

A física dos raios – Parte 1: Raios descendentes

The physics of a lightning flash – Part 1: Downward lightning flashes

M.M.F. Saba^{*1}, J.C.O. Silva¹

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

Recebido em 24 de janeiro de 2025. Revisado em 11 de junho de 2025. Aceito em 12 de junho de 2025.

Após uma breve introdução histórica, os autores discorrem sobre aspectos gerais das descargas elétricas atmosféricas, tais como a iniciação de um raio, o que é o relâmpago e como ocorrem os trovões, além dos tipos de raios e suas interações com o solo. São apresentados os raios descendentes e ascendentes, com polaridades negativa e positiva. A primeira parte do artigo enfatiza os raios descendentes, isto é, aqueles cujos processos iniciais ocorrem nas nuvens e, posteriormente, se propagam até o solo, culminando em descargas elétricas intensas. Uma riqueza de detalhes sobre cada uma de suas etapas, bem como sobre seus efeitos e danos, é apresentada a partir de observações feitas com câmeras de vídeo especiais de alta velocidade (capazes de obter milhares de imagens por segundo) e sensores auxiliares. Este trabalho, juntamente com sua segunda parte, oferece ao leitor informações atualizadas de modo acessível, fruto da pesquisa científica realizada pelos autores e seus colaboradores. Essas informações, em sua maioria fragmentadas em publicações técnicas – e, na maior parte das vezes, em língua inglesa – contribuem para a disseminação do conhecimento sobre descargas atmosféricas em diferentes níveis de ensino no país.

Palavras-chave: Raio, descarga atmosférica, *streamer*, líder, campo elétrico, relâmpago, trovão, tempestade.

After a brief historical introduction, the authors discuss general aspects of atmospheric electrical discharges, such as lightning initiation, what lightning is, how thunder occurs, as well as the types of lightning and their interactions with the ground. Both downward and upward lightning discharges with negative and positive polarity are presented. The first part of the article focuses on downward lightning, that is, those discharges whose initial processes occur in the clouds and subsequently propagate toward the ground, culminating in intense electrical discharges. A wealth of detail on each stage of this process, as well as its effects and associated damage, is presented based on observations made using special high-speed video cameras (capable of capturing thousands of images per second) and auxiliary sensors. This work, along with its second part, provides the reader with up-to-date information in an accessible manner, resulting from scientific research carried out by the authors and their collaborators. These insights, often scattered across technical publications and mostly written in English, contribute to the dissemination of knowledge about atmospheric discharges at different levels of education in the country.

Keywords: Lightning flash, atmospheric discharge, streamer, leader, electric field, thunder, thunderstorm.

1. Introdução

Os raios, além de fascinarem por sua beleza, também assustam por sua intensidade. Eles percorrem os céus e parte deles atinge a terra. Eles causam estupor, mas também mortes e danos de diversos tipos.

Sua natureza começou a ser desvendada a partir da constatação da grande semelhança com descargas elétricas observadas em profusão no século XVIII, através de experimentos em laboratórios e demonstrações sobre eletricidade, muitas vezes para fins de entretenimento. Em particular, as experiências com as garrafas de Leyden (capacitores primitivos feitos com frascos de vidro e materiais condutores) levaram vários cientistas da época a fazerem a analogia entre descargas produzidas em laboratório e os raios que ocorriam na atmosfera [1].

Em 1750, Benjamin Franklin propôs um experimento para verificar se as nuvens continham eletricidade. Ele sugeriu que fosse instalada no topo de uma torre alta uma espécie de guarita de onde subiria uma haste metálica de vários metros de altura, isolada da estrutura. Uma pessoa seria colocada em contato com essa haste e, num dia de tempestade, poderiam ser observadas faíscas saindo dessa pessoa, especialmente da ponta de seus dedos. Caso o experimentador achasse a situação perigosa, Franklin sugeriu que este segurasse um fio aterrado por uma substância isolante, aproximando esse fio da haste isolada, de onde partiriam faíscas para o fio. Tratava-se de uma experiência extremamente arriscada, que o próprio Franklin não realizou na forma proposta [1].

A primeira realização bem-sucedida desse experimento foi conduzida por Thomas-François Dalibard, na França, em maio de 1752. Um mês depois, sem saber do sucesso do experimento francês, Franklin encontrou uma forma de realizar sua própria experiência na Filadélfia,

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

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

comprovando sua hipótese sobre a eletricidade nas nuvens [2, 3]. Segundo um relato seu de 19 de outubro de 1752, durante uma tempestade, ele empinou uma pipa com um barbante. Na parte inferior do barbante, amarrou uma fita de seda e prendeu uma chave na emenda entre o barbante e a fita de seda. Segurando a pipa pela fita de seda, observou, então, que com a aproximação da tempestade o barbante ficava eletrizado e seus fiapos eriçados. Observou também que quando molhado pela chuva o barbante conduzia eletricidade e faíscas saltavam da chave em direção à sua mão. A similaridade entre estas descargas e as que se obtinham em laboratórios com geradores eletrostáticos convenceu a comunidade científica da época do caráter elétrico dos raios. Após o sucesso destes experimentos, vários outros foram realizados com balões e foguetes estendendo um fio condutor sob uma nuvem eletricamente carregada. Em todos estes experimentos havia sempre o risco de um raio atingir o pesquisador. De fato, isto aconteceu com Georg Richmann, morto em 6 de agosto de 1753 em São Petesburgo, na Rússia, quando o experimento que realizava foi atingido por um raio.

Somente no final do século XIX, com o surgimento da fotografia e da espectroscopia, os conhecimentos sobre os raios voltaram a progredir. Embora as primeiras fotografias do espectro do raio datem de 1894, já em 1868 Herschel identificou, através de um prisma, a linha do nitrogênio no espectro do raio. Em 1889, Hoffert registrou pela primeira vez as várias descargas que compõem os raios, movimentando sua câmera fotográfica durante o tempo de exposição do filme fotográfico. No começo do século XX, câmeras fotográficas especiais, nas quais o filme era deslocado em alta velocidade, proporcionaram os primeiros registros da propagação do raio da nuvem para o solo [4]. Alguns anos depois, com o advento da eletrônica, os primeiros registros de corrente elétrica dos raios foram obtidos em torres e arranha-céus. Atualmente, o estudo dos raios conta com o uso de câmeras especiais capazes de registrar mais de um milhão de imagens por segundo, além de sensores de campo elétrico e magnético e sensores de corrente elétrica e radiação eletromagnética produzida pelos raios.

Este artigo e o seu complemento [5] apresentam ao leitor conceitos básicos sobre os raios, os processos físicos envolvidos na sua formação e propagação, imagens do seu desenvolvimento e alguns parâmetros que definem seus diferentes tipos. De posse destas informações o leitor poderá entender melhor a física dos raios em cada uma de suas etapas, bem como responder aos diversos questionamentos e mitos que cercam o tema. Como os raios se originam? O raio sobe ou desce? Um raio pode atingir várias vezes o mesmo lugar? Como se classificam? Quanto tempo duram? Etc.

As informações reunidas neste trabalho foram obtidas a partir de pesquisas realizadas pelos autores e colaboradores. As imagens apresentadas são de propriedade dos autores, adquiridas com o auxílio de câmeras de vídeo

de alta velocidade e de sensores auxiliares de corrente e de campo elétrico¹.

Essas informações, em sua maioria fragmentadas em publicações técnicas e na maioria das vezes em língua inglesa, são apresentadas de modo acessível ao leitor. Elas contribuem com a disseminação do conhecimento e com as discussões sobre descargas atmosféricas em diferentes níveis de ensino no país.

2. Relâmpagos, Trovões e a Iniciação de um Raio

O termo **relâmpago** refere-se ao brilho luminoso resultante da intensa descarga elétrica na atmosfera a que chamamos **raio**. Este clarão se dá pelo intenso aquecimento e ionização do ar causado pelo abrupto fluxo de corrente elétrica em um meio pouco condutor. O valor de pico da corrente elétrica pode chegar a dezenas ou mesmo centenas de quiloampères (kA). Com o aquecimento súbito do ar e sua expansão, forma-se uma onda de choque que causa o som a que chamamos **trovão**. Como a luz emitida pelo raio se propaga a uma velocidade próxima a $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$, e o som a aproximadamente 340 ms^{-1} , observamos primeiro o raio e depois escutamos o trovão. A diferença de tempo entre o instante em que observamos o raio e o momento em que ouvimos o trovão pode nos dar uma estimativa da distância em que o raio ocorreu, em relação ao observador, bastando para isso dividir por 3 a diferença de tempo em segundos (entre os dois eventos) para obtermos a distância aproximada em quilômetros [6, 7].

Para que um raio seja iniciado é necessária a existência de um campo elétrico intenso. Quando uma nuvem encontra condições atmosféricas favoráveis ao seu desenvolvimento, essa intensificação do campo elétrico ocorre como consequência dos processos de separação de cargas. Os mecanismos que geram a separação de cargas dentro de uma nuvem ainda não são bem entendidos. Existem várias teorias, sendo a mais aceita o mecanismo

¹ As câmeras de alta velocidade são capazes de filmar entre 1.000 e 1.000.000 de imagens por segundo. 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 fisicamente (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 gerados 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 [32].

gerado por colisões entre cristais de gelo e *graupel* (aglomerados de cristais de gelo cobertos por água super-resfriada). Uma vez eletrificados, estes elementos sofrem separação por movimentos convectivos e/ou pela ação da gravidade. A separação pode gerar várias regiões predominantemente positivas e negativas dentro da nuvem. A estrutura elétrica simples mais aproximada para uma nuvem de tempestade seria a tripolar: um centro de cargas positivas próximo do topo, um centro de cargas negativas no meio e um centro menor de cargas positivas próximo da base da nuvem [7, 8].

Campos elétricos superiores a 100 kV/m foram medidos no interior das nuvens que produzem raios (chamadas de nuvens de tempestade ou Cumulonimbus). Apesar de muito intensos, esses valores são ainda inferiores ao esperado para que ocorra a quebra de rigidez do ar e o início da descarga inicial. Vários estudos e experimentos vêm sendo desenvolvidos com o propósito de entender como os raios são iniciados [9].

3. Tipos de Raios

3.1. Interação com o solo

Os raios podem ou não tocar o solo. Os raios que não tocam o solo são a maioria (em torno de 80 a 90%) [8]. Apesar de serem chamados de raios na nuvem ou **intranuvem**, algumas vezes partes de suas ramificações podem ser observadas quando se propagam abaixo da base da nuvem, podendo se estender por muitos quilômetros (vídeo suplementar: raio intranuvem [10]), sendo possível ver a sua propagação a olho nu (Fig. 1) [11].

3.2. Raios descendentes e ascendentes

Os raios que tocam o solo, apesar de serem a minoria, são os que produzem mais danos. Estes podem ser classificados como raios **descendentes** (RD) ou **ascendentes** (RA) segundo a direção de propagação da descarga que inicia o raio (Fig. 2). Os raios descendentes



Figura 1: Raio intranuvem com ramificações se propagando abaixo da base de uma nuvem de tempestade. Fonte: Autores.



Figura 2: Exemplo de raio descendente (esquerda) e ascendente (direita), cuja direção de propagação, nesses casos, é facilmente observada pelo sentido das ramificações. Fonte: Diego Rhamon (esquerda); Autores (direita).

(também chamados de **raios nuvem-solo**) são iniciados no interior da nuvem, enquanto os **raios ascendentes** (ou solo-nuvem) se iniciam a partir da extremidade de alguma estrutura alta localizada em superfícies planas ou sobre montanhas [12, 13]. Os raios ascendentes, por serem iniciados somente a partir de estruturas altas, são raros (exceto nessas próprias estruturas). A maioria deles acontece a partir de prédios ou torres altas, mas há também observações de raios ascendentes partindo do topo de árvores ou estruturas rochosas pontiagudas [14].

A física e as características dos raios descendentes são apresentadas no corpo deste trabalho (Parte 1). Na Parte 2 [5], apresentamos a física e as características dos raios ascendentes. De forma suplementar estão disponíveis alguns vídeos e um glossário com os principais termos utilizados nas Partes 1 e 2 [10].

3.3. Raios descendentes negativos e positivos

Os raios nuvem-solo são classificados segundo a carga líquida transferida ao solo. Os elétrons, pela sua grande mobilidade, são os responsáveis pela produção da corrente elétrica presente nos raios, que pode chegar a valores da ordem de centenas de kA. Nos raios de polaridade negativa, a carga líquida transferida ao solo é negativa. Os elétrons descem ao longo do caminho ionizado que une a nuvem ao solo. Já nos raios de polaridade positiva, os elétrons sobem do solo em direção à nuvem, gerando uma carga líquida positiva transferida ao solo [6–8].

No início da tempestade, durante sua fase mais ativa, onde movimentos convectivos intensos ocorrem no interior da nuvem, os raios predominantes são os negativos. Já os raios positivos costumam estar presentes na fase final da tempestade e em regiões predominantemente estratiformes, com menor movimento convectivo [15].

Os raios descendentes negativos costumam ser mais frequentes (80 a 90% dos casos). Os raios descendentes positivos são menos frequentes (10 a 20% dos casos). Os

raios positivos possuem uma descarga líder² descendente de polaridade positiva e etapas similares a de um raio descendente negativo (Fig. 3). A principal diferença entre eles reside no fato de que o raio negativo costuma (em cerca de 80% dos casos) apresentar múltiplas descargas. Já o raio positivo quase sempre (em 80% dos casos) termina após a primeira descarga [16].

4. Raios Descendentes

4.1. Iniciação

Os raios descendentes se iniciam em regiões da nuvem onde o campo elétrico é mais intenso. Isso geralmente acontece entre centros de carga de polaridade oposta. Nesta região surge uma **descarga líder bidirecional**². A extremidade positiva (**líder positivo**) se propaga em direção ao centro negativo de cargas e a extremidade negativa (**líder negativo**) se propaga em direção ao centro positivo de cargas (Fig. 3a). Caso o líder (positivo ou negativo) se propague pelo ar (Fig. 3b–c) e venha a tocar o solo (Fig. 3d), correntes elétricas intensas fluirão através da trajetória percorrida e por eventuais ramificações que o líder tenha formado [17–19].

4.2. Conexão com o solo e descarga de retorno

Quando a extremidade do líder descendente está tipicamente a menos de 150 metros do solo, ocorre a intensificação do campo elétrico numa região localizada abaixo das suas ramificações. Essa intensificação induz a formação de líderes ascendentes (que podem variar de alguns centímetros até dezenas de metros) provenientes de protuberâncias no solo, tais como construções, árvores ou mesmo pessoas que estejam nessa região (Fig. 3c) [20]. Esses líderes ascendentes possuem correntes da ordem de dezenas de ampères e podem ser iniciados simultaneamente de vários locais (Figs. 4 e 5). Quando um desses líderes ascendentes se conecta ao líder descendente, ocorre a etapa mais intensa e luminosa do raio denominada **descarga de retorno** (Fig. 3d–e e Fig. 4). Devido ao colapso do campo elétrico na circunvizinhança, as cargas elétricas acumuladas nos outros líderes ascendentes que não se conectaram ao líder descendente retornam ao ponto de origem em poucos microssegundos. Esse retorno abrupto pode gerar correntes da ordem de centenas de ampères [20, 21]. O líder ascendente que se conecta ao líder descendente é denominado **líder ascendente conectivo (LAC)**. O que não se conecta é denominado **líder ascendente não-conectivo (LANC)**.

A polaridade do raio é determinada pela polaridade do líder que toca o solo. Líderes descendentes negativos produzem raios negativos (vídeo suplementar: RD

negativo [10]). Líderes descendentes positivos produzem raios positivos (vídeo suplementar: RD positivo [10]). A descarga de retorno produz um pulso de corrente ascendente que percorre o caminho traçado anteriormente pelo líder [7, 8, 19]. A corrente de pico pode atingir valores de alguns kA até centenas de kA em poucos microssegundos (μs). A luz emitida após a conexão pode ser observada por satélites geoestacionários, e as ondas eletromagnéticas produzidas, dependendo da frequência, podem ser captadas por antenas situadas a centenas ou milhares de quilômetros do ponto de contato, o que permite a detecção e a localização dos raios e algumas de suas características como intensidade e polaridade [22].

4.3. Líderes de recuo e descargas subsequentes

Quando a corrente elétrica que percorre o canal da descarga cessa, trechos decaídos da parte positiva dentro da nuvem podem dar origem à formação de um novo líder bidirecional chamado **líder de recuo** (Fig. 3g) [6–8]. A extremidade negativa do líder de recuo pode descer em direção ao solo, normalmente percorrendo o trajeto da descarga anterior, que se encontra ainda fracamente ionizado (Fig. 3g–h). Ao estabelecer contato com o solo, esse líder de recuo produz a denominada **descarga de retorno subsequente** (Fig. 3i).

4.4. Líder escalonado e líder contínuo

Quando um líder negativo percorre o ar virgem (não ionizado), essa propagação ocorre em “passos”. Nessas condições o líder negativo é chamado de **líder escalonado** (Fig. 3b–c). Entretanto, quando o líder negativo se propaga por um canal ionizado por uma descarga anterior, estes “passos” tendem a desaparecer e o líder se propaga de modo contínuo com uma velocidade cerca de 100 vezes maior, sendo chamado de **líder contínuo** (Fig. 3h) [6].

Quando o líder contínuo encontra um trecho do trajeto insuficientemente ionizado, uma nova trajetória pode se formar, dando origem a uma descarga de retorno subsequente em um novo ponto de contato no solo. Os raios positivos, quando apresentam descarga de retorno subsequente, raramente utilizam a mesma trajetória da descarga anterior. Metade dos raios negativos atingem o solo em mais de um lugar (média de 1,7 ponto de contato por raio) [23]. Essas múltiplas descargas de retorno ocorrem em intervalos de tempo de dezenas de milissegundos. Um raio nuvem-solo negativo possui em média 3 a 4 descargas de retorno (Tabela 1). No entanto, já foram registrados raios com mais de 20 descargas e que podem atingir até 5 ou 6 pontos no solo em frações de segundos. Quando percebemos cintilação em um raio, (ou seja, quando vemos o raio “pisar”), isso se deve a essa repetição de descargas em um breve intervalo de tempo [24].

² A descarga **líder** abre caminho no ar virgem (não ionizado) e é formada por descargas menos intensas em sua extremidade chamadas de *streamers* (vide Seção 4). Classificamos o líder como **bidirecional** quando as duas extremidades (positiva e negativa) se propagam pelo ar.

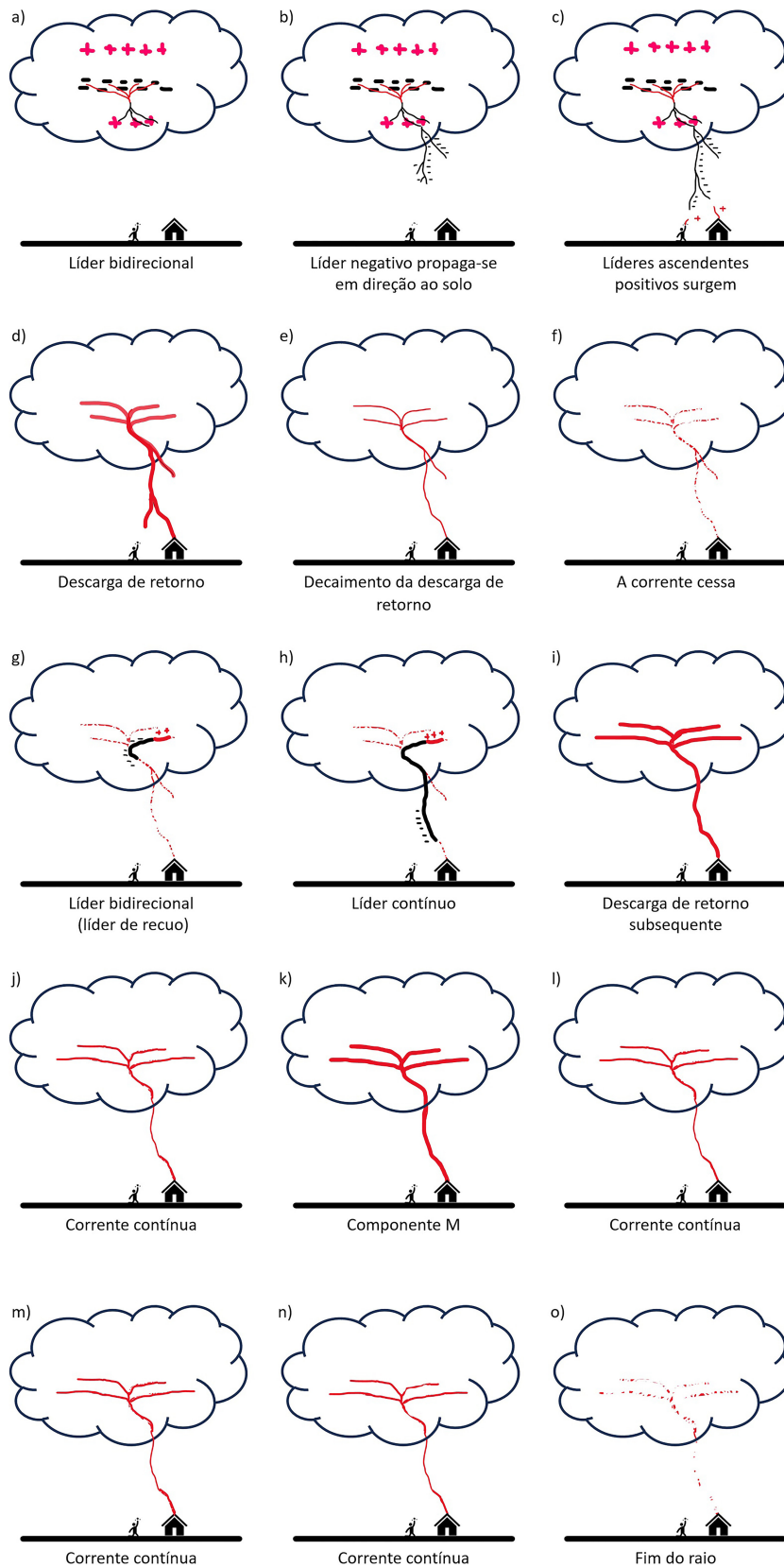


Figura 3: Etapas de um raio descendente negativo: (a) iniciação de uma descarga bidirecional entre os centros negativo e positivo de carga da nuvem; (b) propagação da parte negativa do líder bidirecional em direção ao solo; (c) iniciação de líderes ascendentes positivos a partir de estruturas no solo; (d–f) descarga de retorno e seu decaimento; (g–h) iniciação e propagação em direção ao solo de um novo líder bidirecional; (i–j) descarga de retorno subsequente seguida por uma corrente contínua; (k) ocorrência de uma componente M; (l–o) decaimento da corrente contínua e término do raio. Fonte: Autores.

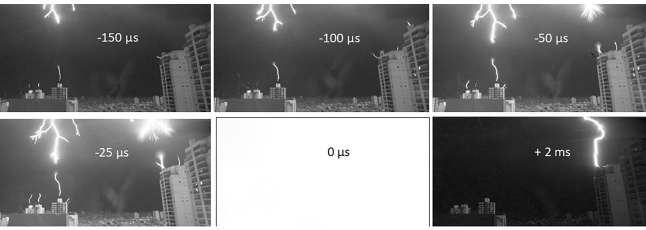


Figura 4: Líderes ascendentes provenientes de vários locais tentam se conectar à duas ramificações de um líder descendente durante um raio nuvem-solo negativo. A saturação da imagem no tempo 0 μs indica o momento da descarga de retorno, que se inicia com a conexão do líder descendente com o líder ascendente que teve início no edifício situado à direita nas imagens. Imagens feitas com uma câmera de vídeo de alta velocidade (40 mil imagens por segundo). Fonte: Autores/Diego Rhamon.

4.5. Correntes de longa duração

Apesar de as descargas de retorno serem responsáveis pelos valores de pico de corrente mais altos em um raio (até centenas de kA), elas possuem duração extremamente curta, nunca superior a um ou dois milissegundos [25]. Entretanto, essas descargas podem ou não serem seguidas por uma corrente de baixa intensidade (dezenas a centenas de ampères), porém muito mais duradoura, denominada **corrente contínua**. Esta corrente pode manter o canal do raio ativo por até 1 segundo. Pela sua longa duração, ela é responsável pela maioria dos danos associados às altas temperaturas (fusão de materiais, perfuração de superfícies metálicas, combustão etc.) e acontecem com mais frequência em raios positivos (Tabela 1) [26].

4.6. Componente M

Durante a ocorrência de corrente contínua no canal de um raio (Fig. 3j–n), pode haver uma súbita intensificação dessa corrente (e luminosidade associada), a qual denominamos **componente M** (Fig. 3k). A componente M acontece como consequência da interação de líderes de recuo em ramos decaídos do canal do raio localizados no interior da nuvem ou próximo à sua base. A extremidade negativa do líder de recuo se conecta ao canal do raio ainda ativo, intensificando a sua corrente [7, 8, 27].

As descargas de retorno, as correntes contínuas e as componentes M são os principais modos de transferência de carga realizados por um raio descendente.

5. Líderes Positivos e Negativos

Os raios são, em última análise, formados por líderes positivos e negativos, sendo as diferenças de um e de outro, junto com a distribuição de carga na nuvem, os principais fatores que geram as diferenças observadas nos raios positivos e negativos (Tabela 1). Os líderes se propagam em um campo elétrico ambiente relativamente

Tabela 1: Principais diferenças entre os raios descendentes negativos e positivos.

Características	RD Negativo	RD Positivo
Fase da tempestade	Convectiva	Pouco convectiva
Líder descendente	Negativo	Positivo
Líder se propagando dentro da nuvem	Positivo	Negativo
Número médio de descargas de retorno	4,6 ¹	1,2 ²
Porcentagem com apenas uma descarga de retorno (%)	17 ¹	80 ²
Intervalo de tempo médio entre descargas de retorno (ms)	92 ¹	143 ²
Porcentagem de raios com mais de um ponto de contato no solo (%)	51 ³	19 ²
Presença de corrente contínua de longa duração (> 40 ms) (%)	27 ⁴	75 ²

¹Ballarotti [28]; ²Saba [29]; ³Saraiva [23]; ⁴Medeiros [30].

baixo e os *streamers*³, iniciados em suas extremidades, fornecem a corrente necessária para se propagarem e formarem o canal do raio [31]. Os *streamers* podem ser positivos ou negativos. O campo elétrico que sustenta os *streamers* positivos (nas extremidades dos líderes positivos) é menos intenso (da ordem de 500 kV/m ao nível do mar) do que o que sustenta os *streamers* negativos (duas ou três vezes maior).

5.1. Características de propagação

Os líderes negativos são caracterizados pela presença de *streamers* longos à sua frente (Fig. 5) e se propagam em passos. Esses passos ocorrem sempre que a extremidade do líder se conecta a um líder bidirecional formado à sua frente devido ao intenso campo elétrico (chamado de **líder espacial**) (Fig. 5). Por se propagarem em passos, os líderes negativos emitem bastante radiação eletromagnética, principalmente em VHF (*Very High Frequency*, Frequência Muito Alta). Essa característica os torna mais fáceis de serem mapeados por antenas de campo elétrico. Através do tempo de chegada da onda eletromagnética gerada pelo líder negativo em cada antena, é possível traçar a sua trajetória ao longo do tempo [32]. Essa trajetória, normalmente errática, tem

³ *Streamers* são descargas elétricas filamentosas que emergem de um condutor ou da ponta de uma descarga líder (Fig. 5). São considerados “frios” porque a condutividade e a temperatura do gás ionizado (plasma) são relativamente baixas em comparação com as descargas líderes.

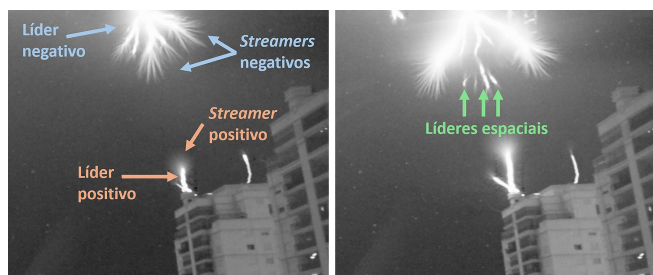


Figura 5: Detalhes de duas imagens (do mesmo raio mostrado na Fig. 4) ilustrando líderes, *streamers* e líderes espaciais na frente de uma descarga líder negativa. Mais detalhes em Saba [33]. Fonte: Autores/Diego Rhamon.

vido estudada por alguns pesquisadores com modelos estocásticos e fractais. Mais detalhes sobre a propagação dos líderes, sobre o uso de modelos fractais e sobre o método utilizado para registrá-los em vídeos podem ser encontrados em Da Silva [31], Saba [33], Assis [34] e Antrias [35].

Os líderes positivos, por sua vez, apresentam uma região de *streamers* cônica e uniforme (Fig. 5). Não há, até o presente momento, e este é um tópico que requer mais estudo, registros claros de uma propagação escalonada (ou em passos) em líderes positivos [31, 36, 37]. Líderes negativos sempre apresentam ramificações durante sua propagação, enquanto os positivos podem não apresentar nenhuma ramificação (Fig. 6; vídeos suplementares: RD negativo e RD positivo [10]).

Os líderes negativos possuem uma velocidade variável durante a sua trajetória em direção ao solo e, apesar de se propagarem em passos, costumam ser mais velozes. Em alguns casos possuem uma velocidade de propagação até dez vezes maior comparada aos líderes positivos. Ambos os líderes (positivos e negativos) aceleram próximo ao

solo (a poucas centenas de metros) e, nessa fase, os positivos podem apresentar velocidades superiores aos negativos [38, 39].

5.2. Consequências do modo de propagação

O canal do raio só se mantém ionizado e condutor se houver corrente elétrica suficiente passando por ele [40, 41]. A principal fonte de corrente do raio durante a ocorrência da corrente contínua é a ionização do ar feita pelo campo elétrico na extremidade do líder que se propaga dentro da nuvem, que no caso dos raios positivos é feita pelo líder negativo. As diversas ramificações e a rapidez na propagação do líder negativo (Tabela 2) contribuem para manter o canal positivo no solo ionizado e condutor por um período de tempo maior. Como consequência, após a descarga de retorno dos raios positivos, há uma maior ocorrência de correntes contínuas longas [25, 29, 31]. No caso dos raios descendentes negativos, o líder positivo no interior da nuvem (menos intenso e mais lento) é incapaz de manter o canal conectado ao solo condutor e isso resulta em correntes contínuas menos intensas e de menor duração (Tabela 1).

A multiplicidade do RD negativo está relacionada à presença de líderes de recuo no interior da nuvem, responsáveis por refazer o canal da descarga anteriormente ionizado. No caso do RD positivo, o líder negativo dentro da nuvem evita que o canal positivo decaia, minimizando a ocorrência de descargas de retorno subsequentes. De fato, salvo raríssimas exceções, não são observados líderes contínuos em raios positivos formando descargas de retorno subsequentes que atingem o mesmo ponto de contato no solo. Quando um raio positivo apresenta duas descargas de retorno, quase sempre ela percorrerá um novo caminho até o solo [29].

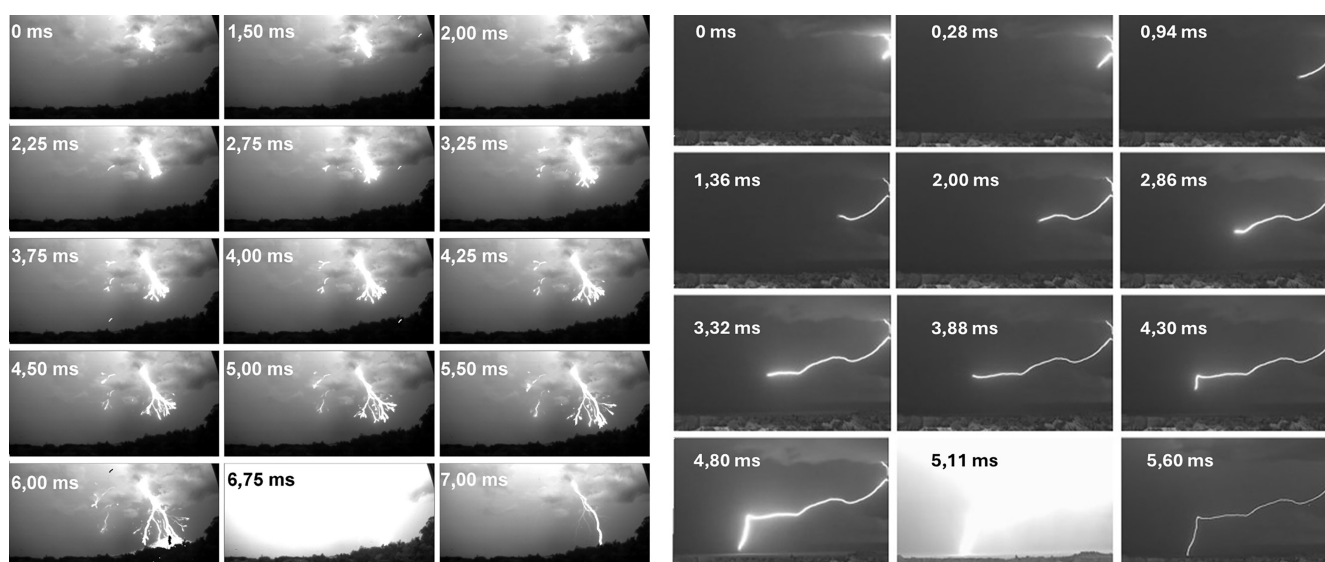


Figura 6: Diferenças entre um líder negativo (esquerda) e um líder positivo (direita) ao se propagarem em direção ao solo. Fonte: Autores.

Tabela 2: Principais diferenças entre os líderes negativos e positivos.

Características	Líder negativo	Líder positivo
Propagação preponderante	Escalonada	Contínua
Ramificações	Sempre	Maioria
Existência de líder espacial	Quase sempre	Não
<i>Streamers</i> na extremidade do líder	Múltiplos e longos	Único e menor
Presença de líderes de recuo	Não	Sim
Radiação eletromagnética (VHF)	Intensa	Fraca
Velocidade média (m/s)	10^5	10^4
Aceleração próximo ao solo (poucas centenas de metros)	Sim	Sim

6. Espectro de Radiação, Raios-X e Raios Gama

O raio irradia sua energia em quase toda a faixa do espectro eletromagnético. O brilho luminoso do raio contém um espectro contínuo (devido à radiação emitida pelo ar aquecido) e linhas espectrais (emissões características de gases ionizados, como o nitrogênio e o oxigênio do ar). Na Fig. 7 ilustramos as linhas espectrais de um raio negativo, registradas com o uso de uma rede de difração posicionada à frente da lente de uma câmera de alta velocidade. O espectro é obtido sem o tradicional uso de uma fenda, já que o raio é em si mesmo uma fonte luminosa estreita [42, 43]. Esses registros permitem estimar a temperatura do raio em diferentes momentos. Temperaturas da ordem de 3×10^4 K foram obtidas a partir da comparação da intensidade das linhas espectrais [4, 44].

Radiação de altíssima energia como os raios-X e até mesmo raios gama já foram observados associados aos raios. Recentemente, com a utilização de câmeras de alta velocidade, foi observado que estas emissões (raios-X e gama) ocorrem na maioria das vezes durante a iniciação ou a propagação dos líderes negativos [45, 46]. Os raios-X, observados com detectores de cintilação de cristal de iodeto de sódio, foram registrados nos instantes

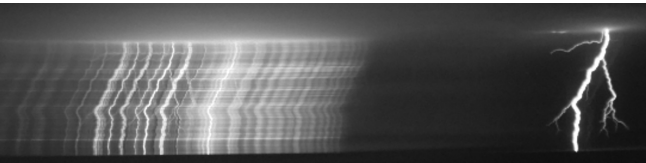


Figura 7: Espectro luminoso (à esquerda) de um raio descendente negativo (à direita) obtido através do uso de uma rede de difração e uma câmera de alta velocidade. Fonte: Autores.

que a propagação do líder negativo se dava na direção do detector de raios-X [47]. Já os raios gama, observados com uma rede de cintiladores plásticos, foram detectados durante os pulsos de quebra de rigidez do ar e, também, quando o líder negativo se propagava em direção ao solo [45, 46].

7. Danos Associados Aos Raios

Os raios podem provocar danos e ferimentos de várias formas nos seres vivos, podendo afetar os sistemas cardiorrespiratório, neurológico, ocular, auditivo, pulmonar e outros, além de queimaduras e morte [48]. O número de vítimas fatais por raios no Brasil em 2023 foi 40 [49], mas o número pode ser maior em razão de subnotificação ou falta de clareza sobre a natureza dos acidentes notificados. Os raios também podem provocar danos físicos a estruturas (fogo, explosão, perfuração de chapas, erosão de metais, ejeção de materiais) e em componentes expostos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica e em pátios de subestações (danos em isoladores, cabos, transformadores etc.). Equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos também estão sujeitos a falhas e mau funcionamento, incluindo interferência eletromagnética [50], os quais podem gerar cessação de atividade, perdas de dados, interrupção de serviço ao público etc. Danos e falhas podem se desdobrar em outros tipos de acidentes como, por exemplo, ferimentos e até morte provocados por ejeção de material do alto de estruturas (pedaços de concreto e outros materiais de construção), movimentos involuntários por choque elétrico, falha de equipamento médico de suporte à vida, incêndio, pânico em locais de grande afluência de público, ataque cardíaco (susto).

Não foi encontrada informação confiável e recente de perdas financeiras anuais devido a raios no Brasil. Nos EUA, para se ter uma ideia, segundo o *Insurance Information Institute*, os raios causaram 1,2 bilhão de dólares em indenizações de proprietários de imóveis naquele país em 2023 [51]. Esse custo não leva em conta os danos em estruturas não seguradas. Além disso, se for considerado o custo das medidas de proteção contra raios em estruturas e instalações elétricas, o raio tem um custo extremamente elevado para a sociedade.

O raio, como fonte da corrente e dos campos eletromagnéticos que causam danos nas estruturas, tem seus efeitos tanto mais fortes quanto mais próximo da estrutura. Num extremo, o raio atinge a própria estrutura, que sofre a ação direta da corrente do raio e dos seus campos elétrico e magnético próximos, que são muito intensos na circunvizinhança do canal do raio e nos condutores por onde a corrente flui. No outro extremo, o raio ocorre longe da estrutura e seus efeitos normalmente se limitam à interferência eletromagnética (EMI) provocada pelos campos eletromagnéticos radiados do raio. Quanto mais longe, mais fracos os efeitos, devido à atenuação dos campos com a distância. Situações

intermediárias se dão quando o raio atinge diretamente as linhas de energia elétrica ou de telecomunicações, que adentram as estruturas, ou quando atingem o solo em pontos próximos a essas linhas, causando induções de altas tensões nessas linhas. As linhas aéreas, que têm baixas perdas (perdas essas causadas apenas pela presença do solo e por corona no entorno dos cabos condutores), permitem a propagação dos impulsos de tensão induzidos em alta velocidade ($\approx c$), com amplitudes limitadas apenas pelos níveis de isolamento dos isoladores e outros componentes da linha, até as cargas consumidoras servidas por essas linhas.

A situação em que as linhas são atingidas ou sofrem indução de raios são muito mais frequentes do que descargas diretas nas estruturas, devido à grande área de exposição das linhas aos raios, por serem tipicamente extensas (áreas de captação muito maiores que as áreas equivalentes de captação das estruturas). Ou seja, as instalações elétricas nas estruturas (residências, comércio, *shopping-centers*, hospitais, centros de telecomunicações e dados, indústrias etc.) sofrem frequentemente os impulsos de alta tensão que chegam pelas linhas elétricas e linhas de sinais/dados, enquanto os efeitos das descargas diretas são menos frequentes, a depender da densidade anual de raios nuvem-solo no local e das dimensões da estrutura.

Além de danos em equipamentos eletroeletrônicos, os “surtos” de tensão conduzidos pelas linhas externas podem causar choques elétricos em pessoas nas instalações, sendo especialmente perigosos nas instalações mais simples (residências) e às pessoas que nos dias de hoje estão constantemente em contato com as linhas externas através de seus celulares e *notebooks* [52]. Por isso, hoje, mais do que nunca, deve-se reforçar a recomendação (que sempre existiu) de não tocar em aparelhos ligados à rede elétrica metálica durante as tempestades. Infelizmente, acidentes, inclusive mortes, nesta situação, estão aparecendo nos canais de notícias. Aparelhos celulares e *notebooks* devem ser desconectados da tomada e da rede de dados (use *Wi-Fi* e/ou dados móveis) durante as tempestades; no caso de um computador, use teclado, mouse e fones de ouvido *wireless* (sem fio).

Uma outra forma de interação entre raios e instalações ou pessoas ocorre na iminência de um raio atingir algum ponto do solo ou de uma estrutura próxima, através dos líderes ascendentes que não se conectam ao líder descendente (LANCs), como se pode ver na Fig. 4, nos quadros anteriores ao quadro “0 μs ”. Como explicado na Seção 4, tais líderes são iniciados a partir de diversos pontos das estruturas ou mesmo de pessoas numa área plana, mas acabam não se conectando ao líder descendente devido ao colapso do campo elétrico que os impulsionava, quando da conexão do líder descendente com algum outro líder ascendente que conseguiu se conectar antes dos demais. Enquanto os LANCs progridem, cargas vão sendo injetadas nos seus canais, através de sucessivos pulsos de corrente de algumas dezenas de ampères,

atraídos pelo líder descendente que se aproxima. Quando esses LANCs retraem, a carga acumulada nos seus canais retorna aos pontos de origem abruptamente, podendo gerar um pulso de corrente reversa da ordem de centenas de ampères [21], o que pode ser especialmente perigoso para pessoas ou animais de onde essas descargas partiram. A descoberta desse novo tipo de interação com seres humanos, através da análise das possíveis causas de mortes numa dada ocorrência [53], deu origem ao “quinto mecanismo de dano (*injury*) por raio”. Os LANCs são responsáveis por 10 a 15% das mortes por raios em países desenvolvidos, onde as estatísticas sobre mortes por raios são melhor realizadas e documentadas [54].

Inevitavelmente, é necessário controlar o risco à vida, o risco de danos físicos às estruturas e o risco de falhas dos equipamentos e das instalações elétricas causados pelos raios. No Brasil, a série de normas técnicas ABNT NBR 5419 [55–58] apresenta conceitos fundamentais e estabelece os requisitos para a análise de risco, as medidas de proteção contra danos físicos nas estruturas e proteção de seres vivos, além de medidas de proteção de sistemas eletroeletrônicos e outros danos internos à estrutura. A norma não se aplica a sistemas colocados fora das estruturas, tais como sistemas ferroviários, veículos, aviões, navios, plataformas *offshore* (sobre os oceanos), tubulações subterrâneas de alta pressão, tubulações e linhas de energia e de sinal. Cada área da eletrotecnologia conta, normalmente, com normas próprias, específicas.

O assunto proteção contra raios é tão antigo quanto a comprovação de que o raio é um fenômeno elétrico. Benjamin Franklin propôs o **para-raios** em 1752 [1], com praticamente o mesmo entendimento de suas funções básicas que se tem hoje: pontas acima de uma estrutura para captar o raio, condutores de descida para conduzir o raio para a terra, e uma parte enterrada para dispersar a corrente no solo. Este conjunto de elementos é chamado de **sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)**. A partir daí as proteções progrediram conforme a necessidade, especialmente no final do século XIX, com a rápida expansão das linhas e instalações de telégrafo, telefonia e energia elétrica. A crescente dependência da sociedade a esses serviços tornou o desenvolvimento e aplicação de técnicas de proteção cada vez mais importantes.

Alguns parâmetros estatísticos da corrente de um raio, obtidos de Anderson [59] e considerados pela norma [55], são apresentados na Tabela 3, associados aos efeitos principais sobre as partes da estrutura atingida. Esses parâmetros orientam o dimensionamento dos materiais e dos componentes de proteção e as características gerais das soluções prescritas na norma.

8. Considerações Finais

Em síntese, esse artigo explora as características gerais dos raios intranuvem e ascendentes e as características

Tabela 3: Parâmetros relevantes da corrente dos raios e efeitos associados, conforme [55].

Parâmetro, unidade	Tipo de descarga	Valores dos parâmetros e % de casos que excedem os valores dados		Valor fixado para NP-I	Efeitos principais	
		50%	5%			
I_p	kA	1DR−	32	90	Efeitos mecânicos (forças eletrodinâmicas), centelhamento (<i>sparking</i>) em junções de materiais e danos por onda de choque acústico (quando a corrente flui através de arco)	
		DRS−	11,8	28,6		50
		1DR+	35	250		200
Q	C	1DR−	4,5	20	Danos térmicos nos pontos de impacto (erosão de materiais, perfuração de chapas)	
		DRS−	0,95	4		100
		1DR+	16	150		
		RD−	7,5	40		
		RD+	80	350		
		CC	−	−		200
		W/R	kJ/Ω	1DR−		55
DRS−	6			52	10.000	
1DR+	650			15.000		
$di/dt_{máx.}$	kA/μs	1DR−	24,3	65	Centelhamento por indução e danos por onda de choque acústico	
		DRS−	39,9	161,5		20
		1DR+	2,4	32		
$di/dt_{30/90\%}$	kA/μs	DRS−	20,1	98,5	200	
DuraçãoΔt	μs	1DR−	75	200	A duração combinada com a corrente pode produzir altas cargas Q e energias específicas W/R , de forma que os efeitos principais acima são geralmente causados por uma combinação de parâmetros da corrente	
		DRS−	32	140		
		1DR+	230	2.000		
	ms	RD−	13	1.100		
		RD+	85	500		
	s	CC	−	−		0,5
I_p	pico de corrente.					
Q	carga elétrica.					
W/R	A energia térmica dissipada num condutor de resistência (constante) R é dada por $W = R \int i(t)^2 dt$, (J ou Ws). A relação $W/R = \int i(t)^2 dt$ é definida como energia específica ou <i>action integral</i> .					
1DR−	primeira descarga de retorno, raio negativo.					
1DR+	primeira descarga de retorno, raio positivo.					
DRS−	descarga subsequente negativa.					
RD−	raio descendente negativo (todas as fases do raio).					
RD+	raio descendente positivo (todas as fases do raio).					
CC	corrente contínua.					
NP	nível de proteção definido na norma em função da análise de risco, podendo ser I, II, III ou IV (do mais ao menos exigente).					

específicas dos raios descendentes. Nele foi mostrado como os raios descendentes se originam e como se propagam em direção ao solo. O artigo também discute as principais diferenças entre as polaridades dos raios descendentes e os diferentes processos físicos durante as etapas de propagação desse tipo de descarga (veja a Fig. 3). Todo o material apresentado é composto com informações que compõem o estado da arte da pesquisa no tema.

Os recentes avanços tecnológicos permitiram o uso de sensores e equipamentos sofisticados, dentre os quais

possuem especial relevância as câmeras de alta velocidade (ver vídeos suplementares na referência [10]). Com eles, muito se avançou no entendimento dos processos físicos dos raios. Existem, todavia, muitas questões importantes a serem respondidas. Entre elas poderíamos citar: (a) como o raio descendente se inicia? (b) por que o raio positivo é mais raro? (c) por que o raio negativo tem geralmente várias descargas e o positivo não? (d) o que determina o número de descargas em um raio? (e) por que os líderes positivos apresentam líderes de recuo e os negativos não? (f) por que algumas descargas de retorno

no raio negativo são seguidas de correntes contínuas de longa duração e outras não? (g) por que a maioria dos raios positivos têm picos de corrente altos e são seguidos por correntes contínuas longas? (h) que processos físicos de um raio são responsáveis pela produção de raios-X e raios gama? (i) como melhorar os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas? Várias destas questões estão sendo amplamente estudadas pelos autores deste trabalho em cooperação com universidades e institutos dentro e fora do Brasil (ver referências bibliográficas).

O conhecimento mais atualizado sobre raios encontra-se majoritariamente em publicações em inglês ou é apresentado de forma fragmentada, muitas vezes com foco técnico, como em dissertações, teses e publicações científicas em periódicos. A escassez de materiais didáticos em língua portuguesa que abordem as características básicas desse fenômeno dificulta a disseminação do conhecimento no contexto educacional. Este artigo teve como principal objetivo apresentar as características dos raios descendentes 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.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Processos: 2023/03908-5, 2023/1536-6, 2022/10808-4) e ao CNPq (Processos: 141450/2021-5, 310288/2021-5) 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. Agradecimento especial aos colegas de pesquisa Diego Rhamon R. da Silva e Tom A. Warner pela captura de preciosas imagens de raios. Agradecimento especial também a muitos outros colegas de pesquisa, alunos de graduação e pós-graduação que desde 2003 passaram tantas horas comigo tentando entender mais sobre os raios através do uso de câmeras de alta velocidade e sensores auxiliares.

Disponibilidade de Dados

Um glossário de termos utilizados e vídeos de câmeras de alta velocidade que complementam o artigo estão disponíveis em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15644157>.

Referências

- [1] E.P. Krider, *Physics Today* **59**, 42 (2006).
- [2] E.P. Krider, in: *Proceedings of the International Commission on History of Meteorology 1.1* (Mexico, 2004).
- [3] FOUNDERS ONLINE, *The Kite Experiment, 19 October 1752*, disponível em: <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-04-02-0135>.
- [4] V.A. Rakov e M.A. Uman, *Lightning Physics and Effects* (Cambridge University Press, Cambridge, 2003).

- [5] M.M.F. Saba, T.P. Silva, C. Schumann, I.J. Costa Neto, I.T. Cruz, J.C.O. Silva, P.B. Lauria e D.R.R. Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **47**, e20250023 (2025).
- [6] M.A.S. Ferro, *Afinal, o que, Raios, é Isso? O que é e Como Ocorre* (Editora do autor, São José dos Campos, 2022).
- [7] V. Cooray, *An Introduction to Lightning* (Springer Dordrecht, Londres, 2015).
- [8] V.A. Rakov, *Fundamentals of Lightning* (University Printing House, Cambridge, 2016).
- [9] D. Petersen, M. Bailey, W.H. Beasley e J. Hallett, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **113**, D17205 (2008).
- [10] 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”*, disponíveis em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15644157>.
- [11] T.P. Silva, *Estudo dos raios intranuvem através de câmeras de alta velocidade e de sensores de campo elétrico*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2022).
- [12] C. Schumann, M.M.F. Saba, M.A.S. Ferro, W. Schulz, G. Diendorfer, T.A. Warner e A.R. Paiva, em: *Anais do XIII Simpósio Internacional de Proteção Contra Descargas Atmosféricas* (São Paulo, 2015).
- [13] J.R. Dwyer e M.A. Uman, *Physics Reports* **534**, 147 (2014).
- [14] ZT RESEARCH, *Upward Lightning From Shiprock, NM* (2023), disponível em: <https://ztresearch.blog/2023/11/01/upward-lightning-from-shiprock-nm/>.
- [15] J.R. Monteiro, E.V. Mattos e W.F.A. Lima, *Anuário do Instituto de Geociências* **44**, 41700 (2021).
- [16] C. Schumann, *Caracterização dos raios positivos através de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2012).
- [17] H.W. Kasemir, em: *Qualitative Übersicht über Potential- Feldund Ladungsverhältnisse bei einer Blitzenladung in der bewitterwolke* (Akademische Verlagsgesellschaft, Ges. Geist und Portig K.-G., Leipzig, 1950).
- [18] V. Mazur, *Journal of Geophysical Research* **94**, 3326 (1989).
- [19] M.A.S. Ferro, *Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2008).
- [20] P.B. Lauria, *Estudo de líderes ascendentes iniciados nos para-raios em resposta às descargas descendentes negativas*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2021).
- [21] M.M.F. Saba, P.B. Lauria, C. Schumann, J.C.O. Silva e F.L. Mantovani, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **128**, e2022JD038082 (2023).
- [22] J. Montanyà, J.A. López, O. van der Velde, G. Solà, D. Romero, C. Morales, S. Visacro, M.M.F. Saba, S.J. Goodman, E. Williams et al., *Electric Power Systems Research* **213**, 108730 (2022).

- [23] 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**, D11102 (2010).
- [24] D.R. Poelman, W. Schulz, S. Pedebay, D. Hill, M.M.F. Saba, H. Hunt, L. Schwalt, C. Vergeiner, C.T. Mata, C. Schumann et al., *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* **21**, 1909 (2021).
- [25] M.M.F. Saba, O. Pinto Jr. e M.G. Ballarotti, *Geophysical Research Letters* **33**, L23807 (2006).
- [26] M.M.F. Saba, T.A. Warner e C. Schumann, em: *The Lightning Flash*, editado por V. Cooray (Institution of Engineering & Technology, Londres, 2014).
- [27] V. Mazur, *Principles of Lightning Physics* (IOP Publishing, Londres, 2016).
- [28] M.G. Ballarotti, C. Medeiros, M.M.F. Saba, W. Schulz e O. Pinto Jr., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **117**, D06112 (2012).
- [29] 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**, D24201, (2010).
- [30] 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).
- [31] C.L. Silva, W.P. Winn, M.C. Taylor, G.D. Aulich, S.J. Hunyady, K.B. Eack, H.E. Edens, R.G. Sonnenfeld, P.R. Krehbiel, E.M. Eastvedt et al., *Geophysical Research Letters* **50**, e2023GL105041 (2023).
- [32] W. Rison, R. Thomas, P. Krehbiel, T. Hamlin e J. Harlin, *Geophysical Research Letters* **26**, 3573 (1999).
- [33] M.M.F. Saba, D.R.R. da Silva, J.G. Pantuso e C.L. da Silva, *Geophysical Research Letters* **49**, e2022GL101482 (2022).
- [34] T.A. de Assis, J.G.V. Miranda, F.B. Mota, R.F.S. Andrade e C.M.C. Castilho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 2304 (2008).
- [35] C. Antrias, A. Ioannidis, I. Lepentsiotis, K. Amygdaloudis, M.M.F. Saba, D.R.R. da Silva, I.T. Cruz, T.P. da Silva, T.E. Tsovilis e J.C.O. Silva, em: *Anais do XVIII Simpósio Internacional de Proteção Contra Descargas Atmosféricas* (Tessalônica, 2025).
- [36] M.M.F. Saba, C. Schumann, T.A. Warner, J.H. Helsdon e R.E. Orville, *Electric Power Systems Research* **118**, 89 (2015).
- [37] O. Scholten, B.M. Hare, J. Dwyer, N. Liu, C. Sterpka, K. Mulrey e S.T. Veen, *Scientific Reports* **13**, 14485 (2023).
- [38] I.T. Cruz, M.M.F. Saba, J.C.O. Silva, R.U. Abbasi, H.G.P. Hunt, C. Schumann, D.R.R. da Silva, T.P. da Silva, P.B. Lauria e N.T. Kieu, *Geophysical Research Letters* **52**, e2024GL111594 (2025).
- [39] L.Z.S. Campos, M.M.F. Saba, T.A. Warner, O. Pinto Jr., E.P. Krider e R.E. Orville, *Atmospheric Research* **135**, 285 (2014).
- [40] E. Williams e S. Heckman, *Aerospace Laboratory* **5**, AL05-04 (2012).
- [41] J.L. Lapierre, R.G. Sonnenfeld, H.E. Edens e M. Stock, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **119**, 12479 (2014).
- [42] R.E. Orville, *Journal of Geophysical Research* **73**, 6999 (1968).
- [43] T.A. Warner, R.E. Orville, J.L. Marshall e K. Huggins, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **116**, D12210 (2011).
- [44] N.T. Kieu, R.U. Abbasi, M.M.F. Saba, J.W. Belz, P.R. Krehbiel, M.A. Stanley, F.J. Gordillo-Vazquez, M. Passas-Varo, T.A. Warner, W. Rison et al., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **129**, e2024JD041720 (2024).
- [45] R.U. Abbasi, M.M.F. Saba, J.W. Belz, P.R. Krehbiel, W. Rison, N.T. Kieu, D.R.R. da Silva, M.A. Stanley, D. Rodeheffer, J. Remington et al., *Geophysical Research Letters* **50**, e2023GL102958 (2023).
- [46] R.U. Abbasi, N.T. Kieu, P.R. Krehbiel, J.W. Belz, M.M.F. Saba, W. Rison, M.A. Stanley, D. Rodeheffer, D. Mazzucco, T. Knight et al., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **129**, e2024JD041260 (2024).
- [47] M.M.F. Saba, M.A.S. Ferro, E.T. Cuadros, D.M. Custódio, A. Nag, C. Schumann, V. Cooray, A.R. Paiva, P.B. Lauria, D.S.F. Medeiros et al., *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **124**, 10564 (2019).
- [48] C.J. Andrews, M.A. Cooper, M. Darveniza e D. Mackeras, *Lightning injuries – Electrical, Medical, and Legal Aspects* (CRC Press, Florida, 1992).
- [49] ABRACOPEL, *Estatísticas (2023)*, disponível em: <http://doi.org/10.29327/5388685>.
- [50] R. Thottappillil, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **44**, 203 (2002).
- [51] INSURANCE INFORMATION INSTITUTE, *Lightning Caused \$1.2 Billion in US Homeowners Claim Payouts in 2023; Severity Trends Upward for the Year* (2024), disponível em: <https://www.iii.org/press-release/lightning-caused-12-billion-in-us-homeowners-claim-payouts-in-2023-severity-trends-upward-for-the-year-061824>.
- [52] A.R. Panicali e J.C.O. Silva, em: *Proceedings of International Conference on Grounding 2020/21 and 9th Lightning Physics and Effects* (Belo Horizonte, 2021).
- [53] R.B. Anderson, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* **20**, 105 (2001).
- [54] M.A. Cooper e R. Holle, *Reducing Lightning Injuries Worldwide* (Springer Natural Hazards, New York, 2019).
- [55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5419-1:2015: Proteção Contra Descargas Atmosféricas: Parte 1: Princípios Gerais* (Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2015).
- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5419-2:2015: Proteção Contra Descargas Atmosféricas: Parte 2: Gerenciamento de Risco* (Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2015).
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5419-3:2015: Proteção Contra Descargas Atmosféricas: Parte 3: Danos Físicos a Estruturas e Perigos à Vida* (Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2015).
- [58] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5419-4:2015: Proteção Contra Descargas Atmosféricas: Parte 4: Sistemas Elétricos e Eletrônicos Internos na Estrutura* (Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2015).
- [59] R.B. Anderson e A.J. Eriksson, *CIGRE Electra* **69**, 65 (1980).