

A física dos raios – Parte 2: raios ascendentes

The physics of a lightning flash – Part 2: upward lightning flashes

M.M.F. Saba^{*1}, T.P. Silva¹, C. Schumann², I.J. Costa Neto³, I.T. Cruz¹,
J.C.O. Silva¹, P.B. Lauria¹, D.R.R. da Silva¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

²University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.

³Altave, São José dos Campos, SP, Brasil.

Recebido em 24 de janeiro de 2025. Revisado em 11 de junho de 2025. Aceito em 10 de julho de 2025.

Nesta segunda parte do artigo, os autores discorrem sobre os raios ascendentes com dados obtidos a partir do uso de câmeras de vídeo especiais de alta velocidade (capazes de obter milhares de imagens por segundo) e sensores auxiliares. Os raios ascendentes ocorrem a partir de estruturas altas no solo, naturais ou não, em direção à nuvem, devido à intensificação do campo elétrico na extremidade dessas estruturas sob uma nuvem de tempestade. A iniciação de raios ascendentes está frequentemente associada à ocorrência de outros raios na região, e sua duração é em média duas vezes maior do que a dos raios descendentes. Além disso, os raios ascendentes são os maiores responsáveis pelos danos causados em turbinas eólicas. Eles podem causar paralisação no fornecimento de energia por semanas, resultando em grandes perdas financeiras. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão sobre esse fenômeno, ainda pouco explorado na literatura em língua portuguesa. Ele oferece ao leitor informações atualizadas de modo acessível, fruto da pesquisa científica realizada pelos autores e colaboradores. Essas informações, em sua maioria fragmentadas em publicações técnicas e na maioria das vezes em língua inglesa, contribuem com a disseminação do conhecimento e com as discussões sobre descargas atmosféricas em diferentes níveis de ensino no país.

Palavras-chave: Raio ascendente, raio solo-nuvem, descarga atmosférica, tempestade, turbina eólica.

In this second part of the article, the authors discuss upward lightning using data obtained from high-speed video cameras (capable of recording thousands of images per second) and auxiliary sensors. Upward lightning originates from tall ground-based structures, either natural or man-made, and propagates toward the cloud due to the intensification of the electric field at the tips of these structures beneath a thunderstorm cloud. The initiation of upward lightning is often associated with the occurrence of other lightning discharges in the vicinity, and the duration of upward lightning is, on average, twice as long as that of downward lightning. Furthermore, upward lightning is the main cause of damage to wind turbines. It can lead to shutdowns in energy production and supply for weeks, resulting in significant financial losses. This work aims to provide a review of this phenomenon, which is still underexplored in the Portuguese-language literature. It offers readers up-to-date information in an accessible format, based on scientific research conducted by the authors and collaborators. Most of this information, often scattered across technical publications and predominantly written in English, contributes to the dissemination of knowledge and supports discussions on atmospheric discharges at various levels of education in the country.

Keywords: Upward lightning flash, ground-to-cloud lightning, atmospheric discharge, thunderstorm, wind turbine.

1. Introdução

Nesta segunda parte deste trabalho, os raios ascendentes serão abordados com detalhes. Serão descritas suas principais características, sua classificação e iniciação, e serão apresentados os principais parâmetros dos raios ascendentes e como se comparam aos dos raios descendentes. Por fim, será discutido que apesar de serem bem menos frequentes que os raios descendentes, são, no entanto, os maiores responsáveis pelos danos causados em turbinas eólicas.

Como exposto na primeira parte [1], normalmente um raio se inicia no interior da nuvem de tempestade e permanece dentro dela. Esses são os chamados raios na nuvem ou intranuvem. Algumas vezes, porém, parte da descarga que se iniciou na nuvem desce até o solo e interage com ele (raios descendentes ou nuvem-solo).

Pode acontecer, no entanto, que um raio se inicie no solo e termine na nuvem de tempestade. Esses são denominados raios ascendentes (RA) ou solo-nuvem. Estes raios se iniciam em estruturas elevadas, com alturas tipicamente maiores do que 100 m (Fig. 1a–b), ou não tão altas, mas situadas em locais elevados (Fig. 1c–d) [2–4]. Pás de turbinas eólicas (Fig. 1a), torres de telecomunicação ou de transmissão de energia (Fig. 1b–c),

*Endereço de correspondência: marcelo.saba@inpe.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

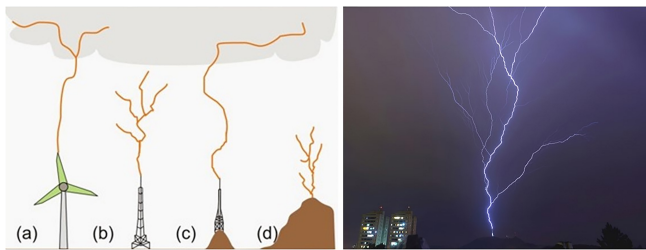


Figura 1: Raios ascendentes iniciados a partir de estruturas e topografias diversas. À esquerda: estruturas no plano ou em locais elevados que podem dar início ao RA. À direita: foto de um RA a partir de uma torre de telecomunicações situada no Pico do Jaraguá, na cidade de São Paulo-SP. Fonte: Autores.

ou até mesmo estruturas rochosas pontiagudas (Fig. 1d) podem iniciar os RA quando estão sob a presença de uma nuvem de tempestade.

2. Tipos de Raios Ascendentes

Os RA podem ser classificados quanto à sua polaridade. Existem RA negativos, positivos e bipolares, sendo assim denominados segundo a carga líquida transferida ao solo. Os RA negativos são iniciados por um líder positivo que emerge de uma estrutura no solo e se propaga em direção à base da nuvem de tempestade, gerando uma transferência de carga negativa ao solo (Fig. 2a) [5]. Os RA positivos são iniciados por um líder negativo e transferem carga positiva ao solo (Fig. 2b). Nos RA bipolares, ocorrem processos físicos cuja transferência de carga pode alternar de polaridade durante o seu desenvolvimento, podendo ser iniciados por um líder positivo ou por um líder negativo, sendo a carga transferida ao solo ora negativa ora positiva, dependendo da etapa do RA [6, 7].

Sendo raros (em torno de 4% de todos os RA, segundo Diendorfer [8]), os RA positivos e os RA bipolares possuem características próprias, ainda em estudo. Assim sendo, as características descritas neste trabalho se referem apenas aos RA mais frequentes, ou seja, os RA negativos.

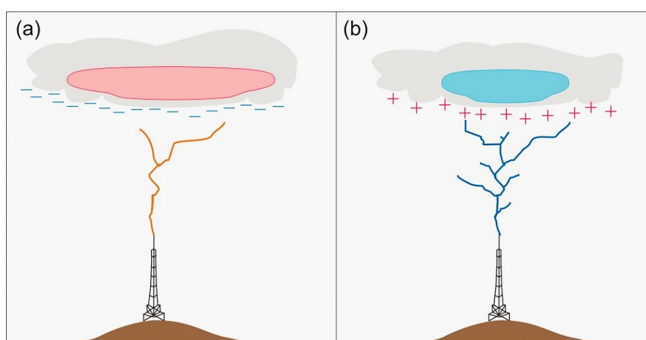


Figura 2: a) Raio ascendente negativo; b) Raio ascendente positivo. Líderes positivos estão em laranja e líderes negativos estão em azul. Fonte: Autores.

3. Etapas de um Raio Ascendente

3.1. Iniciação

Quando uma tempestade se forma ou passa sobre uma estrutura alta, o campo elétrico na ponta da estrutura se intensifica tanto mais quanto mais alta e mais pontiaguda for sua extremidade¹. Esse fenômeno, conhecido na física como o poder das pontas, pode acarretar a formação de pequenas descargas elétricas nas extremidades superiores de estruturas altas. Estas descargas podem ser, inicialmente, *streamers*, que são descargas ainda tênues e “frias”. Elas emitem um zumbido característico e podem ser visualizadas à noite, sendo popularmente conhecidas como fogo de Santelmo². Dependendo das condições do campo elétrico (intensidade e duração), elas podem, através do aquecimento do plasma gerado na ponta de onde surgem, evoluir para uma descarga menos dispersa e mais extensa e luminosa chamada descarga líder. A descarga líder pode se desenvolver e se propagar em direção à base da nuvem dando origem a um RA [2, 5, 7, 9, 10].

Na maioria das vezes, a iniciação do RA não se dá apenas com a intensificação do campo elétrico ambiente pela presença da estrutura. Muitas vezes, ela necessita também de uma perturbação rápida e intensa no campo quase-estático da nuvem que favoreça o seu desenvolvimento. Essa perturbação é geralmente causada pela ocorrência de um raio intranuvem ou de um raio descendente (RD) positivo nas proximidades (Fig. 3) [2, 11].

Assim, o processo físico que inicia um RA é, geralmente, a propagação de um líder negativo (representado pela cor azul na Fig. 3) sobre as imediações de uma estrutura alta. Esse líder negativo pode ser parte de um raio intranuvem (Fig. 3a) ou parte de um RD positivo (Fig. 3b). Ao passar sobre a estrutura ou ao ter

¹ A intensificação do campo elétrico devido à presença de uma estrutura condutiva apoiada no solo se dá pelo fato de as cargas elétricas livres do material condutor se redistribuírem na superfície dessa estrutura, sob a ação do campo, de tal forma a cancelar o campo no seu material condutor. A nova distribuição de cargas, porém, resulta em um campo não nulo, externo, normal à superfície, que se soma ao campo externo, tornando-o mais intenso na extremidade ou nas partes pontiagudas no topo da estrutura (considerando que o campo elétrico sob uma nuvem de tempestade é predominantemente vertical). Qualquer protuberância na superfície do solo que seja minimamente condutiva provoca intensificação do campo, desde uma folha de grama até uma turbina eólica. Quanto mais alta e fina for a estrutura, maior a intensificação do campo, porém mais rápido ele decai com a distância. Por exemplo, um corpo semi-elipsoidal de 100 m de altura e 6,3 m de diâmetro na base (a extremidade desse corpo teria uma forma semi-esférica com um raio de 10 cm) irá intensificar o campo elétrico vertical em cerca de 317 vezes na sua extremidade. A 10 m acima desse ponto, tal intensificação terá caído para cerca de 2 vezes, apenas.

² Santelmo, Santo Elmo ou Santo Erasmo, mártir no ano 303, conhecido como patrono dos navegantes nas tempestades e perigos no mar, emprestou o seu nome a uma estranha luz azulada que aparecia no topo dos mastros das embarcações sob uma nuvem de tempestade. Era considerada pelos navegantes como o sinal de sua proteção.

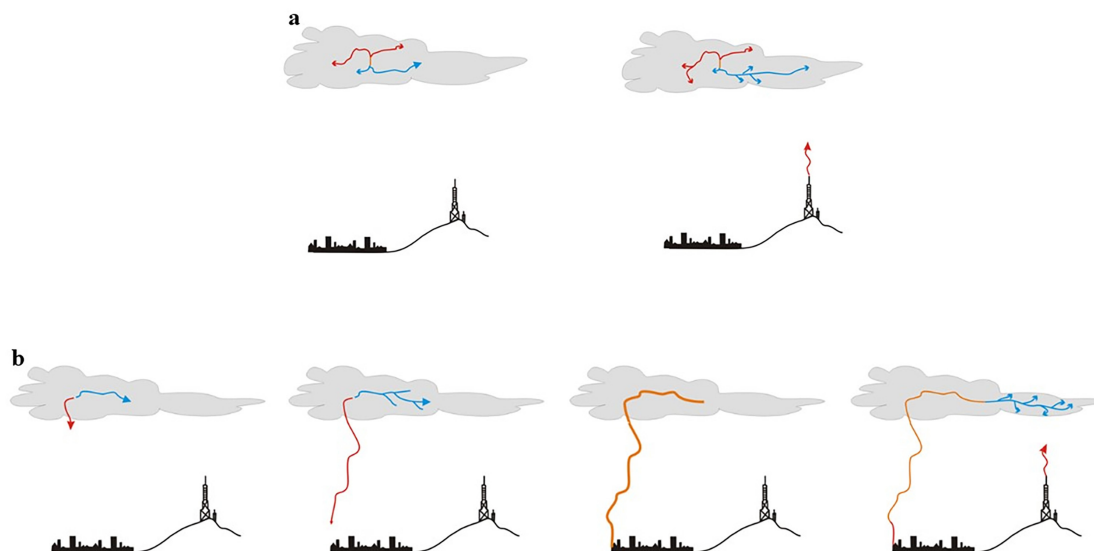


Figura 3: RA iniciados por: a) raio intranuvem; b) raio intranuvem seguido de um RD positivo. Em ambos os casos uma descarga negativa (azul) inicia um líder ascendente positivo (vermelho) ao passar sobre uma estrutura alta. Fonte: Autores.

sua corrente intensificada por uma descarga de retorno (instante no qual o líder descendente toca o solo), o equilíbrio quase-estático de cargas na nuvem é alterado subitamente. A introdução de um excesso de carga negativa na nuvem, sobre a estrutura, causa um aumento repentino do campo eletrostático na extremidade da estrutura, o que possibilita a iniciação de um líder ascendente positivo que se propaga em direção à nuvem (traço vermelho na Fig. 3) [11].

No Brasil (mais concretamente, na cidade de São Paulo) os RA são sempre induzidos por um raio que ocorreu anteriormente, geralmente um RD positivo. Assim também acontece na Dakota do Sul, EUA [4, 11]. No entanto, a iniciação da maioria dos RA em torres de comunicação na Suíça e na Áustria ocorre sem a necessidade de outro raio nas proximidades [12], ocorrendo simplesmente com o aumento do campo elétrico ambiente.

O tempo entre o raio anterior ao RA (que induz o RA) e a iniciação do RA costuma ser menor que 0,2 segundo. Já a distância entre o raio que induz o RA e a estrutura na qual o RA se inicia pode chegar a 60 km [4]. Quando várias estruturas estão próximas umas das outras (torres de telecomunicação ou mesmo turbinas eólicas), vários RA podem surgir simultaneamente (Fig. 4) [13, 14].



Figura 4: RA iniciados simultaneamente em nove turbinas eólicas na Dakota do Sul, EUA. Fonte: Tom A. Warner.

3.2. Desenvolvimento

Após o seu início, o líder ascendente propaga-se em direção à base da nuvem com uma velocidade da ordem de 10^4 a 10^5 ms⁻¹ [15]. A partir de sua iniciação e durante toda a sua propagação, o líder impõe uma corrente elétrica na estrutura da qual partiu. Essa corrente é da ordem de centenas de ampères e possui duração média de 300 milissegundos (ms), podendo chegar em alguns casos a mais de um segundo [9], sendo denominada corrente contínua inicial – CCI (Fig. 5b–g). É nesta etapa que o RA realiza a sua maior transferência de carga entre a nuvem e o solo, variando em média de 27 a 40 Coulombs [8] (vídeo suplementar: RA [16]).

Ao longo de sua trajetória ascendente, a luminosidade do líder diminui, e em mais da metade dos casos os líderes ascendentes se ramificam, havendo divisão de corrente elétrica nesses ramos [9]. O enfraquecimento dos líderes pode dar origem a líderes de recuo (LR), que são vistos como descargas rápidas (Fig. 5e–f) que retraçam a trajetória dos canais formados pelo líder ascendente, em direção à sua origem (o mesmo ocorre com os RD; veja a parte 1 deste trabalho: Saba e Silva [1]).

Os LR que ocorrem durante a CCI causam rápidas intensificações de luminosidade (e de corrente) no canal do raio (Fig. 6 e Fig. 7). São iniciados quase sempre após a primeira bifurcação do líder ascendente, sendo que a maioria (75%) ocorre após decorridos 40% da duração da CCI [9]. O efeito que os LR produzem é análogo ao produzido pelas componentes M (Fig. 5l e Fig. 7) nas correntes contínuas (correntes elétricas de longa duração e baixa intensidade) que seguem as descargas de retorno nos RD: eles intensificam a corrente dessas descargas [1]. Uma vez cessada a propagação do líder ascendente, a corrente cessa (Fig. 5h), o canal do raio decai e o RA termina [9].

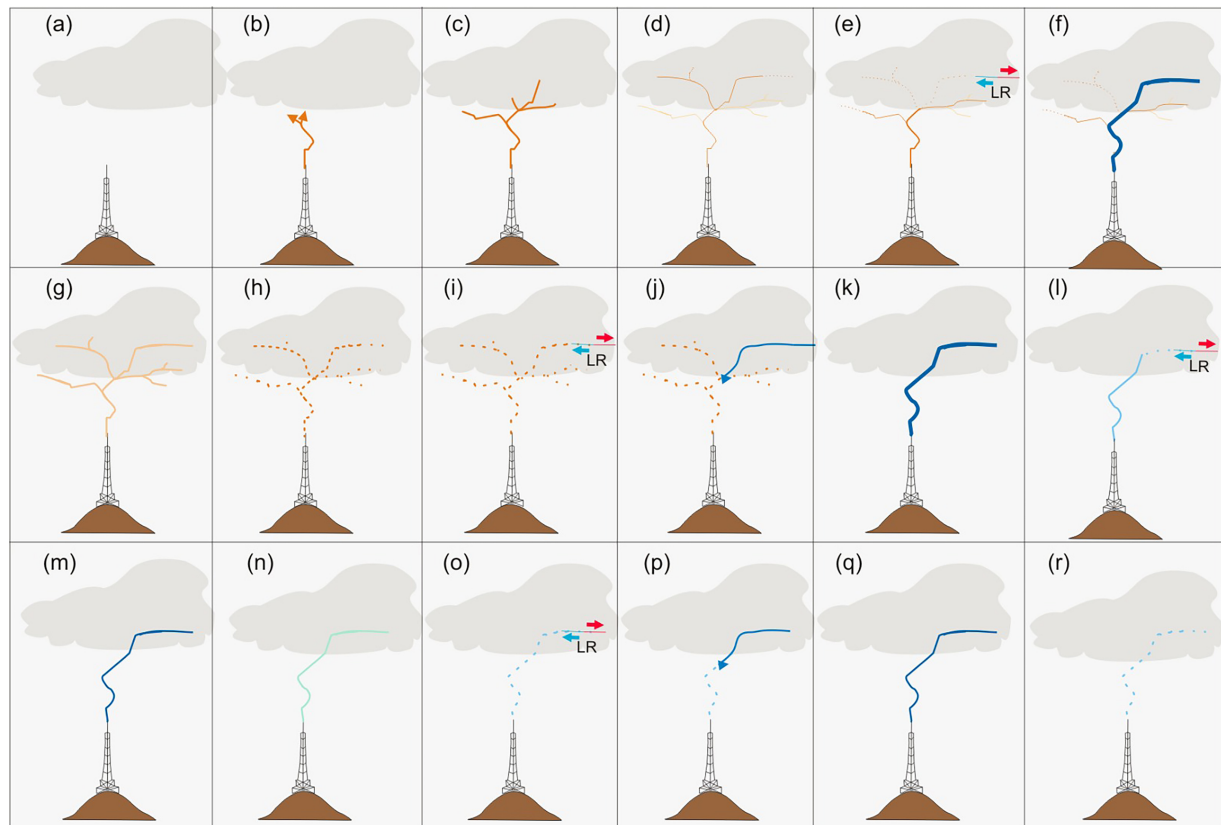


Figura 5: Etapas de um RA negativo. As imagens b–g ilustram a formação da CCI e de possíveis pulsos durante sua ocorrência. Alguns raios (cerca de 25%) apresentam ainda a ocorrência de descargas de retorno subsequentes (imagens k e q) [9]. Algumas descargas de retorno podem ser seguidas por correntes com duração superior a três milissegundos, denominadas correntes contínuas (CC) (imagens l–n). Durante a CC, podem surgir oscilações da corrente no canal, denominadas componentes M, que intensificam a corrente no canal principal (imagens l–n). Na figura, LR significa líder de recuo. Fonte: Autores.

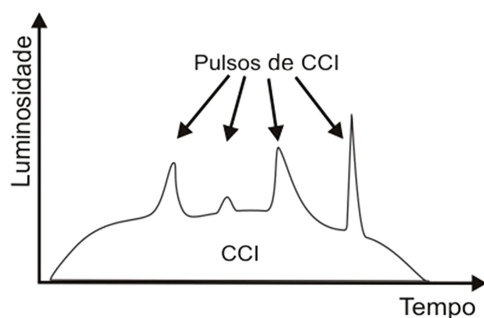


Figura 6: CCI com pulsos de luminosidade (e de corrente) devido à ocorrência de LR. Fonte: Adaptado de Saba [4].

No entanto, a ocorrência de um LR suficientemente energético pode reionizar todo o canal ao fluir por ele até solo (Fig. 5i–k). Ao alcançar a estrutura, o LR dá origem a uma descarga de retorno semelhante à descarga de retorno subsequente de um RD negativo [1, 6]. Esses LR podem produzir diversas descargas de retorno subsequentes (Fig. 5o–q e Fig. 7), sendo que o maior número observado no Brasil foi de 27 descargas de retorno em um único RA [17].

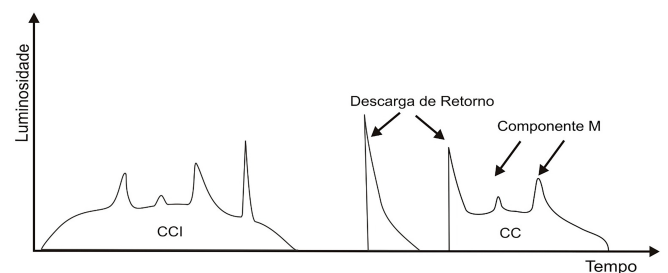


Figura 7: Variação da luminosidade (e de corrente) de um raio ascendente com descargas de retorno subsequentes. Fonte: Autores.

O pico de corrente das descargas de retorno nos RA negativos é em média 18 quiloampères (kA) e a duração inferior a um milissegundo [9]. Analogamente aos RD, as descargas de retorno em RA também podem ser seguidas por correntes contínuas (Fig. 5l–n e Fig. 7). Quando essas correntes duram entre 3 e 10 ms, são caracterizadas como correntes contínuas muito curtas. Se a duração varia entre 10 e 40 ms, são classificadas como correntes contínuas curtas. Já quando o tempo excede 40 ms, são consideradas correntes contínuas longas [18]. As correntes contínuas, como nos RD negativos, possuem

intensidade variável (geralmente inferior a 1 kA), duração de até 1 segundo, e podem conter componentes M (Fig. 5m e Fig. 7).

4. Parâmetros Físicos de um Raio Ascendente e Comparação com Raios Descendentes

O raio ascendente se inicia, portanto, com o surgimento de um líder ascendente no topo de uma estrutura e termina após o decaimento do canal do raio. Este decaimento acontece no final da CCI ou, no caso de existir descarga de retorno subsequente, após o término desta.

Aproximadamente 25% dos RA negativos apresentam uma ou mais descargas de retorno subsequentes. Neles o número médio de descargas por raio é de 3 a 4 [4, 9]. Se considerarmos todos os RA (incluindo os que não têm descargas de retorno), o número médio cai para 1,1.

Os RA negativos em geral possuem poucas descargas de retorno (1,1) em comparação com os RD negativos (4,6), e um valor quase igual à média de descargas de retorno nos RD positivos (1,2) [9, 19]. Além de possuírem poucas descargas de retorno, o intervalo médio de tempo entre elas é aproximadamente a metade (49 ms) do intervalo entre as descargas de retorno de um RD negativo (92 ms) [9, 19]. Entretanto, a duração total do RA é quase duas vezes maior do que as dos RD negativos e positivos (Tabela 1). Isso se deve à ocorrência da CCI, que é responsável por 90% da duração total do RA [9] e que não ocorre nos RD (Fig. 8).

Em um RD a transferência de carga se inicia somente após o líder descendente tocar o solo (descarga de retorno). Ao contrário do RD – onde o líder se inicia na nuvem e chega no solo em algumas dezenas de milissegundos – no RA o líder ascendente alcança a nuvem e continua sua propagação por centenas de milissegundos, já que não encontra na nuvem uma fonte

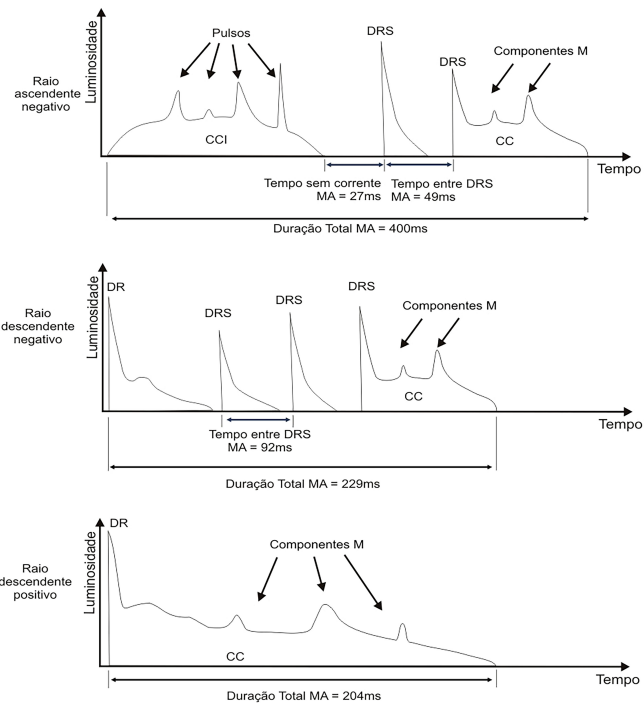


Figura 8: Etapas dos RA e dos RD negativos e positivos. MA = média aritmética. Fonte: Adaptada de Costa Neto [9].

abundante de cargas livres capaz de iniciar uma descarga de retorno como no caso do líder descendente. Assim sendo, a longa duração da CCI (Tabela 1), responsável pela maior parte da duração de um RA, é também responsável por transferir uma quantidade apreciável de carga e produzir danos nas estruturas onde teve sua origem.

5. Considerações Sobre os Raios Ascendentes e os Danos em Turbinas Eólicas

Apesar de não oferecerem danos diretos à população, pois se iniciam em estruturas altas, atualmente os RA têm sido objeto de estudo devido ao aumento do número de estruturas altas tais como arranha-céus e torres de telecomunicações, e principalmente, de aerogeradores ou turbinas eólicas (TE).

Com o aumento na demanda por energia renovável no mundo inteiro, cresce o número de parques eólicos instalados. Segundo o relatório de 2024 do *Global Wind Energy Council* (GWEC), o Brasil ocupa a 6ª posição no ranking de capacidade total instalada de energia eólica *onshore* (sobre o continente). Em 2012, o Brasil ocupava o 15º lugar e, de lá para cá, o país vem crescendo de forma consistente, sendo o terceiro com maior número de instalações em 2023 com produção total de 4,8 Gigawatts (GW). A energia eólica já representa 15% da matriz elétrica brasileira [22].

Graças ao desenvolvimento da tecnologia empregada na construção das TE e ao uso de materiais leves

Tabela 1: Características dos RA e comparação com os RD.			
Características	RA negativo	RD negativo	RD positivo
Formado por um líder	ascendente positivo	descendente negativo	descendente positivo
Duração média total (ms)	400 ¹	229 ⁵	204 ⁴
Duração média de CCI (ms)	361 ¹	não possui	não possui
Multiplicidade média de DR	1,1 ¹	4,6 ²	1,2 ⁴
Intervalo médio entre DR (ms)	49 ¹	92 ²	143 ⁴
Presença de CC longa após DR (%)	19 ¹	27 ³	75 ⁴

¹Costa Neto [9]; ²Ballarotti [18]; ³Medeiros [20]; ⁴Saba [19]; ⁵Saraiva [21]. Na tabela, DR significa descarga de retorno.



Figura 9: Raio ascendente iniciado em uma pá de uma turbina eólica. Durante a ocorrência da CCI o movimento giratório da pá arrasta o canal do raio consigo. Fonte: Tom A. Warner.

e resistentes (fibra de vidro e de carbono), a altura e a potência gerada pelas TE têm crescido cada vez mais [23].

No entanto, quanto mais alta a TE, maior a chance de ser atingida ou iniciar um raio. De fato, os raios são os maiores responsáveis pelos danos em TE (Fig. 9) [24, 25]. Prejuízos enormes são frequentes quando as pás, parte essencial de uma TE, são atingidas. A rotação das pás e a sua baixa condutividade oferecem grandes desafios aos projetos dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) [26, 27].

Os danos causados por raios em uma TE podem levar à paralisação na produção e no fornecimento de energia por semanas, resultando em grandes perdas financeiras, além do custo de manutenção ou troca de peças danificadas. Na Europa, entre 4 e 8% das TE sofrem danos por raios todos os anos. Já nos Estados Unidos, em 2012, cerca de 23% das TE sofreram falhas devido à incidência de raios [24, 25, 28, 29].

As normas que definem os SPDA para TE (e.g. a norma internacional IEC 61400-24:2019 [30]) ainda se baseiam em métodos empíricos, modelos e teorias baseadas em padrões de proteção adotados em edificações, que por sua vez são em parte baseadas em medidas feitas em torres. A aplicação das normas vigentes assume que estas informações podem ser extrapoladas para turbinas eólicas, que não são estáticas (pás rotativas), localizadas *offshore* (sobre os oceanos) ou *onshore*, e em terrenos planos e montanhosos.

Os resultados obtidos com o uso de câmeras de alta velocidade e sensores auxiliares (antenas de campo elétrico,

medidores de corrente etc.³), expostos neste trabalho, estão progressivamente definindo diferentes parâmetros dos raios e de sua interação com as TE [31].

A análise desses parâmetros em diferentes parques eólicos permitirá oferecer à comunidade científica, aos parques eólicos e aos fabricantes, informações relevantes que auxiliam no melhor entendimento sobre descargas atmosféricas que atingem as TE e no melhor dimensionamento e eficiência dos SPDA.

6. Considerações Finais

Em suma, esse artigo descreve como os raios ascendentes são iniciados e como se desenvolvem em direção às nuvens de tempestade. Ele apresenta os diferentes processos físicos envolvidos durante as etapas de propagação dos raios ascendentes (veja a Fig. 5). Os raios ascendentes representam menos de 1% do número total de raios que estabelecem contato com o solo [3]. Embora esse percentual seja pequeno, este trabalho mostra que a duração desse tipo de descarga é aproximadamente duas vezes maior que os raios descendentes (Tabela 1), produzindo danos diretos nas estruturas atingidas.

Com o rápido crescimento da energia eólica em todo o mundo, o interesse pela proteção das TE, especialmente em locais onde a incidência de raios é alta, tem levantado uma série de questões que requerem respostas confiáveis. Através de apoios recebidos e parcerias com instituições de pesquisa no Brasil e no exterior, os autores buscam respostas para algumas questões básicas como as seguintes: como se dá a conexão de um raio com as TE? Como avaliar a eficiência dos para-raios utilizados em TE? Em que local da pá da TE se inicia o raio ascendente? A rotação das pás das TE favorece a incidência de raios? A carência de respostas a estas e outras questões se deve em parte à complexidade do fenômeno e à dificuldade de observação, afinal, todo o processo acontece em uma fração de segundo. Uma observação adequada requer estarmos no local correto, no momento correto e providos de instrumentos adequados.

³ As câmeras de alta velocidade são capazes de filmar entre 1.000 e 1.000.000 de imagens por segundo. Elas possuem uma memória interna que permite o registro em vídeo com duração de até 2 segundos ou mais (normalmente o suficiente para filmar toda a duração de um raio). O registro de um raio é realizado através de um disparo (*trigger*) produzido no momento exato da ocorrência do raio. Esse disparo pode ser produzido eletronicamente (através de detectores de mudanças bruscas de luminosidade e de sensores de campo elétrico, por exemplo) ou via *software* (através de mudanças bruscas na luminosidade dos *pixels* da imagem da câmera, por exemplo). Os arquivos podem ser armazenados em uma memória *flash* conectada à câmera para serem analisados posteriormente, ou podem ser transferidos diretamente para um computador através de um cabo de rede. O horário de cada imagem é registrado com precisão de microssegundos através do uso de uma antena de GPS, o que permite que as imagens possam ser analisadas em conjunto com os dados de outros sensores auxiliares. Sensores de campo elétrico e de campo magnético medem as variações dos campos geradas por cada etapa do raio. Antenas especiais são capazes de estimar a localização e o pico de corrente do raio através da detecção da sua radiação eletromagnética [11].

Tal como na primeira parte [1], este trabalho teve como objetivo apresentar as características dos raios ascendentes de maneira acessível, de modo a servir como ferramenta didática no contexto educacional brasileiro, ampliando o alcance das discussões sobre descargas atmosféricas em diferentes níveis de ensino no país. Ele oferece ao leitor informações atualizadas, imagens obtidas por câmeras especiais, e um glossário de termos utilizados [16]. Essas informações são fruto da pesquisa científica realizada pelos autores e colaboradores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Processos: 2023/03908-5, 2023/1536-6, 2022/10808-4), ao CNPq (Processos: 141450/2021-5, 310288/2021-5, 167553/2022-4) e à *National Research Foundation* (Unique Grant No.: CSRP23030380658) pelos auxílios e bolsas vigentes mencionados e pelos outros recebidos ao longo de vários anos que tornaram a pesquisa sobre a física dos raios possível. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradecimento especial a muitos colegas de pesquisa, alunos de graduação e pós-graduação que desde 2003 passaram tantas horas conosco tentando entender mais sobre os raios através do uso de câmeras de alta velocidade e sensores auxiliares.

Disponibilidade de Dados

Conteúdos complementares ao artigo, incluindo vídeos de câmeras de alta velocidade e um glossário de termos técnicos, podem ser encontrados em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15644157>.

Referências

- [1] M.M.F. Saba e J.C.O. Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **47**, e20250022 (2025).
- [2] C. Schumann, *Estudo dos raios ascendentes a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e de medidas de campo elétrico*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2016).
- [3] V.A. Rakov, *Fundamentals of Lightning* (University Printing House, Cambridge, 2016).
- [4] M.M.F. Saba, C. Schumann, T.A. Warner, M.A.S. Ferro, A.R. Paiva, J. Helsdon Jr. e R.E. Orville, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **121**, 8493 (2016).
- [5] M.A.S. Ferro, *Afinal, o que, Raios, é Isso? O que é e Como Ocorre* (Editora do autor, São José dos Campos, 2022).
- [6] I.T. Cruz, M.M.F. Saba, C. Schumann e T.A. Warner, *Geophysical Research Letters* **49**, e2022GL101072 (2022).
- [7] I.T. Cruz, *Líderes de recuo em raios ascendentes*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2022).
- [8] G. Diendorfer, H. Pichler e M. Mair, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **51**, 443 (2009).
- [9] I.J. Costa Neto, *Estudos das fases dos raios ascendentes*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2023).
- [10] J.R. Dwyer e M.A. Uman, *Physics Reports* **534**, 147 (2014).
- [11] C. Schumann, M.M.F. Saba, T.A. Warner, M.A.S. Ferro, J.H. Helsdon Jr., R. Thomas e R.E. Orville, *Scientific Reports* **9**, 9576 (2019).
- [12] H. Zhou, G. Diendorfer, R. Thottappillil, H. Pichler e M. Mair, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **117**, 1 (2012).
- [13] L. Cai, Y. Ke, W. Fan, R. Yan, M. Zhou, J. Wang e Y. Fan, *High Voltage* **9**, 163 (2024).
- [14] T.A. Warner, *Atmospheric Research* **117**, 45 (2012).
- [15] R. Jiang, X. Qie, Z. Wu, D. Wang, M. Liu, G. Lu e D. Liu, *Atmospheric Research* **149**, 111 (2014).
- [16] M.M.F. Saba, *Glossário e vídeos de câmeras de alta velocidade para os artigos “A física dos raios – Parte 1: Raios descendentes” e “A física dos raios – Parte 2: Raios ascendentes”*, disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15644157>.
- [17] I.T. Cruz, M.M.F. Saba, J.C.O. Silva e C. Schumann, *Geophysical Research Letters* **52**, e2024GL110492 (2025).
- [18] M.G. Ballarotti, C. Medeiros, M.M.F. Saba, W. Schulz e O. Pinto Jr., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **117**, 1 (2012).
- [19] M.M.F. Saba, W. Schulz, T.A. Warner, L.Z.S. Campos, C. Schumann, E.P. Krider, K.L. Cummins e R.E. Orville, *Journal of Geophysical Research* **115**, 1 (2010).
- [20] C. Medeiros, *Estudo da ocorrência de corrente contínua em relâmpagos nuvem-solo negativos*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2011).
- [21] A.C.V. Saraiva, M.M.F. Saba, O. Pinto Jr., K.L. Cummins, E.P. Krider e L.Z.S. Campos, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **115**, 1 (2010).
- [22] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, *Análise Socioambiental das Fontes Energéticas do PDE 2031*, disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-593/NT%20EPE-DEA-SMA-004-2022%20-%20Analise%20Socioambiental%20das%20Fontes%20Energeticas%20do%20PDE%202031.pdf>.
- [23] International Energy Agency, *Technology Roadmap – Wind Energy 2013*, disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-wind-energy-2013>.
- [24] J. Montanyà, O. van der Velde e E. Williams, *Journal of Geophysical Research* **119**, 1455 (2014).
- [25] N. Yang, W. Jiang, C. Jin, S. Zhang e W. Hou, *Frontiers in Earth Science* **10**, 1 (2023).
- [26] F. Vukovic, V. Milardic, B. Filipovic-Grcic, N. Stipetic, B. Franc e D. Milos, em: *Proceedings of the 2023 4th International Conference on Smart Grid Metrology* (Cavtat, 2023).

- [27] F. Vukovic, B. Filipovic-Grcic, N. Stipetic e B. Franc, *Electric Power Systems Research* **238**, 111061 (2025).
- [28] G. Diendorfer, em: *Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (Roma, 2015).
- [29] F. Rachidi, M. Rubinstein, J. Montanyà, J.L. Bermúdez, R.R. Sola, G. Solà e N. Korovkin, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **55**, 2489 (2008).
- [30] International Electrotechnical Commission, *IEC 61400-24:2019 – Wind Energy Generation Systems: Part 24: Lightning Protection* (IEC, Genebra, 2019).
- [31] T.P. da Silva, M.M.F. Saba, T.A. Warner, I.T. Cruz, R. Alipio e C. Schumann, em: *Proceedings of International Conference on Grounding 2024 and 11th Lightning Physics and Effects* (Belo Horizonte, 2024).