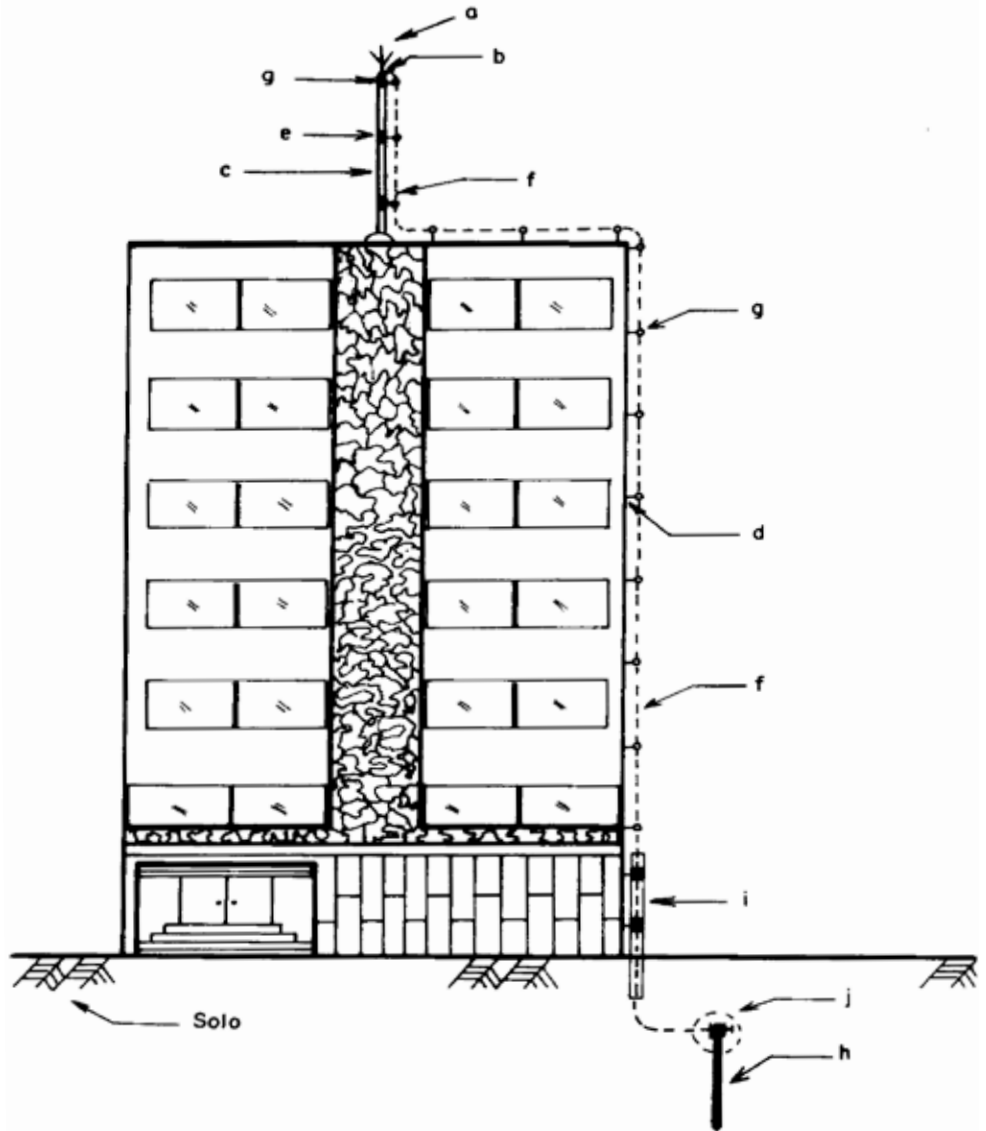


Figura 33 - Prédio protegido pelo para-raios Franklin. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Os elementos apresentados na figura 33, são listados a seguir:

- a. Captor – que pode ser de uma só ponta ou em forma de bouquet;
- b. Conector – para prender o cabo de descida ao captor;
- c. Haste de Sustentação – para elevar o captor na altura desejada;
- d. Espaçador – para manter o cabo de descida afastado da estrutura ou da haste de sustentação;
- e. Braçadeira – para fixar o espaçador à haste de sustentação;
- f. Cabo de descida – para interligar o captor ao sistema de aterramento;
- g. Isolador – pode ser de dois tipos: modelo industrial com classe de tensão 10 kV ou tipo roldana usado na estrutura do espaçador (distância máxima de 2 m);
- h. Aterramento – para produzir conexão com a terra;
- i. Tubo Protetor – de material não condutor, para evitar atos de vandalismo e evitar tensão de toque direto com o cabo descida (altura mínima 2,5 a 3,0 m);
- j. Cobertura de Conexão – de material emborrachado, para proteger a conexão da corrosão.
- k. OBS: Embora a figura tenha apenas um eletrodo de aterramento, o anel de aterramento é obrigatório pela nova norma.

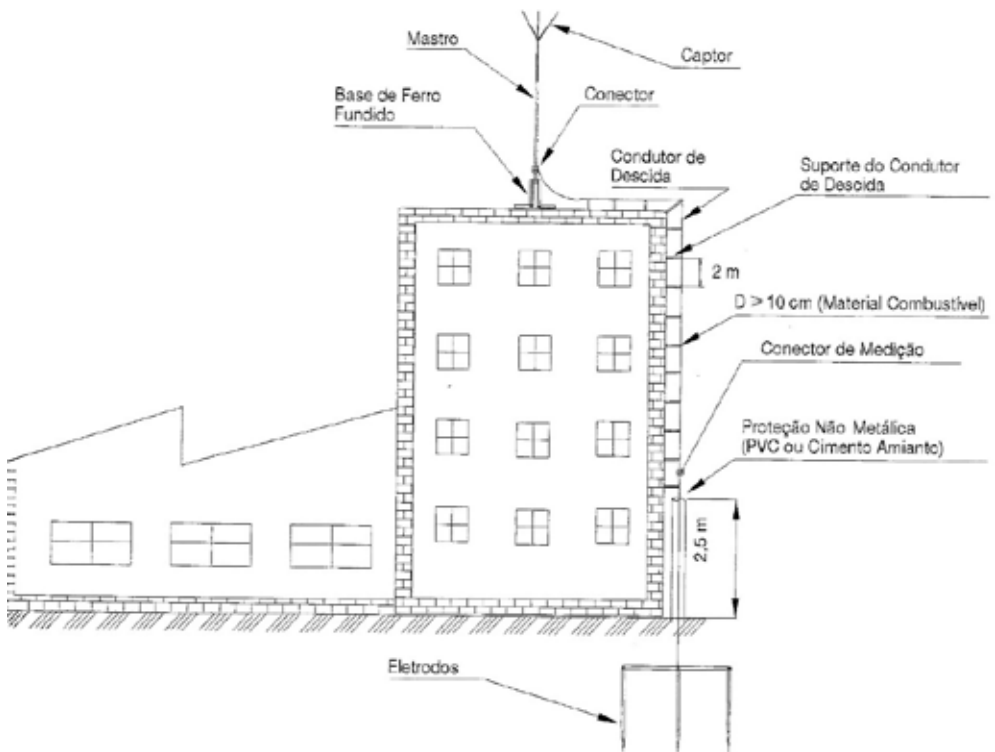


Figura 34 – SPDA em estruturas que utilizam materiais combustíveis nas paredes. Fonte: Mamede Filho, J. (2017)

Como ilustração, a figura 35 seguinte apresenta alguns materiais para instalações de para-raios.

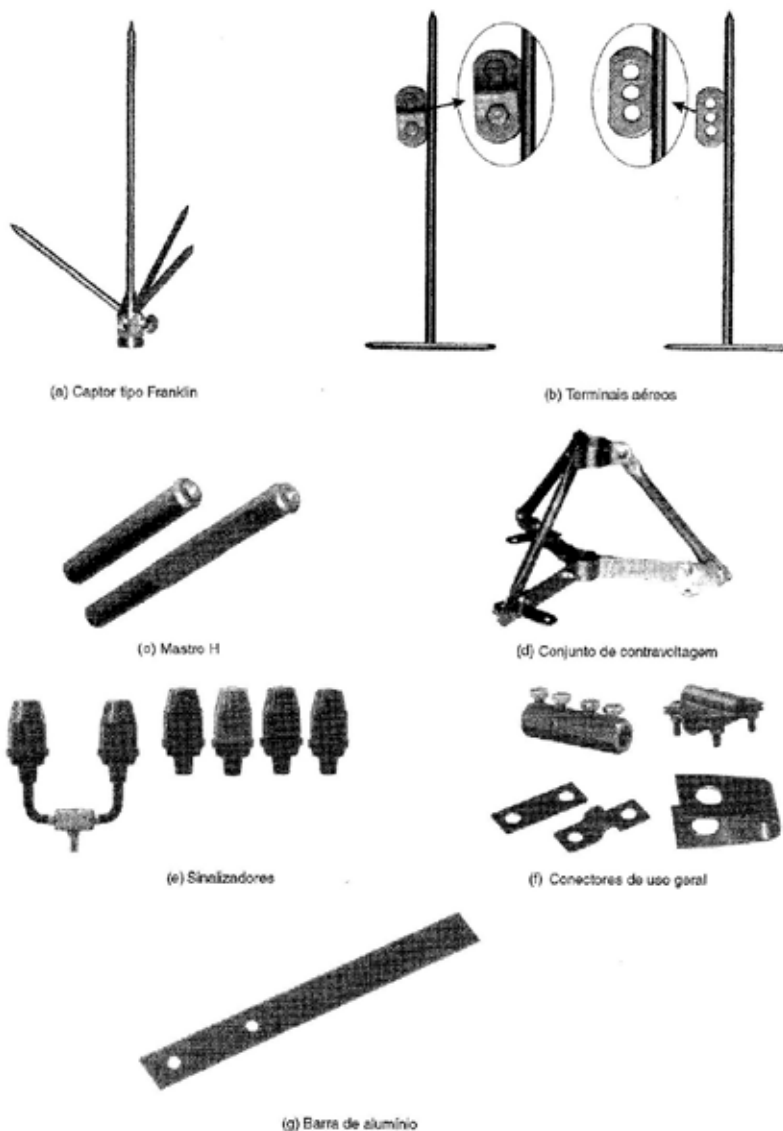


Figura 35 - Materiais para instalações de para-raios. Fonte: Creder, H. (2016)

6.3 MÉTODO DA GAIOLA DE FARADAY

Este método é baseado na teoria de Faraday, segundo a qual o campo no interior de uma gaiola é nulo, mesmo quando passa por seus condutores uma corrente de valor elevado. Para que o campo seja nulo, na verdade, é preciso que a corrente se distribua uniformemente por toda a superfície. Quando as correntes não são uniformes o campo no seu interior não é nulo, mas é pequeno. O raio ao cair na estrutura, não produz uma dissipação uniforme e por este motivo ocorrem induções internas devido à variação do campo magnético existente no interior da gaiola.

O método consiste em instalar um sistema de captadores formado por condutores horizontais interligados em forma de malha. A proteção se dá porque as correntes induzidas nas quadrículas da malha criam campos magnéticos de oposição, levando o raio para as bordas da malha, obrigando-os a fluir para o cabo de descida, indicado na figura 36.

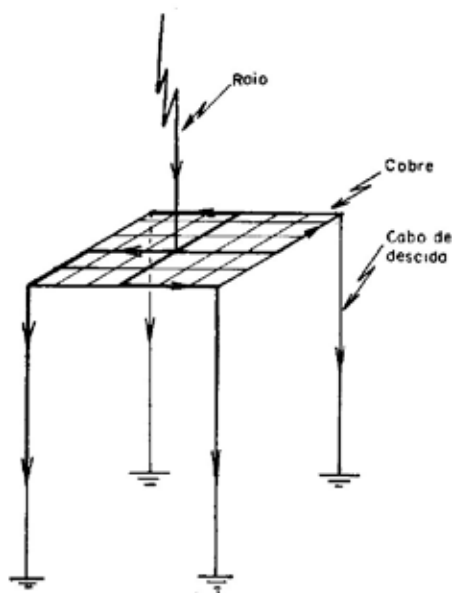


Figura 36 - Condução do raio para o cabo de descida. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Quanto mais malhada for a gaiola, melhor a blindagem, portanto, melhor a proteção. A proteção só será máxima quando toda a gaiola for metálica, isto é, o prédio estiver envolvido por uma caixa metálica contínua.

6.3.1 Dimensões entre os cabos na malha

A distância entre os condutores ou a abertura da malha está relacionada com a classe de proteção do SPDA desejada. A NBR-5419/2015 estabelece através da tabela 7 e reproduzida na tabela 8, a seguir, essas distâncias.

Tabela 9 - Máximos afastamentos dos condutores da malha

Classe do SPDA	Dimensão do módulo da malha (m)
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Os condutores captadores devem ser instalados:

- na periferia da cobertura da estrutura;
- nas saliências da cobertura da estrutura;
- nas cumeeiras dos telhados, se o declive deste exceder 1/10 (um desnível por dez de comprimento)

Dois exemplos de prédios protegidos pelo método das malhas estão indicados na figura 37

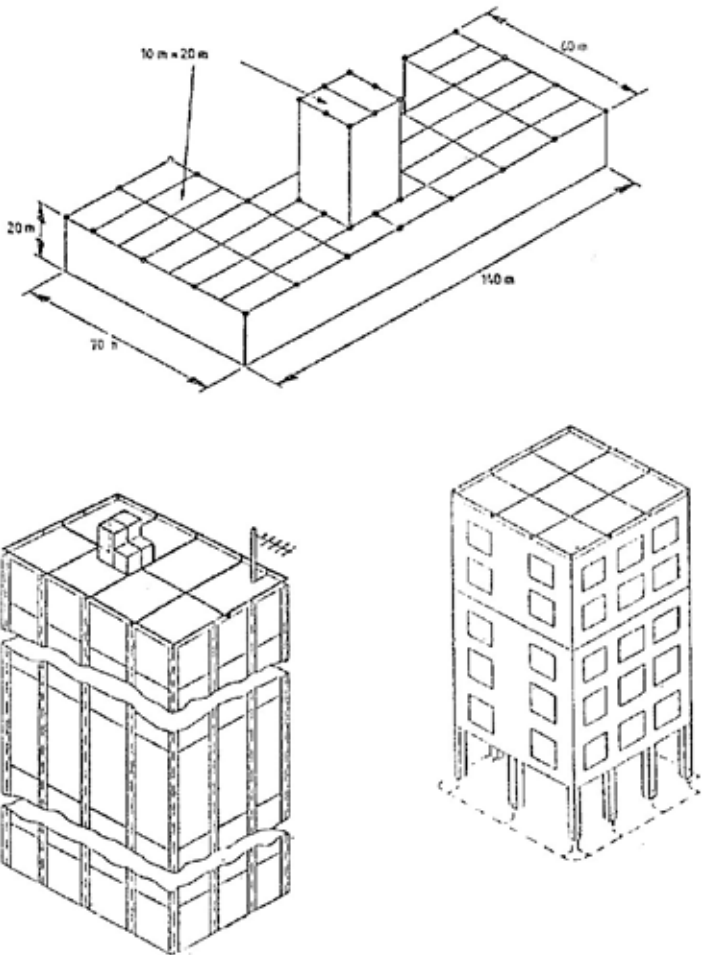


Figura 37- Método das Malhas. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Para diminuir a possibilidade dos condutores de malha captora serem danificados nos pontos de impacto, algumas normas, como a inglesa BS 6651, recomendam a colocação de pequenos captadores verticais, que no Brasil foram denominados “terminais aéreos”, com 30 a 50cm de altura, separados por uma distância máxima de 8m ao longo da malha.

As seções dos condutores da malha e de descida são dimensionadas da mesma

forma como no método de Franklin e indicada na tabela 7.

Quanto ao número de condutores de descida, também se emprega o método descrito no item 6.2.2 e tabela 8. Recomenda-se usar em cada canto do prédio um cabo de descida.

O número de condutores que formam a malha pode ser determinado para qualquer dimensão de malha pela equação (9).

$$N_{cm} = (D/D_{dm}) + 1$$

Eq.(9)

onde:

N_{cm} – número de condutores na malha;

D – dimensão no sentido da largura e do comprimento do prédio (m);

D_{dm} – dimensão do módulo da malha (m).

6.3.2 Instalação da malha superior da gaiola de faraday

uma vez projetada a malha superior, deve-se decidir a forma de sua instalação. Há quatro modos de proceder:

- a. malha suspensa, formando um varal a certa altura da cobertura;
- b. malha suspensa a 20 cm da cobertura;
- c. malha depositada sobre a cobertura;
- d. malha embutida na própria laje da cobertura.

Os itens a, b, e c são interessantes quanto ao aspecto da inspeção e manutenção. O item d esteticamente é melhor, com o inconveniente da descarga do raio danificar o concreto no seu ponto de impacto, sem maiores problemas para a estrutura.

O método das malhas tem recebido a preferência dos projetistas. O motivo é realçado pelo fato de que, no método de Franklin, a interligação entre as hastes suportes dos captosres, pode conduzir a uma malha no topo da construção de dimensões tais que, resultam praticamente nas dimensões necessárias à aplicação do método de Faraday.

6.3.3 Exemplo 2

Considerar o exemplo 1 anterior e dimensionar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas com base o método das malhas (Faraday).

- a. Dimensões da malha captora
 - Área da construção: $S_{const} = 40 \times 75 = 3000m^2$
 - Construção com classe do SPDA IV: P módulo da malha 20 x 20m (tabela 7). (adotar-se-á um retículo retangular de 20 x 15m, menor que o máximo exigido pela norma)

Logo, tem-se: $D_{dm} = 20\text{m}$

(no sentido da largura do prédio, 40m)

$D_{dm} = 15\text{m}$ (no sentido do comprimento do prédio, 75m)

- Na direção da menor dimensão da construção, segundo a figura 22, o número de condutores vale:

$$N_{cm1} = (75/15) + 1 = 6,0 \text{ condutores}$$

- Na direção da maior dimensão da construção, o número de condutores vale:

$$N_{cm2} = (40/20) + 1 = 3,0 \text{ condutores}$$

b. Número de condutores de descida

Conforme já calculado no exemplo 1 anterior, tem-se que:

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

c. Seção dos condutores da malha captora e de descida

$$S_{mal} = 35\text{mm}^2 \text{ e } S_{des} = 35\text{mm}^2 \text{ (condutor de cobre, conforme tabela 7)}$$

d. Seção dos condutores da malha de aterramento

$$S_{mal} = 50\text{mm}^2 \text{ (condutor de cobre, conforme tabela 8)}$$

e. Número de hastes captoras verticais no topo

$$\text{Comprimento total da malha captora: } C_{ma} = (6 \times 40\text{m}) + (3 \times 75\text{m}) = 465\text{m}$$

$N_{hv} = (75/8\text{m} + 1).3 + (40/8\text{m} + 1).6 = 68$ hastes de 50cm ao longo da malha captora (uso opcional). (Admitindo espaçamento máximo de 8m entre hastes).

6.3.4 Exemplo 3

Realizar o dimensionamento de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas de um **edifício residencial**, com as características descritas a seguir:

Edifício com:

- um pavimento térreo, 12 pavimentos tipo, caixa d'água e casa de máquinas do elevador na cobertura.
- largura = 10m; comprimento = 20m e altura até cobertura = 40m.
- dimensões da caixa d'água: 4x6x4m.
- localização e topografia: em cidade de grande porte, próxima de São Paulo, próximo de outras estruturas de altura semelhante, em local com elevações moderadas, colinas.

Solução:

- a.** Será admitido que densidade de raios para a terra/ km^2/ano será igual a $N_g = 10,6$ raios/ km^2/ano
- b.** Admite-se ainda que o prédio possua um risco total R calculado maior que o risco tolerável R_T , portanto necessário providenciar a instalação de um SPDA.

Interpretação de Resultados:

Como o prédio é residencial, conforme tabela 3, adota-se a classe de SPDA nível III.

Para a proteção de antenas que serão instaladas sobre a caixa d'água, utilizar um captor Franklin, sobre mastro de aço galvanizado, com 4 metros de altura estaiado.

Para a proteção da área da cobertura, utilizar o método das malhas (Faraday) com duas malhas de 10x10m (máximo pela norma 15x15m), sendo que o condutor que realiza a divisão das malhas também é aproveitado para efetuar a conexão do captor Franklin com o anel da gaiola de Faraday. Para constituir o condutor para a gaiola serão utilizadas barras de alumínio 7/8 x 1/8" (de seção superior a 70mm²) fixadas sobre a cobertura do prédio.

Através do perímetro (60m), determina-se a quantidade de descidas: 04 (quatro) descidas. Para as descidas também serão utilizadas barras de alumínio 7/8 x 1/8" (de seção superior a 70mm²), fixadas sobre a alvenaria, com parafusos e buchas, e pintadas na cor da parede. A 15m de altura será também instalado um anel de barras de alumínio 7/8 x 1/8" (de seção superior a 70mm²), que atua como captor para descargas laterais, e para efetuar a equipotencialização das descidas.

Também serão utilizadas as descidas naturais na ferragem de estrutura de concreto das colunas, que estarão conectadas ao anel captor superior, ao anel intermediário e ao anel do aterramento.

O aterramento será realizado utilizando-se como eletrodo um anel de cabo de cobre nú (50mm²), enterrado a 50cm de profundidade, circundando todo o prédio e afastado da estrutura no mínimo de 1 (um) metro. Para conexão dos condutores de descida ao anel de aterramento serão utilizados cabos de cobre nú de 35mm², e a conexão será efetuada em caixas de inspeção de aterramento, em local acessível, de concreto com tampo de ferro. As conexões serão realizadas com solda exotérmica.

6.4 MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO

O método eletrogeométrico, também conhecido como Método da Esfera Rolante ou Esfera Fictícia, é mais uma ferramenta com que contam os projetistas dos SPDA para estruturas. Baseia-se na delimitação do volume de proteção dos captores de SPDA, podendo utilizar hastes, cabos ou mesmo uma combinação destes. A necessidade de um modelo surgiu, inicialmente, para as linhas de transmissão e foi depois simplificado para aplicação em estruturas.

O volume de proteção do método de Franklin é determinado independentemente da intensidade do raio. Este fato sempre intrigou os pesquisadores. Estudos feitos a partir dos registros fotográficos, das medições da forma e do valor da corrente das descargas atmosféricas, dos ensaios em laboratórios e do emprego de técnicas de simulação e modelagem matemática, verificou-se que a zona de proteção é dependente da corrente do raio.

Com base na conceituação da formação de uma descarga atmosférica, o método eletrogeométrico se fundamenta na premissa de uma esfera de raio "Re" com o centro localizado na extremidade da descarga líder antes do seu último salto. Os pontos da superfície da referida esfera são o lugar geométrico que devem ser atingidos por uma descarga atmosférica. As figuras 38 e 39 exemplificam essa conceituação.

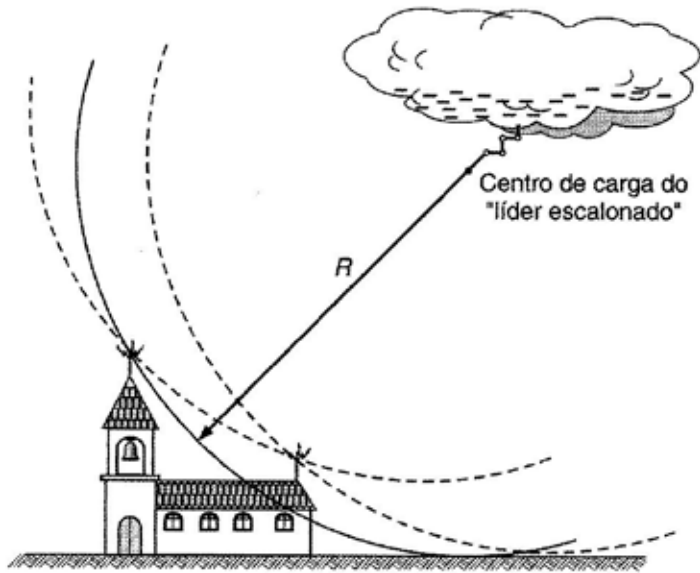


Figura 38 - Determinação da distância do raio da esfera do modelo eletrogeométrico. Fonte: Creder, H. (2016)

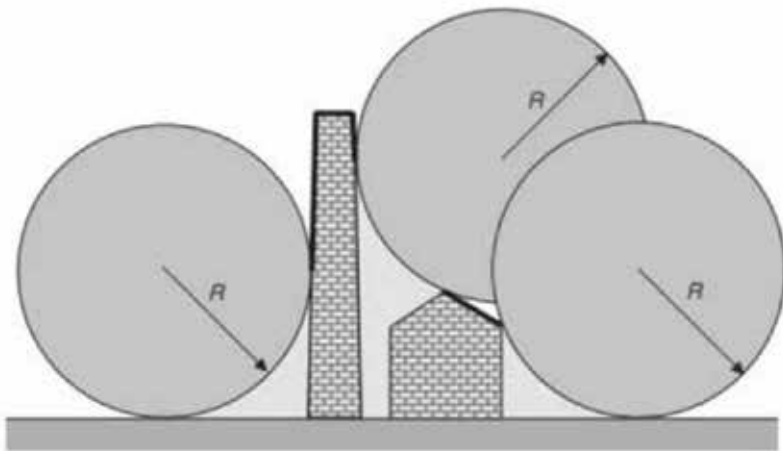


Figura 39 - Posicionamento do subsistema de captação . Fonte: Termotécnica (2003)

A figura 40 indica uma comparação nos volumes de proteção obtidos pelos métodos de Franklin e eletrogeométrico.

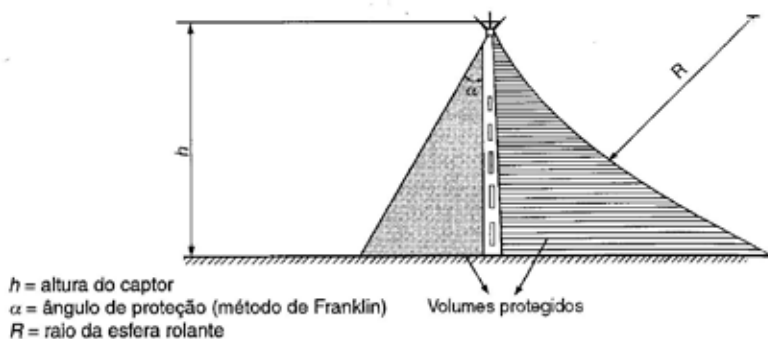


Figura 40 - Volumes de proteção pelo método de Franklin e eletrogeométrico. Fonte: Creder, H. (2016)

O valor de R_e pode ser calculado pela equação (10):

$$R_e = 10 \cdot I_p^{0,65} \quad \text{Eq.(10)}$$

onde:

R_e – raio da esfera rolante em metros;

I_p – corrente de pico mínima do primeiro impulso do raio em kA

(tabela 4, página 25)

A Esfera Rolante é a esfera obtida com raio igual à distância de R_e . Como a intensidade verificada da maioria dos raios para I_p é em média 16 kA, cujo $R_e = 10 \cdot 16^{0,65} = 60,60$ m, pode-se adotar, dentro da perspectiva dos graus de proteção, os raios da esfera rolante obtidos de acordo com tabela 12.

Tabela 12 - Raio da esfera rolante

Classe do SPDA	Raio da Esfera Rolante (m)	Valor de I_p mínima (kA)
I	20	3
II	30	5
III	45	10
IV	60	16

6.4.1 Volume de proteção

É a região subentendida em torno da estrutura, na qual as descargas elétricas que ali incidiriam, tenderiam a fluir para o sistema de proteção, ou seja, é a região realmente protegida.

Este volume é a região em que a esfera rolante não consegue tocar. A esfera é rolada sobre o solo e sobre o sistema de proteção e a região em que ela não tocar é a zona protegida. As figuras 41 e 42 mostram a zona de proteção obtida pela esfera rolante de um sistema de proteção constituído de uma haste. Qualquer estrutura ficará protegida se estiver totalmente contida no volume (ou zona) de proteção.

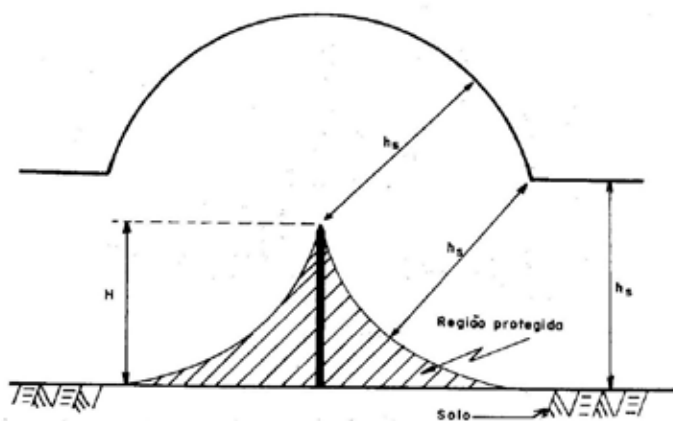


Figura 41 - Volume de proteção para $H < R$. Fonte: Kindermann, G. (2003)

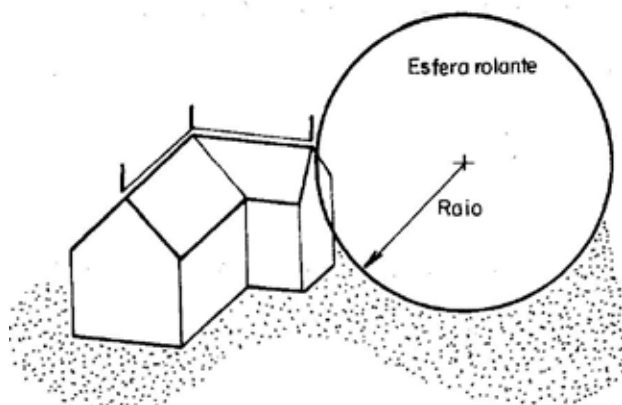


Figura 42 - Proteção para uma casa. Fonte: Kindermann, G. (2003)

Se ao invés de uma haste vertical tivermos um condutor horizontal esticado, dependendo da altura do mesmo, o volume de proteção pode ter vários tamanhos, conforme indicam as figuras 43 e 44.

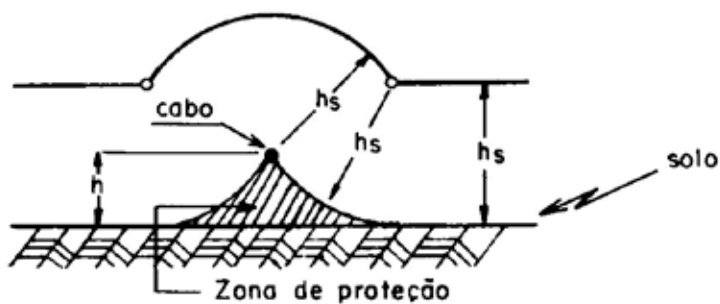


Figura 43 - Condutor esticado. Fonte: Kindermann, G. (2003)

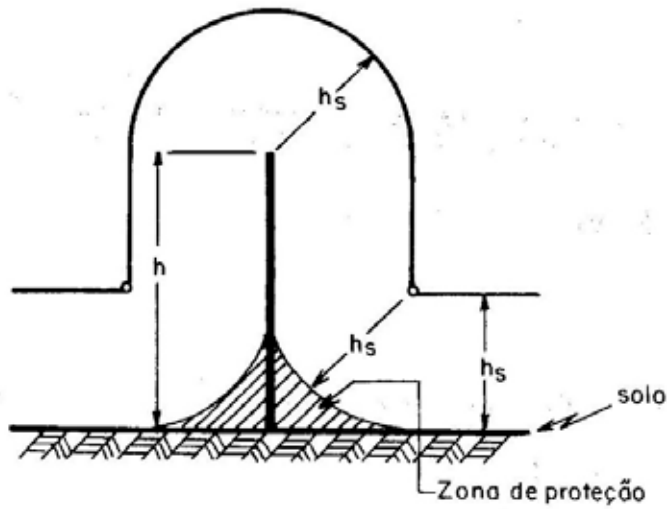


Figura 44 - Condutor esticado muito alto. Fonte: Kindermann, G. (2003)

O método da esfera rolante mostra claramente a pequena zona protegida pela haste muito elevada. Isto evidencia o fato da haste não ser útil para proteger estruturas elevadas, indicada na figura 45. Neste caso, a melhor proteção é a consorciada com a haste de Franklin e Gaiola de Faraday.

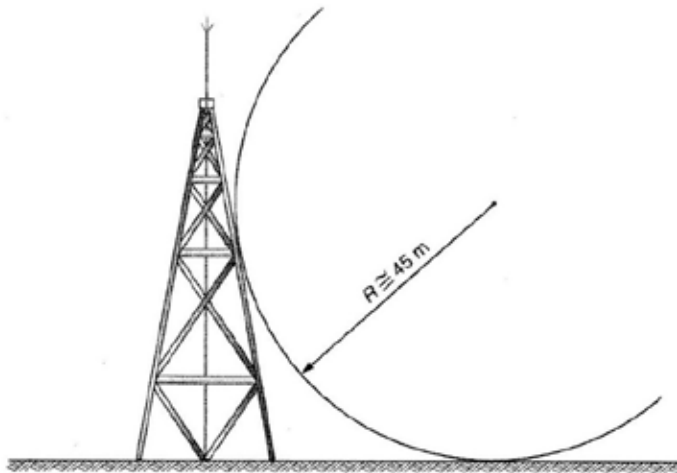


Figura 45 - Volume de proteção para $H > R_e$. Fonte: Creder, H. (2016)

Pode ocorrer impacto direto nas laterais de todas as estruturas com altura maior que o raio R_e da esfera rolante. Cada ponto lateral tocado pela esfera rolante é um ponto possível de ocorrência de impacto direto. Entretanto, a probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas laterais é, geralmente, desprezível para estruturas com altura inferior a 60 m.

Para estruturas superiores a 60m, um maior número de descargas atmosféricas incidirá na cobertura, em especial nos cantos da estrutura e nas extremidades horizontais da periferia. Apenas uma pequena percentagem de todas as descargas atingirá as laterais desta.

Por esta razão, a instalação de captação na lateral da parte superior das estruturas altas, acima de 60m de altura, (tipicamente a 20% do topo da estrutura) deve ser considerada. Neste caso, o método da esfera rolante é aplicado somente para o posicionamento do subsistema de captação na parte superior da estrutura, conforme indicado na figura 46.

A figura 46 mostra os volumes de proteção quando aplicado o método das "esferas rolantes"

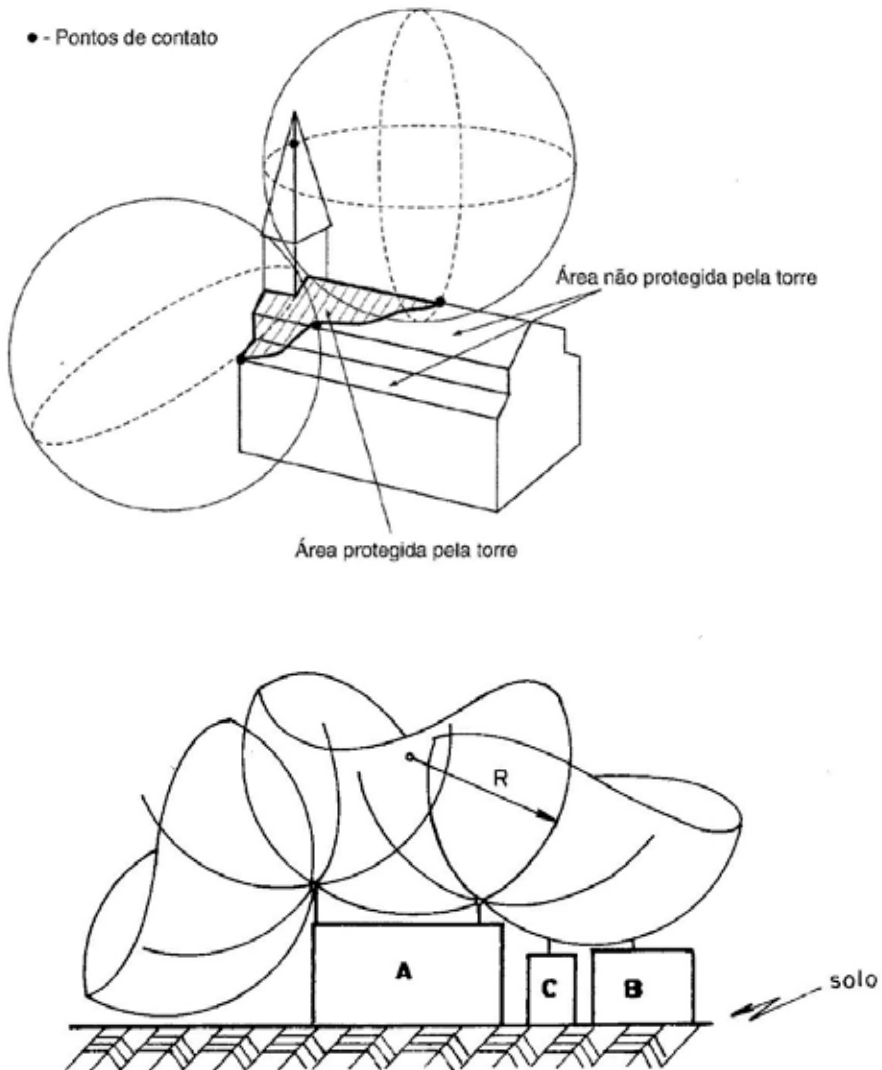


Figura 46 - Exemplos dos volumes de proteção definidos pelas "esferas rolantes" Fonte: Creder, H. (2016)

7.1 RECOMENDAÇÕES GERAIS SOBRE SPDA

Independentemente do método adotado em um projeto de proteção contra descargas atmosféricas devem ser seguidas algumas recomendações básicas, a maioria delas constantes da NBR-5419/2015 e suas partes, e que são as seguintes:

- As edificações com altura superior a 10 metros deverão possuir no subsistema de captação, um condutor periférico em forma de anel, contornando toda a cobertura e afastado no máximo de 0,5m da borda.
- Todas as peças e acessórios de origem ferrosa, usados no SPDA, deverão ser galvanizados a fogo ou banhadas com 254 micrometros de cobre. Fica assim proibida a zincagem eletrolítica.
- Os eletrodos de aterramento devem ser instalados a uma profundidade mínima de 0,5 metros e a uma distância da ordem de 1,0 (um) metro das fundações da estrutura.
- O comprimento mínimo do eletrodo de aterramento é de 5,0 metros.
- Para evitar centelhamentos perigosos e diferenças de potenciais entre os diversos níveis de uma estrutura de grande altura, os condutores de descida externos devem ser interligados por meio de condutores de equipotencialidade horizontais, formando anéis, sendo o primeiro próximo ao nível do solo e os outros a cada 10, 15 e 20 metros de altura, conforme a classe do SPDA.
- Os condutores de descida podem ser instalados externos sobre a estrutura, fixados sobre espaçadores ou embutidos, se a parede não for de material combustível.

- Nos casos onde for impossível a execução do anel de aterramento inferior dentro de valetas, deverá ser feito um anel de equalização a até 4,0 metros acima do nível do solo.
- Os condutores de descida devem ser protegidos mecanicamente por materiais não condutivos e não magnéticos até uma altura de 3,0 metros a partir do solo.
- Os condutores de descida devem manter uma distância mínima de 0,5 metros de portas, janelas e outras aberturas.
- Cada condutor de descida preferencialmente deve ter individualmente o seu elemento de terra, devendo-se proceder à interligação desses eletrodos.
- A instalação de para-raios em ambientes de atmosfera corrosiva implica na utilização de materiais de cobre. Cuidados especiais de proteção devem ser tomados quando os para-raios são instalados no topo de chaminés de grande porte, estruturas contendo líquidos ou gases inflamáveis, antenas externas e guindastes e guias, casos muito comuns nas aplicações práticas.
- Não se deve, em qualquer hipótese, fazer emendas no condutor de descida, exceto por solda exotérmica. Somente é permitida a conexão destinada à medição da resistência de terra no eletrodo, e que deve ficar o mais próximo possível deste (máximo de 1,5 metro).
- É vedada a instalação de eletrodos de terra em fossas sépticas, abaixo de coberturas de concreto, massa asfáltica e revestimentos diversos e em poços de abastecimento de água.

Ressalta-se que essas recomendações são básicas e servem de base para nortear e auxiliar o profissional no desenvolvimento dos projetos de SPDA e não eximem da consulta à Norma e suas partes para entendimento e atendimento às prescrições de segurança necessárias à proteção exigida na estrutura em estudo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5419: Informação e documentação. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas – Parte 1: Princípios gerais. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5419: Informação e documentação. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de risco. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5419: Informação e documentação. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5419: Informação e documentação. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas – Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura. Rio de Janeiro, 2015.

CREDER, Hélio. Instalações Elétricas. 16 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 470p.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. Aterramento elétrico. 5 ed. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 2002. 214p.

KINDERMANN, Geraldo. Descargas atmosféricas. 3 ed. Florianópolis: UFSC-EEL-LABPLAN, 2003. 154p.

LEITE, Carlos Moreira; PEREIRA FILHO, Mário Leite. Técnicas de aterramento. 2 ed. São Paulo: Oficina de Mydia Editora, 1996. 215p.

MODENA, J. Proteção contra raios - História e responsabilidade. Portal do setor elétrico. <<https://www.osetoreletrico.com.br/protECAo-contra-raios/>> Acesso em dezembro 2017.

MOREIRA LEITE, Duílio. Proteção contra descargas atmosféricas. 3 ed. São Paulo: Oficina de Mydia Editora, 1996. 232p.

Pinto Jr O. O setor elétrico e as mudanças climáticas. Ciência Hoje. 2011; 47 (280): 68-69

JFSP - Caderno B6 - Cotidiano em 6 de janeiro de 2018

Sites acessados:

<https://nasa.gov/>

<https://commons.wikimedia.org/>

<https://www.nssl.noaa.gov>

<https://www.osetoreletrico.com.br>

<http://www.inpe.br>

<http://www.abnt.org.br>

<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>



AEASC

apio



CREA-SP