

1º Edição



SOBRE O PARA-RAIOS COM DISPOSITIVO DE IONIZAÇÃO

*A tecnologia que vem
crescendo no Brasil.*

SYLVAIN FAUVEAUX

**R. BLAUTH; M. CASTRO; L. DUQUE;
L. PEREIRA; P. SILVA; C. VIEIRA**

SOBRE O PARA-RAIOS COM DISPOSITIVO DE IONIZAÇÃO

**A tecnologia que vem crescendo
no Brasil.**

SYLVAIN FAUVEAUX

**R. BLAUTH; M. CASTRO; L. DUQUE; L. PEREIRA;
P. SILVA; C. VIEIRA**

1º Edição

Julho 2020

É expressamente proibida a reprodução total ou parcial desta obra sem a expressa anuência do autor principal.

Autor



Sylvain Fauveaux

Engenheiro Eletricista formado pela Université du Littoral Côte d'Opale de Calais, Mestre em Eletrônica pela Université de Lille 1, e Doutor em Eletrônica pela Université de Bordeaux 1, na França. Sylvain Fauveaux é atualmente Diretor de P&D da Indelec e Coordenador do Laboratório de Alta Tensão do LIRI (Lightning Research and Innovation Institute). S. Fauveaux acumula mais de 15 anos de pesquisa na Université Champagne-Ardenne de Reims (CReSTIC), na Université du Littoral Côte d'Opale (LEMCEL) e no LIRI, na área de EMC, descargas atmosféricas e participou das mais recentes campanhas de teste em condições reais da Indelec (Indonésia, Ruanda, Brasil), resultando em artigos científicos publicados em revistas e congressos de renome mundial (Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, GROUND', International Lightning Protection Symposium). S. Fauveaux é membro ativo dos comitês nacional e europeu UTE, GIMELEC CT D84 e CENELEC Task Force TC81.

Co-autores



Ricardo Augusto Blauth

Técnico em Eletrônica e Telecomunicações pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET/PR, Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal do Paraná - UFPR e Mestre em Administração igualmente pela UFPR. Ricardo Blauth é professor de Pós-Graduação e MBA na Universidade Positivo, na Universidade do Alto Vale do Itajaí, e na Faculdade Sant'Ana de Ponta Grossa. R. Blauth atuou durante 6 anos na indústria automobilística (Volkswagen) na área de Engenharia Industrial e Planejamento, e por 5 anos no Grupo Positivo, antes de fundar a NGLED, especializada em SPDA (Para-Raios e MPS), Iluminação, Eficiência Energética, Projetos e Laudos Elétricos gerais, e Curitiba Solar, especializada em micro inversores e instalações fotovoltaicas de pequeno porte até usinas.



Márcia Inocêncio de Castro

Engenheira Eletricista formada pela PUC Goiás, Mestra em Engenharia Elétrica e Computação pela Universidade Federal de Goiás - UFG. Possui também um MBA pela Fundação Getúlio Vargas - FGV. Atuação em projetos de pesquisa para Smart Grid (Automação de Redes de Alta Tensão). Márcia Castro começou sua carreira na Companhia Energética de Goiás (CELG) e possui mais de 10 anos de experiência em projetos e instalações de automação predial e industrial, projetos luminotécnicos, projetos e instalações de sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), principalmente em projetos industriais e comerciais de grande porte.



Luciano Henrique Duque

Engenheiro Eletricista formado pelo Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL em Minas Gerais e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília - UnB. Atuou por 15 anos na Brasil Telecom/Oi na área de redes de telecomunicações e infraestrutura elétrica de Cyber Datacenter. Luciano Duque é Diretor Técnico e fundador da IPT Engenharia onde atua na área de projetos elétricos, vistorias e laudos de elétrica, eficiência energética e telecomunicações. É também Professor-Mestre do UniCEUB (Centro Universitário de Brasília) nos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia da Computação, Elétrica e Civil.



Luiz Antonio Pereira

Engenheiro Eletricista formado pela Faculdade de Engenharia de Sorocaba - FACENS e pós-graduado em Marketing pela ESPM. Também recebeu treinamento no Lightning Innovation & Research Institute - LIRI na França. Diretor e fundador da ABC Para-raios, empresa especializada em Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA e MPS) desde 2001, com mais de 10mil ARTs no segmento. Fundou nos anos 90 a empresa BST, fabricante de estabilizadores e nobreaks, vendida em 2000 para a multinacional inglesa Invensys. Especializado em Conversores Estáticos de Energia, Aterramentos e Descargas Atmosféricas. Palestrante e membro ativo da ABNT CE 003 064 010, comissão de estudo revisadora da NBR 5419.



Paulo de Sousa Silva

Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal do Amazonas - UFAM, com especialização em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, e Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Engenharia Clínica pela UFAM. Paulo Silva foi Professor Titular da UniNorte, e é atualmente Professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica do Centro Universitário FAMETRO e Diretor Técnico da Amazon Consultoria, onde oferece serviços de engenharia como projetos, instalação e manutenção predial/industrial, além de ministrar cursos e treinamentos ISO 9000, 5S, KAIZEN e NR10. P. Silva possui ampla experiência no segmento industrial, pois atuou como Gerente de Engenharia da Fógas, Gerente de Qualidade da Elsys e Gerente de Manutenção e Facilities da montadora Bramont.



Claudio Bernardo Vieira

Engenheiro Eletricista formado pela PUC Rio Grande do Sul. Atuou como Engenheiro Eletricista no Departamento de Engenharia do Banco do Brasil durante 27 anos, onde foi responsável pelos projetos, obras, fiscalização e contratações na região Sul. Em paralelo, atuou como Assessor Técnico da Carteira de Comercio Exterior - CACEX nos anos 80 onde foi um dos primeiros brasileiros a avaliar a importação do para-raios ionizante no Brasil, em colaboração com a ABINEE e a ABIMAQ. C. Vieira foi Professor no departamento de Engenharia Elétrica da PUCRS e Professor do Curso de Eletrotécnica, Eletrônica e Automação Industrial da Fundação Bradesco. C. Vieira fundou a SPDA Engenharia, onde atua hoje como Responsável Técnico, especializado em projetos, instalações e laudos de SPDA.

Préfacio



Li esse e-book com muito prazer, sobretudo apreciando as fotos e interpretações das configurações/modelos apresentados, com explicações bem didáticas. Os relatos históricos de experiências realizadas em vários lugares do mundo nos mostram que pesquisas científicas às vezes levam tempo para apresentar resultados satisfatórios.

Quando definirmos um SPDA, temos que incluir na proteção capttores, condutores de descida e um bom sistema de aterramento. Nesse sentido, o livro apresenta todos os aspectos da proteção, levando em consideração as necessidades dos diferentes casos e obedecendo as normas vigentes.

Os para-raios com dispositivos de ionização (PDI) são dispositivos internos ao sistema (SPDA) que podem coexistir com os sistemas tradicionais, apresentando vantagens na proteção com menor custo. A diferença entre os capttores Franklin e os dispositivos de ionização está na captação do fenômeno, pois ambos estão conectados da mesma forma à terra desde a captação. Portanto, o captor PDI é o captor Franklin mais o dispositivo de ionização.

O texto relaciona as pesquisas realizadas em diversos locais no mundo para colocar em evidência o funcionamento do para-raios, assim como sua validação e eficiência, em laboratório. Parâmetros como o tempo de antecipação do líder ascendente e o raio de atração são temas em discussão e há estudos quanto à sua operação e funcionamento. A confiabilidade da tecnologia fica demonstrada pelo número de capttores instalados, mais de 1 milhão ao redor do mundo em 35 anos.

Recomendo esse e-book a todos: engenheiros, projetistas, instaladores e pesquisadores.

José Pissolato Filho, PhD

Senior member IEEE. Professor titular da FEEC -
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da
UNICAMP e Coordenador do Laboratório de Alta Tensão.

Sumário

1. Introdução	8
• Contexto	
• Objetivo do documento	
• Observações	
2. Fenômeno do raio	12
3. Sistemas de proteção tradicionais	14
• Método de Ângulo de Proteção (para-raios Franklin)	
• Método da Esfera Rolante (EGM)	
• Método das malhas (gaiola de Faraday)	
4. Sistema de proteção moderno:	
Para-raios com Dispositivo de Ionização	22
• Histórico	
• Conceito	
• Dimensionamento	
• Normas	
• Requisitos de teste	
5. Comprovação científica	32
• Validação empírica	
• Validação em laboratório	
• Validação em condições reais	
6. Conclusão	45
7. Referências	47

1. Introdução

Contexto

É um fato conhecido do ser humano de todos os tempos. As novas tecnologias ou mudanças no sentido geral sempre incomodaram pessoas que temiam que o sistema em vigor fosse modificado, alterado, ou até abandonado em benefício de uma nova invenção.

Até o advento dos caminhos-de-ferro, ninguém no Reino Unido tinha viajado mais depressa do que um cavalo em pleno galope e, poucos anos depois da abertura da primeira grande ferrovia, a Liverpool & Manchester em 1830, os comboios percorriam o país a velocidades anteriormente inimagináveis. Foi uma perspectiva assustadora. Antes da ferrovia ser aberta, havia temores de que seria impossível respirar enquanto se viajava em tais velocidades, ou que os olhos dos passageiros seriam danificados por ter que se ajustar ao movimento. Cientistas eminentes expressaram preocupação de que as vacas perturbadas pelo barulho parassem de produzir leite ou que as ovelhas ficassem pretas da fumaça. Podemos rir agora, mas tais sentimentos demonstram até que ponto as ferrovias foram um mergulho no desconhecido e como as pessoas reagiram inicialmente à inovação.

É uma prova de que a resistência às mudanças às vezes não segue nenhuma lógica senão a do medo, do desconhecimento, dos interesses econômicos ou até mesmo, em alguns casos, da má fé...



“Quando os ventos de mudança sopram, umas pessoas levantam barreiras, outras constroem moinhos de vento”
Érico Veríssimo

Até hoje, mudanças de mercado ainda assustam os atores tradicionais e exemplos não faltam: greve dos taxistas contra o desenvolvimento dos aplicativos tais como Uber e 99, agências de viagem online como Decolar.com e plataformas como AirBnB revolucionando o mercado de viagens aéreas e de hotelaria.

Essa comparação pode ser vista como ousada, mas o atual mercado brasileiro de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas também está afetado por grandes mudanças e acompanha o caminho natural da evolução que ocorre em todos os setores e o avanço tecnológico neste mercado é inevitável, assim como ocorreu e está ocorrendo em outros países.

Objetivo do documento

Embora o para-raios com dispositivo de ionização possa representar uma preocupação para alguns opositores, a disponibilização deste sistema de proteção contra descargas atmosféricas representou enorme oportunidade para o mercado em geral – projetistas, instaladores e usuários finais – que vem se beneficiando com o uso da tecnologia, principalmente onde os sistemas tradicionais não se aplicam, ou onde se tornaram inviáveis, técnica e/ou economicamente.

É importante entender que ambos sistemas de proteção, tradicionais e modernos, podem coexistir, cada um apresentando vantagens e desvantagens, assim como atendendo a diferentes tipos de circunstâncias, edificações e aplicações. Com o objetivo de proporcionar a melhor solução possível para o cliente final, uma empresa atuando no segmento de proteção contra descargas atmosféricas deverá se mostrar bipartidária, e disposta a oferecer o que há de mais adequado e eficiente, seja através de sistema tradicional ou moderno, ou às vezes, sistemas mistos, em conformidade com as respectivas normas vigentes.

Reconhecer que sistemas de proteção tradicionais podem ser melhorados é aceitar a possibilidade de optar por sistemas mais modernos, contanto que tal sistema seja respaldado por comprovações no mínimo iguais às

comprovações dos sistemas tradicionais e seu desempenho garantido por organismos competentes. Desde há 35 anos, um sistema moderno se destaca das outras inovações: o para-raios com dispositivo de ionização (PDI). Esta tecnologia será justamente o tema deste documento, onde serão apresentados e analisados seu conceito, origens, funcionamento, embasamento técnico e algumas das suas aplicações. Os autores deste documento decidiram com unanimidade limitar o escopo deste documento à dimensão técnica da tecnologia. A questão jurídica será brevemente abordada, mas de propósito pouco detalhada, devido à falta de clareza na atuação dos poucos fabricantes presentes no Brasil, cada um tendo sua própria estratégia e a obrigação de atender a legislação brasileira de uma maneira ou de outra.

Observações

Já foram vistas diversas tentativas de associar outras tecnologias ao para-raios ionizante por parte de diversos atores do mercado, defensores dos sistemas tradicionais, as quais consideramos de natureza ética questionável, confundindo e dificultando o entendimento correto do leitor do que de fato é cada tecnologia e como cada uma funciona.

Esse documento se dedica unicamente à tecnologia de PDI (Para-Raios com Dispositivo de Ionização ou ESE

(Early Streamer Emission em inglês).

Desta forma, é importante deixar claro que não se deve confundir a tecnologia PDI (ESE) com outras tecnologias, tais como Para-Raios Radioativos, Charge Transfer System (CTS) ou Dissipation Array Systems (DAS), ou outras propostas tecnológicas, as quais não são sustentadas por nenhuma norma ou certificação e não tem absolutamente relação alguma com a tecnologia de PDI.

Incumbe lembrar que a instalação dos para-raios radioativos chegaram a ser proibidos, primeiramente na França em 1986 e 3 anos depois no Brasil em 1989. O conceito do para-raios radioativo era interessante pois visava aumentar o raio de proteção do para-raios, através de uma ionização contínua da ponta do captor graças à uma pastilha radioativa, na maioria dos casos usando o radioisótopo Amerício-241. Embora o risco de irradiação deste equipamento seja pequeno, o risco de contaminação em caso de contato permanece considerável, dificultando a sua manipulação por pessoas tais como instaladores. Infelizmente, o desenvolvimento do para-raios radioativo não ultrapassou a dimensão caseira, sendo insuficiente para a tecnologia obter comprovações e embasamento para normas específicas e certificações. Por fim, o para-raios radioativo se tornou inviável considerando a ausência de locais apropriados para seu descarte, a fonte

radioativa tendo uma duração de vida de mais de 400 anos. Hoje, a fabricação e instalação deste tipo de captor está interdita no Brasil conforme Resolução No. 4/89 da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, e leis municipais obrigam a remoção de tais equipamentos. Cabe ressaltar que o Amerício-241 ainda é utilizado nos detectores de fumaça, tão comuns em hotéis e edifícios comerciais e residenciais atualmente.

Com relação ao sistema Charge Transfer System (CTS), a proposta desta tecnologia deve ser estudada e avaliada com cautela e isenção, em nenhuma hipótese, associada ao sistema de para-raios com dispositivo de ionização.

2. Fenômeno do raio

Falar de proteção contra raios, sem entender primeiramente o fenômeno, tornaria o estudo incompleto. Conforme definição do INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, descargas atmosféricas são descargas elétricas de grande extensão (alguns quilômetros) e de grande intensidade (picos de intensidade de corrente acima de 1kA), que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro de tempestades. A descarga inicia quando o campo elétrico produzido por estas cargas excede a capacidade isolante do ar, também conhecida como rigidez dielétrica, em um dado local na atmosfera, que pode ser dentro da nuvem ou próximo ao solo. Quebrada a rigidez, traduzido por uma variação brusca do campo elétrico, tem início um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas.

Dentre os vários tipos de descargas atmosféricas, as descargas nuvem-solo (raios) são as mais estudadas e são o objeto dos sistemas de proteção atuais. O raio é o encontro natural entre um líder descendente gerado pela nuvem em direção à terra, com um líder ascendente emitido a partir de pontos altos e condutores, onde existe menor resistência entre o ponto de impacto e a terra, ou seja, lá onde um efeito de ponta intenso e suficiente se produzirá. Como demonstrado na figura 1. abaixo, apenas um líder descendente e um líder ascendente se conectam. O líder ascendente que mais terá se aproximado do líder descendente, em outros termos, que mais terá reduzido a distância com o líder descendente, irá ganhar essa competição natural e se conectar. Como ilustrado nas figuras, o primeiro ascendente a chegar em uma altura suficiente será o escolhido.

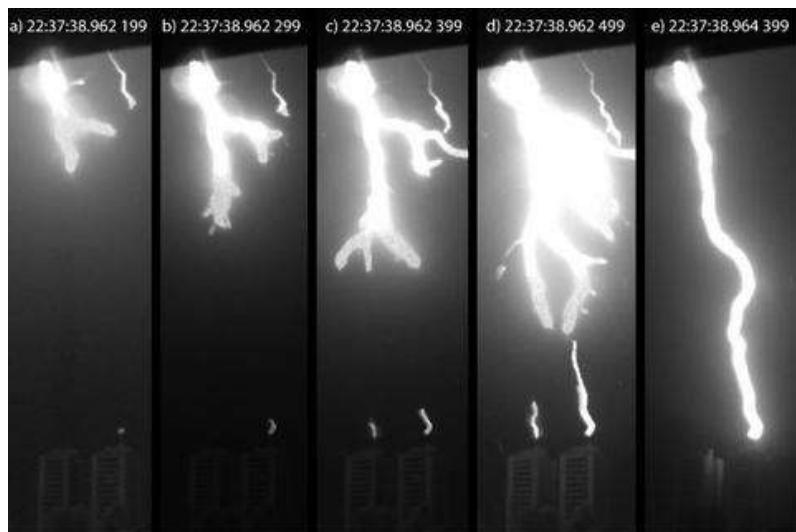


Figura 1.
Competição
entre dois
líderes
ascendentes
emitidos a partir
de para-raios
Franklin,
localizados em
prédios
idênticos.

3. Sistemas de proteção tradicionais

Embora o tema deste documento seja o para-raios com dispositivo de ionização, este estudo não seria completo sem abordar os fundamentos dos sistemas de proteção convencionais, também chamados de sistemas de proteção tradicionais ou passivos. Os sistemas tradicionais usam os três métodos de captação relacionados abaixo:

- Método de Ângulo de Proteção (para-raios tipo Franklin)
- Método de Malhas (gaiola de Faraday)
- Método da Esfera Rolante (Eletro-geométrico)

Os sistemas de proteção tradicionais são baseados nas descobertas fortuitas de Benjamin Franklin no meio do século 18 [2], cujas experimentações o levaram a duas hipóteses:

1. As nuvens estão carregadas eletricamente e um raio é uma descarga elétrica.
2. Objetos pontiagudos e aterrados podem descarregar correntes elétricas sem faísca, ao contrário de objetos rombudos.¹

Com base nesses resultados, a hipótese de que objetos pontiagudos poderiam receber a descarga elétrica e descarregá-la com segurança e sem danificar a infraestrutura, foi testada instalando pontas metálicas em telhados. Foi constatado que, ocasionalmente, quando atingidas, essas pontas protegiam a estrutura,

dando nascimento ao que até hoje é conhecido como para-raios tipo Franklin e aos primeiros sistemas de proteção contra raios. Encontramos por exemplo em um relatório (ver figura 2) de 1824, realizado por Gay Lussac, a pedido do equivalente ao Ministério de Segurança Pública na França, um valor aproximado onde o raio de proteção do para-raios Franklin seria igual ao dobro da sua altura [5].

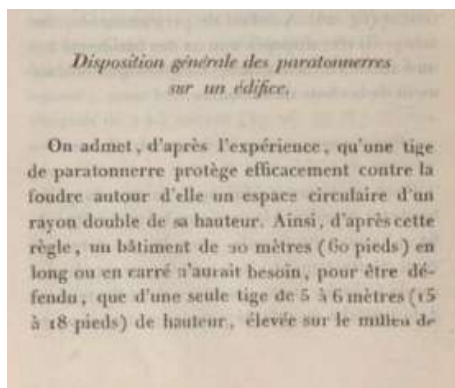


Figura 2. Extrato do relatório

Apesar de que tenham sido publicados numerosos relatórios de danos causados por impactos de raios em edificações protegidas pelo para-raios tipo Franklin [6], [7], [8], [9], os demais estudos da sua eficiência prevaleceram e foram considerados suficientes para determinar o método de ângulo de proteção e considerar este sistema como válido empiricamente.

Vale ressaltar que até hoje, na ciência atual, não existe proteção 100% contra

¹ Pesquisas mostraram que nem sempre captadores pontiagudos seriam melhores, bem pelo contrário [3]. Outras pesquisas demonstraram que os dois tipos de ponta são eficazes dependendo do estágio de desenvolvimento da descarga atmosférica [4].

raios. As normas incluem uma análise de risco criteriosa, envolvendo diversos parâmetros (por exemplo, densidade de raios no local, as dimensões e o tipo de infraestrutura, presença de pessoas, etc), cujo resultado indica o Nível de Proteção, que se situa entre 80% para o nível IV, o menos exigente, e 98% para o nível I, o mais exigente. Ou seja, mesmo no nível I, ainda existe a possibilidade de o raio impactar um ponto indesejado. Esse risco aumenta caso o sistema de proteção contra descargas atmosféricas não esteja dimensionado conforme normas e executado com materiais normatizados.

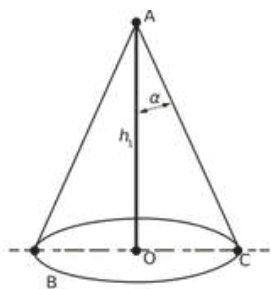


Figura 3. Ângulo de Proteção

Hoje, ainda há dúvidas sobre a exatidão do método do ângulo de proteção e, por consequência da exatidão da área de proteção obtida pelo para-raios tipo Franklin, pois este nunca foi cientificamente testado e medido em condições reais de raios, ou seja, na natureza. Pela primeira vez, em 1999, um relatório oficial da *National Fire Protection Association* enfatizou a falta de rigor científico e de embasamento técnico atrás da aceitação cega dos sistemas tradicio-

-nais: “Parece, segundo o referido Painel, que o documento NFPA 780 não atende aos critérios da NFPA para uma norma, uma vez que o sistema recomendado de proteção contra raios nunca foi cientificamente ou tecnicamente validado e os terminais aéreos - para-raios Franklin - não foram validados em testes de campo sob condições de tempestade” [10] Outros nomes da área de pesquisa também ressaltam: esses terminais aéreos ainda não foram testados e verificados em laboratórios e estudos de campo como sendo a configuração ótima.

Este método continua sendo aplicado na proteção de pequenas estruturas, mas permanece limitado por seu ângulo de proteção, e passa a ser cada vez menos utilizado na proteção de grandes superfícies, apesar do custo relativamente barato do captor tipo Franklin em si.

O sistema de proteção tradicional usando a esfera rolante, baseado no método eletrogeométrico (EGM) se tornou mais viável. O método consiste em rolar-se ao redor de todas as partes externas da edificação uma esfera fictícia, cujo raio (R) corresponde à distância de colisão (striking distance). Esse raio é chamado “raio de atração” e é uma projeção estimada da distância entre o ponto de início do último “salto” do líder descendente e o ponto onde inicia o líder ascendente na estrutura, o qual corresponde ao raio da esfera rolante e depende das características dos raios para cada nível de proteção.

Este método foi inicialmente proposto por Ralph H. Lee em 1978 após estudos realizados em linhas de transmissão. Um modelo similar já tinha sido proposto por Tibor Horvath em 1962. O EGM define essa relação estabelecendo uma extrapolação entre o pico de corrente (I) de uma conexão à distância de colisão (R) através da expressão: **$R = a \cdot I_{max}^b$**

Segundo estudos realizados em grandes redes elétricas de alta tensão, vários valores possíveis de a e b foram propostos, o que torna essa fórmula totalmente estatística, baseada em um modelo empírico. Independentemente disto, cientistas modelaram e quantificaram matematicamente a física das descargas atmosféricas em grandes redes elétricas para chegar ao método eletrogeométrico, permitindo ao GT-33 da CIGRÉ - Conferência Internacional de Grandes Redes Elétricas de Alta-Tensão [11] formular a seguinte equação: **$R = 10 \cdot I_{max}^{0,65}$**

A tabela abaixo estabelece uma relação entre a equação anterior, apesar de ser feita para grandes redes de alta tensão, e os quatro níveis de proteção, quando aplicado em edificações:

Nível de Proteção	I _{max} (kA)	Raio da Esfera Rolante (m)
I	2.9	20
II	5.4	30
III	10.1	45
IV	15.7	60

Figura 4. Raio da Esfera Rolante

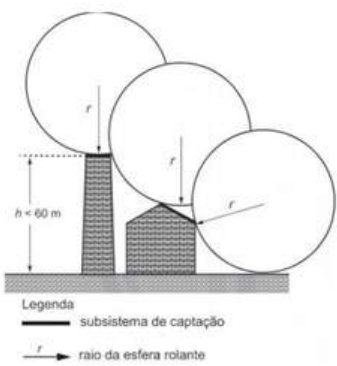


Figura 5. Método da Esfera Rolante

Como todos os sistemas, o posicionamento dos terminais aéreos no método da esfera rolante não garante uma proteção 100%, devido a várias razões: caso uma descarga elétrica seja inferior a corrente limiar, e devido à distância de colisão ser uma média estatística não comprovada em estudo de campo, existe a possibilidade do raio não atingir os terminais aéreos.

Já o método das malhas consiste em instalar no telhado um sistema de captos formados por condutores horizontais, interligados em forma de malha. O conceito, segundo o qual o campo magnético no interior de uma gaiola metálica é nulo e permitiria criar uma blindagem contra interferências eletromagnéticas, foi desenvolvido em 1836 por Michael Faraday e é também conhecido como Gaiola de Faraday. O conceito inicial foi adaptado para se tornar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. De fato, para obter uma gaiola perfeita, a gaiola de Faraday

teria que ser fechada na sua íntegra, o que na prática, no caso de uma edificação, não é possível.

As normas especificam o máximo afastamento dos condutores da malha, conforme tabela abaixo, de maneira arbitrária e, infelizmente, sem estudo de campo comprovando a exatidão desse dimensionamento, mas apenas na base da teoria. Não há garantia que as fitas metálicas utilizadas no método da gaiola de Faraday serão atingidas pela descarga em preferência de outros pontos próximos e expostos [12]. Tradicionalmente, para aumentar a probabilidade de impacto na gaiola, são adicionados terminais aéreos nas interseções dos condutores e, no mínimo, nos cantos.

Nível de Proteção	Máximo afastamento dos condutores da malha (m)
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Figura 6. Método das malhas

As normas especificam também o distanciamento e número de condutores de descida. Embora a quantidade considerável de descidas possa inviabilizar alguns projetos, o distanciamento e número de descidas está justificado. Todavia, muitos profissionais falham na hora de explicar a razão do maior número de condutores de descida na gaiola de Faraday. De fato, o método das malhas exige um maior número de descidas que no método do ângulo de proteção não

por ser melhor, mas por ser necessário.

Ao contrário do para-raios Franklin onde as normas especificam um dimensionamento para que o captor seja o ponto de impacto do raio, o impacto do raio na gaiola de Faraday poderá ocorrer em qualquer ponto da malha. Por tanto, a corrente da descarga precisará de um condutor próximo para se dissipar até o aterramento. A única configuração onde a corrente da descarga se dividirá por igual em todos os condutores do subsistema de captação e de descida da malha, seria obter um impacto de raio no centro exato da malha no telhado de uma edificação, cuja geometria seria perfeitamente simétrica, com aterramentos e comprimento dos condutores idênticos, equidistantes e todos equipotencializados. Na realidade, a probabilidade de obter essa configuração é próxima de 0, sendo que, por exemplo, a probabilidade do impacto do raio ser perfeitamente centralizado é quase nula [13]. Tendo em vista que o impacto do raio nunca acontecerá no centro da gaiola, mas mais provavelmente nos cantos e nas bordas, um simples cálculo vem confirmar que a corrente do raio não se dividirá por igual, mas somente nos condutores mais próximos. Calculando-se a reatância indutiva de um condutor, entende-se que a corrente do raio irá se dividir apenas nos condutores de descida mais próximos, conforme exemplo a seguir:

$$X_L = 2\pi fL$$

Onde:

X_L Reatância Indutiva, em Ohms (Ω)

f Frequência, em Hertz (Hz)

L Indutância, em Henry (H)

Considerando a alta frequência da descarga atmosférica, variando na faixa de 1 KHz à 100 MHz [14], e uma indutância de 1 μ H para um condutor de descida comum (cobre ou alumínio) de 1 metro, obtemos para 10 metros de condutor de descida para uma descarga de 10 MHz uma reatância indutiva muito alta de 628 Ω . Assim sendo, a corrente da descarga atmosférica terá enorme dificuldade para se dividir em condutores de descida opostos, encontrando alta reatância indutiva, e irá preferir se dividir na sua maior proporção no condutor de descida mais próximo.

Considerações sobre a coerência entre os três métodos tradicionais

Os três sistemas tradicionais de proteção, através dos seus métodos respectivos, estão atrelados e algumas considerações podem ser feitas sobre a coerência dos sistemas entre si, para que estes métodos não sejam contraditórios.

Esfera Rolante x Gaiola de Faraday

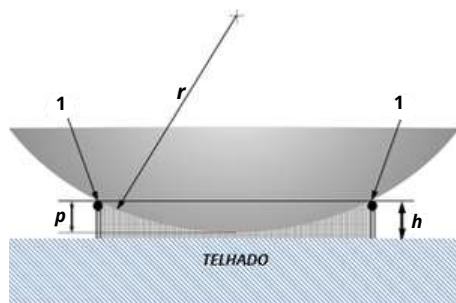
Para ser 100% coerente com as normas de sistemas tradicionais, seria conveniente aplicar, por exemplo, o conceito da esfera rolante em uma gaiola de Faraday. Constatase que,

conforme o método da esfera rolante, o método das malhas sozinho não seria suficiente, pois verifica-se que a esfera rolante, ao rolar sobre a edificação e a gaiola de Faraday, penetra o interior das malhas e toca a estrutura supostamente protegida. Para evitar que a estrutura a ser protegida, esteja em contato com a esfera rolante, é preciso elevar os condutores da malha, conforme a formula normatizada de penetração da esfera-rolante, ilustrado na figura 7 a seguir:

$$p = r - [r^2 - (d/2)^2]^{1/2}$$

Figura 7. Penetração da esfera rolante nas malhas conforme IEC 62305:3

Nível de proteção	Raio da esfera r (m)	Malha d (m)	Penetração p (m)
I	20	5 x 5	0,16
II	30	10 x 10	0,42
III	45	15 x 15	0,63
IV	60	20 x 20	0,84



- 1** Condutores da malha
- r** Raio da esfera rolante
- p** Penetração da esfera no interior e abaixo dos condutores da malha
- h** Altura da malha acima do telhado
- d** Tamanho da malha

Portanto, convém elevar a malha do telhado conforme a formula adequada, ou seja, com 16 cm no nível de proteção I e até 84 cm no nível de proteção IV.

Esfera Rolante x Ângulo de Proteção

Na hora de comparar e verificar a coerência entre o raio de proteção oferecido pelo método de Ângulo de Proteção e o raio de proteção oferecido pelo método da Esfera Rolante, os dois sistemas tradicionais infelizmente se contradizem.

No gráfico a seguir, comparamos os raios de proteção oferecidos pelos dois métodos no Nível I de Proteção.

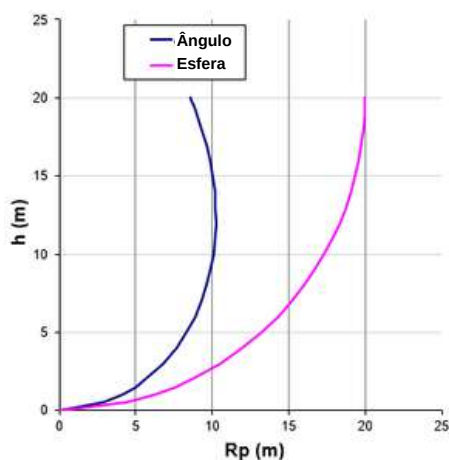


Figura 8. Comparativo dos raios de proteção conforme métodos do Ângulo de Proteção e da Esfera Rolante no Nível I

Independentemente da altura do para-raios, os raios de proteção nos dois métodos não coincidem. Verifica-se na figura 8 acima que os dois métodos oferecem raios de proteção muito

divergentes. Por exemplo, um captor posicionado com 5 metros de altura oferece 13,22 metros de raio de proteção conforme o método da esfera rolante e 8,33 metros de raio de proteção conforme o método do ângulo de proteção. Já quando posicionado com 10 metros de altura, a diferença se torna ainda mais flagrante, onde o captor oferece 17,32 metros de raio de proteção conforme o método da esfera rolante e 10,07 metros conforme o método do ângulo de proteção. Esta discrepância pode causar grande margem de insegurança para projetistas nos dimensionamentos dos métodos citados, e revela falta de rigor científico.

Sistemas de proteção tradicionais são baseados em mais de 250 anos de observações empíricas da sua eficiência no caso do para-raios Franklin, e uma experiência levemente mais curta no caso de sistemas mais recentes como a Gaiola de Faraday (1836) ou o Método da Esfera Rolante (1978). A principal validação dos sistemas tradicionais permanece a validação empírica, faltando rigor científico no que tange a outros tipos de comprovações em laboratório e em campo e por uma razão bem simples: o fenômeno da descarga atmosférica é extremamente complexo. Devido à sua natureza altamente aleatória, à sua velocidade (da ordem de microssegundos), à sua potência e à complexidade dos mecanismos da descarga, o entendimento do

fenômeno ainda está longe de ser satisfatório. Portanto, as normas mantêm a validação empírica como a mais significativa, resultando em métodos supostamente aceitáveis. No capítulo a seguir, veremos que, além da sua evidente validação empírica, o funcionamento do sistema moderno de proteção de para-raios com dispositivo de ionização foi cientificamente comprovado através de ensaios em laboratório, bem como muitas das suas características foram demonstradas em estudos de campo em condições reais de tempestade.

4. Sistema de proteção moderno: para-raios com dispositivo de ionização - PDI

Histórico

A tecnologia de para-raios com dispositivo de Ionização (PDI), também conhecida como *Early Streamer Emission Air Terminal* (ESEAT), emissão antecipada do líder em inglês, mais comumente chamado de para-raios ionizante, ou sistema ativo, nasceu na França no final do ano 1985, já prevendo a futura proibição do para-raios radioativo. O para-raios com dispositivo de ionização é o único sistema moderno de proteção a ganhar relevância no mercado. Duas empresas francesas pioneiras estiveram na origem da tecnologia: Indelec e Helita-Soulé (adquirida e comercializada hoje pela multinacional ABB). Elas foram rapidamente seguidas nessas três décadas de existência por fabricantes de diversas nacionalidades, tais como americanos, australianos e espanhóis.

"O PDI no Brasil não é um sistema novo, pois pioneiros brasileiros enxergaram lacunas no mercado e começaram importar este sistema já há 25 anos atrás, logo após sua criação. Durante minha atuação como assessor técnico de engenharia na Carteira de Comércio Exterior do Banco do Brasil, fomos responsáveis pela análise e liberação dos primeiros pedidos de importação de para-raios ionizantes a entrar no mercado dos 3 estados da região sul. A documentação e catálogos eram todos na língua francesa e havia uma escassez de dados técnicos sobre o assunto. Nos valíamos de informações

da indústria eletro-eletrônica e junto a universidades. Quando voltei a me interessar sobre o assunto, percebi o quanto a tecnologia se desenvolveu e fiquei surpreso com a quantidade de pesquisas realizadas e o número de ensaios e certificações adquiridos nessas últimas décadas. Hoje, ainda é possível encontrar os primeiros modelos instalados, principalmente na região sul, em monumentos históricos tais como o Santuário das Mães em Novo Hamburgo, RS, desde 1988, em universidades tais como a Unisinos em São Leopoldo, RS, desde 1998 e em indústrias tais como a Renault em São José dos Pinhais, PR desde 1998. Fui pessoalmente testar em 2018 os para-raios com testador específico do fabricante em questão e os circuitos ainda estavam respondendo e operacionais. Cabe ressaltar que a evolução do sistema PDI também foi grandemente proporcionada pelo enorme desenvolvimento de sistemas e dispositivos eletrônicos como chips de microeletrônica, processamento e potência surgidos com a indústria da tecnologias da informação destas últimas décadas."

Eng. Eletricista Claudio Vieira

Conceito

O Para-Raios com Dispositivo de Ionização usa a mesma base teórica dos sistemas tradicionais e baseia seu funcionamento nas características elétricas da formação do raio. Enquanto sistemas de proteção tradicionais são passivos, onde o líder ascendente é emitido de forma

natural e aleatória, o para-raios com dispositivo de ionização é ativo, e o líder ascendente é emitido naturalmente, mas de maneira controlada, ou seja, atua para antecipar a emissão do líder ascendente, resultando em várias vantagens:

- maior probabilidade de captação
- conexão com o líder descendente em altura maior
- maior raio de proteção

Essa antecipação, pelo captor ativo, é possível graças à detecção dinâmica da variação brusca do campo elétrico entre a nuvem e a terra, sinônima de aproximação do líder descendente. O objetivo sendo intensificar a ionização na ponta do captor no momento exato, essa ação permite quebrar a rigidez dielétrica do ar isolante e favorece desenvolvimento e emissão do líder ascendente, com dezenas de microssegundos de antecipação, buscando a conexão com o líder descendente em altura maior, o que o torna o ponto de impacto preferencial da descarga atmosférica.²

Os para-raios com dispositivo de ionização mais confiáveis são geralmente de tipo eletrônico, baseados em um circuito composto por capacitores, componentes ativos e microprocessadores que detectam a variação do campo elétrico $\Delta E/\Delta t$. Esses circuitos geram centelhamentos elétricos entre os eletrodos e a ponta do equipamento, modificando intencionalmente as linhas do campo ao topo da ponta, facilitando a ionização natural do ar em um momento preciso. Vale ressaltar que a

função do PDI é controlar a emissão natural do líder ascendente e, não emití-lo, uma vez que nenhum equipamento de origem humana poderia gerar energia suficiente para emitir um fenômeno natural desta potência.

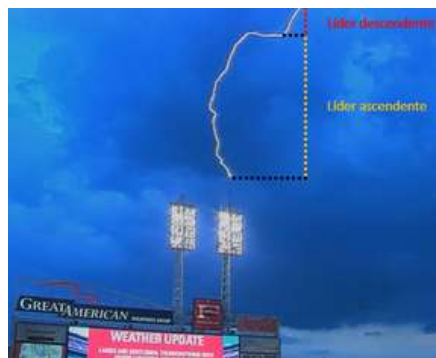


Figura 9. Atuação de um para-raios ionizante na proteção de um estádio

Normas vigentes

Assim como muitas outras normas, a normalização de sistemas tradicionais e modernos de proteção contra raios sempre foi origem de longos debates. O processo de elaboração das normas técnicas brasileiras está muito bem estruturado, permitindo a participação da sociedade em geral. Mas, infelizmente, a participação da sociedade como um todo na elaboração das normas é mínima. Em alguns casos, a elaboração da norma conta, principalmente, com a participação de interessados, como fabricantes de produtos, mas com pouca interação do consumidor em geral, especialmente, quando se trata de “commodities” [15]. No que diz respeito a SPDA, um bom exemplo de commodity seria o cobre.

² Para alguns tipos de PDI, existe a neutralização das cargas de espaço (space charge) ao redor da ponta.

A norma de referência para proteção contra descargas atmosféricas com sistemas de proteção com dispositivo de ionização é a norma francesa NFC 17102 - *Protection contre la foudre - Systèmes de protection contre la foudre à dispositif d'amorçage*, pois foi a primeira no mundo a estabelecer padrões para o uso desta tecnologia, cuja primeira versão foi publicada em 1995. Essa norma foi traduzida, às vezes adaptada, e passou a vigorar em vários países e idiomas tais como na Espanha com a UNE 21.186 - *Protección de estructuras, edificaciones y zonas abiertas mediante pararrayos con dispositivo de cebado*, em Portugal com a NP 4426 - *Proteção contra descargas atmosféricas, Sistemas com dispositivo de ionização não radioativo*, na Argentina com a IRAM 2426 - *Pararrayos con dispositivo de cebado para la protección de estructuras y de edificios*, na Romênia com a I20 - *Normativ Privind Protecția Construcțiilor Împotriva Trăsnetului*, na Turquia com a TSE K 122 - *Yildirimdan Korunma – Erken Akim Yayan Hava Bağlantı Uçları Kullanılarak Yapıların Ve Açık Alanların Yıldırma Karşı Korunması – Aktif Paratonerler*, em Angola com a N33 - *Proteção contra Descargas Atmosféricas*, etc. Hoje, as normas de PDI existentes são amplamente utilizadas no mundo, especialmente na ausência de uma norma específica no país em questão. Por exemplo, diversos países hispânicos da América Latina adotam naturalmente a norma espanhola UNE 21.186, assim como nos EUA,

onde uma versão em inglês da norma francesa NFC 17102 é amplamente utilizada, inclusive por instituições certificadoras como a Underwriters Laboratories – UL, ou na União Europeia, onde normas nacionais podem ser utilizadas por outros países conforme o artigo 34 do Tratado da União Europeia regulamentando a livre circulação de bens, serviços e pessoas. No Brasil, por se tratar de uma norma de sistemas tradicionais, a NBR 5419:2015 não proíbe, apenas não contempla o sistema de para-raios com dispositivo de ionização, conforme item 5.2.1 da parte 3.

As normas NFC 17102:2011, NP 4426:2013 e UNE 21.186:2011 adotaram vários requisitos da norma internacional de proteção com sistemas tradicionais IEC 62305, tais como os mesmos quatro níveis de proteção baseados em análise de risco, o dimensionamento específico para estruturas altas com requisitos adicionais, os arranjos de aterramentos Tipo A e Tipo B, as medidas de proteção contra tensão de toque e de passo e o cronograma de inspeção do SPDA. Também incluíram requisitos da série IEC 62561 sobre os componentes e materiais a serem utilizados no SPDA. Interessante mencionar que a NFC 17102:1995 foi revisada em 2011 para atender a exigência do CENELEC - Comité Européen de Normalização Eletrotécnica e foi a base para que o mesmo respondesse à ICLP - International Conference on Lightning Protection que a NFC 17102:2011 não é conflitante com a IEC 62305.

Dimensionamento

A fórmula de cálculo do raio de proteção do Para-raios com Dispositivo de Ionização é uma fórmula normatizada, muito similar e baseada também no modelo eletro-geométrico (EGM).

$$R_p(h) = \sqrt{2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta)} \quad \text{para } h \geq 5 \text{ m}$$

$$R_p = h \times R_p(5) / 5 \quad \text{para } 2 \text{ m} \leq h \leq 5 \text{ m}$$

- R_p** Raio de proteção
r Raio da esfera rolante definido em função do nível de proteção
h Altura do captor acima da estrutura
Δ Comprimento do líder antecipado, calculado conforme a fórmula:

$$\Delta = \Delta T \times V$$

Onde:

- ΔT** Tempo de antecipação do líder ascendente do para-raios
V Velocidade do líder ascendente de 1m/μs

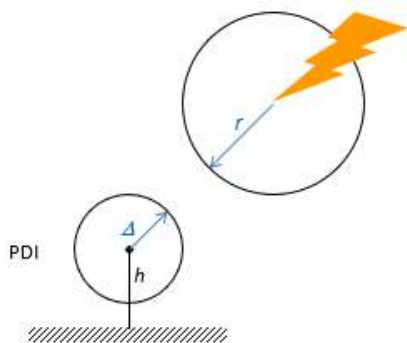


Figura 10. Modelo de proteção do para-raios ionizante

A fim de facilitar o entendimento, os raios de proteção se encontram calculados em função do nível de proteção, tempo de antecipação do para-raios e altura do captor, nas tabelas abaixo:

Nível de Proteção I – Raio da Esfera Rolante $r = 20\text{m}$					
$\Delta T (\mu\text{s}) \backslash H(\text{m})$	2	3	4	5	10
60	31	47	63	79	79
50	27	41	55	68	69
40	23	35	46	58	59
25	17	24	34	42	44
10	10	15	21	26	28

Nível de Proteção II – Raio da Esfera Rolante $r = 30\text{m}$					
$\Delta T (\mu\text{s}) \backslash H(\text{m})$	2	3	4	5	10
60	34	52	68	86	88
50	30	45	60	76	77
40	26	39	52	65	67
25	19	29	39	49	51
10	12	19	25	31	34

Nível de Proteção III – Raio da Esfera Rolante $r = 45\text{m}$					
$\Delta T (\mu\text{s}) \backslash H(\text{m})$	2	3	4	5	10
60	39	58	78	97	99
50	34	52	69	86	88
40	30	45	60	75	77
25	23	34	46	57	61
10	15	22	30	38	42

Nível de Proteção IV – Raio da Esfera Rolante $r = 60\text{m}$					
$\Delta T (\mu\text{s}) \backslash H(\text{m})$	2	3	4	5	10
60	43	64	85	107	109
50	38	57	76	95	98
40	33	50	67	84	87
25	26	39	52	65	69
10	17	26	34	43	49

No **nível de proteção I**, um para-raios ionizante com **60μs de antecipação**, instalado em um **mastro de 5 metros** acima do ponto mais alto da estrutura a proteger, oferece uma área circular de **79 metros de raio de proteção**, ou seja, 158 metros de diâmetro de proteção.

Considerações sobre a velocidade do líder ascendente

Por quatro razões principais, permanece difícil determinar com exatidão a velocidade do líder ascendente:

1) Muitos casos estudados por cientistas relatam apenas líderes ascendentes emitidos por estruturas e edifícios altos como montanhas ou torres, lidando com raios positivos ascendentes, em vez de raios negativos descendentes, muito mais comuns na natureza.

2) Na maioria dos casos, a velocidade de desenvolvimento do líder ascendente é medida com equipamentos óticos, em duas dimensões. O cálculo da trajetória do líder ascendente é realizado na sua projeção e conversão de um volume em 3D para um plano em 2D. Essa conversão induz uma certa redução da medição da distância percorrida pelo líder. A velocidade do líder ascendente é igual à sua distância em metros (projetado) dividida pelo tempo em microssegundos: uma vez que a distância percorrida é subestimada, a velocidade real deveria ser maior que a velocidade medida e, portanto, também é sempre subestimada.

3) Dependendo das condições climáticas e geográficas locais, as características da descarga atmosférica podem variar.

4) A trajetória do líder ascendente não é linear, bem como do líder descendente. O líder ascendente positivo se desenvolve de maneira

continua, todavia, como visto nas figuras anteriores 1 e 9, a velocidade do líder ascendente não é linear com o tempo e varia em função da sua elevação.

Ainda há debates na comunidade científica sobre a velocidade do líder ascendente. Equipes de cientistas apresentaram diferentes medições, tais como os resultados a seguir:

- A equipe de pesquisa de V. Rakov (University of Florida) sugere uma velocidade do líder ascendente de 1 até 2 m/ μ s [16]
- Bazelyan e Raiser sugerem uma velocidade entre 0,1 até 10 m/ μ s [17]
- Yokogawa et al., através do system ALPS (Automatic Lightning Discharge Progressing Feature Observation System), desenvolvido no Japão nos anos 90, sugere uma velocidade do líder ascendente de 0,3 até 10 m/ μ s [18]

Somando todas essas incertezas e considerando a falta de dados disponíveis sobre a velocidade do líder ascendente na literatura, comitês normativos concordaram com unanimidade em determinar uma velocidade média, baixa, estimada, de 1 m/ μ s, cujo valor parece ser o mais realístico com base no conhecimento que temos sobre o fenômeno e do feedback obtido por instalações reais. Na prática, esse cenário conservador traz uma certa margem de segurança para projetistas, responsáveis e usuários.

Para confirmar este último comentário, foi modelado o raio de proteção, para cada nível de proteção (I até IV), em função de vários valores de velocidade, de 0,1 m/μs até 1 m/μs (ver figura 11). O raio de proteção de um para-raios simples (*simple rod*) (conforme o método de ângulo de proteção) e um para-raios com dispositivo de ionização com 60μs de antecipação (*ESE*), ambos montados sobre mastros de 5 metros de altura, são comparados no gráfico abaixo: podemos ver claramente que o para-raios com dispositivo de ionização oferece um raio de proteção superior ao do para-raios simples para todas as velocidades, baixas ou altas, do líder ascendente.

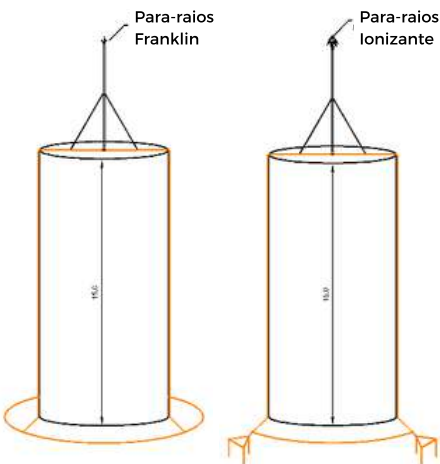


Figura 12. Comparativo em caixa d'água

As normas NFC 17102:2011, NP 4426:2013 e UNE 21.186:2011, por se tratarem de para-raios com tecnologia embarcada, se tornaram ainda mais exigentes nas suas últimas revisões, com o objetivo de garantir a eficiência esperada de um para-raios com dispositivo de ionização. Apesar da instalação de um para-raios ionizante ser muito similar à instalação de um para-raios Franklin (ver figura 12), normas de para-raios com dispositivo de ionização prescrevem uma sequência de testes (ver figura 13), a saber:

Requisitos de teste e certificação

- A. Testes de marcação (nome do fabricante, número de série, selos das certificações);
- B. Testes mecânicos
- C. Testes ambientais em névoa salina e atmosfera úmida sulfúrica;
- D. Teste de corrente (resistência do para-raios ionizante à impactos de corrente de raio de 100 kA à onda 10/350μs);

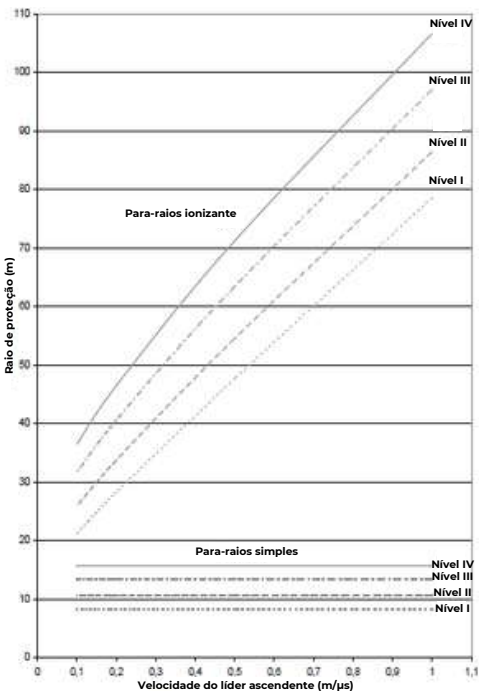


Figura 11. Modelagem de raio de proteção / velocidade do líder

E. Determinação do tempo de antecipação (ΔT) de acordo com um critério rigoroso de desvio padrão.

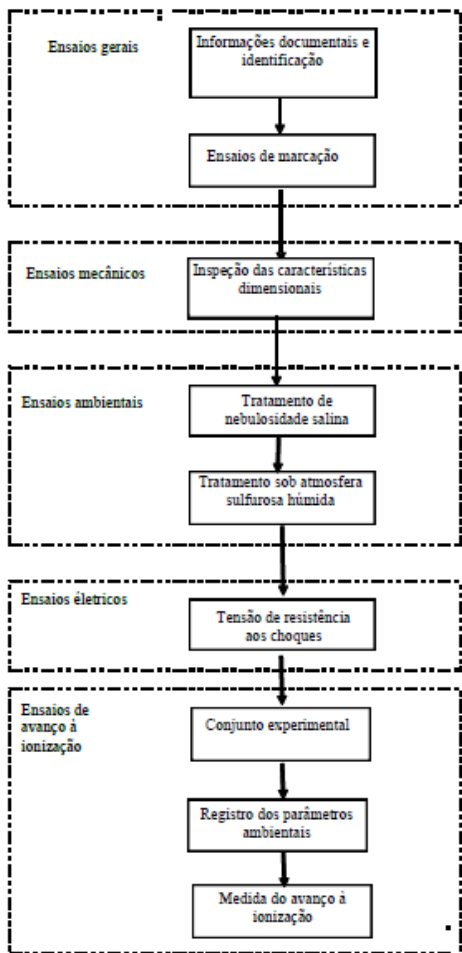


Figura 13. Sequência de testes conforme Anexo C. das NFC 17102:2011, NP 4426:2013 e UNE 21.186:2011

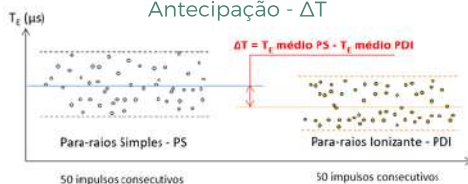
Para o para-raios ser caracterizado como para-raios com dispositivo de ionização, os fabricantes precisam cumprir as seguintes condições:

- $TPDI < TPS$: o tempo de emissão do líder ascendente para o PDI deve ser inferior ao tempo de emissão para um para-raios simples, ou seja, deve oferecer um tempo de antecipação;
- $TPS - TPDI \geq 10\mu s$: o tempo de antecipação do PDI deve respeitar um mínimo de $10\mu s$ e um máximo de $60\mu s$.

A medição do tempo de antecipação é realizada mediante ensaios em laboratório de alta tensão que consistem em aplicar 50 impulsos de corrente consecutivos em um para-raios simples e 50 em um para-raios ionizante. Este teste permite obter os tempos em que o para-raios simples e o PDI demoram para captar cada impacto, ou seja, o tempo de emissão do líder ascendente. A subtração das médias destes tempos de emissão permite que se obtenha o tempo de antecipação ΔT do PDI, em relação ao para-raios simples.

Os ensaios são realizados comparando-se os tempos médios de emissão de um para-raios simples com os tempos médios de emissão de para-raios ionizantes com ΔT de $10\mu s$ até $60\mu s$ de antecipação, como ilustrado na figura 14.

Figura 14. Cálculo do Tempo de Antecipação - ΔT

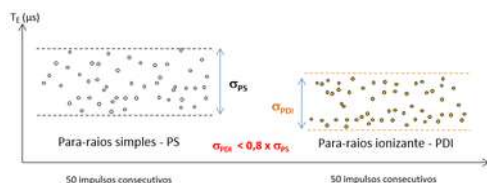


Além da medição do tempo de antecipação ΔT , as normas exigem que o para-raios ionizante respeite um desvio padrão específico, de tal modo que garanta uma determinada uniformidade nas medidas da antecipação do líder ascendente em torno do valor médio. Para tal, os desvios padrão σ dos para-raios ionizante e do para-raios simples são calculados.

Portanto, para ser caracterizado como para-raios ionizante, fabricantes precisam cumprir a seguinte condição adicional:

- $\sigma \text{ PDI} < 0,8 < \sigma \text{ PS}$, ou seja, o valor do desvio padrão do PDI deve ser no mínimo 20% mais baixo que o valor do desvio padrão de um para-raios simples. Em outras palavras, as medidas dos tempos de antecipação de um PDI devem estar mais uniformemente concentradas em torno do valor médio destas medidas em comparação com as medidas do do para-raios simples, ou seja, devem apresentar uma amplitude σ baixa (ver figura 15).

Figura 15. Cálculo do Desvio Padrão - σ



Nenhuma outra norma de para-raios no mundo fornece e exige um critério de desempenho para terminais aéreos tais como o estabelecido nas normas francesa, portuguesa, espanhola e outras. Por exemplo, a norma IEC 62305 não fornece orientação sobre ensaios para o desempenho esperado de para-raios Franklin ou da gaiola de Faraday, seja em testes de laboratórios ou em campo.

Os ensaios requeridos pelas normas de PDI acima citadas, para serem considerados válidos, devem ser supervisionados e certificados por organismos independentes de certificação. Na próxima página, alguns laboratórios que já testaram a tecnologia foram relacionados (ver figura 16).

Depois dos argumentos acima expostos e uma vez analisados, pode-se considerar bem fundamentada a eficácia e a confiabilidade da tecnologia de para-raios com dispositivo de ionização. Além disso, vale ressaltar que as normas de para-raios ionizante e sua fórmula de cálculo dos raios de proteção, consideram um cenário conservador, trazendo maior segurança para engenheiros responsáveis e usuários finais, onde:

- a velocidade do líder ascendente considerada é apenas uma média, enquanto a velocidade pode ser menor ou maior na realidade;
- o tempo de antecipação do para-raios ionizante é limitado normativamente à $60\mu s$, podendo

ser levemente maior na realidade;

- um para-raios ionizante poderá ter uma variação no seu tempo de antecipação, mas sempre respeitando um desvio padrão normatizado e menor que o de um para-raios simples.

Por fim, a adoção do sistema de para-raios ionizante por profissionais já ha-

-bituados com sistemas tradicionais demonstrou ser de fácil entendimento e aplicação, uma vez que os sistemas de para-raios Franklin e para-raios ionizante tem muitas semelhanças, tanto no seu projeto e dimensionamento, como na sua instalação, para não dizer iguais, sendo a principal diferença o uso de um captor ativo cujo raio de proteção é maior.

Figura 16. Relação de laboratórios internacionais

Laboratório	Localização	Ensaio
ABB - COFRAC	Chassieu, França	<i>Efficiency Measurement*</i>
CITEL	Reims, França	Teste de Corrente
CNRS Ampère Lab	Lyon, França	<i>Efficiency Measurement</i>
EDP (Energias do Portugal) - LABELEC	Lisboa, Portugal	<i>Efficiency Measurement</i>
ELEMKO	Atenas, Grécia	Teste de Corrente e Ambiental
GERAC Laboratory	Limoges, França	Teste de Corrente
High Voltage Test Laboratory of Beijing	Pequim, China	<i>Efficiency Measurement</i>
Instituto Tecnológico de Energia	Valencia, Espanha	<i>Efficiency Measurement /</i> Teste de Corrente e Ambiental
Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy	Varsóvia, Polônia	Teste de Corrente
Instytut Techniki Budowlanej - Building Research Institute	Varsóvia, Polônia	Teste Ambiental
Laboratoire Central des Industries Électriques - LCIE	Fontenay aux Roses, França	Teste Ambiental
Lightning Research & Innovation Institute	Douai, França	<i>Efficiency Measurement /</i> Teste de Corrente e Ambiental
SEDIVER Centre d'Essais	Bazet, França	<i>Efficiency Measurement</i>
Shanghai Grand Top Lightning Technology Laboratory	Xangai, China	Teste de Corrente
Shanghai Lightning Protection Center Laboratory	Xangai, China	<i>Efficiency Measurement</i>
SIAME - Université de Pau	Pau, França	<i>Efficiency Measurement</i>
Technische Universität Ilmenau	Ilmenau, Alemanha	Teste de Corrente
UL Laboratories	NY, EUA	<i>Efficiency Measurement</i>
UNICAMP	Campinas, Brasil	Teste de Corrente

*Efficiency measurement: Medição do tempo de antecipação e do desvio padrão

5. Comprovações da tecnologia

Para atestar a eficácia e a confiabilidade da tecnologia já demonstradas, relacionamos a seguir dados sobre diversos levantamentos, estudos e pesquisas que as validam. Somando todos os fabricantes, estima-se em mais de um milhão o

número de para-raios com dispositivo de ionização instalados ao redor do mundo em 35 anos. A tecnologia se expandiu em todos os continentes e está sendo amplamente utilizada, como ilustrado na figura 17. abaixo.

Figura 17. Para-raios com dispositivo de ionização no mundo



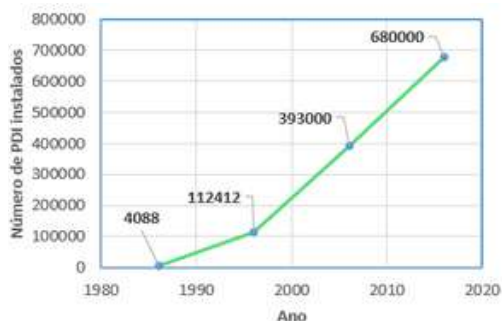
Conforme estatísticas oficiais da *International Lightning Protection Association* (ILPA)³, ilustradas no gráfico abaixo (ver figura 18), considerando apenas fabricantes franceses e espanhóis, em 1986, que é o primeiro ano de estatísticas disponíveis, o número de para-raios ionizante foi de 4.088, quando em 1996 já era um número acumulado de 112.412 unidades. Em 2006, o número

acumulado era de 393.000 até chegar em 680.000 unidades em 2016. Este número é obviamente menor que o número real de unidades instaladas no mundo, sendo que fabricantes de outras nacionalidades não foram contabilizados. Isso significa que a experiência e a credibilidade da tecnologia acumulada ao longo desses 35 anos, é muito extensa

³ ILPA : Associação Internacional de Proteção contra Raios criada em 2006 e que se destina a fazer o inventário de elementos científicos, técnicos e práticos para sustentar a modernização da proteção contra raios e avançar as técnicas de proteção contra raios no futuro.

e conclusiva, com estudos apresentando percentual de falhas inferior aos sistemas tradicionais de proteção e com resultados em conformidade com os níveis de proteção projetados.

Figura 18. Número de para-raios ionizantes instalados entre 1986 e 2016.



Esses números, apoiados por dados coletados em contadores de raios, somados aos depoimentos de usuários finais, exprimindo suas experiências e satisfação a respeito do funcionamento dos para-raios ionizantes instalados, se mostram suficientes para justificar o mesmo tipo de comprovação que os sistemas tradicionais de proteção: a validação empírica e estatística.

A validação empírica é reconhecida através de estudos publicados e aceitos. A título de exemplo, cinco pesquisas serão detalhadas na próxima parte, realizadas ambas na Europa (França e Espanha) e também em regiões do planeta particularmente atingidas: Malásia e Cuba.

Validação Empírica

Em 2002, o instituto de pesquisa privado e independente de renome mundial, IPSOS, através de uma pesquisa realizada na França, a pedido do Instituto Nacional para Ambientes Industriais & Riscos - INERIS do Ministério do Meio Ambiente e do GIMELEC (*Groupement des Entreprises de la Filière Électronumérique Française*)⁴ [19], veio confirmar a validação empírica do para-raios com dispositivo de ionização. Foram abordadas 1581 indústrias das quais 489 responderam à pesquisa. Dessas 489 indústrias, 78,9% eram protegidas por algum sistema de proteção contra descargas atmosféricas. A satisfação geral dos gerentes industriais entrevistados foi de 95,7% para as indústrias protegidas por para-raios ionizante, 96% para as indústrias protegidas por gaiola de Faraday e 89,7% para as indústrias protegidas por para-raios Franklin. Esses resultados corroboram os dados obtidos após o estabelecimento das primeiras normas de sistemas tradicionais de proteção contra descargas atmosféricas [20], assim como as primeiras décadas após a normalização e intensificação da instalação dos para-raios ionizantes.

Em 2014, um outro estudo foi realizado no mesmo âmbito na França: receber feedback sobre a utilização do para-raios com dispositivo de ionização, entrevistando

⁴ Sindicato Profissional da Indústria Eletrônica Francesa

sob o controle ético do GIMELEC, 204 locais, protegidos por um total de 1580 para-raios ionizantes instalados [21]. Dentro desse grupo de locais estudados, 40 foram impactados por descargas atmosféricas, representando um total de 320 para-raios com dispositivo de ionização atingidos. Apenas 5 locais reportaram danos, sendo 2 devido à impactos dentro do raio de proteção projetado (ressaltando que o nível de proteção mais rigoroso, Nível I, oferece apenas 98% de probabilidade de captação) e 3 devido à ausência de dispositivos de proteção contra surtos. 45% dos usuários reportaram estar satisfeitos com a proteção do sistema, e 48% muito satisfeitos. Esse estudo, além de ser uma evidência estatística, também representa uma evidência experiencial do funcionamento do para-raios ionizante.

Ainda em 2014, foi publicada na Espanha mais uma pesquisa conduzida sob supervisão do *Energy Technological Institute* (ITE), centro tecnológico ligado à Universidade Politécnica de Valencia [22]. Com 4645 instalações de para-raios com dispositivo de ionização, instalados entre 1998 e 2009, todas tendo sido vistoriadas periodicamente e também recentemente, essa pesquisa pode ser considerada sem precedente e de extrema relevância pois nunca havia sido apresentado um número de instalações tão considerável e tão detalhado para uma pesquisa no segmento de para-raios. Baseado em

entrevistas, registros de seguradoras e relatórios de inspeção conforme normas, constatou-se que nenhuma instalação registrou danos por conta de descarga atmosférica, além do que, 2019 instalações estavam equipadas com contadores de raios, registrando 549 impactos de raio. Esses dados representam, indubitavelmente, mais uma demonstração da validação empírica da tecnologia de para-raios com dispositivo de ionização.

Outro instituto de pesquisa privado e independente, a Mega Jati Consult Sdn Bhd (MJCSB), realizou em 2016 na Malásia⁵ uma pesquisa a pedido do Departamento de Regulamentação de Segurança Elétrica da Comissão Nacional de Energia (*Suruhanjaya Tenaga - ST*) [24]. Um total de 419 edifícios foram inspecionados e categorizados (como edifícios residenciais, edifícios governamentais, escolas, indústrias, aeroportos, etc.). 88% destes edifícios eram protegidos por um SPDA. Essa proporção de infraestruturas protegidas é maior do que a de outros países, como na França (79% protegidas), muito provavelmente devido à presença de tempestade e à densidade de raios muito maior na Malásia.

Dos 306 edifícios protegidos por um sistema de proteção tradicional, 22 sofreram danos devido a impacto de raios (seja na estrutura ou interrupção elétrica, interrupção das telecomunicações ou perdas), ou seja, 7,18%.

⁵ Com uma densidade de raios de aproximadamente 15-20 descargas por km² por ano, a Malásia é um dos países mais atingidos no mundo [23].

Dos 64 prédios protegidos por um para-raios com um dispositivo de ionização, apenas 3 sofreram danos causados por raios, ou seja, 4,68%. Esse resultado demonstra de forma factual que a utilização de para-raios ionizante apresenta uma taxa de falhas pelo menos igual e até menor no caso dessa pesquisa, que dos sistemas de proteção tradicionais. As amostragens sendo coerentes e suficientes para serem relevantes, vem a reforçar mais uma vez a validação empírica do sistema.

Na mesma linha que o estudo anterior, analisamos um estudo originado em Cuba em 2011 [25], pelo próprio Comité Cubano de Eletrotécnica, responsável pela normalização dentro da *Oficina Nacional de Normalización* em Cuba, equivalente ao COBEL no âmbito da ABNT. Tão relevante quanto o estudo da Malásia, este estudo emanou de um país semelhante ao Brasil, em termos de localização (América Latina), de clima (tropical e subtropical, conforme classificação climática de Köppen, propício para descargas atmosféricas), de densidade de raios (elevada) e de taxa de fatalidade (média de 65 vítimas por ano). Como se não bastasse, a *Agencia de Protección contra Incendios* (APCI) é o órgão público responsável pela certificação e fiscalização dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas na ilha cubana, semelhante aos nossos corpos de bombeiros, registrando com precisão estatísticas sobre instalações e aciden-

-tes com raios. Assim sendo, os dados desta pesquisa são vistos como particularmente representativos.

Os dados da APCI registram no país 690 sistemas passivos (para-raios Franklin e gaiola de Faraday) e 6940 sistemas ativos (para-raios com dispositivo de ionização) e demonstram que a experiência com esse amplo grupo de sistemas foi muito satisfatória. De fato, o índice de acidentes em estruturas protegidas é baixo e investigações apontam motivos que não desacreditam nenhum dos três sistemas de proteção: defeito ou falha no projeto, falta de manutenção, conduta humana inapropriada, ausência de DPS e danos mínimos, abaixo da taxa tolerável e de acordo com os níveis de proteção. Além de ser uma confirmação da validação empírica para ambos sistemas, tradicionais e modernos, em uma região com densidade de raios severa, acrescenta-se que ambos sistemas convivem perfeitamente, seguindo normas respectivas não conflitantes: a norma IEC 62305 para os sistemas passivos e a norma espanhola UNE 21.186 para o sistema ativo de para-raios com dispositivo de ionização, na ausência de normas cubanas específicas.

Coerente com as comprovações dos sistemas tradicionais, a extensa validação empírica do para-raios com dispositivo de ionização demonstrou ser suficiente até hoje para sustentar a expansão da tecnologia no mundo.

Apesar da descarga atmosférica ser um fenômeno de extrema complexidade para ser estudada, por envolver muitas variáveis fora do controle humano, como já expostas anteriormente, a tecnologia de para-raios com dispositivo de ionização também se embasa em outras comprovações além da validação empírica. Em 35 anos de existência, experimentações em laboratório e em campo vieram complementar e fundamentar sua eficiência.

Validação em laboratório

O simples fato de uma norma exigir ensaios comprobatórios de parâmetros de desempenho como o tempo antecipação do para-raios com dispositivo de ionização, além do seu desvio padrão, representa uma validação para os fabricantes que cumprirem com esses requisitos normativos, atestados por diversas certificações independentes.

De fato, nas suas últimas revisões, as normas NFC 17102:2011, NP 4426:2013 e UNE 21.186:2011 reforçaram ainda mais as exigências da sequência de ensaios em laboratório, adicionando novos padrões para a medição do tempo de antecipação do para-raios com dispositivo de ionização (limitado à mínimo $10\mu\text{s}$ e máximo $60\mu\text{s}$, adição de um desvio padrão, 50 impactos consecutivos sem admissão de falhas), e novas exigências como os testes de altas correntes (100 kA à forma de onda 10/350 μs), ensaios EMC (Compatibilidade Eletromagnética) e ambientais.

Enquanto o ensaio normativo requer que a medição do tempo de antecipação seja calculado testando alternadamente um para-raios simples e um para-raios com dispositivo de ionização, cientistas foram ainda mais longe, implementando um ensaio similar, testando os dois tipos de para-raios simultaneamente [26]. Essa nova técnica visa comprovar novamente a eficiência do para-raios ionizante em comparação com o para-raios simples. Neste ensaio realizado no laboratório SIAME da Universidade de Pau na França, todas as descargas impactaram o para-raios ionizante ($60\mu\text{s}$ de antecipação). Um último detalhe, mas não menos importante, seria o valor de pico da carga induzida na ponta do para-raios ionizante e registrada como duas vezes maior que a carga induzida naturalmente na ponta do para-raios simples, garantindo desta forma uma emissão antecipada do líder ascendente.

Descargas atmosféricas em um local determinado são infrequentes e estudos de campo demandam longos períodos de tempo. Testes podem ser realizados mais prontamente em laboratório utilizando geradores de alta tensão [3]. A vantagem do laboratório reside no fato de que os parâmetros de testes, tais como a voltagem ou corrente aplicadas, as condições do ambiente e configurações geométricas podem ser controladas e ao mesmo tempo, fornecer uma quantidade de dados estatisticamente significativa [27].

Embora seja comum encontrar alegações de que sistemas tradicionais não precisam de ensaios para comprovar os seus subsistemas de captação, recentes estudos de campo demonstram que um para-raios simples reagiria de maneiras diferentes em relação ao seu raio de proteção em função do formato da sua ponta [3] [4]. Assim sendo, não seria mais razoável exigir que os para-raios simples fossem também ensaiados como os PDI, em ambas as condições de laboratório e de campo, para garantir o ângulo e o raio de proteção prometidos?

Testes em condições reais

Duas principais técnicas de pesquisa em condições reais de raio se destacam: pesquisa com raios naturais e pesquisa com raios trigados. Ao contrário do laboratório onde muitas variáveis estão sob controle e são ajustáveis pelo ser humano, pesquisas em condições reais de raio são conhecidas como extremamente difíceis e custosas, com escassez de resultados. Totalmente dependente das condições climáticas, o simples fato de escolher um local de pesquisa com densidade de raios elevada muitas vezes não foi sinônimo de êxito para cientistas envolvidos e muitos parâmetros devem ser levados em consideração para talvez se conseguir um número suficiente de impactos. Idealmente, uma duração de no mínimo 20 a 30 anos seria o prazo necessário para recolher um número estatisticamente significativo, ao mesmo nível que comprovações empíricas ou em laboratório.

A título de exemplo, mesmo em uma região vivenciando um alto índice de descargas atmosféricas tais como a Flórida Central, objeto da primeira pesquisa descrita abaixo, o número de raios nuvem-solo registrado por km² é inferior à 5 em média durante a temporada com pico de tempestades. Claramente, mesmo recebendo um ou dois impactos de raios por ano, essa pesquisa irá demorar um tempo extremamente extenso para recolher dados suficientes sobre o desempenho do para-raios ensaiado para ser estatisticamente significativa.

Saint Privat d'Allier, França



Figura 19. Plataforma de teste

Inédita na época, a primeira pesquisa visando comprovar a eficiência do para-raios com dispositivo de ionização foi implementada pela Comissão de Energia Atômica de Grenoble na França [28], utilizando novas técnicas de raio trigado por foguete recentemente desenvolvidas em Camp Blanding na Flórida entre 1993 e 1995 [29]. Essa experiência consiste em lançar em uma nuvem carregada propícia à formação de raio

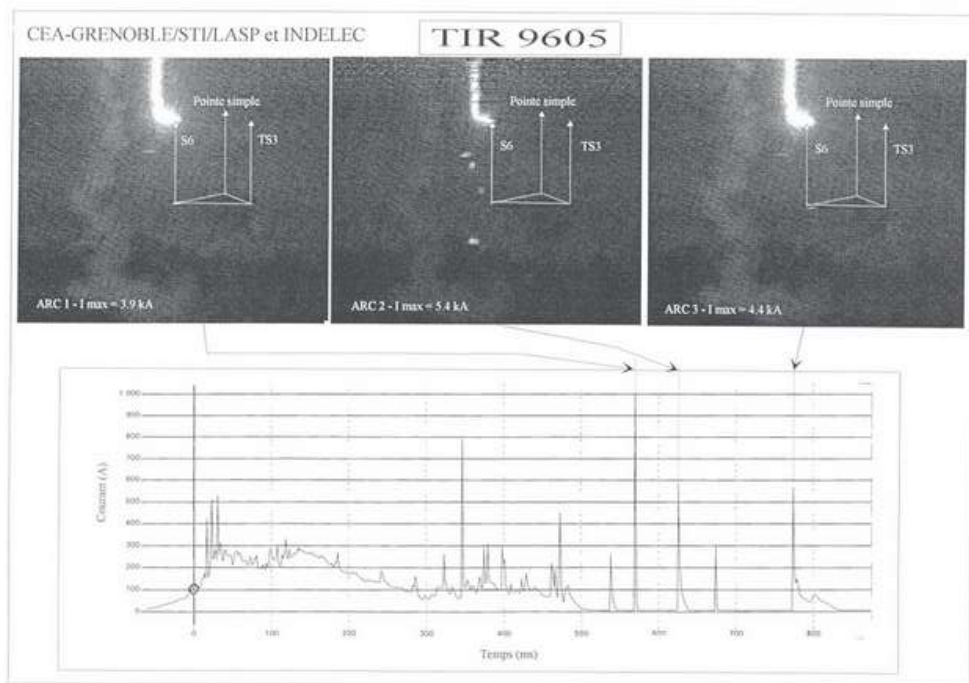
(detectada através de sensores de campo elétrico), um foguete de tipo LRS. Esse tipo de foguete está ligado a um fio condutor de cobre geralmente de 400 até 500 metros de extensão, para que o líder descendente possa se propagar da nuvem em direção à plataforma onde estão instalados os dois tipos de para-raios, em competição no ensaio:

- 1 para-raios Franklin
- 1 para-raios ionizante com 30 μ s de antecipação
- 1 para-raios ionizante com 60 μ s de antecipação

Os últimos 100m do fio são de material isolante (fio de kevlar), assim o líder descendente não podendo mais se propagar no fio condutor, irá atingir um dos dois tipos de para-raios, ou seja, o para-raios que emitir o líder ascendente primeiro.

Essa pesquisa vem ilustrar a complexidade de obter resultados suficientes em condições reais de raio. Devido à falta de ocorrências de descargas atmosféricas, apenas um lançamento foi capaz de fornecer dados significativos. O lançamento número 9605 (ver figura 20), trigado com um campo elétrico de 8,1 kV/m, provocou uma descarga dividida em

Figura 20. Lançamento n°9605 : 3 arcos elétricos, ilustrados pela corrente medida na ponta do para-raios ionizante de 60 μ s de antecipação



duas etapas: o primeiro arco de retorno resultou em uma vaporização do fio ligado ao foguete e os segundo e terceiro arcos elétricos subsequentes atingiram o para-raios ionizante de 60 μ s de antecipação. O para-raios ionizante reagiu à variação brusca do campo elétrico, produzindo um líder ascendente antecipado que se conectou ao líder descendente, alterando a trajetória do raio em sua direção. Apesar de um lançamento ser insuficiente para produzir dados estatísticos, esta campanha foi positiva, pois veio confirmar pela primeira vez da história e comprovar através de imagens e medições a eficiência do para-raios ionizante em testes de campo.

Cachoeira Paulista, Brasil

Depois desse primeiro resultado motivante, um projeto de campanha de maior envergadura foi lançado em 2000, nas dependências do INPE em Cachoeira Paulista no estado de São Paulo [30].



Figura 21. Plataforma de teste

Essa campanha foi o fruto de uma colaboração entre varias entidades públicas e privadas:

- CEA - Comissão de Energia Atômica
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- Unicamp - Universidade Estadual de Campinas
- Université de Toulouse
- PUC-RS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
- Indelec - Empresa especialista na proteção contra raios
- Hydro Québec - Empresa estatal canadense de energia
- Telebras - Empresa estatal brasileira de telecomunicação
- France Telecom - Empresa estatal francesa de telecomunicação
- CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações

Durante mais de 5 anos, cientistas incrementaram uma instrumentação mais completa (ver figuras 21, 22 e 23) permitindo alavancar avanços na pesquisa do fenômeno e da tecnologia de para-raios ionizante, e trouxeram conclusões valiosas, seja com raios trigados ou com raios naturais. Os primeiros anos dessa campanha foram insatisfatórios, devido à condições climáticas inesperadas e alguns fatores negligenciados:

Apesar da alta densidade de raios na região de Cachoeira Paulista, a atividade de tempestades durante os 3 primeiros anos foi extremamente

baixa, resultando em poucas ocorrências de raios. Um outro aspecto fundamental foi a altitude do cumulonimbus e da sua base, consideravelmente maior que na Florida ou na França nos anos 90, influenciando o redimensionamento dos comprimentos do fio de cobre e do fio de kevlar conectados ao foguete.

Cientistas relataram também uma forte incidência de raios intra-nuvens em comparação com raios nuvem-solo, uma resistividade do solo não favorável para os objetivos da pesquisa e níveis de campo elétrico para realizar lançamentos entre -10 e -11 kV/m (Florida e França -4 e -8 kV/m). Como exemplo, a taxa de êxito no lançamento dos foguetes caiu de 60% para 38% entre 2002 e 2003. Por fim, fortes ventanias foram responsáveis por desvios e transtornos na trajetória dos lançamentos dos foguetes. Um ajuste no motor para propulsão do equipamento foi necessário, aumentando a velocidade do foguete de 220m/s para 250m/s.

Apesar da existência de empecilhos e condições climáticas pouco favoráveis, essa campanha trouxe vários ensinamentos e resultados positivos, vindo comprovar várias características da tecnologia de para-raios com dispositivo de ionização e seu funcionamento.

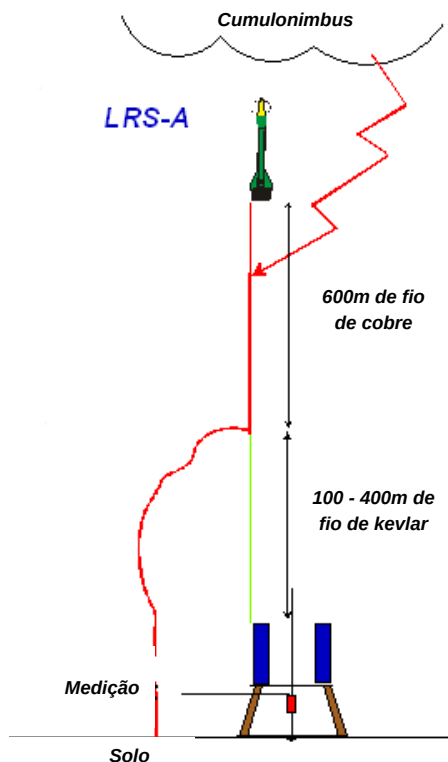


Figura 22. Configuração de teste



Figura 23. Modelo de foguete LRS

Em 2000, duas câmeras de 8000 fps (imagens por segundo) fornecidas pela Hydro-Québec comprovaram duas vezes a emissão antecipada do líder ascendente pelo para-raios com dispositivo de ionização. A primeira imagem registrada no dia 25/01/2000 pela câmera localizada a 72m da plataforma e a segunda no dia 25/12/2000 pela câmera localizada a 800m (ver figura 24) demonstram claramente a emissão antecipada do líder ascendente pelo para-raios ionizante com $60\mu\text{s}$ de antecipação enquanto o de $30\mu\text{s}$ e o para-raios Franklin ainda não tinham reagido.

Figura 24. Primeira e segunda imagem



Mais pertinente ainda, no final da campanha, câmeras registraram alguns lançamentos validados (ver figuras 25 e 26), demonstrando novamente o funcionamento do para-raios com dispositivo de ionização. Os dois impactos de raios registrados no para-raios ionizante de $60\mu\text{s}$ de antecipação foram contabilizados pelo contador de raios e validados por superposição de imagens.

Figura 25. Lançamento n°49





Figura 26. Lançamento n°59



Nadachi, Japão

Em paralelo com a campanha de pesquisa de Cachoeira Paulista, uma pesquisa foi conduzida na usina eólica de Nadachi no Japão [31]. Cientistas e engenheiros reportaram descargas atmosféricas particularmente frequentes e potentes, causando sérios danos nas turbinas eólicas. Essas condições propícias concretizaram uma nova pesquisa cujo principal

objetivo visava testar novamente o funcionamento do para-raios com dispositivo de ionização, mas também sua capacidade a suportar raios ultrapassando às vezes o patamar de 200kA. Nesse sentido, um para-raios com dispositivo de ionização modelo Prevectron® de 60μs de antecipação foi instalado em uma torre de 60m de altura, 8,5m acima do ponto mais alto das turbinas, distante 25m de uma e 100m de outra (ver figura 27).

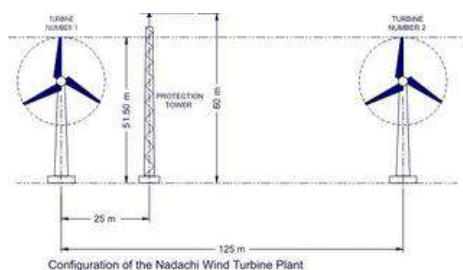


Figura 27. Configuração de teste

Só no ano de 1998, foram contabilizadas 32 descargas atmosféricas, sendo 29 descargas capturadas pelo para-raios Prevectron®, 2 pela turbina mais próxima e 1 pela turbina mais afastada, o que corresponde à uma taxa de 90,62%. O para-raios ionizante cumpriu perfeitamente sua função de proteção das turbinas (ver figura 28) conforme o nível II de proteção determinado na época pela análise de risco conforme a versão de 1995 da NFC 17102 ($0,80 < \% < 0,95$ de probabilidade de captação) [32], o que corresponderia ao nível III de proteção de hoje. Na última campanha, com um PDI melhorado, a taxa subiu até 94% e 100%. Globalmente, o desempenho do para-raios ionizante se mostrou muito

satisfatório no sentido que ele foi capaz de proteger as turbinas eólicas, em uma região fortemente atingida por raios (mais de 50 descargas entre 1999 e 2002), mesmo com raios de tipo ascendente, e com impactos de até 250 kA, 200 C, 20.000 kJ/Ω.

Figura 28. Atuação do para-raios ionizante



6. Conclusão

Ainda há muito a ser descoberto na área de fenômenos naturais, como as descargas atmosféricas e suas consequências danosas aos seres vivos e à economia. A natureza deste fenômeno, sua imprevisibilidade, velocidade e potência, tornam muito complexa a sua compreensão pelo ser humano, assim como a busca para formas de proteção. Este documento demonstrou com clareza que a validação empírica, proporcionada graças à experiência acumulada ao longo dos anos por todos os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, permanece a mais relevante e, no caso de sistemas tradicionais, praticamente a única, uma vez que são baseados na própria experiência de uso, estatísticas e modelagens. Consequentemente, podemos entender que todos os sistemas de proteção contra raios que comprovem ter validação empírica, devem ser igualmente aceitos.

No caso do para-raios com dispositivo de ionização (PDI), foram apresentados neste documento múltiplos estudos relatando experiências positivas do sistema ao longo das últimas décadas e em uma variedade de regiões climáticas, constituindo sólida validação empírica. Foi demonstrado também que, além da validação empírica, ensaios laboratoriais comumente praticados por alguns fabricantes para desenvolver a tecnologia, ganharam status de requisito normativo, hoje compulsório para o PDI e inédito em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Em adição à validação empírica e ensaios laboratoriais, a curiosidade científica e o desejo de aperfeiçoar sistemas de proteção levaram cientistas a buscar outros tipos de validação. Campanhas *in situ* lideradas por diversos órgãos e entidades (universidades, fabricantes, institutos de pesquisa e empresas privadas e estatais, nacionais e internacionais) abriram margem para muitas descobertas, em benefício de toda sociedade. Ressalta-se a necessidade do grande volume de recursos por longo período de tempo, talvez por décadas, para se obter resultados significativos na natureza.

Todos os autores deste documento concordam em dizer que ambos sistemas tradicionais e modernos são válidos, assumindo a responsabilidade técnica de usar o mais apropriado em função de cada determinada configuração. Cabe ao profissional determinar qual solução é mais adequada em cada projeto, pois além do fator de risco assumido e a estratégia de segurança que tal projeto adota, devem ser levados em consideração a exequibilidade prática do projeto, e sua viabilidade econômica do ponto de vista de quem fará o investimento.

Por todas as razões aqui demonstradas, o para-raios ionizante já conquistou lugar de destaque na proteção contra descargas atmosféricas em muitos países, de todos os continentes e estágios de desenvolvimento e sua adoção vem crescendo no Brasil nos mais variados segmentos.

7. Referências

- [1] Saba, M. M. F.; A. R. Paiva; C. Schumann; M. A. S. Ferro; K. P. Naccarato; J. C. O. Silva; F. V. C. Siqueira; & D. M. Custódio - "Lightning attachment process to common buildings" - Geophysical Research Letters, 44, 4368–4375 - 2017
- [2] Cohen, I. B. - "Benjamin Franklin's Experiments, A New Edition of Franklin's Experiments and Observations on Electricity" - Harvard University Press, Cambridge - 1941.
- [3] C. B. Moore; G. D. Aulich; W. Rison - "The Case for Using Blunt-Tipped Lightning Rods as Strike Receptors" - Langmuir Laboratory for Atmospheric Research - New Mexico Institute of Mining and Technology - Journal of Applied Meteorology - Volume 42 - Issue 7, pp.984-993 - 2003
- [4] S. Fauveaux et al. - "Investigations and Studies on Lightning Air Terminal Shapes in Relationship with the Efficiency of a Simple Rod" - International Lightning Protection Association Symposium, Chamonix, France, S3.6. - 2014.
- [5] Gay-Lussac, Louis-Joseph - "Instruction sur les paratonnerres" adoptée par l'Académie royale des sciences le 23 juin 1823 et publiée par ordre du ministre de l'Intérieur - 1824
- [6] Krider, E.P. - "Lightning rods in the 18th century" - Second International Symposium on Lightning and Mountains, Chamonix Mont Blanc, France - 1997
- [7] Sakurano, H.; Katsuragi, Y. & Nakamura, K. - "Discussions on striking distance and lightning protection failure to a radome structure in winter thunderstorm" - 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria pp. 6766-1 - 6766-4. - 1995
- [8] Moore, C.B.; Rison, W.; Mathis, J. & Aulich, G. - "Lightning rod improvement studies" - Journal of Applied Meteorology and Climatology, in press - 1999
- [9] Tobias, J.M. et al - "The Basis of Conventional Lightning Protection Technology" - Report of the Federal Interagency Lightning Protection User Group - June 2001
- [10] Bryan, J.L.; Biermann, R.G.; Erickson, G. A. - "Report of the Third-Party Independent Evaluation Panel on Early Streamer Emission Lightning Protection Technology" submitted to the National Fire Protection Association Council on September 1, 1999.
- [11] Modena, J - "A proteção na captação pelo método da esfera rolante" – O Setor Elétrico – Fev. 2018

- [12] D'Alessandro, F. & Gumley, J.R. - "A modern perspective on direct strike lightning protection" - Proceedings 25th International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, pp. 362-368 - 2000
- [13] Kern, A.; Schelthoff, C. & Mathieu, M. - "Probability of lightning strikes to air-terminations of structures using the electro-geometrical model theory and the statistics of lightning current parameters" - 30th ICLP Cagliari, Italy, pp. 1-8 - 2010
- [14] Mayekar; Miheer & Kulkarni; Anil & Marakarkandy; Bijith - "Designing and Simulation of Low Frequency Cloud to Ground Lightning Receiver for Severe Weather Monitoring Application" - Procedia Computer Science, 45, 661-670 - 2015
- [15] Luiz K. Tomiyoshi; José Sebastião Viel; & Marco A. Bucciarelli Roque - "Em debate "Normalização" – O processo de elaboração das normas técnicas brasileiras é eficiente?" – O Setor Elétrico, Edição 50 - Março 2010
- [16] Ait-Amar, S. - "Thèse de Doctorat Paris XI, Modélisation de la Protection Foudre par Paratonnerre" - 2006
- [17] Bazelyan, E.M.; Raiser, Y.P. - "Spark Discharge". CRC Press, ISBN 9780849328688 - 1998.
- [18] S. Yokogawa; K. Miyake; T. Suzuki; S. Kanao - "Winter lightning on Japan Coast - Development of measuring system on processing feature of lightning discharge" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.3, pp1418-1425 - 1990
- [19] "Feedback on the lightning protection of high-risk industrial facilities in France" - IPSOS, INERIS, Ministry of Environment, GIMELEC - 2002
- [20] Rison, W. - "Experimental Validation of Conventional and Non-Conventional Lightning Protection Systems" - Power Engineering Society General Meeting, IEEE Volume 4 - 2003
- [21] Benali, E.; Serrie, G.; Henaff, Y.; Lefort, A.; GIMELEC D84 - "Survey on ESE Lightning Protection" - International Lightning Protection Association Symposium, Chamonix, France, SI.10, - 2014
- [22] Polo, S.; Pomar, V; Llovera, P. - "Effectiveness Empirical Study on Early Streamer Emission Lightning Protection Installations in Spain" - International Lightning Protection Association Symposium, Valencia, Espanha, 1.2. - 2011

- [23] Hassan, M; Rahman, R; Che Soh, A; Kadir, Z. - "Lightning Strike Mapping for Peninsular Malaysia using Artificial Intelligence Techniques" - Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 34. 202-214 - 2011
- [24] Mega Jati Consult Sdn. Bhd "Kajian Penggunaan Alat Penangkap Kilat Di Bangunan-Bangunan Di Malaysia" - 2016
- [25] Martínez, R.; Pascual, A.; Mendez, E; Crespo, H. - "External Lightning Protection Experience In Cuba" - 1st International Lightning Protection Association Symposium, Valencia, Spain, 1.7. - 2011
- [26] Pecastaing, L. et al. - "Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal versus a Franklin Rod" - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 2, pp. 789-798 - April 2015.
- [27] Llovera-Segovia, P. et al. - "High voltage laboratory tests according to lightning protection standards" - International Lightning Protection Association Symposium, Valencia, Spain, 2.3. - 2011
- [28] Eybert-Berard, A. - "On-site Test Campaign" – St Privat d'Allier - Atomic Energy Commission in Grenoble, STI, LASP - 1996
- [29] Lalande, P.; Bondiou-Clergerie, A.; Laroche, P.; Eybert-Berard, A.; Berlandis, J.-P.; Bador, B.; Bonamy, A.; Uman, M.A.; Rakov, V.A.; "Connection to Ground of an Artificially Triggered Negative Downward Stepped Leader" - Proceedings of 10th International Conference on Atmospheric Electricity, Osaka, Japan - 1996
- [30] Eybert-Bérard, A.; Thirion, B.; Boilloz, P.; Saba, M.; Solorzano, N. - "An Experimental Study of Leaders Initiated by Single and Advanced (ESE) Lightning Rods - Triggering Site of Cachoeira Paulista (SP), Brazil" - International Conference on Lightning Protection, Avignon, França, 4b1 - 2004
- [31] Mimowa, M.; Yoda, M.; Kusama, Y.; Maeda, K. - "Observation of Winter Lightning Flashes to Nadachi Wind Power Station on The Coast of the Japan Sea" - GROUND'2002 - International Conference on Grounding and Earthing & 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity – Rio de Janeiro, RJ – Brasil - 2002
- [32] Eybert-Bérard, A.; Thirion, B.; Katoh, G.; "Lightning Protection Field Experiment in Japan on a Wind Turbine Plant using an ESE Lightning Conductor" – International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Grécia, 9.15, pp 871-873 - 2000

SOBRE O PARA-RAIOS COM DISPOSITIVO DE IONIZAÇÃO

A tecnologia que vem crescendo no Brasil.

1º Edição

