



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CAMPUS CAXIAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

HIGOR BEZERRA DOS SANTOS

**SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA)
EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

Caxias - MA

2026

HIGOR BEZERRA DOS SANTOS

**SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA)
EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Física Licenciatura da Universidade
Estadual do Maranhão para o grau de Licenciado
em Física.

Orientador: Prof. Me. Ricardo Gomes

Caxias - MA

2026

S237s Santos, Higor Bezerra dos

Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) em estruturas metálicas / Higor Bezerra dos Santos. __Caxias: Campus Caxias, 2026.

40f.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Maranhão – Campus Caxias, Curso de Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Me. Ricardo Gomes.

1. Descargas atmosféricas. 2. Eletrostática. 3. Proteção elétrica. 4. Raios. 5. Segurança estrutural. I. Título.

CDU 537.2

Elaborada pelo bibliotecário Wilberth Santos Raiol CRB 13/608

HIGOR BEZERRA DOS SANTOS

**SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA)
EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
junto ao curso de Física da Universidade
Estadual do Maranhão – UEMA para obtenção
de grau de Licenciado em Física.

Aprovado em: 14 de Janeiro de 2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



RICARDO GOMES

Data: 27/01/2026 19:19:37-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Ricardo Gomes (Orientador)

Mestre em Física da Matéria Condensada
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Documento assinado digitalmente



PEDRO HENRIQUE MACEDO BARROS

Data: 27/01/2026 18:57:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Pedro Henrique Macedo Barros (Avaliador Interno)

Mestre em Física da Matéria Condensada
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Documento assinado digitalmente



IURE DA SILVA CARVALHO

Data: 27/01/2026 19:10:16-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Iure da Silva Carvalho (Avaliador Interno)

Doutor em Física da Matéria Condensada
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

A Deus, por ser minha fonte de sabedoria e força nos momentos mais desafiadores. A minha família, por todo o apoio, carinho e incentivo durante minha trajetória acadêmica. Sem vocês, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder saúde, perseverança e discernimento ao longo dessa jornada.

Agradeço profundamente à minha família, pilar fundamental na minha formação pessoal e profissional, pelo amor, paciência e compreensão em todos os momentos.

Ao meu orientador, prof. Me. Ricardo Gomes, pela dedicação, orientação criteriosa e constante incentivo.

Aos professores, funcionários e colegas da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), pela contribuição acadêmica e convívio enriquecedor que me impulsionaram a concluir esta etapa com êxito.

"A imaginação é mais importante que o conhecimento, porque o conhecimento é limitado, ao passo que a imaginação abraça o mundo inteiro, estimulando o progresso, dando à luz à evolução. Ela é, rigorosamente falando, um fator real na pesquisa científica".

Albert Einstein

RESUMO

As descargas atmosféricas constituem fenômenos naturais de elevado potencial destrutivo, sendo responsáveis por danos estruturais, falhas em sistemas elétricos e eletrônicos, interrupções de serviços essenciais e riscos significativos à integridade física de pessoas e animais. Em países de clima tropical, como o Brasil, a elevada incidência de raios torna ainda mais relevante a adoção de medidas eficazes de proteção. Nesse contexto, o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) destaca-se como elemento fundamental para a segurança das edificações. Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia dos SPDA, com base nos critérios técnicos da ABNT NBR 5419:2015, em edificações com estruturas metálicas. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica sistematizada, realizada a partir da seleção de estudos científicos, livros especializados e normas técnicas pertinentes ao tema, permitindo uma análise crítica dos principais aspectos relacionados à proteção contra descargas atmosféricas. Os resultados obtidos evidenciam que a eficiência do SPDA está diretamente relacionada à correta definição do nível de proteção, ao dimensionamento adequado de seus componentes como captores, condutores de descida e sistema de aterramento e à realização de inspeções e manutenções periódicas. A aplicação rigorosa das normas técnicas, aliada ao conhecimento dos princípios da eletrostática e à análise criteriosa dos riscos envolvidos, é indispensável para a mitigação dos efeitos das descargas atmosféricas, contribuindo de forma significativa para a proteção da vida humana, do patrimônio e da continuidade operacional das edificações.

Palavras-chave: descargas atmosféricas; eletrostática; proteção elétrica; raios; segurança estrutural.

ABSTRACT

Lightning discharges are natural phenomena with high destructive potential, capable of causing structural damage, failures in electrical and electronic systems, service interruptions and serious risks to human life. In tropical countries such as Brazil, where lightning incidence is among the highest in the world, the adoption of efficient Lightning Protection Systems (LPS) is essential, especially in buildings with metallic structures. This study aims to evaluate the effectiveness of LPS applied to metallic structures, based on the technical criteria established by ABNT NBR 5419:2015. The methodology consisted of a systematized literature review, including scientific articles, technical standards, books, theses and dissertations published between 2003 and 2025. The analysis focused on risk assessment, protection levels, grounding systems, equipotential bonding, inspection and maintenance procedures. The results indicate that the effectiveness of LPS is directly related to the correct definition of the protection level, proper design of its components and periodic inspections. The strict application of technical standards, combined with knowledge of electrostatic principles, is essential to mitigate the effects of lightning strikes, ensuring the protection of human life, structural integrity and operational continuity of buildings.

Keywords: lightning protection system; lightning discharges; metallic structures; grounding; electrical safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processos de eletrização por atrito, contato e indução.	10
Figura 2 - Representação das Forças entre duas cargas positivas.	12
Figura 3 - Representação das linhas de forças.	13
Figura 4 - Superfícies Gaussianas S , S' , S'' e S'''	14
Figura 5 - Etapas da formação da descarga atmosférica nuvem – solo	16
Figura 6 – Raios descendentes (esquerda) e ascendentes (direita).....	17
Figura 7 - Captor do tipo Franklin	23
Figura 8 - Gaiola de Faraday	24
Figura 9 - Esfera rolante	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nível de proteção e classes de SPDA	22
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas.

SPDA — Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

NBR — Norma Brasileira (ex.: NBR 5419:2015).

LEMP — Lightning Electromagnetic Pulse (Pulso Eletromagnético de Raios).

DPS — Dispositivo de Proteção contra Surtos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	5
3 REFERENCIAL TEÓRICO	8
3.1 Eletricidade	8
3.2 Descarga elétrica atmosférica	16
3.3 Danos causados pelas descargas atmosféricas	18
3.4 Tipos de danos ocasionados pelas descargas atmosféricas	19
3.5 Sistemas de proteção contra descargas elétricas	20
4 MATERIAL E MÉTODOS	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
6 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas, popularmente conhecidas como raios, são um dos fenômenos naturais mais impressionantes e, ao mesmo tempo, mais perigosos da natureza. Resultantes de processos eletrostáticos, na qual acontece uma ruptura da rigidez dielétrica devido a uma diferença de potencial entre dois carregados eletricamente com cargas opostas, sendo formada no interior das nuvens (Tipler; Mosca, 2009; Halliday *et al.*, 2016).

Os raios liberam enormes quantidades de energia em frações de segundos, capazes de gerar impactos devastadores tanto para seres vivos quanto para edificações e sistemas tecnológicos. De acordo com o Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (ELAT/INPE, 2025), o Brasil é o país com maior incidência de descargas atmosféricas do mundo, registrando cerca de 75 milhões de raios por ano, número superior ao de qualquer outra nação. Essa realidade, por si só, já evidencia a relevância de pesquisas que abordem a proteção de estruturas contra esse tipo de fenômeno.

Os efeitos das descargas elétricas no Brasil não se restringem apenas a danos materiais, mas também alcançam dimensões sociais e econômicas preocupantes. Estima-se que milhares de equipamentos eletroeletrônicos sejam danificados anualmente, resultando em prejuízos que ultrapassam bilhões de reais (Saba; Silva, 2025). Além disso, os raios provocam a interrupção de fornecimento de energia elétrica, afetando hospitais, indústrias, escolas e residências, o que pode gerar consequências graves para a segurança e o bem-estar da população. Há também registros de acidentes fatais envolvendo pessoas e animais, o que reforça a necessidade de medidas preventivas cada vez mais eficazes (Almeida *et al.*, 2023).

No contexto urbano e industrial, o problema é ainda mais crítico quando se trata de estruturas metálicas, que, devido às suas propriedades físicas, funcionam como atrativos naturais para a incidência de descargas elétricas (Silva *et al.*, 2024). Isso significa que edificações como fábricas, torres de telecomunicação, centros de armazenamento e até empreendimentos menores, como cervejarias artesanais, estão constantemente expostos a riscos elevados. Nesses ambientes, além do potencial de destruição estrutural, há a possibilidade de perda de equipamentos sensíveis e de interrupção de processos produtivos, o que pode comprometer cadeias inteiras de fornecimento.

Para mitigar esses riscos, foram desenvolvidos os SPDA, que têm como função captar, conduzir e dissipar a energia elétrica gerada pelo raio de forma segura até o solo. Esses sistemas são projetados para preservar a integridade física das construções e proteger vidas humanas,

reduzindo os impactos diretos e indiretos das descargas. No Brasil, a regulamentação que orienta a implementação desses sistemas está consolidada na ABNT NBR 5419:2015, norma que estabelece critérios técnicos e metodológicos para o projeto, instalação, manutenção e análise de risco dos SPDAs (Mattedde, 2021).

A ABNT NBR 5419 teve sua primeira publicação em 1980, sendo posteriormente atualizada em diferentes versões para acompanhar o avanço tecnológico e científico da área. A atualização mais relevante ocorreu em 2015, quando foram introduzidos critérios mais detalhados de análise de risco e metodologias que buscam alinhar a realidade brasileira às práticas internacionais. Desde então, a norma passou a ser referência obrigatória em projetos de engenharia civil e elétrica, assumindo caráter estratégico para a redução de acidentes e perdas patrimoniais (Corrêa Junior *et al.*, 2025). A relevância dessa atualização se deve não apenas ao rigor técnico, mas também à necessidade de se adequar à elevada incidência de raios no Brasil, país que apresenta condições climáticas singulares quando comparado a outras regiões do mundo.

Apesar da existência de um marco regulatório robusto, a prática ainda revela deficiências importantes. Muitos projetos não contemplam integralmente as diretrizes da NBR 5419:2015, seja por desconhecimento técnico, seja por negligência. Além disso, a análise de risco, que deveria ser o ponto de partida de qualquer projeto de SPDA, muitas vezes não é executada com a profundidade necessária, comprometendo a eficácia do sistema. Tal lacuna evidencia um descompasso entre a teoria prescrita pela norma e a aplicação prática nas construções brasileiras.

A problemática que se apresenta, portanto, pode ser assim formulada: até que ponto a ausência de análise de risco detalhada e a aplicação parcial da ABNT NBR 5419:2015 comprometem a eficácia dos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas em edificações metálicas? Essa questão direciona o presente estudo, conferindo-lhe relevância científica e social.

A justificativa para a realização deste estudo repousa na necessidade de aprofundar a compreensão sobre a aplicação prática da NBR 5419:2015, considerando o alto índice de descargas elétricas no Brasil e os danos recorrentes associados à ausência ou inadequação dos SPDAs. Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa busca contribuir com a literatura recente, oferecendo uma análise fundamentada em referências atualizadas que possam apoiar novos estudos e projetos na área. Do ponto de vista social e econômico, objetiva-se reforçar a

importância da adoção de medidas preventivas que preservem vidas, patrimônios e serviços essenciais.

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficácia dos SPDA, com base nos critérios técnicos da ABNT NBR 5419:2015, em edificações com estruturas metálicas. Como objetivos específicos têm-se: apresentar os conceitos fundamentais sobre descargas atmosféricas e princípios da eletrostática; discutir os danos provocados por raios em edificações e os principais riscos associados; analisar os subsistemas que compõem o SPDA e sua função específica; estudar as diretrizes da NBR 5419:2015 e sua importância para a segurança estrutural; e avaliar com base na literatura, a aplicabilidade e eficácia dos SPDAs em estruturas metálicas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os principais fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são discutidos os conceitos básicos da eletrostática, abordando os processos de eletrização, a estrutura da matéria e o comportamento das cargas elétricas. Em seguida, são apresentados os princípios físicos associados às descargas atmosféricas, destacando-se os mecanismos de formação dos raios e seus efeitos sobre o meio ambiente e as edificações.

Posteriormente, discute-se o SPDA, com ênfase em sua finalidade, componentes e importância para a segurança estrutural. Por fim, são analisadas as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 5419, que orientam o projeto, a execução e a manutenção dos SPDA, fornecendo o embasamento normativo necessário para a compreensão do tema.

3.1 Eletricidade

A história da eletricidade remonta à Antiguidade, quando Tales de Mileto (cerca de 600 a.C.) observou que o âmbar, ao ser friccionado, adquiria a capacidade de atrair pequenos objetos, como palha ou sementes. Esse fenômeno, posteriormente denominado eletrização por atrito, é considerado um dos primeiros registros do estudo empírico das interações elétricas (Rocha, 2002; Chaves, 2012).

Durante o século XVII, o médico e físico inglês William Gilbert publicou *De Magnete* (1600), no qual utilizou pela primeira vez o termo “eletricidade” e sistematizou observações sobre forças elétricas e magnéticas. Pouco depois, o cientista inglês Stephen Gray contribuiu com descobertas fundamentais ao diferenciar materiais condutores e isolantes, estabelecendo bases para o entendimento das propriedades dos materiais (Boss *et al.*, 2012).

No século XVIII, o americano Benjamin Franklin realizou experimentos notáveis, entre eles a famosa experiência da pipa durante uma tempestade (1752), que lhe permitiu demonstrar a natureza elétrica dos raios. Franklin também foi o idealizador do para-raios, primeira aplicação prática de proteção contra descargas atmosféricas. Nesse mesmo período, o físico francês Charles-Augustin de Coulomb desenvolveu, em 1785, a Lei de Coulomb, que descreve quantitativamente a força de atração e repulsão entre cargas elétricas, marco essencial para a eletrostática (Ferreira, 2015).

Já no início do século XIX, o físico italiano Alessandro Volta construiu a pilha voltaica (1800), primeiro dispositivo capaz de gerar corrente elétrica contínua. A invenção de Volta foi decisiva para o desenvolvimento posterior do eletromagnetismo e para a aplicação da eletricidade em dispositivos tecnológicos. Paralelamente, cientistas como Michael Faraday (1852) e, posteriormente, James Clerk Maxwell (1865) expandiram o entendimento das forças elétricas e magnéticas, estabelecendo os fundamentos da teoria eletromagnética moderna (Rocha, 2002). Esse percurso histórico, que vai das observações empíricas da Antiguidade às formulações teóricas e aplicações práticas da Idade Moderna, demonstra como a eletricidade deixou de ser um fenômeno curioso para tornar-se um dos pilares da ciência contemporânea.

Com o desenvolvimento da física moderna, compreendeu-se que a carga elétrica é uma propriedade intrínseca das partículas subatômicas que compõem a matéria. Segundo Tipler e Mosca (2009), essas cargas são classificadas como positivas, associadas aos prótons, e negativas, associadas aos elétrons. Os prótons estão localizados no núcleo do átomo, enquanto os elétrons se encontram distribuídos ao redor desse núcleo em regiões de probabilidade. Já os nêutrons, também presentes no núcleo, não possuem carga elétrica, sendo caracterizados como partículas eletricamente neutras (Tipler; Mosca, 2009).

Os materiais condutores, como os metais, permitem o livre deslocamento das cargas elétricas, enquanto os isolantes, como o vidro e o plástico, dificultam essa movimentação (Halliday *et al.*, 2016). Stephen Gray foi um dos primeiros estudiosos a diferenciar condutores e isolantes em suas pesquisas experimentais (Boss *et al.*, 2012). Essa classificação é importante para entendermos a aplicação prática dos materiais no cotidiano e em tecnologias eletrônicas (Helerbrock, 2024; Freitas *et al.*, 2024).

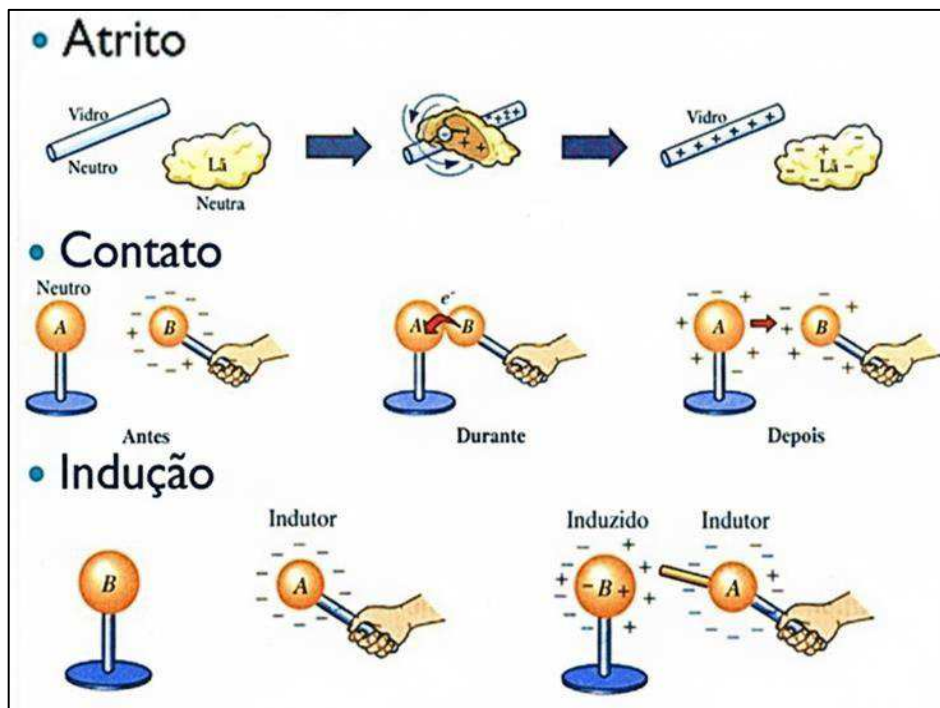
A identificação das cargas elétricas e a classificação dos materiais quanto à sua capacidade de conduzir ou isolar eletricidade são pilares fundamentais para o entendimento das aplicações tecnológicas atuais. Esses conceitos permitem explicar, por exemplo, o funcionamento dos dispositivos eletrônicos que usamos diariamente, além de garantirem segurança na manipulação de circuitos e equipamentos elétricos (Tipler; Mosca, 2009; Halliday *et al.*, 2016).

A eletrização é um processo físico pelo qual um corpo adquire carga elétrica, podendo ocorrer de três formas principais: por atrito, por contato e por indução. Segundo Tipler e Mosca (2009), qualquer corpo, independentemente de sua simetria, pode ser eletrizado desde que exista um meio que possibilite o desequilíbrio entre prótons e elétrons. A eletrização por atrito ocorre quando dois corpos neutros, constituídos de materiais diferentes, são esfregados entre si,

promovendo a transferência de elétrons do material com maior tendência à perda para aquele com maior afinidade eletrônica. Esse fenômeno ocorre porque apenas os elétrons apresentam mobilidade suficiente para se deslocarem entre os corpos, enquanto os prótons permanecem fixos no núcleo atômico (Halliday *et al.*, 2016).

Além disso, os processos de eletrização por contato e por indução também envolvem a redistribuição de cargas elétricas, sendo fundamentais para a compreensão do comportamento eletrostático dos materiais. A Figura 1 ilustra de forma esquemática os três processos de eletrização, atrito, contato e indução evidenciando as diferenças no mecanismo de transferência e redistribuição das cargas elétricas em cada situação, contribuindo para a visualização e compreensão dos conceitos discutidos.

Figura 1 - Processos de eletrização por atrito, contato e indução.



Fonte: Gestão Educacional, 2019.

A eletrização por contato ocorre quando um corpo previamente eletrizada encosta em um corpo neutro, possibilitando a redistribuição das cargas elétricas entre eles. Essa forma de eletrização é mais eficiente entre materiais condutores, nos quais os elétrons se movem com mais facilidade. De acordo com Halliday *et al.* (2016), após o contato, os corpos tendem a atingir um equilíbrio eletrostático, o que significa que eles compartilham a carga total de forma proporcional.

Por fim, a eletrização por indução ocorre sem a necessidade de contato direto entre os corpos. Nesse processo, um corpo eletricamente carregado, denominado indutor, é aproximado de um corpo neutro, chamado induzido, provocando a redistribuição das cargas elétricas em seu interior. A região do corpo induzido mais próxima ao indutor passa a apresentar carga de sinal oposto, enquanto a extremidade mais afastada adquire carga de mesmo sinal. Para que o corpo induzido permaneça eletrizado após a retirada do indutor, torna-se necessário o aterramento, permitindo o escoamento ou a entrada de cargas elétricas. Esse fenômeno evidencia a ação à distância dos campos elétricos, uma característica fundamental da eletrostática, amplamente discutida na literatura da física clássica, que destaca o papel do campo eletrostático na organização e no comportamento das cargas elétricas (Griffiths, 2011; Tipler; Mosca, 2009; Nussenzveig, 2015).

O fato de existir cargas em determinados pontos do espaço é suficiente para surgir uma força, de natureza elétrica, que é capaz de ocorrer atração ou repulsão entre estas cargas (Asth, 2024). Com isso, a força elétrica de ação mútua entre duas cargas elétricas puntiformes tem intensidade diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa (Asth, 2024).

A força elétrica entre duas cargas é uma interação fundamental descrita pela Lei de Coulomb, formulada por Charles-Augustin de Coulomb em 1785. Essa lei estabelece que duas cargas elétricas puntiformes exercem forças entre si que podem ser de atração (cargas de sinais opostos) ou de repulsão (cargas de mesmo sinal). A intensidade da força é diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa, conforme a equação 1 (Coulomb, 1785; Halliday *et al.*, 2016).

$$F = k \cdot \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (1)$$

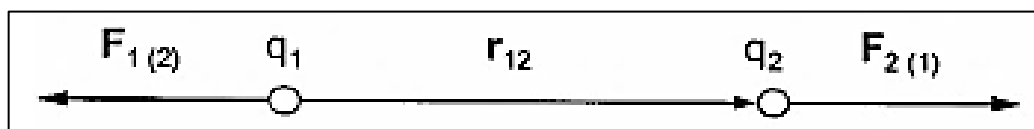
F é a força elétrica (Newton – N), q_1 e q_2 são as cargas elétricas (Coulomb – C), r é a distância entre as cargas (metro – m), k é a constante eletrostática no vácuo ($\approx 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$).

Essa força possui caráter vetorial, apresentando direção, intensidade e sentido. A Figura 2 mostra duas cargas positivas, q_1 e q_2 , separadas por uma distância r_{12} . As setas indicam que ambas sofrem forças de repulsão: $F_1(2)$ atua sobre q_1 devido a q_2 , enquanto $F_2(1)$ atua sobre q_2 devido a q_1 . As forças têm mesma intensidade e sentidos opostos, em conformidade com a terceira lei de Newton (Nussenzveig, 2015).

Conforme Nussenzveig (2015), a força elétrica possui caráter vetorial, ou seja, apresenta direção, intensidade e sentido. A Figura 2 ilustra duas cargas elétricas positivas, q_1 e q_2 ,

separadas por uma distância r_{12} . As setas indicam que ambas sofrem forças de repulsão: $F_{1(2)}$ atua sobre a carga q_1 devido a q_2 , enquanto $F_{2(1)}$ atua sobre a carga q_2 devido a q_1 . Essas forças possuem a mesma intensidade e sentidos opostos, em conformidade com a terceira lei de Newton (ação e reação).

Figura 2 - Representação das Forças entre duas cargas positivas.



Fonte: Nussenzveig, 2015.

q_1 é a primeira carga elétrica (positiva), q_2 é a segunda carga elétrica (positiva), r_{12} é a distância entre as duas cargas, $F_{1(2)}$ é a força que q_2 exerce sobre q_1 , apontando para a esquerda (repulsão), $F_{2(1)}$ é a força que q_1 exerce sobre q_2 , apontando para a direita (repulsão).

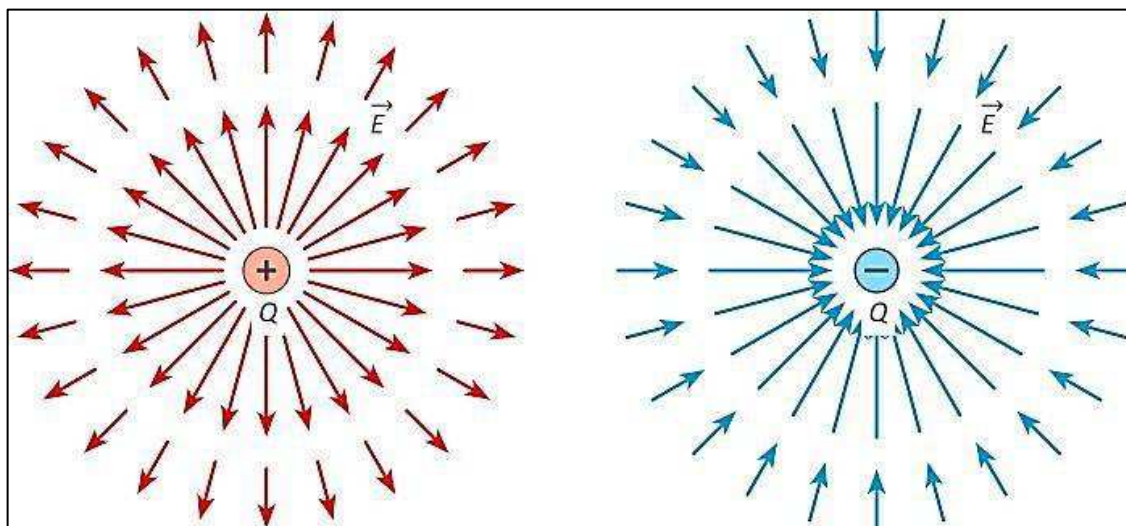
Outro ponto importante é o fato de que a força elétrica decresce com o quadrado da distância, como destaca Helerbrock (2024), o que significa que seu valor diminui rapidamente à medida que as cargas se afastam. Tal comportamento é típico das forças de campo de longo alcance, tal qual a lei da gravitação universal de Isaac Newton. Contudo, no contexto eletrostático, a intensidade da interação pode ser muito mais forte do que a gravitacional, especialmente quando as cargas elétricas envolvidas possuem valores elevados e estão separadas por pequenas distâncias, uma vez que a constante eletrostática apresenta magnitude significativamente maior que a constante gravitacional (Tipler; Mosca, 2009; Nussenzveig, 2015).

Duas cargas elétricas interagem por meio de uma força de natureza elétrica, capaz de provocar atração ou repulsão, dependendo do sinal de suas cargas. Ao se abordar esse fenômeno por outra perspectiva, considera-se uma das cargas como carga geradora e a outra como carga de prova. Essa abordagem permite a definição de uma nova grandeza física fundamental: o campo elétrico. Trata-se de um campo vetorial, o que significa que, em cada ponto do espaço onde atua, está associado a um vetor com direção, sentido e intensidade definidos (Ferreira, 2015; Halliday *et al.*, 2016).

O campo elétrico é definido como uma grandeza física associada à presença de corpos eletricamente carregados, independentemente de a carga ser positiva ou negativa, sendo responsável por descrever a influência que essas cargas exercem no espaço ao seu redor. Historicamente, esse conceito foi introduzido por Michael Faraday no século XIX, ao propor a ideia de linhas de força como um recurso conceitual para a visualização da ação das cargas

elétricas no espaço (Griffiths, 2011; Halliday *et al.*, 2016). Essas linhas representam o comportamento do campo elétrico e indicam a trajetória que uma carga de prova seguiria ao ser colocada nesse campo (Griffiths, 2011), conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3 - Representação das linhas de forças.



Fonte: Halliday *et al.*, 2016.

Para cargas positivas as linhas de campo são de afastamento e para cargas negativas as linhas de campo são de aproximação. A equação 2 define matematicamente o campo elétrico como:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{r^2}\right) \vec{r} \quad (2)$$

$\vec{E}$ é o vetor campo elétrico (N/C) indicando a direção e sentido da força elétrica em um ponto no espaço, $\vec{F}$ é a força elétrica que atua sobre a carga de prova q , q é a carga de prova usada para medir o campo elétrico (em C), Q é a carga fonte ou seja, a carga que gera o campo (em C), $\vec{r}$ é a distância entre a carga fonte Q e o ponto onde o campo está sendo calculado, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo.

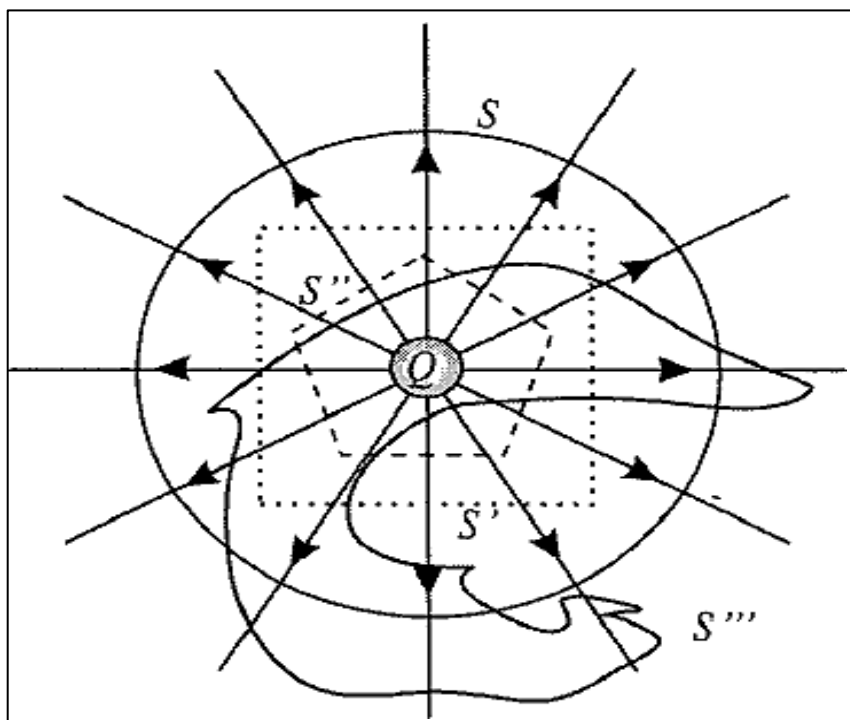
O campo elétrico pode ser determinado para diferentes distribuições espaciais de carga, sejam elas lineares, superficiais ou volumétricas. Isso significa que é possível calcular o campo gerado por fios condutores, discos, esferas ou anéis, cada um com sua geometria específica e implicações no comportamento do campo elétrico (Tipler; Mosca, 2009; Halliday *et al.*, 2016). Um dos conceitos fundamentais dessa abordagem é a utilização da superfície gaussiana, definida como uma superfície fechada arbitrária que envolve uma ou mais cargas elétricas,

escolhida de acordo com a simetria do sistema, com a finalidade de simplificar a análise do campo elétrico por meio da Lei de Gauss (Ferreira, 2015).

De acordo com a Lei de Gauss, o fluxo do campo elétrico por meio dessa superfície é proporcional à carga elétrica total contida em seu interior. Isso implica que quanto maior a quantidade de linhas de campo que atravessam a superfície gaussiana, maior será o fluxo elétrico observado (Griffiths, 2011). A figura 4 ilustra essa ideia: a superfície que envolve uma carga gera mais linhas de campo atravessando sua área, em comparação com aquelas que não envolvem carga ou a envolvem parcialmente.

A figura 4 demonstra quatro superfícies Gaussianas distintas, S , S' , S'' e S''' , representadas como superfícies fechadas envolvidas por linhas de campo elétrico. Essas superfícies são utilizadas na aplicação da Lei de Gauss, que estabelece uma relação direta entre o campo elétrico e a carga elétrica total contida no interior de uma superfície fechada (Griffiths, 2011; Tipler e Mosca, 2009).

Figura 4 - Superfícies Gaussianas S , S' , S'' e S''' .



Fonte: Machado (2000)

O fluxo é negativo quando se tem mais linhas de campo entrando. Para calcular o fluxo do campo elétrico utiliza-se a Equação 3:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{env}}{\epsilon_0}. \quad (3)$$

Φ_E - fluxo elétrico total que atravessa a superfície fechada, $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$ - Integral de superfície fechada do produto escalar entre o vetor campo elétrico e o vetor de área infinitesimal $d\vec{A}$, q_{env} - Carga total envolvida (interna) pela superfície Gaussiana, ϵ_0 - Permissividade elétrica do vácuo, constante igual a $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$.

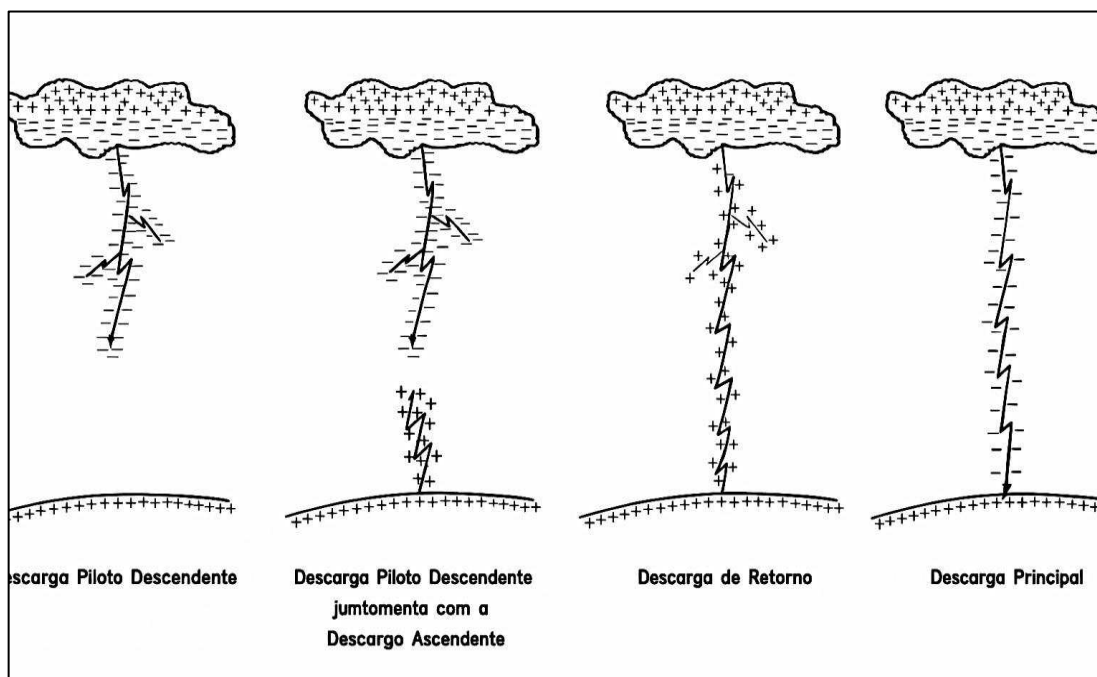
A carga interna envolvida desempenha um papel fundamental na definição do fluxo. Além disso, por meio da equação da Lei de Gauss, é possível isolar o campo elétrico no lado esquerdo da equação, permitindo seu cálculo de forma direta. A integral utilizada é uma integral de superfície fechada (Halliday *et al.*, 2016), o que indica que a análise é realizada considerando todos os pontos da superfície que envolve a carga.

3.2 Descarga elétrica atmosférica

As descargas elétricas atmosféricas são um tipo de descargas que podem ocorrer entre nuvens ou entre nuvem e terra consistindo em impulsos elétricos denominados raios. Além disso, são ocorrências típicas da natureza e suas características são totalmente imprevisíveis em especial quanto ao local a serem atingidos, intensidade da descarga elétrica e o período de duração do evento (Lima e Gomes, 2009).

Para que ocorra a formação de um raio, é necessário que haja acúmulo de cargas elétricas opostas entre a nuvem e o solo (Santos e Poy, 2016), conforme representado na Figura 5. Essa diferença de potencial é o que gera as descargas atmosféricas, que podem ser classificadas em dois tipos principais: descargas entre nuvem e solo e descargas entre nuvens.

Figura 5 - Etapas da formação da descarga atmosférica nuvem – solo.



Fonte: Cruz, 2010.

Compreende-se, portanto, que as descargas elétricas surgem a partir de uma diferença de cargas elétricas na atmosfera, resultante da interação entre cargas negativas acumuladas na base das nuvens e cargas positivas induzidas na superfície terrestre, originando uma corrente elétrica intensa e repentina que se manifesta visualmente na forma do raio (Rakov; Uman, 2003).

Essas descargas possuem corrente elétrica de curta duração, mas que varia rapidamente, o que provoca distúrbios eletromagnéticos no ambiente (Silva, 2018). Por isso, são eventos que oferecem riscos à segurança de pessoas e estruturas, exigindo atenção especial no contexto do gerenciamento de riscos, sobretudo em relação à proteção de seres vivos.

Conforme as classificações da ABNT NBR 5419-1:2015, as descargas atmosféricas podem ser divididas em dois tipos: descendentes e ascendentes. As descargas descendentes ocorrem no trajeto da nuvem para o solo e são mais frequentes em áreas planas ou com estruturas mais baixas. Já as descargas ascendentes seguem o caminho contrário, do solo para a nuvem, e geralmente partem de estruturas elevadas, como torres e edifícios altos, que favorecem a indução elétrica. Esse processo está ilustrado a figura 6.

Figura 6 – Raios descendentes (esquerda) e ascendentes (direita)



Fonte: Saba; Silva, 2025.

Filho (2017) menciona que as descargas descendentes podem se ramificar em diversas direções à medida que se propagam, criando novas descargas conhecidas como "líderes escalonados". Já as descargas ascendentes têm início em estruturas elevadas e surgem devido à carga elétrica induzida nessas superfícies, sendo comuns em locais com para-raios ou antenas.

Compreende-se que os raios descendentes não seguem um único caminho retilíneo, mas podem se dividir em várias direções durante o seu percurso até o solo, formando ramificações elétricas conhecidas como líderes escalonados. Esses líderes se propagam em etapas de dezenas de metros, com pausas de microssegundos entre elas, e são responsáveis pela formação de canais tortuosos que aumentam a área de alcance da descarga elétrica, tornando os raios ainda mais perigosos (ELAT/INPE, 2025). A propagação dessas ramificações é influenciada por variações no campo elétrico atmosférico, o que pode gerar múltiplos caminhos até o solo (Matos e Leal, 2021).

Por outro lado, as descargas ascendentes ocorrem de forma oposta: elas partem de estruturas altas, como torres e para-raios, e se dirigem em direção à nuvem. Esse fenômeno é induzido por descargas descendentes positivas que deixam um saldo de carga negativa na nuvem, o que pode provocar a indução de carga positiva na ponta das estruturas elevadas. Se essa carga for suficientemente intensa, pode iniciar uma descarga ascendente, formando o chamado raio "invertido" (Schumann *et al.*, 2019).

Estruturas com mais de 70 metros de altura são especialmente suscetíveis à ocorrência de descargas atmosféricas ascendentes. Isso ocorre porque, durante tempestades, essas estruturas acumulam carga elétrica induzida em seus pontos mais altos, o que favorece a formação de raios que partem do solo em direção às nuvens. Em outubro de 2012, pesquisadores do Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais registraram a ocorrência de nove raios ascendentes em um intervalo de apenas 37 minutos, todos originados a partir de torres de telecomunicação instaladas no Pico do Jaraguá, evidenciando a elevada incidência desse tipo de descarga em estruturas altas localizadas em regiões de grande atividade elétrica (ELAT/INPE, 2015).

Esse padrão de repetição em um mesmo ponto de origem representa um desafio para os sistemas de proteção convencionais, que são projetados principalmente para lidar com raios descendentes. A norma brasileira ABNT NBR 5419 estabelece diretrizes para o SPDA, que inclui captores, condutores de descida e aterramento (ABNT, 2015). O objetivo é conduzir a corrente elétrica de forma segura até o solo, protegendo tanto as estruturas quanto as pessoas.

3.3 Danos causados pelas descargas atmosféricas

Até o momento já se sabe que as descargas elétricas são bastante prejudiciais e podem causar danos irreparáveis para tudo que está dentro ou próximo a ela (Rakov e Uman, 2003; ABNT, 2015). Segundo a norma NBR 5419-1 (ABNT, 2015), devem-se levar em consideração as principais características das estruturas para os efeitos das descargas atmosféricas:

- a) tipo de construção (madeira, alvenaria, concreto, concreto armado, estruturas de aço);
- tipo de função (residencial, comercial, reunião de público, fábrica, hotel, escolar, hospital, museu etc.);
- b) ocupantes e conteúdo (pessoas e animais, presença de materiais inflamáveis ou explosivos, sistemas elétricos e eletrônicos);
- c) linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram a estrutura (linhas de energia, linhas de TV a cabo, telefonia, tubulações);
- d) medidas de proteção existentes ou fornecidas (medidas de proteção para reduzir danos físicos e risco à vida, medidas de proteção para reduzir falhas em sistemas internos);
- e) dimensão do risco (estruturas com limitações nas saídas de emergência ou estruturas com grande afluência de público causando pânico na evacuação, estruturas perigosas às redondezas, estrutura perigosa ao ambiente, por exemplo, fábricas de matérias tóxicas).

Entende-se que as descargas elétricas atmosféricas apresentam grande variabilidade, ou seja, não seguem um padrão fixo quanto à forma, intensidade ou direção (Beckhauser, 2016). Por isso, nenhum sistema de proteção é totalmente eficaz contra todos os tipos de raios. Mesmo os sistemas mais modernos e avançados conseguem reduzir significativamente os riscos, mas ainda assim deixam uma pequena margem de vulnerabilidade cerca de 2%, evidenciando a complexidade e o poder imprevisível desses fenômenos.

3.4 Tipos de danos ocasionados pelas descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas, além de representarem um fenômeno natural de grande impacto visual, estão entre as principais causas de danos estruturais, falhas em sistemas eletrônicos e riscos à vida humana. A norma NBR 5419-1 (ABNT, 2015) destaca a importância de se identificar o tipo de dano causado em edificações e sistemas, principalmente em razão das tensões induzidas pelo impulso eletromagnético gerado pelos raios (LEMP – *Lightning Electromagnetic Pulse*).

Esses danos são classificados da seguinte forma:

- D1 – Danos a pessoas devido ao choque elétrico, que podem ocorrer por contato direto ou indireto com estruturas energizadas;
- D2 – Danos físicos e mecânicos, como incêndios, explosões, quebra de telhados ou estruturas atingidas diretamente;
- D3 – Danos causados por falhas ou destruição de equipamentos eletrônicos e de comunicação, devido ao LEMP;

A norma também categoriza os tipos de perdas associadas:

- L1 – Perda de vidas humanas ou danos permanentes à saúde;
- L2 – Perda ou interrupção de serviços públicos essenciais, como energia elétrica, telecomunicações, água e saneamento;
- L3 – Perda de patrimônio cultural, como arquivos históricos, museus e igrejas antigas;
- L4 – Perda de valores econômicos, como prejuízos com a parada de atividades produtivas ou comerciais.

Além disso, os efeitos de uma descarga atmosférica podem se propagar por meio de estruturas metálicas e sistemas elétricos, atingindo dispositivos sensíveis mesmo à distância, e causando danos severos a computadores, sistemas de controle industrial e redes de dados (Rakov e Uman, 2003). Essa característica torna o raio um fenômeno não apenas destrutivo

localmente, mas também de alto impacto indireto, afetando o funcionamento de edifícios inteiros, especialmente aqueles sem um sistema eficiente de proteção contra surtos.

Os danos materiais mais comuns envolvem curto-circuito de equipamentos, queima de circuitos integrados, queda de sistemas de segurança (como CFTV) e desligamentos repentinos de servidores, o que compromete a segurança, a operação e a produtividade de ambientes corporativos e públicos (Almeida *et al.*, 2013). Portanto, conhecer os tipos de danos potenciais causados por descargas atmosféricas é essencial para a elaboração de projetos de proteção eficaz, envolvendo para-raios, sistemas de aterramento, proteção contra surtos (DPS) e blindagem eletromagnética em instalações sensíveis.

3.5 Sistemas de proteção contra descargas elétricas

O Brasil, por estar situado em uma zona tropical, apresenta uma das maiores incidências de raios do mundo. Essa condição climática favorece a formação de grandes massas de nuvens convectivas, especialmente durante o período chuvoso, resultando em elevados índices de descargas atmosféricas em praticamente todo o território nacional. Diante desse cenário, torna-se indispensável a adoção de SPDA, capazes de minimizar os riscos à vida humana, às edificações e aos equipamentos eletrônicos sensíveis (Pompeu *et al.*, 2017).

Santos e Poy (2016) destacam que a implantação de sistemas de proteção deve considerar a diversidade de situações e ambientes, garantindo segurança e eficiência mesmo diante de eventos extremos. A principal função desses sistemas é proteger as estruturas contra os efeitos destrutivos das descargas, como incêndios, danos materiais e interrupções nos serviços essenciais.

Para viabilizar a implantação de um SPDA, é imprescindível realizar uma análise detalhada do Mapa Isoceráunico, que indica o número médio anual de dias com ocorrência de trovoadas em uma determinada região (Zurita Álvarez, 2020). Essa ferramenta permite estimar a densidade de descargas atmosféricas e, conseqüentemente, avaliar o grau de exposição de uma estrutura aos raios. A partir desses dados, é possível determinar a necessidade e o nível de proteção adequado para cada edificação (ABNT, 2015).

É importante ressaltar que, embora os mapas e modelos meteorológicos forneçam estimativas confiáveis, variações climáticas e fenômenos naturais imprevisíveis podem alterar significativamente o comportamento das descargas em determinadas áreas (Martins, 2017).

A segurança de uma edificação frente às descargas atmosféricas depende diretamente

da correta concepção, dimensionamento e execução do SPDA, uma vez que falhas em qualquer uma de suas etapas podem comprometer a integridade da estrutura, das pessoas e dos equipamentos presentes (Filho, 2017). Dessa forma, torna-se essencial que todos os componentes do sistema como captadores, condutores de descida, sistema de aterramento e equipotencialização sejam projetados de maneira integrada, assegurando uma proteção contínua e duradoura contra os efeitos das descargas elétricas naturais.

De acordo com a ABNT NBR 5419-1 (2015), o SPDA tem como principal finalidade a proteção contra os efeitos primários das descargas atmosféricas, ou seja, aqueles associados ao impacto direto do raio sobre a estrutura. Complementarmente, a ABNT NBR 5419-3 (2015) estabelece os critérios construtivos e define os níveis de proteção aos quais os sistemas de SPDA podem ser projetados, considerando o grau de risco associado à edificação, sua ocupação, localização e consequências de uma eventual descarga.

Os níveis de proteção são classificados de I a IV, conforme apresentado na Tabela 1, sendo o Nível I o mais rigoroso e o Nível IV o menos exigente. O Nível de Proteção I é destinado a estruturas que demandam maior segurança, como instalações com elevado risco à vida humana, patrimônio de alto valor ou grande concentração de pessoas, exigindo critérios mais restritivos de projeto e maior eficiência na captação e condução da descarga. Já os níveis II e III correspondem a graus intermediários de proteção, aplicáveis à maioria das edificações usuais. Por fim, o Nível IV é indicado para estruturas com menor risco associado, onde as exigências de proteção são menos severas.

Cada nível de proteção está diretamente relacionado a uma classe de SPDA, conforme estabelecido pela norma, de modo que o nível escolhido determina parâmetros como espaçamento entre captadores, distância entre condutores de descida e características do sistema de aterramento. Assim, a correta definição do nível de proteção, conforme a análise de risco, é fundamental para garantir que o SPDA seja tecnicamente adequado e compatível com as características da edificação protegida, conforme sintetizado na Tabela 1.

Tabela 1 - Nível de proteção e classes de SPDA

NÍVEL DE PROTEÇÃO	CLASSE DE SPDA
I	I
II	II
III	III
IV	IV

Fonte: ABNT NBR 5419-1 (2015)

Faz-se necessário o uso de cálculos que englobem o valor aproximado e a intensidade do raio atingido, sendo que a maior parte de energia liberada por essas descargas fica dispersas no ar, sendo convertida em energia térmica e eletromagnética por exemplo (ABNT, 2015). A Equação 4 é feita para o formato das ondas das correntes das descargas atmosféricas, sejam eles por impulsos positivos e negativos na sequência.

$$i(t) = \frac{I}{k} \frac{(t/T_1)^{10}}{1+(t/T_1)^{10}} e^{-t/T_2} \quad (4)$$

I é o valor de pico da corrente, k é o fator de correção para o valor de pico de corrente, t é o tempo, T_1 é a constante de tempo de frente, T_2 é a constante de tempo decaída.

Conforme a NBR 5419:2015 para se executar um projeto de SPDA para uma estrutura qualquer, devemos primeiramente verificar a real necessidade de sua implantação, sendo necessário classificá-la de forma mais completa possível, tal como finalidade da edificação, localização, características do seu entorno, materiais constituintes de sua construção entre outros (Lopes; Antunes, 2019).

Segundo Mattede (2021) os três principais métodos de captação utilizados nos SPDA — gaiola de Faraday, método de Franklin e esfera rolante requerem, de forma complementar, a implementação de uma malha de aterramento eficiente. Essa malha é composta por hastes e condutores interligados, cuja função é garantir a dissipação segura da corrente elétrica proveniente das descargas atmosféricas para o solo. O dimensionamento dessa malha depende de diversos fatores, como a resistividade elétrica do solo, a altura da edificação e a área total construída. Quanto maiores forem esses parâmetros, maior será a necessidade de hastes de aterramento para assegurar a eficácia do sistema e a segurança das instalações.

Alves e Xavier (2016) descrevem que o modelo de Franklin, mostrado na Figura 7, é o mais usado nas estruturas atualmente e tem intuito de criação de um meio que absorva o índice elevado de descargas elétricas, protegendo as pessoas, instalações e estruturas em geral que possam ser acometidas. Dessa forma, como modelo de para-raios é um dos mais utilizados e atua como limitador de tensão, mantendo valores de tensão acima do permitido para a total segurança dos equipamentos.

Figura 7 - Captor do tipo Franklin

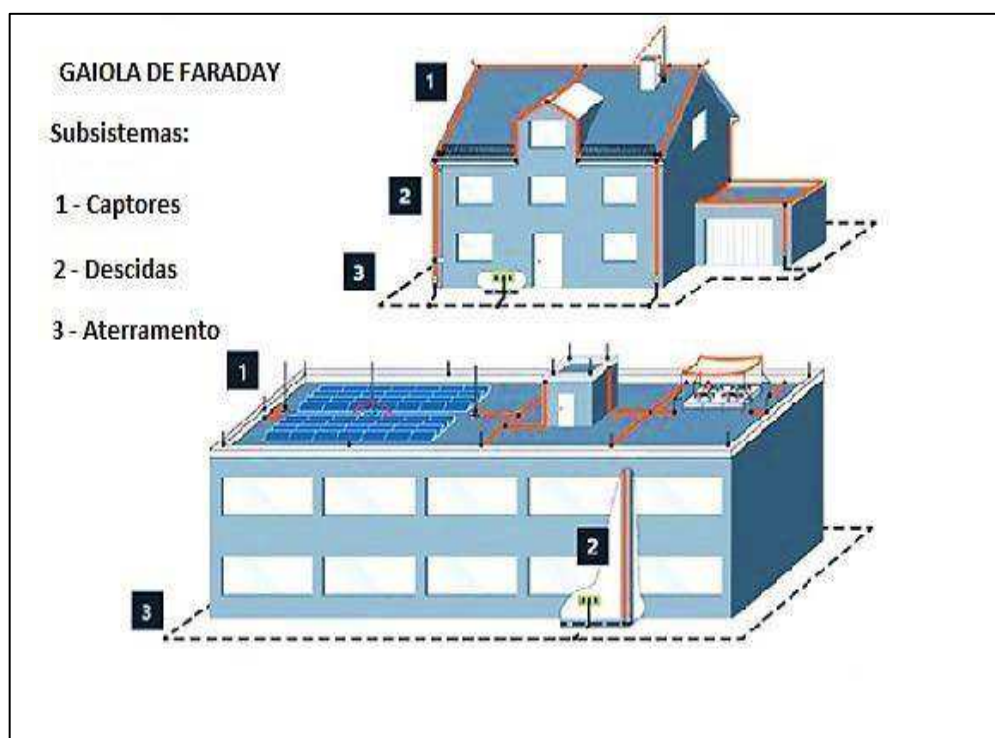


Fonte: ABNT, 2015.

Portanto, o método de Franklin é um dos mais utilizados na proteção contra descargas atmosféricas. Consiste na instalação de uma haste metálica no ponto mais alto da edificação, capaz de interceptar as descargas e conduzi-las de forma segura ao solo, minimizando danos à estrutura e aos equipamentos internos. Esse sistema atua como limitador de tensão, garantindo maior segurança às instalações (Figura 7).

Almeida (2014) destaca que o método conhecido como Gaiola de Faraday (Figura 8), é um sistema onde, envolve uma rede de condutores em todo o perímetro a ser protegido, criando uma blindagem eletromagnética. Esse método se baseia nos experimentos de Faraday onde, as correntes no interior de uma gaiola se anulam, sem depender da corrente. Sendo eficiente, porém, tem uma difícil instalação e custos mais altos, mas, podem ser instalados em todas as estruturas sem restrições desde prédio, galpões e etc.

Figura 8 - Gaiola de Faraday

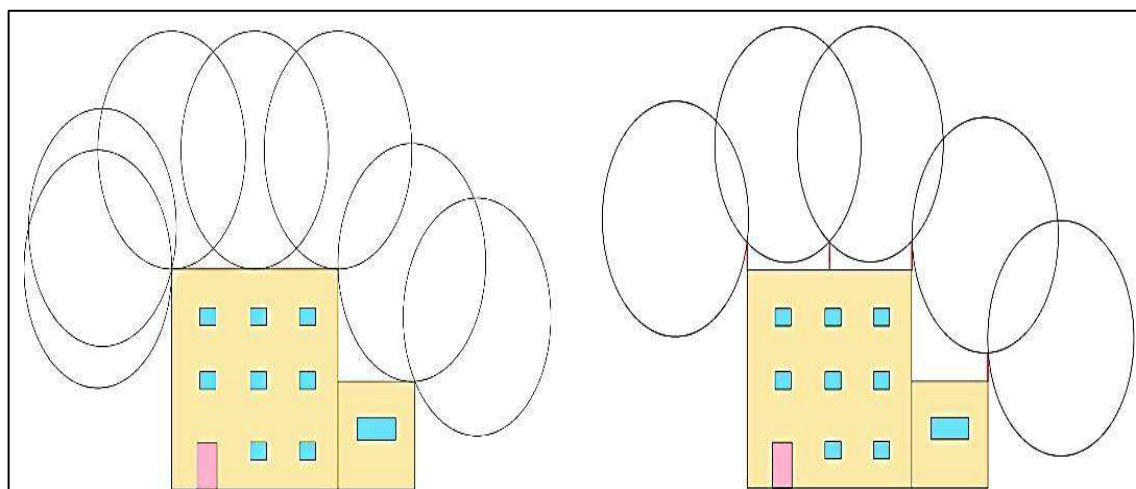


Fonte: SOS Alarmes, 2017.

A Gaiola de Faraday é outro método de proteção bastante eficiente. Ela envolve a estrutura com uma rede de condutores interligados, formando uma blindagem eletromagnética que impede a penetração das correntes induzidas no interior da edificação. Apesar de apresentar custos mais elevados e maior complexidade de instalação, pode ser utilizada em construções de diferentes portes e formatos (Noletto, 2006).

De acordo com ABNT (2015), o correto posicionamento do subsistema de captação envolve um método conhecido como Esfera Rolante (Figura 9) onde, nenhuma parte da estrutura a ser protegida entra em contato com uma suposta esfera padrão, que rola ao redor da estrutura em todos os planos possíveis, garantindo que não haja erros no sistema.

Figura 9 - Esfera rolante



Fonte: Laffier Engenharia, 2022

O método da Esfera Rolante é amplamente utilizado para verificar se toda a estrutura está dentro da zona de proteção dos captores de um SPDA. Baseado em uma análise tridimensional, esse método consiste em "rolar" uma esfera imaginária sobre todas as superfícies externas da edificação (Brito, 2012). A premissa é que qualquer ponto tocado pela esfera está potencialmente exposto à incidência de raios e, portanto, deve ser protegido por captores adequadamente posicionados.

Esse método é especialmente indicado para construções de geometria irregular ou de grande altura, onde o método das malhas ou o ângulo de proteção não são suficientes para garantir cobertura total. A esfera rolante permite identificar áreas vulneráveis mesmo em aproximações inclinadas dos líderes atmosféricos, como demonstrado em simulações tridimensionais. Além disso, possibilita o uso de elementos naturais da própria estrutura, como guarda-corpos metálicos e armaduras de aço, como parte do sistema de captação, reduzindo custos e aumentando a eficiência do SPDA (Moura, 2024).

ABNT (2015), destaca que além de existir esses modelos de SPDA enfatiza ainda o subsistema de aterramento, onde existe a menor resistência possível e que tenha compatibilidade com o eletrodo padrão e a resistividade do solo, a fim de minimizar qualquer situação perigosa. Martins (2017), aborda que é recomendável as armaduras com fundação de aço preparada para o aterramento do subsistema, havendo entre elas uma conexão contínua. A impossibilidade da armação dessas estruturas das fundações, deverá ser utilizado um condutor externo, ou um condutor de conexão entre as armaduras descontínuas.

3.6 ABNT NBR 5419-1:2015

A proteção contra descargas atmosféricas no Brasil é regulamentada pela ABNT NBR 5419, publicada pela primeira vez em 1980 e atualizada em 2005 e 2015. A versão mais recente, de 2015, está dividida em quatro partes:

1. Parte 1 – Princípios Gerais: estabelece fundamentos, conceitos e critérios para o projeto de sistemas de proteção.
2. Parte 2 – Gerenciamento de Risco: define metodologias para avaliar o nível de risco de uma estrutura e determinar a necessidade de proteção.
3. Parte 3 – Danos Físicos a Estruturas e Risco à Vida: apresenta medidas de proteção física contra descargas diretas e seus efeitos secundários.
4. Parte 4 – Sistemas Elétricos e Eletrônicos Internos: trata da proteção de instalações elétricas e de equipamentos eletrônicos contra surtos causados por descargas atmosféricas.

A Parte 1 (Princípios Gerais) é especialmente relevante, pois fornece as definições fundamentais e orientações técnicas para o dimensionamento e implementação de SPDA. Entre os aspectos abordados estão: os tipos de estruturas que necessitam de proteção, os métodos de captação mais utilizados (para-raios, gaiola de Faraday, método da esfera rolante), as exigências de aterramento e os critérios de manutenção (ABNT, 2015).

A atualização de 2015 representou um avanço significativo, pois integrou práticas internacionais e reforçou a necessidade da análise de risco, tornando o processo mais robusto e adaptado à realidade brasileira (Almeida *et al.*, 2023). Isso é particularmente importante, considerando que o Brasil lidera o ranking mundial de incidência de raios, com cerca de 75 milhões de descargas anuais (ELAT/INPE, 2025).

4 METODOLOGIA

O presente estudo consiste de uma revisão de literatura sistematizada, cujo objetivo é reunir, organizar e discutir evidências técnicas e normativas sobre SPDA em estruturas metálicas, com ênfase nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5419:2015. Revisões desse tipo são adequadas quando se pretende reunir estudos de natureza mista (normas, estudos de caso, simulações, medições e trabalhos acadêmicos) e produzir uma síntese temática e crítica que subsidie recomendações práticas e lacunas de pesquisa (Feitosa, 2021).

A escolha desse método se deve à necessidade de consolidar conhecimentos técnicos e práticos sobre a aplicação do SPDA em construções metálicas, incluindo aspectos de projeto, instalação, inspeção e desempenho. A pesquisa foi realizada em bases de dados multidisciplinares e repositórios científicos nacionais e internacionais, tais como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, SciELO, Google Scholar, Portal de Periódicos CAPES, repositórios institucionais de TCCs, teses, dissertações. Também foram incluídos documentos técnicos, como a própria ABNT NBR 5419:2015, e relatórios técnicos de relevância. A seleção dessas fontes buscou garantir amplitude e diversidade de perspectivas, considerando o caráter interdisciplinar do tema.

As buscas utilizaram descritores em português e inglês, combinados por operadores booleanos. Alguns exemplos de combinações foram:

- ("SPDA" OR "Sistema* de Proteção contra Descargas Atmosféricas" OR "para-raios") AND ("estrutura* metálic*" OR "metal structure*" OR "steel building*") AND ("NBR 5419" OR "lightning protection standard*" OR "rolling sphere" OR "Faraday cage" OR "equipotential bonding").
- ("lightning protection system*" OR "LPS") AND ("metal roof*" OR "metal tank*" OR "telecommunication tower*") AND (design OR performance OR inspection).

Foram considerados trabalhos publicados entre 2003 e 2025, contemplando tanto estudos anteriores quanto posteriores à atualização da NBR 5419:2015. Os idiomas aceitos foram português, inglês e espanhol.

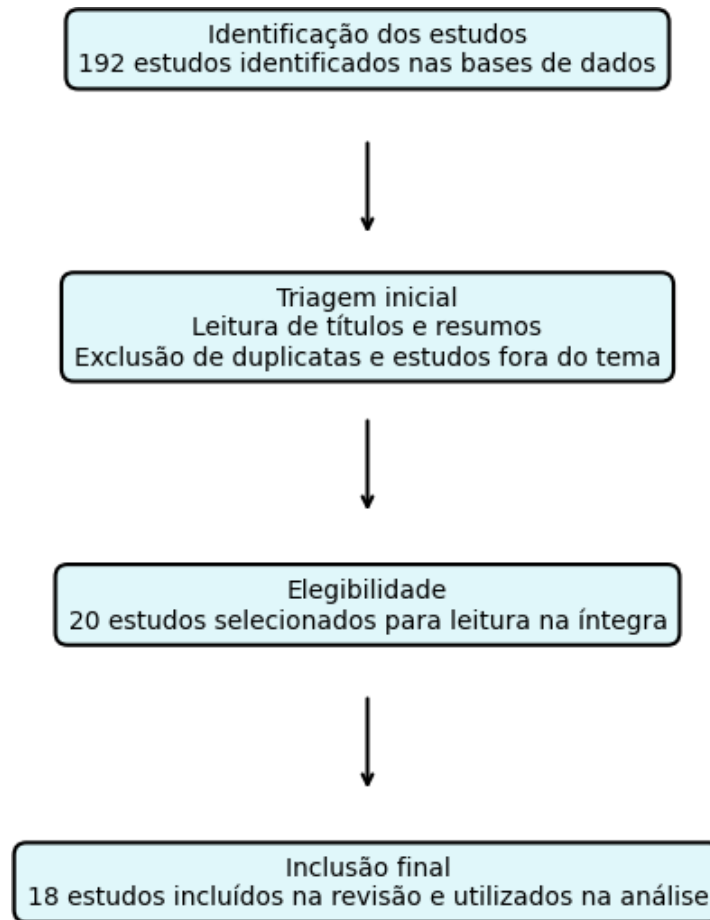
Os critérios de inclusão foram: a) trabalhos que abordassem o SPDA aplicado a estruturas metálicas (torres, telhados metálicos, tanques, galpões, entre outros); b) documentos alinhados à NBR 5419:2015 ou a normas internacionais equivalentes; c) Artigos científicos, revisões, livros, capítulos, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, relatórios técnicos e estudos de caso; d) Conteúdos que discutissem subsistemas do SPDA (captação, descidas, aterramento, equipotencialização, distâncias de segurança e proteção contra surtos).

Quanto aos critérios de exclusão: a) Trabalhos sem relação direta com estruturas metálicas; b) Materiais sem base científica ou técnica (opiniões, blogs, patentes sem dados de desempenho); c) Estudos focados exclusivamente em linhas de transmissão de energia sem vínculo com edificações metálicas; d) Duplicatas.

O processo de seleção dos estudos ocorreu em duas etapas: 1) Triagem de títulos e resumos, com exclusão de duplicatas e registros sem relevância; e 2) Leitura integral dos documentos potencialmente elegíveis, aplicando rigorosamente os critérios de inclusão e exclusão.

O processo de busca, triagem e seleção dos estudos seguiu etapas sequenciais e criteriosas, de modo a garantir a qualidade e a pertinência das fontes utilizadas. Inicialmente, foi realizado um levantamento amplo nas bases de dados selecionadas, seguido da aplicação de critérios de inclusão e exclusão. As etapas desse processo estão sistematizadas no fluxograma apresentado na figura 10.

Figura 10 – Fluxo do processo de seleção de estudos



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico nas bases de dados selecionadas, resultando na identificação de 192 estudos potencialmente relevantes. Em seguida, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos, com a exclusão de trabalhos duplicados e daqueles que não apresentavam aderência ao tema ou ao recorte temporal definido. Após essa etapa de triagem, foram selecionados 20 estudos para leitura integral, dos quais 18 trabalhos foram efetivamente utilizados como base teórica e analítica para a construção deste estudo.

Dos estudos selecionados foram extraídas as seguintes informações: autor(es), ano de publicação, país, tipo de estrutura metálica estudada, abordagem metodológica (cálculos, simulações, estudos de caso), subsistemas do SPDA analisados (captação, descidas, aterramento, equipotencialização, DPS), parâmetros técnicos adotados (nível de proteção, distâncias de segurança, continuidade elétrica), achados principais e relação com a NBR 5419:2015.

Os estudos selecionados foram examinados por meio de uma análise qualitativa, realizada a partir da leitura integral dos textos e da identificação dos principais conceitos, abordagens e contribuições referentes às descargas atmosféricas e aos SPDA. Esse processo possibilitou a sistematização das informações e a discussão dos aspectos mais relevantes para a compreensão dos fundamentos físicos e normativos relacionados ao tema.

A avaliação da qualidade dos trabalhos foi conduzida de forma qualitativa adaptada, com a atribuição de escores que consideraram a clareza metodológica, a conformidade técnica com a NBR 5419, a consistência dos resultados e a aplicabilidade prática. Essa estratégia buscou privilegiar a transparência e a comparação crítica entre os estudos, evitando a exclusão automática de trabalhos com base em um único critério.

Na análise, foram considerados:

- Clareza metodológica (definição dos objetivos, métodos utilizados e replicabilidade);
- Adequação técnica em relação às diretrizes da NBR 5419:2015;
- Consistência dos resultados em relação a riscos e danos típicos (danos físicos, riscos à vida, falhas em sistemas internos);
- Aplicabilidade prática das recomendações para o projeto e manutenção de estruturas metálicas.

Cada estudo foi classificado em três níveis: alta, média ou baixa qualidade e a síntese dos resultados foi realizada de forma narrativa e temática, agrupando os estudos em cinco eixos principais:

- 1) Concepção do SPDA em estruturas metálicas (captação natural x dedicada);
- 2) Dimensionamento e nível de proteção (LPL/classe de proteção);
- 3) Aterramento, equipotencialização e distâncias de segurança;
- 4) Inspeção e manutenção;
- 5) Evidências empíricas (casos práticos, medições e simulações).

Por se tratar de uma revisão de literatura baseada em dados públicos, não houve necessidade de aprovação por Comitê de Ética em Pesquisa. As limitações do estudo incluem a heterogeneidade das metodologias dos trabalhos analisados, a disponibilidade parcial de algumas normas técnicas completas e a possibilidade de viés de publicação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da revisão de literatura evidenciam que os SPDA são fundamentais para reduzir os impactos das descargas elétricas em estruturas metálicas. A análise mostrou que, embora a ABNT NBR 5419:2015 estabeleça critérios técnicos claros para projeto e instalação, muitos sistemas ainda são aplicados de forma parcial ou sem a devida análise de risco, o que compromete sua eficácia. De acordo com Corrêa Junior *et al.* (2025), a atualização da norma trouxe avanços significativos ao incluir metodologias de avaliação de risco e critérios mais rigorosos de dimensionamento, alinhando o Brasil às práticas internacionais. No entanto, a literatura aponta que a aplicação prática ainda apresenta lacunas, especialmente em edificações industriais e urbanas.

Um dos pontos centrais observados foi o uso da estrutura metálica como captor natural. Estudos como os de Silva, Oliveira e Costa (2024) demonstram que a continuidade elétrica da estrutura pode ser aproveitada para conduzir correntes de descarga, reduzindo custos e simplificando o sistema. Contudo, quando há descontinuidades, pinturas isolantes ou juntas mal conectadas, o desempenho do SPDA é comprometido. Nesse sentido, Saba e Silva (2025) reforçam que a confiabilidade do sistema depende não apenas da instalação inicial, mas também da manutenção periódica, já que a corrosão e o desgaste podem interromper a continuidade elétrica e aumentar a vulnerabilidade da edificação.

Outro resultado relevante refere-se ao dimensionamento do nível de proteção (LPL). A escolha inadequada do LPL foi identificada como uma das principais falhas em projetos, resultando em zonas descobertas e maior probabilidade de ocorrência de descargas internas. Almeida *et al.* (2023) destacam que ambientes industriais com equipamentos sensíveis e grande circulação de pessoas exigem níveis mais rigorosos de proteção, como LPL II ou III, enquanto estruturas elevadas, como torres de telecomunicação, podem demandar LPL I. Essa constatação corrobora os achados de Mattedde (2021), que enfatiza a importância da análise de risco como ponto de partida para qualquer projeto de SPDA, evitando decisões baseadas apenas em critérios econômicos.

A discussão também evidenciou a relevância do aterramento e da equipotencialização. Halliday *et al.* (2016) explicam que a dissipação eficaz da corrente elétrica depende não apenas da resistência ôhmica, mas também da impedância em alta frequência, fator muitas vezes negligenciado em projetos nacionais. Os resultados mostraram que malhas perimetrais, armaduras de fundação e hastes suplementares são estratégias eficazes para reduzir gradientes

de potencial e tensões de passo e toque. Griffiths (2011) complementa que a equipotencialização de sistemas metálicos internos, como tubulações e carcaças de máquinas, é indispensável para evitar diferenças de potencial que possam gerar faíscas ou surtos internos.

No âmbito da proteção interna contra surtos eletromagnéticos (LEMP), verificou-se que a simples instalação de captos externos não é suficiente para proteger equipamentos eletrônicos. Nussenzveig (2015) e Tipler e Mosca (2009) destacam que o acoplamento eletromagnético em estruturas metálicas extensas pode amplificar correntes de surto, exigindo a coordenação em camadas de dispositivos de proteção contra surtos (DPS). A literatura aponta que a instalação de DPS em cascata — tipo 1 na entrada, tipo 2 nos quadros setoriais e tipo 3 próximo às cargas sensíveis associada ao roteamento adequado de cabos e à definição de zonas de proteção eletromagnética (LPZ), é indispensável para reduzir falhas em sistemas de energia e comunicação.

Por fim, os resultados reforçam que a manutenção e inspeção periódica são determinantes para a eficácia do SPDA. Estudos como os de Achora *et al.* (2018) mostram que a ausência de inspeções regulares compromete a confiabilidade do sistema, já que problemas como conexões afrouxadas, pintura isolante sobre elementos de captação e desconexão de condutores de descida são recorrentes em edificações brasileiras. A discussão evidencia que o SPDA deve ser tratado como um sistema dinâmico, que exige acompanhamento contínuo e revalidação após reformas ou ampliações estruturais.

Além disso, a literatura comparativa mostra diferenças importantes entre a proteção de estruturas metálicas e as construções convencionais em alvenaria ou concreto armado. Enquanto estruturas metálicas apresentam continuidade elétrica mais favorável para captação natural, edificações de alvenaria dependem integralmente de captos dedicados e condutores de descida artificiais. Barbosa e Neto (2014) e Noleto (2006) destacam que edifícios metálicos podem alcançar desempenho superior quando a armadura ou o perfil metálico é devidamente conectado e equipotencializado.

Por outro lado, quando as conexões não seguem as recomendações da NBR 5419, ou quando há pintura espessa e isolante, o risco de centelhamentos internos aumenta significativamente, diferentemente das edificações tradicionais, cujo comportamento é mais previsível e menos dependente de continuidade estrutural. Esse contraste reforça a necessidade de análise específica para cada tipologia construtiva e demonstra que soluções padrão pode ser inadequadas para estruturas metálicas.

Os resultados também apontaram falhas recorrentes na implementação de SPDAs em estruturas metálicas. Entre as mais citadas estão:

- a) ausência de equipotencialização entre a estrutura metálica e sistemas internos;
- b) utilização de eletrodos de aterramento incompatíveis com a resistividade do solo;
- c) falta de documentação técnica e de ARTs de inspeção;
- d) instalação inadequada de condutores de descida, principalmente em galpões industriais, onde são comuns trajetos excessivamente longos ou com dobras que aumentam a impedância;
- e) subdimensionamento de DPS em painéis elétricos com cargas sensíveis.

Estudos como os de Marinho (2018) e Santos e Cruz (2018) mostram que essas falhas representam mais de 60% das ocorrências de danos internos associados a descargas atmosféricas em indústrias brasileiras. Esses achados reforçam o argumento de que a simples instalação do SPDA não garante proteção, sendo indispensáveis inspeções, registros e manutenção documentada.

Outro aspecto identificado foi a necessidade de integrar metodologias internacionais aos projetos nacionais. A norma IEC 62305, adotada em diversos países europeus, apresenta conceitos de zonas eletromagnéticas (LPZ) mais detalhados e procedimentos de medição específicos para sistemas internos. Rakov e Uman (2003) e Brito (2012) destacam que a adoção de elementos dessas metodologias pode aprimorar a concepção de SPDA em edificações metálicas brasileiras, especialmente em ambientes industriais com alto nível de automação. A literatura sugere que alinhamentos entre a NBR 5419:2015 e a IEC 62305 contribuem para reduzir incertezas no dimensionamento, principalmente na definição de distâncias de segurança e no cálculo de correntes parciais em estruturas complexas.

A discussão revelou também lacunas significativas na literatura, principalmente em relação ao comportamento de estruturas metálicas extensas submetidas a descargas múltiplas ou repetitivas. Trabalhos recentes, como os de Matos e Leal (2021) e Moura (2024) destacam que a maior parte dos estudos utiliza modelos computacionais simplificados, que nem sempre representam a geometria real das edificações industriais. Isso abre espaço para pesquisas futuras baseadas em ferramentas avançadas, como modelagem eletromagnética tridimensional por métodos de elementos finitos (FEM) ou estudos experimentais com sensores distribuídos. Além disso, poucos trabalhos avaliam o desempenho de SPDAs após longos períodos de operação, o que limita o conhecimento sobre degradação e envelhecimento dos condutores, eletrodos e conexões metálicas.

Outro ponto ressaltado pela literatura é a relação direta entre a proteção contra descargas atmosféricas e a continuidade das operações. Em setores como hospitais, telecomunicações, data centers e indústrias automatizadas, uma falha momentânea causada por descargas pode gerar interrupções graves, com perdas econômicas significativas. Conforme aponta Pompeu *et al.* (2017), o SPDA precisa ser entendido não apenas como um dispositivo de proteção física, mas como parte integrante da gestão de riscos operacionais. Isso reforça a necessidade de sistemas redundantes de aterramento, inspeções periódicas e proteção interna em múltiplas camadas.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou uma compreensão aprofundada acerca dos fundamentos físicos das descargas atmosféricas e de seus impactos sobre as edificações, evidenciando que esses fenômenos naturais, embora recorrentes, representam riscos significativos à integridade estrutural, à segurança das pessoas e ao funcionamento de sistemas elétricos e eletrônicos. A análise teórica realizada demonstrou que a ocorrência de danos associados aos raios está diretamente relacionada não apenas à intensidade das descargas, mas, sobretudo, à ausência ou à inadequação dos SPDA.

A partir da revisão da literatura especializada e das normas técnicas vigentes, constatou-se que a correta aplicação da ABNT NBR 5419 constitui o principal instrumento para a mitigação dos riscos associados às descargas atmosféricas. A norma fornece diretrizes claras para a análise de risco, a definição do nível de proteção, o dimensionamento dos componentes do sistema e os critérios de inspeção e manutenção, assegurando que o SPDA seja projetado de forma compatível com as características específicas de cada edificação. Dessa forma, verificou-se que a eficiência do sistema depende de uma abordagem integrada, na qual os aspectos físicos, normativos e construtivos são considerados de maneira conjunta.

Os resultados discutidos ao longo do trabalho evidenciam que falhas no projeto, na execução ou na manutenção do SPDA comprometem significativamente sua capacidade de proteção, aumentando a vulnerabilidade das estruturas aos efeitos diretos e indiretos das descargas atmosféricas. Nesse sentido, destaca-se a importância da atuação de profissionais qualificados e da adoção de práticas de engenharia fundamentadas em critérios técnicos e científicos, evitando soluções improvisadas ou inadequadas que possam gerar uma falsa sensação de segurança.

Além disso, o estudo reforça que a proteção contra descargas atmosféricas não deve ser compreendida como uma medida pontual, mas como um processo contínuo, que envolve desde a análise inicial de risco até a realização periódica de inspeções e manutenções. Essa perspectiva é especialmente relevante em um cenário de crescente urbanização, verticalização das cidades e intensificação do uso de equipamentos sensíveis, fatores que ampliam os prejuízos potenciais associados às descargas elétricas naturais.

Por fim, conclui-se que o conhecimento dos princípios da eletrostática, aliado ao cumprimento rigoroso das normas técnicas e à adoção de uma postura preventiva, é fundamental para a promoção da segurança das edificações. Este trabalho contribui ao

evidenciar a relevância do SPDA como elemento essencial da engenharia de proteção, ressaltando que investimentos adequados em projeto, execução e manutenção não representam apenas um atendimento às exigências normativas, mas uma ação estratégica voltada à preservação da vida humana, à proteção do patrimônio e à garantia da continuidade operacional dos sistemas. Como perspectiva para trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos de caso e análises experimentais que permitam avaliar, de forma prática, a eficiência dos sistemas de proteção em diferentes tipos de edificações e contextos regionais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.P. **Gaiola de Faraday**: uma proposta para o ensino de eletromagnetismo com ênfase nas descargas atmosféricas. Faculdade de Educação e Meio Ambiente. Ariquemes - RO 2014.
- ALMEIDA, L. A.; ASSIS, M. V. L.; SANTANA, M. C.; MOSARELI, R. CESAR, P. Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA): Estudo de Caso Aplicado em Ambiente com Condições Adversas. **Revista FT**, v. 27, n. 128, p. 1-27, 2023. 10.5281/zenodo.10200740
- ALVES, E.G.S.; XAVIER, C. S. **Utilização da técnica para sistema de aterramento**. Faculdades Santo Agostinho. Montes Claros - MG, março de 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1: proteção \contra descargas atmosféricas parte 1: sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <
https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/resultado_avancado.asp>. Acesso em: 31/03/2022
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-4: proteção contra descargas atmosféricas parte 4: sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**. Rio de Janeiro, 2015. 87 p.
- ASTH, R. C. **Lei de Coulomb**. Toda Matéria, 2024.
- BARBOSA, T.D.; NETO, J.P.S. **Proteção contra descargas atmosféricas de edificações utilizando a ferragem estrutural**. Centro federal de educação tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG. Belo Horizonte, 26 de novembro de 2014.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2019.
- BECKHAUSER, R. M. **Estudo de caso: dimensionamento de SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosféricas) no edifício residencial colinas enfatizando a NBR 5419/2015**. Faculdade SATC, Criciúma-SC, novembro – 2016.
- BOSS, S. L. B.; ASSIS, A. K. T.; CALUZI, J. J. **Stephen Gray e a descoberta dos condutores e isolantes**: tradução comentada de seus artigos sobre eletricidade e reprodução de seus principais experimentos. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012.
- BRITO, F.D.S. **Avaliação e implementação de SPDA no canteiro de obras da proenge**. Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba fevereiro de 2012.
- CHAVES, A. **Física básica**. Rio de Janeiro: v. 3, LTC, 2012.
- CHIBENI, S. S. **Aspectos da descrição física da realidade**. Coleção CLE. V. 21. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciências, UNICAMP.
- CORRÊA JUNIOR, J. C. B.; MARTINS, I. D. da S.; SOUZA, A. O. de; NASCIMENTO, E. L. B. do. A evolução da NBR 5419 e seus reflexos na concepção de sistemas de aterramento.

Cuadernos de Educación y Desarrollo, v. 17, n. 6, e8548, 2025. DOI: 10.55905/cuadv17n6-031

COULOMB, Charles-Augustin. **Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme**. Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Paris, p. 569–577, 1785.

CRUZ, João Lucas Silva da. **Bancada experimental para topologias de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)**. Trabalho de conclusão de curso - FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA. Campo Grande, 2010.

ELAT/INPE. **Características da corrente elétrica dos raios**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2025.

FARADAY, M. LVIII. On the physical character of the lines of magnetic force. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 3, n. 20, p. 401–428, 1852. <https://doi.org/10.1080/14786445208647033>

FEITOSA, Raphael Alves. Uma revisão sistemática sobre investigações narrativas o ensino de ciências nos últimos cinco anos na América Latina (2016-2020). **Revista de Ciências do Estado**, v. 6, n. 1, e26440, 2021.

FERREIRA, A. **Fundamentos de eletrostática**. São Paulo: EDUSP, 2015.

FILHO, J. M. **Instalações elétricas Industriais: de acordo com a norma brasileira NBR 2419/2015**/ João Mamede Filho. – 9º Edição, p.601– Rio de Janeiro: LTC. 2017.

FREITAS, B. B.; CASTRO, M. E. L.; CARRIJO, M. C.; CRUZ, S. C. R. BASSI, A. L. **Materiais Condutores e Isolantes: Investigação de Suas Propriedades Elétricas**. UniFACEF, 2024.

GRIFFITHS, David J. **Introduction to Electrodynamics**. 4. ed. Boston: Pearson, 2011.

RAKOV, Vladimir A.; UMAN, Martin A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HELERBROCK, R. **Condutores e Isolantes**. Brasil Escola, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Sistema Elétrico**. 2021. Disponível em: < <http://www.inpe.br/webelat/homepage/> >. Acesso em: 02/03/2022.

LIMA, K. C.; GOMES, R. G. Detecção de descargas elétricas atmosféricas em sistemas convectivos com dados do SIMEPAR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, 2009. DOI: 10.1590/S0102-261X2009000100001

LOPES, B. B. M.; ANTUNES, S. W. F. **Metodologia de Projeto de Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas**. Cidade: Editora, 2019.

MACHADO, Kleber Daum. **Teoria do eletromagnetismo: volume 1**. 1ª ed. UEPG, 2000.

- MARINHO, D. L. M. **Avaliação de risco de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas**. Centro Universitário de Brasília – UNICEUB. Brasília, 2018. Milliohmímetro. INSTRUM. Disponível: milliohmímetro p/ nbr 5419-2015 modelo: milliohm-1 marca: instrum - instrumbrasil. Acesso em:23/03/2022.
- MARTINS, F. M. **Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas**. Universidade Federal de Uberlândia – MG. 2017.
- MATOS, W. L. N.; LEAL, A. F. R. Comparação entre Cálculo e Medição de Campos Elétricos de Líderes em Raios Nuvem-solo. In: IV Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento da Amazônia - CTDA, 2021, Marabá-PA. **Anais... IV Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento da Amazônia**, 2021.
- MATTEDDE, R. **ABNT NBR 5419 – Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA): Um Guia Detalhado**. Clintec Engenharia, 2024. Disponível em: clintec.com.br
- MATTEDE, H. **O que é SPDA (Sistema de proteção contra descargas atmosféricas). 2021**. Disponível em :<<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-spda-sistema-de-protecao-contra-descargas-atmosfericas/>>. Acesso: 21/03/2022.
- MOURA, Gabriel Fernandes de. **Aplicação do método eletrogeométrico para projeto de SPDA em estruturas esféricas complexas**. Orientador: Fábio Isaac Ferreira. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2024.
- NOLETO, S. R. C. **As estruturas metálicas das edificações como sistema de proteção contra descargas atmosféricas**. UnB, 2006. v. 1, n. 1, p. 01–139, 12 2006. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/852>>
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: eletromagnetismo**. v. 3. 2ª ed. revista e ampliada. Editora: Blucher, 2015.
- POMPEU, M. M.; DE SOUZA, J. R. S.; RIBEIRO, W. M. do N.; SILVA, C. C. S.; AARÃO JUNIOR, R. N. N. Estudo das relações entre descargas elétricas atmosféricas e a chuva no Leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 267–279, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170015>
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge University Press, 2003.
- ROCHA, José Fernando (Org.). **Origens e evolução das ideias da física**. 1. ed. Salvador: EDUFBA, 2002.
- SABA, M. M. F.; SILVA, J. C. O. A física dos raios–Parte 1: Raios descendentes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 47, p. e20250022, 2025.
- SANTOS, F. M.; POY, L. E. A. **Análise comparativa entre os sistemas de proteção de descargas atmosféricas de torres de telecomunicação prediais e em terra**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2016.

SANTOS, L. B. O.; CRUZ A.F.S. **Aplicação da proteção contra descargas atmosféricas com estudo de caso numa edificação comercial.** Salvador, 2018.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; JUNIOR-HEDELSON, J. H.; THOMAS, R.; ORVILLE, R. E. On the Triggering Mechanisms of Upward Lightning. **Scientific Reports**, v. 9, p. 9576, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46122-x>

SILVA, D. R.; OLIVEIRA, M. A.; COSTA, F. J. Análise da Vulnerabilidade de Estruturas Metálicas à Incidência de Descargas Atmosféricas: Estudo Técnico em Ambiente Industrial. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 12, n. 2, p. 45–60, 2024. DOI: 10.37885/2237-1236.v12n2p45

SILVA, K.R. **Projeto de proteção contra descargas atmosféricas (PDA) em uma emissora de televisão situada na cidade de Manaus.** Universidade do Sul de Santa Catarina – 2020.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros.** 6ª ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

WALTRICK, P. V. V. **Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) estudo de caso em uma estrutura predial.** Centro Universitário UNIFACVEST. Lages – SC 2018.

ZURITA ÁLVAREZ, M. A. **Mapa isoceraúnico georreferenciado para la coordinación de protecciones frente a descargas atmosféricas.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Equador.