

Atividade Remota (Video 01)

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Atividade remota sobre o *Vídeo 1 - Mistérios da Ciência: O Poder dos Raios (Dublado) - Documentário*.

Sinopse: Os raios são mais rápidos que uma bala e seis vezes mais quentes que a superfície do sol. Eles duram menos de uma fração de segundo e podem transformar areia em vidro. Diariamente cerca de oito milhões de raios atingem a Terra. Embora este fenômeno natural seja um dos mais observados, ele ainda está envolto em mistérios. Neste episódio, os telespectadores irão acompanhar a incrível jornada de um raio desde o espaço até o interior do corpo humano. Para isso, iremos à Darwin, na Austrália, cidade onde acontecem algumas das tempestades com relâmpagos mais violentas da Terra. No centro de uma monstruosa nuvem de tempestade observaremos as forças misteriosas que provocam um raio. Novas descobertas dramáticas e experiências chocantes revelam que os raios são um dos fenômenos mais estranhos, destrutivos e importantes do planeta.

Sugestão do Professor: levar ao menos uma dúvida para discussão em sala de aula.

2 Dúvidas e Questionamentos

- Sabe-se que os relâmpagos e outros tipos de raios são fenômenos de origem elétrica. Sabe-se que o plasma é (a grosso modo) um gás ionizado superaquecido pela corrente elétrica. Questionamento: além da corrente elétrica convencional, quantos tipos de corrente elétrica existem? É pertinente pois *sprites*, *blue jets* e *elves*, segundo o vídeo, são formados por plasma que, por ser um gás ionizado, se caracteriza como uma corrente elétrica não convencional se posto em movimento.

- Segundo o vídeo, os raios bola ou esféricos são bolas de plasma, contudo estas bolas de plasma desaparecem em questão de meio segundo, Porém, os raios bola costumam durar minutos e ainda se movimentam de forma errática. No vídeo, há uma tentativa de explicar com a adição de esferas de poeira junto ao plasma, fazendo-o durar mais. Porém, esta teoria é incompleta. Questionamento: segundo o estado da arte, qual o real motivo dos raios bola durarem mais que o previsto pelo vídeo?
- Existe explicação para esta bola de plasma aparecer do nada?
- Existe algum mecanismo que permita que o raio bola atravesse superfícies rígidas, ou é meio fantasioso o relato do documentário?
- No início do vídeo, há a apresentação de um caso de vítima de descarga atmosférica. Também há uma referência estatística ao número de sobreviventes (cerca de 90%). Não seria um caso de uma releitura dos casos antes de fazer a estatística? Necessitaria de mais informação antes de dizer tal coisa, pois assim parece a um leigo que o raio nem é tão grave assim (e de fato, é mais grave do que imaginamos).
- Ao explicar como uma nuvem adquire carga elétrica, o script do documentário utiliza de forma simplificada o modelo de carregamento por fricção e, logo em seguida, diz que o ar não é um bom condutor de eletricidade. O que acontece com a rigidez dielétrica do ar em condições de tempestade? para E_{max} sair de $3MV/m$ e parar em $300kV/m$, algo tem de acontecer, certo? Ou será que existe algo na dinâmica do raio que permita ao mesmo driblar a rigidez dielétrica do ar e escoar corrente por um caminho mais fácil?

Atividade Remota (Video 02)

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Atividade remota sobre o *Vídeo 2 - Planeta Feroz Raio Dublado Documentário Discovery*.

Sinopse: Raio é uma descarga elétrica de grande intensidade que ocorre na atmosfera, entre regiões eletricamente carregadas, e pode dar-se tanto no interior de uma nuvem, como entre nuvens ou entre nuvem e terra. O raio vem sempre acompanhado do relâmpago (intensa emissão de radiação eletromagnética também visível), e do trovão (som estrondoso), além de outros fenômenos associados. Embora sejam mais frequentes descargas dentro das nuvens (as intra-nuvens) e entre duas nuvens (as inter-nuvens), descargas entre nuvens e a terra são de maior interesse prático para o homem. A maior parte ocorre na zona tropical do planeta e principalmente sobre as terras emersas, associados a fenômenos convectivos, dos quais, quando é intensa a atividade elétrica, resultam as trovoadas.

Sugestão do Professor: levar ao menos uma dúvida para discussão em sala de aula.

2 Dúvidas e Questionamentos

- Cada raio tem centímetros de espessura e quilômetros de extensão: como um evento geometricamente pequeno pode causar tanto estrago?
- Nuvens de Bigorna \Rightarrow Cumulo nimbus (Coerente)
- A cada minuto tem 2000 tempestades ocorrendo no mundo: verdade ou mito? Se cada tempestade tem uma média de 2 a 4 raios por minuto, seriam 4000 ou 8000 raios por minuto, por isto a pergunta - não tenho esta estatística.

- “*Um raio mata 1 em cada 6 pessoas que atinge*” \Rightarrow esta estatística é bem mais medonha do que a taxa de sobrevivência do Video 01 (90%) e, não argumentando sobre a precisão da estatística, é bem mais impactante e realista.
- Um raio não cai exatamente do nada, certo? o video causa esta impressão.....
- O video diz que a nuvem fica eletrificada com cargas negativas embaixo e positivas em cima. O modelo de tripolo é o que descreve de forma mais precisa o que acontece dentro da nuvem?
- a descrição da descarga atmosférica negativa descendente está coerente com o que vimos em sala de aula.
- O vídeo traz uma descrição do *dart leader*, mas não o trata por este nome.
- “*Vários cientistas que tentaram replicar o experimento da pipa de Franklin morreram*” - na verdade, o que eles não entenderam é como foi feito o experimento.
- “*Sequelas em Sobreviventes*” \Rightarrow fato impactante do vídeo, realmente não compreendemos muito bem as implicações de ser vítima não fatal de raio. Sobrevivo, mas como? eis a questão.
- O vídeo fala de pára raios, interessante saber que haste de Franklin ainda faz sucesso.
- Mais tecnologia significa maior vulnerabilidade aos raios \Rightarrow tendo a concordar com este ponto de vista.
- Eventos Luminosos Transientes \Rightarrow uma pincelada é dada no video

Atividade Remota (Video 03)

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Atividade remota sobre o *Vídeo 3 - Raios de Fogo* Documentário *FULL HD*.

Sugestão do Professor: levar ao menos uma dúvida para discussão em sala de aula.

2 Dúvidas e Questionamentos

- Este documentário é bem mais sério do que os anteriores. Enquanto nos 2 primeiros vídeos havia sensacionalismo, neste a necessidade de causar polêmica é bem reduzida.
- Um erro, talvez de tradução: elétrons positivos e negativos. O documentário diz que há a formação de elétrons positivos dentro da nuvem e, por serem mais leves, estes são transportados para a parte de cima da nuvem. Uma outra ideia: por serem em menor número, o campo elétrico gerado pelas cargas negativas é suficiente para empurrá-las para cima, certo?
- Uma nuvem por si não é capaz de acumular tanta energia e produzir uma centelha: questionamento interessante e pertinente.
- primeiro vídeo a falar do *Runaway Breakdown*, inclusive é bem extenso a descrição do fenômeno a partir da detecção de raios *gamma* \Rightarrow talvez a explicação para a aparente falta de capacidade de gerar raios das nuvens.
- Eventos Luminosos Transientes têm potência o bastante para interferir nas comunicações e equipamentos de navegação \Rightarrow por serem eventos muito rápidos, devem produzir uma grande gama de radiação de alta frequência, interferindo nas comunicações. Realidade linda porém infeliz.

- Todos os vídeos falam de vítimas \Rightarrow embora seja pertinente, não é de nosso escopo estudar sequelas, portanto, não tecerei nenhum comentário sobre as vítimas de raios.

Atividade Remota (Video 04)

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Atividade remota sobre o *Vídeo 4 - Vídeo do Youtube*.

Sugestão do Professor: levar ao menos uma dúvida para discussão em sala de aula.

2 Dúvidas e Questionamentos

- O vídeo se encontra indisponível na data de acesso (14/05/2023). Não há como cumprir a tarefa nesta data.

Aula 1 - Engenharia das Descargas Atmosféricas

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- **Ementa do Curso** ⇒ aprender de A a Z sobre o fenômeno das Descargas atmosféricas.

Roadmap ⇒ Estudar os fenômenos na ionosfera, estudar os fenômenos que ocorrem dentro da nuvem, estudar os fenômenos e processos que acontecem entre a nuvem e o solo, estudar os fenômenos que acontecem quando a descarga chega no solo.

Palavras-Chave ⇒ Fenômenos da Ionosfera, Processos que dão origem a relâmpagos, Circuito Elétrico Global e Local, Stepped Leader, Dart Leader, Return Stroke, Parâmetros de Relâmpago, Equipamentos de Monitoramento de Tempestades, Impactos no Sistema Elétrico, Normas Regulamentadoras, Gestão de Risco contra raios.

- **Importância do Estudo** ⇒ Descargas atmosféricas são fenômenos com impactos econômicos, ambientais e sociais. Alguns fatos rápidos apresentados durante a aula:

Mortes por Raios ⇒ Os raios podem ser extremamente perigosos e até mesmo mortais para seres humanos. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que cerca de 2.000 pessoas são mortas por raios a cada ano em todo o mundo. No entanto, este número pode ser subestimado, uma vez que muitas mortes causadas por raios são erroneamente atribuídas a outras causas. Nota: a maioria das mortes causadas por raios (Cerca de 80%) seriam evitadas com conhecimentos básicos sobre o fenômeno das descargas atmosféricas.

Incêndios Causados Por Raios ⇒ Os raios são uma das principais causas de incêndios naturais em todo o mundo. Quando um raio atinge a superfície terrestre, ele pode aquecer instantaneamente o ar e causar uma explosão, que pode incendiar a vegetação circundante.

Esses incêndios causados por raios são conhecidos como incêndios de origem elétrica. Os incêndios de origem elétrica podem se espalhar rapidamente, especialmente em áreas com clima seco e ventoso, e podem ser muito difíceis de controlar. Eles também podem ser extremamente perigosos, ameaçando vidas humanas, animais e propriedades.

Impactos Econômicos ⇒ As descargas atmosféricas podem ter impactos significativos na economia, especialmente nos setores de energia, infraestrutura e agricultura. Aqui estão alguns exemplos:

- ***Setor de energia:*** As descargas atmosféricas podem causar interrupções no fornecimento de energia elétrica, danificando linhas de transmissão, transformadores e outros equipamentos. Isso pode levar a cortes de energia prolongados e significativos prejuízos financeiros para as empresas de energia e para os consumidores.
- ***Infraestrutura:*** Descargas atmosféricas também podem danificar edifícios, pontes, torres de comunicação e outras infraestruturas críticas. Os custos de reparo e substituição dessas estruturas podem ser altos e afetar a economia local.
- ***Agricultura:*** Descargas atmosféricas podem danificar plantações e colheitas, afetando a produção agrícola e os preços dos alimentos. Além disso, os incêndios causados por raios podem destruir terras agrícolas e pastagens, causando danos econômicos significativos.

Além disso, os custos de seguro podem aumentar em áreas de alto risco de raios, como resultado do aumento dos custos de reparação e substituição de equipamentos danificados. As empresas também podem ser afetadas pelos custos de paralisação das operações e pela perda de produtividade dos funcionários durante interrupções causadas por descargas atmosféricas. Portanto, é importante tomar medidas preventivas para minimizar os impactos econômicos das descargas atmosféricas.

- ***Curiosidades e Fatos Rápidos*** ⇒ alguns fatos rápidos discutidos em sala e aula e outros retirados da internet.

Maneiras pelas quais um raio pode matar ⇒ Um raio pode ser letal de várias maneiras. Aqui estão algumas maneiras pelas quais um raio pode matar:

- ***Parada cardíaca:*** A descarga elétrica do raio pode afetar o sistema cardiovascular do corpo, levando a uma parada cardíaca. Isso ocorre quando o coração para de bater e é responsável pela maioria das mortes por raios.

- ***Queimaduras:*** O raio pode causar queimaduras na pele e nos órgãos internos, o que pode ser fatal, dependendo da gravidade da queimadura.
- ***Lesões cerebrais:*** O raio pode afetar o sistema nervoso central, incluindo o cérebro, causando lesões cerebrais graves que podem ser fatais.
- ***Danos aos órgãos internos:*** A descarga elétrica do raio pode afetar os órgãos internos, como o fígado, os rins e os pulmões, causando danos graves que podem ser fatais.
- ***Explosão do corpo:*** Em casos raros, o raio pode causar uma explosão do corpo devido à rápida expansão do ar dentro do corpo, o que pode ser fatal.

Mecanismos Decorrentes das Descargas Atmosféricas que levam à morte ⇒ Os mecanismos mais comuns que levam à morte humana e animal são:

- ***“Ground Current”:*** A corrente de solo é um fenômeno elétrico que pode ocorrer durante uma descarga atmosférica. Durante uma tempestade com raios, a descarga elétrica do raio que atinge o solo cria uma corrente elétrica que se propaga em média de forma radial com centro no ponto de impacto. Isso ocorre porque o solo é um condutor elétrico, embora com resistência elétrica significativa. A corrente de solo é uma corrente elétrica de baixa frequência e alta amplitude que se propaga pelo solo a partir do ponto de contato do raio com o solo. A corrente de solo é particularmente perigosa pois pode causar uma diferença de potencial (tensão de passo) entre dois pontos no solo, resultando em uma corrente elétrica que afeta as pessoas, animais e equipamentos próximos. A corrente de solo causa um risco de choque elétrico, especialmente em áreas onde há muita umidade ou com solo úmido, o que torna o solo um melhor condutor elétrico. A corrente de solo é responsável por cerca de 50 a 55% das mortes causadas por raios.
- ***“Side Flash”:*** Side flash é um fenômeno perigoso que pode ocorrer durante uma descarga atmosférica. Isso acontece quando um raio atinge um objeto alto, como uma árvore, poste, torre ou prédio, e a corrente elétrica do raio segue o caminho do objeto em direção ao solo. Se houver alguém próximo ao objeto, a corrente elétrica pode saltar do objeto para a pessoa, causando uma descarga elétrica perigosa. O side flash pode ser perigoso, pois a corrente elétrica pode atingir uma pessoa sem que ela esteja diretamente no caminho da descarga elétrica do raio. Por exemplo, se uma pessoa estiver embaixo de uma árvore durante uma tempestade com raios e um raio atingir a árvore, a corrente elétrica pode saltar da árvore para a pessoa, mesmo que ela não esteja tocando a árvore diretamente. O Side Flash é responsável por 30 a 35% das mortes causadas por raios.

- **“Upward Leader”:** Durante uma tempestade, a carga elétrica se acumula na nuvem e na superfície terrestre, criando um campo elétrico intenso entre elas. Esse campo elétrico pode ionizar o ar e formar uma espécie de caminho condutor para a descarga elétrica. O processo de formação da descarga elétrica começa com o aparecimento de pequenos canais condutores de ar, chamados de líderes ascendentes, que se propagam a partir de objetos pontiagudos no solo, como árvores, antenas, edifícios, folhas de capim e até mesmo as pessoas. Esses líderes ascendentes contêm cargas elétricas que se movem em direção à nuvem, criando um caminho condutor para a descarga elétrica. Os líderes ascendentes são responsáveis por 10 a 15% das mortes causadas por raios.
- **Incidência Direta:** As mortes por incidência direta de raios ocorrem quando uma pessoa é atingida diretamente por um raio. Esse tipo de acidente é raro, mas pode ser fatal. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que cerca de 3 a 5% das pessoas atingidas por raios morrem devido à incidência direta. No entanto, é importante lembrar que muitas mortes causadas por raios são atribuídas a outras causas, já que os sintomas podem ser semelhantes aos de outras condições médicas. Os efeitos da incidência direta de raios no corpo humano podem variar, mas geralmente incluem queimaduras graves, lesões musculares e danos aos órgãos internos, como coração e pulmões. O raio pode causar parada cardíaca, parada respiratória e outras condições que podem levar à morte.
- **“Contact Voltage”:** A tensão de contato é uma forma de risco elétrico que ocorre quando uma pessoa toca diretamente em um objeto eletricamente energizado. Essa forma de tensão elétrica pode ser fatal em determinadas circunstâncias, tais como eletrização por descarga atmosférica. A tensão de contato pode ser causada por uma variedade de situações, como tocar em um fio elétrico exposto, em um aparelho elétrico com defeito ou em uma superfície metálica eletricamente carregada, entre outras. A intensidade da tensão de contato depende da voltagem da fonte de energia elétrica, da resistência elétrica do corpo humano e da duração do contato. A tensão de contato é responsável por 3 a 5% das mortes causadas por raios.

Guia Rápido de Sobrevivência ⇒ Existem algumas medidas que podem ser tomadas para aumentar as chances de sobrevivência durante uma tempestade com raios:

- **Procure abrigo em um local seguro:** A melhor maneira de evitar ser atingido por um raio é encontrar um local seguro. Evite prédios sem proteção contra descargas atmosféricas e qualquer estrutura alta ou metálica, como torres de energia eólica. Também evite árvores

e arbustos.

- ***Evite áreas abertas:*** Se você estiver ao ar livre, evite áreas abertas e expostas, como campos abertos, praias e campos de golfe. Procure abrigo em uma área protegida, como um carro ou uma caverna.
- ***Agache-se e cubra a cabeça:*** Se não houver abrigo disponível, agache-se e cubra a cabeça com as mãos. Mantenha os pés juntos e não toque em superfícies metálicas.
- ***Mantenha-se afastado de objetos condutores:*** Durante uma tempestade com raios, evite contato com objetos condutores de eletricidade, como cercas, linhas de energia elétrica, encanamentos de metal e equipamentos elétricos.
- ***Espere a tempestade passar:*** Espere pelo menos 30 minutos depois de ouvir o último trovão antes de sair do abrigo. Lembre-se de que as tempestades podem se mover rapidamente e é importante esperar até que a tempestade esteja bem distante antes de sair de um local seguro.

A melhor maneira de sobreviver a uma descarga atmosférica é evitar situações de risco, como áreas abertas e objetos condutores, e procurar abrigo em um prédio seguro ou em um carro. Se você estiver preso ao ar livre, agache-se e cubra a cabeça com as mãos, mantendo os pés juntos e evitando superfícies metálicas.

2 Temas impactantes, dúvidas e questionamentos

- Uma constatação triste é a de que muitas mortes por raios seriam evitadas se conhecimentos básicos sobre o fenômeno da eletricidade atmosférica fossem difundidos. Em uma situação ideal, 80% das mortes seriam evitadas seguindo procedimentos simples de proteção. Mas o que esperar de um povo cujo Q.I médio é 86? No Brasil, por mais que se difunda, por mais procedimentos que se façam, ainda existe o poder discricionário do matuto sabe-tudo que não manja nada. Realidade infeliz.
- À primeira vista, os raios são fenômenos habituais e até simples. É tudo corrente elétrica certo? sou engenheiro e sei do que se trata.... Só que não: um raio é um processo complexo que vai desde a ionosfera até o chão e não existe nada que possa ser subentendido ou menosprezado.
- Porque (quase) tudo na natureza que é bonito também é perigoso? Um *blue jet* deve ser lindo, um raio é magnífico, porém altamente perigosos.

3 Mitos e Verdades Sobre Descargas Atmosféricas

- ***Raios nunca atingem o mesmo lugar duas vezes.*** \Rightarrow *Mito:* Na verdade, raios podem atingir o mesmo lugar várias vezes, especialmente se o local é alto e condutivo, como uma torre de transmissão ou um arranha-céu.
- ***Áreas montanhosas são mais seguras durante tempestades com raios*** \Rightarrow *Mito:* Áreas montanhosas e picos de montanhas são na verdade mais perigosos durante tempestades com raios, pois a altitude pode aumentar a possibilidade de uma pessoa ser atingida.
- ***É seguro ficar dentro de um carro durante uma tempestade com raios.*** \Rightarrow *Verdade:* Ficar dentro de um carro é uma das opções mais seguras durante uma tempestade com raios, pois o carro age como uma gaiola de Faraday, protegendo as pessoas dentro dele.
- ***É seguro se abrigar embaixo de uma árvore durante uma tempestade com raios.*** \Rightarrow *Mito:* Na verdade, é perigoso se abrigar embaixo de uma árvore durante uma tempestade com raios, pois os raios tendem a atingir as árvores mais altas, e a eletricidade pode passar para uma pessoa que esteja embaixo dela.
- ***O raio só pode atingir pessoas que estão fora durante uma tempestade*** \Rightarrow *Mito:* Infelizmente, isso não é verdade. Pessoas dentro de casa, prédios e outros locais fechados ainda podem ser atingidas por raios, especialmente se estiverem em contato com objetos condutores de eletricidade, como telefones com fio, encanamentos de metal e equipamentos eletrônicos.
- ***É seguro tomar banho ou usar água corrente durante uma tempestade com raios.*** \Rightarrow *Mito:* Não é seguro tomar banho ou usar água corrente durante uma tempestade com raios, pois a eletricidade pode passar através da água e chegar até uma pessoa.
- ***O arco-íris após uma tempestade com raios é um sinal de que a tempestade acabou e é seguro sair*** \Rightarrow *Mito:* Embora o arco-íris possa ser um belo espetáculo após uma tempestade com raios, isso não significa que a tempestade acabou e que é seguro sair. As descargas atmosféricas ainda podem ocorrer mesmo após o fim da chuva.
- ***Um para-raios é 100% eficaz em evitar que raios atinjam uma estrutura*** \Rightarrow *Mito:* Um para-raios pode reduzir significativamente a probabilidade de um raio atingir uma estrutura, mas não é uma garantia absoluta. É importante que os para-raios sejam instalados corretamente e mantenham um bom estado de conservação.

- ***A distância do trovão pode ser calculada contando o número de segundos entre o relâmpago e o trovão*** ⇒ *Verdade:* Contar o número de segundos entre o relâmpago e o trovão pode dar uma estimativa grosseira da distância do trovão, mas não é uma medida precisa. A distância real pode variar dependendo de muitos fatores, como a direção do trovão e a temperatura e umidade do ar.
- ***A posição do corpo durante uma descarga atmosférica pode afetar a gravidade da lesão*** ⇒ *Mito:* A posição do corpo não afeta a gravidade da lesão durante uma descarga atmosférica. Qualquer parte do corpo que esteja em contato com um objeto condutivo de eletricidade pode ser afetada pela eletricidade.
- ***É seguro filmar ou fotografar tempestades com raios ao ar livre*** ⇒ *Mito:* É altamente desaconselhável filmar ou fotografar tempestades com raios ao ar livre, pois isso aumenta significativamente o risco de ser atingido por um raio. É melhor observar a tempestade de dentro de casa ou de um local seguro.
- ***Se você tocar uma vítima de incidência de descarga atmosférica, será eletrocutado*** ⇒ *Mito:* o corpo humano não armazena eletricidade.
- ***Você pode sentir uma descarga atmosférica antes de ser atingido*** ⇒ *Mito:* Algumas pessoas relatam sentir uma sensação de formigamento ou choque elétrico antes de serem atingidas por um raio, mas isso não é comum e não é uma garantia de que você será atingido. É importante procurar abrigo imediatamente e evitar ficar em áreas abertas durante tempestades com raios.

4 Normas

4.1 Norma ABNT NBR 5419

A ABNT NBR 5419 é uma norma brasileira que estabelece as diretrizes e requisitos para o projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). A norma aborda temas como a análise de risco, dimensionamento dos componentes do SPDA e procedimentos de inspeção e manutenção. O objetivo da ABNT NBR 5419 é garantir a segurança de pessoas e patrimônio em caso de descargas atmosféricas, prevenindo danos e acidentes. A norma é atualizada periodicamente para se adequar a novas tecnologias e práticas de segurança. A norma ABNT NBR 5419 é dividida em 5 partes:

- **Parte 1 - Princípios gerais** ⇒ a parte 1 da norma ABNT NBR 5419 estabelece os requisitos gerais para o projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). Esta parte também fornece orientações para a avaliação de riscos envolvidos e a seleção de medidas de proteção adequadas, considerando as características do local, a função da estrutura e as consequências de uma descarga atmosférica. Além disso, são abordados temas como a classificação das estruturas e o dimensionamento do sistema de proteção, considerando os parâmetros elétricos, geométricos e ambientais. Esta parte da norma é essencial para garantir a eficácia e segurança dos SPDA instalados.
- **Parte 2 - Gerenciamento de Risco** ⇒ a Parte 2 da ABNT NBR 5419 fornece informações específicas para a avaliação do risco devido aos efeitos indiretos de raios, como sobretensões transitórias e correntes de terra, em estruturas e sistemas elétricos, eletrônicos e de telecomunicações. A norma apresenta os requisitos para o projeto, instalação e manutenção de medidas de proteção contra sobretensões transitórias e correntes de terra induzidas por raios em estruturas e sistemas elétricos, eletrônicos e de telecomunicações. A Parte 2 da norma inclui também informações sobre a seleção e instalação de dispositivos de proteção contra sobretensões transitórias, a medição da resistência de terra, a avaliação da compatibilidade eletromagnética, a análise de risco, a classificação dos locais em termos de risco e as especificações para o projeto e instalação de sistemas de aterramento.
- **Parte 3 - Danos físicos a estruturas e perigos à vida animal** ⇒ a parte 3 da ABNT NBR 5419, intitulada "Danos físicos a estruturas e perigos à vida animal", estabelece diretrizes para avaliar os efeitos das descargas atmosféricas em estruturas e na vida animal, incluindo edificações, linhas de transmissão, antenas e torres de telecomunicação, e animais em pastos, estábulos ou cercados. A norma descreve procedimentos para avaliar a probabilidade de danos e as consequências de uma descarga atmosférica, incluindo o risco de incêndios e explosões, e a necessidade de medidas de proteção para minimizar os riscos. A parte 3 da norma também apresenta orientações para a análise do risco de danos a equipamentos eletrônicos e de telecomunicações e para a avaliação dos efeitos da eletricidade de contato e da indução eletromagnética em pessoas e animais próximos a estruturas afetadas por descargas atmosféricas.
- **Parte 4 - Sistemas elétricos e eletrônicos internos** ⇒ a parte 4 da NBR 5419 é intitulada "Sistemas Elétricos e Eletrônicos Internos na Estrutura", e estabelece as medidas de proteção contra surtos para os sistemas elétricos e eletrônicos internos em uma estrutura, tais como equipamentos de telecomunicações, sistemas de automação, entre outros. A norma define requisitos

para o projeto, instalação e manutenção desses sistemas, incluindo a seleção e instalação de dispositivos de proteção contra surtos. Além disso, a parte 4 da NBR 5419 também aborda a necessidade de um sistema de aterramento eficiente para garantir a eficácia da proteção contra surtos. Essa parte da norma é importante para garantir a segurança e a integridade dos sistemas elétricos e eletrônicos internos de uma estrutura, evitando danos e perda de funcionamento de equipamentos sensíveis a sobretensões.

- **Parte 5 - Outros serviços e estruturas** ⇒ a parte 5 da ABNT NBR 5419 estabelece as diretrizes para o sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Essa parte especifica os requisitos para o projeto, instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em estruturas que contenham equipamentos eletroeletrônicos sensíveis, como centrais de telecomunicações, sistemas de informática e outros similares. A parte 5 da NBR 5419 traz recomendações para a proteção de equipamentos eletroeletrônicos sensíveis contra sobretensões transitórias induzidas por descargas atmosféricas em suas linhas de alimentação de energia, de sinal e de dados. Ela aborda aspectos como a seleção e instalação de dispositivos de proteção contra sobretensões, a coordenação desses dispositivos, as características elétricas dos equipamentos a serem protegidos e os procedimentos de inspeção e manutenção desses sistemas de proteção.

4.2 Norma ABNT NBR 5410

A Norma Brasileira ABNT NBR 5410 é referente às instalações elétricas de baixa tensão em edificações, e tem como objetivo estabelecer as condições a que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens. Ela define as características dos materiais e equipamentos a serem utilizados, as condições a que devem satisfazer as instalações elétricas, as disposições relativas à proteção e ao funcionamento da instalação, entre outras diretrizes importantes para a segurança e bom funcionamento das instalações elétricas.

A NBR 5410 é dividida em partes e seções, sendo elas:

- **Parte 1 - Objetivo, campo de aplicação e definições gerais** ⇒ a parte 1 da NBR 5410 estabelece o objetivo, o campo de aplicação e as definições gerais para a norma. Seu objetivo é definir as medidas necessárias para garantir a segurança das pessoas e dos animais, o funcionamento adequado dos equipamentos e a conservação dos bens em instalações elétricas de baixa tensão, abrangendo as fases de projeto, execução, inspeção, manutenção e reforma. O campo

de aplicação da norma inclui instalações elétricas de baixa tensão, com tensões de até 1.000V em corrente alternada (CA) ou 1.500V em corrente contínua (CC), em edificações residenciais, comerciais, públicas, industriais e rurais, bem como em áreas externas, como ruas, praças e estradas. As definições gerais estabelecem termos e conceitos que serão utilizados em todas as partes da norma, visando garantir uma linguagem uniforme e adequada. Alguns exemplos de definições abordadas na parte 1 incluem: aparelho de proteção contra surtos (DPS), circuito elétrico, corrente nominal, dispositivo de proteção contra sobrecorrente, entre outros.

- **Parte 2 - Condições gerais de projeto** ⇒ a parte 2 da NBR 5410 estabelece as condições gerais de projeto que devem ser consideradas para garantir a segurança das pessoas, dos animais e dos bens materiais contra os efeitos térmicos e não térmicos da eletricidade. Essa parte da norma estabelece os princípios básicos a serem seguidos em todas as instalações elétricas de baixa tensão e define os parâmetros de projeto, tais como:

- Seleção dos equipamentos elétricos de acordo com sua adequação ao uso pretendido e às condições ambientais e de instalação;
- Critérios para a seleção das características nominais dos componentes elétricos, tais como corrente nominal, tensão nominal, corrente de curto-circuito suportável, seletividade e coordenação entre dispositivos de proteção;
- Dimensionamento dos condutores elétricos e cálculo da queda de tensão;
- Proteção contra sobrecorrentes, curto-circuito, sobretensão e contato direto;
- Disposições para aterramento e equipotencialização;
- Isolação e proteção contra choques elétricos;
- Proteção contra os efeitos do calor e fogo;
- Identificação e sinalização das instalações elétricas.

Essa parte da norma também apresenta exemplos de aplicação dos critérios estabelecidos, para orientar o projetista na correta aplicação dos conceitos e parâmetros definidos.

- **Parte 3 - Proteção contra choques elétricos** ⇒ a parte 3 da NBR 5410 aborda os aspectos das instalações elétricas em relação às proteções contra choques elétricos. Ela fornece os requisitos de proteção para as pessoas, animais e bens, bem como para o próprio sistema elétrico. Alguns dos tópicos abordados nesta parte incluem:

- Proteção contra choques elétricos diretos e indiretos;

- Medidas de proteção para reduzir a probabilidade de falhas de isolamento;
- Seleção de dispositivos de proteção contra sobrecorrente;
- Proteção contra sobretensões;
- Proteção contra sobrecargas e curto-circuitos;
- Coordenação de isolamento;
- Verificação da eficácia da proteção.

Essa parte da norma é essencial para garantir a segurança das pessoas e a proteção dos equipamentos elétricos.

- ***Parte 4 - Proteção contra sobretensões e perturbações eletromagnéticas*** ⇒ a parte 4 da NBR 5410 estabelece os requisitos para a seleção e instalação de dispositivos de proteção contra sobretensões transitórias, também conhecidos como DPS (Dispositivos de Proteção contra Surto).

Essa parte da norma apresenta orientações sobre as características e especificações técnicas que os DPS devem atender, bem como os critérios para sua seleção e instalação, de forma a garantir a proteção adequada dos equipamentos elétricos contra surtos de tensão decorrentes de descargas atmosféricas, manobras de rede e outras causas.

Entre os tópicos abordados na Parte 4 da NBR 5410, destacam-se:

- Definições e classificação dos DPS;
- Características elétricas e mecânicas dos DPS;
- Critérios para seleção dos DPS, com base nas
 - características do sistema elétrico e nos requisitos de proteção;
- Requisitos para a instalação dos DPS, incluindo sua localização, conexão e equipotencialização;
- Verificação da eficácia dos DPS instalados, por meio de ensaios e testes.

O cumprimento dos requisitos da Parte 4 da NBR 5410 é fundamental para garantir a proteção dos equipamentos elétricos e a segurança das pessoas que trabalham com eletricidade.

- ***Parte 5 - Instalações elétricas em locais com condições especiais*** ⇒ a parte 5 da NBR 5410 estabelece requisitos específicos para instalações elétricas em locais com condições especiais, tais como:

- ***Locais com presença de poeira:*** a norma estabelece requisitos para a instalação de equipamentos e dispositivos elétricos em locais com presença de poeira combustível, de forma a prevenir a ocorrência de explosões ou incêndios.
 - ***Locais com presença de umidade:*** a norma estabelece requisitos para a instalação de equipamentos e dispositivos elétricos em locais úmidos ou com possibilidade de inundação, de forma a garantir a segurança das pessoas e a integridade dos equipamentos.
 - ***Locais com presença de gases ou vapores explosivos:*** a norma estabelece requisitos para a instalação de equipamentos e dispositivos elétricos em locais com presença de gases ou vapores inflamáveis, de forma a prevenir a ocorrência de explosões ou incêndios.
 - ***Locais com presença de líquidos inflamáveis:*** a norma estabelece requisitos para a instalação de equipamentos e dispositivos elétricos em locais com presença de líquidos inflamáveis, de forma a prevenir a ocorrência de incêndios.
 - ***Locais com presença de animais:*** a norma estabelece requisitos para a instalação de equipamentos e dispositivos elétricos em locais com presença de animais, de forma a prevenir a ocorrência de acidentes elétricos.
 - ***Locais com presença de pessoas com necessidades especiais:*** a norma estabelece requisitos para a instalação de equipamentos e dispositivos elétricos em locais com presença de pessoas com necessidades especiais, de forma a garantir a acessibilidade e a segurança dessas pessoas.
- ***Parte 6 - Verificação*** ⇒ a parte 6 da NBR 5410 estabelece os procedimentos de verificação das instalações elétricas de baixa tensão, incluindo as inspeções visuais e os ensaios elétricos e funcionais.

Esta parte da norma apresenta as diretrizes para a realização de inspeções visuais nas instalações elétricas, que devem ser realizadas antes da energização e após a conclusão das obras. Além disso, também são descritos os procedimentos de ensaios elétricos e funcionais que devem ser realizados em cada fase do processo de instalação elétrica.

Os ensaios elétricos incluem medições de resistência de circuito de terra, verificação da continuidade dos condutores de proteção, testes de isolamento, entre outros. Já os ensaios funcionais têm como objetivo verificar o funcionamento correto dos dispositivos de proteção, como disjuntores, fusíveis, DRs, entre outros.

A Parte 6 da NBR 5410 também apresenta os critérios para aceitação e rejeição das instalações elétricas, com base nos resultados das inspeções visuais e dos ensaios elétricos e funcionais. Por

fim, a norma estabelece as responsabilidades dos diferentes agentes envolvidos na verificação das instalações elétricas, como projetistas, instaladores e usuários.

- **Parte 7 - Disposições para segurança** ⇒ a parte 7 da NBR5410 aborda as disposições para a segurança das pessoas, animais e bens materiais envolvidos em instalações elétricas. Essas disposições incluem medidas de proteção contra choques elétricos, isolamento elétrico, proteção contra sobretensões e sobrecorrentes, proteção contra incêndios e explosões, entre outras.

A Parte 7 estabelece os critérios de segurança a serem observados em todas as etapas de projeto, construção, instalação, operação, manutenção e inspeção de instalações elétricas. Ela também fornece orientações sobre a seleção de dispositivos de proteção, equipamentos de medição e outros dispositivos de segurança, bem como sobre a identificação de riscos e a adoção de medidas preventivas.

A Parte 7 da NBR5410 é fundamental para garantir a segurança das pessoas e dos bens envolvidos em instalações elétricas e deve ser seguida rigorosamente por todos os profissionais envolvidos em atividades relacionadas à eletricidade.

- **Seções complementares** ⇒ Conjunto de normas e documentos técnicos que complementam a NBR 5410 e são referenciados ao longo do texto da norma.

A NBR 5410 cita a NBR 5419, que é a norma que estabelece os requisitos para o sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) em edificações e estruturas. A NBR 5410, por sua vez, estabelece as normas técnicas para instalações elétricas de baixa tensão em edificações. É comum que ambas as normas sejam utilizadas em conjunto para garantir a segurança e o bom funcionamento das instalações elétricas em edificações.

4.3 Norma Regulamentadora NR-10

A NR-10 é uma Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego (atualmente, Secretaria Especial de Previdência e Trabalho do Ministério da Economia) que estabelece as condições mínimas para garantir a segurança e saúde dos trabalhadores que atuam em instalações e serviços em eletricidade.

A norma tem como objetivo estabelecer medidas de controle e prevenção de acidentes elétricos, através de requisitos para a segurança em projetos, execução, operação, manutenção, reforma e ampliação das instalações elétricas, além de prever a capacitação e treinamento dos trabalhadores que atuam nessas áreas.

Entre os temas abordados pela NR-10, estão a análise de risco, a utilização de equipamentos de proteção coletiva e individual, a sinalização de segurança, a documentação técnica das instalações elétricas, as medidas de proteção contra incêndios e explosões, a investigação de acidentes, entre outros. A norma também estabelece as responsabilidades dos empregadores, empregados e prestadores de serviços quanto à segurança elétrica.

A NR 10 e a NBR 5419 são duas normas que tratam de assuntos distintos, mas complementares no que se refere à segurança em instalações elétricas.

A NR 10, estabelecida pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), trata da segurança em serviços em eletricidade. Ela estabelece as diretrizes e requisitos mínimos para a segurança dos trabalhadores que interagem direta ou indiretamente com instalações elétricas e serviços com eletricidade. A norma tem como objetivo garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que trabalham com eletricidade, prevenindo acidentes e minimizando os riscos associados a essas atividades.

Já a NBR 5419, estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), trata da proteção contra descargas atmosféricas. Ela estabelece os requisitos mínimos para a proteção de pessoas e patrimônios contra os efeitos diretos e indiretos das descargas atmosféricas em edificações e estruturas.

Apesar de terem focos diferentes, as duas normas são complementares, pois uma instalação elétrica pode estar exposta a descargas atmosféricas e, portanto, precisa ser protegida. Por isso, a NBR 5419 é frequentemente mencionada na NR 10 como uma norma complementar que deve ser seguida em instalações elétricas expostas a riscos de descargas atmosféricas.

5 Nomes aos Bois - Nomenclatura

- ***Raio ou descarga atmosférica (“Lightning”)*** ⇒ refere-se a todos os elementos envolvidos no processo completo de descarga atmosférica, incluindo a formação do canal de descarga, a corrente de retorno, bem como as manifestações elétricas, visuais e sonoras associadas.
- ***Relâmpago (“Lightning”)*** ⇒ o efeito luminoso produzido pelo aquecimento do canal causado pelo fluxo de corrente de retorno.
- ***Trovão (“Thunder”)*** ⇒ o efeito sonoro resultante do deslocamento abrupto do ar próximo ao canal de descarga, que se expande devido ao aquecimento gerado pela corrente elétrica que passa pelo canal.
- ***Descarga Elétrica (“Electric discharge”)*** ⇒ fenômeno físico que ocorre quando há uma transferência súbita de cargas elétricas entre dois corpos com potenciais elétricos diferentes. Esse

processo é acompanhado por uma liberação intensa de energia em forma de luz, calor e ondas eletromagnéticas.

- **Descarga atmosférica plena (“Flash”)** \Rightarrow Corresponde ao conjunto de descargas de retorno (“Return Stroke”) envolvidas após o fechamento do canal. Um *flash* pode ser constituído de uma ou mais descargas (“Strokes”) pelo canal.
- **Canal precursor de descarga (Líder Escalonado ou “Stepped Leader”)** \Rightarrow É o canal ionizado que evolui por passos, da ordem de 50 m, decorrente de sucessivos saltos no ar, com intervalos de 50 μs .
- **Canal descendente (“Downward Leader”)** \Rightarrow é o canal ionizado que se forma a partir da quebra do ar e se propaga em direção ao solo, partindo da nuvem em direção ao solo. Esse canal apresenta uma direção vertical, com ramificações e oscilações.
- **Canal Ascendente (“Upward Leader”)** \Rightarrow é o canal ionizado que se propaga no sentido ascendente a partir do solo, evoluindo em direção à nuvem. Também tem direção vertical, com tortuosidades e ramificações.
- **Canal de descarga (“Lightning Channel”)** \Rightarrow é um caminho ionizado através do qual a eletricidade flui durante uma descarga elétrica, como um raio. É criado quando um campo elétrico intenso ioniza o ar e cria um canal condutivo para que a carga elétrica possa se mover. O canal de descarga geralmente se estende do solo até a nuvem de tempestade, embora também possa se formar entre diferentes partes da mesma nuvem. O canal de descarga é rodeado por uma aura brilhante de luz chamada de corona, que é causada pela ionização do ar ao redor do canal. O núcleo do canal mede alguns centímetros e a aura do efeito corona mede alguns metros.
- **Corrente de retorno (“Return Current”)** \Rightarrow A corrente que flui pelo percurso ionizado após o fechamento do canal de descarga corresponde à corrente de retorno. É a corrente elétrica que retorna da nuvem para o solo, fechando o circuito elétrico da descarga atmosférica. A intensidade dessa corrente pode atingir valores muito elevados, da ordem de dezenas ou até centenas de milhares de amperes. O descarregamento dessa corrente pode gerar diversos efeitos, como luminosos, sonoros, térmicos e magnéticos.
- **Descarga de Retorno (“Stroke” ou “Return Stroke”)** \Rightarrow A descarga de retorno é um evento elétrico que ocorre durante uma descarga atmosférica. Ela está associada ao fluxo de corrente de retorno pelo canal de descarga após o fechamento. Um único flash de descarga atmosférica pode incluir várias descargas de retorno (strokes).

- ***Descarga de Retorno Subsequente (“Subsequent Stroke”)*** ⇒ descargas subsequentes à descarga de retorno.
- ***Corrente de Recarregamento do Canal de Descarga (“Dart Leader Current”)*** ⇒ A corrente de recarregamento do canal de descarga é uma corrente de baixo valor que corresponde ao deslocamento de cargas negativas da nuvem para o canal restante após uma descarga de retorno negativa anterior. Logo após o fluxo da corrente de retorno, o canal tende a se dissipar. No entanto, em alguns casos (entre 70 e 80% das vezes), ocorrem processos disruptivos na parte superior do canal, conectando-o a outro centro de cargas negativas na nuvem.
- ***Processo de Descarregamento do Canal de Descarga (“Dart Leader”)*** ⇒ é um evento que ocorre durante a dissipação da corrente de retorno de uma descarga anterior. Nesse momento, a corrente de recarga flui pelo canal de descarga, criando um fenômeno semelhante a um "dardo" percorrendo o canal.
- ***Processo de Conexão ou Fechamento do Canal de Descarga (“Attachment Process”)*** ⇒ após a evolução dos canais ascendente e descendente, ocorre a conexão entre eles, dando origem ao canal de descarga. Nesse canal, ocorrerá o fluxo da corrente de retorno. Esse processo é considerado o estágio final da evolução do fenômeno da descarga elétrica atmosférica.
- ***Canal Piloto de Descarga (“Streamer”)*** ⇒ canal precursor estabelecido junto a um eletrodo ou na extremidade de um canal ionizado, o qual antecede a formação do salto da descarga elétrica plena.
- ***Descarga Direta (“Direct Flash”)*** ⇒ O evento associado à incidência direta de uma descarga sobre uma vítima, estrutura ou objeto.
- ***Descarga indireta, lateral ou próxima (“Indirect Flash” ou “Close Strike”)*** ⇒ Descarga indireta é um evento no qual a descarga elétrica não atinge diretamente uma pessoa, objeto ou estrutura, mas causa um efeito indireto. Por exemplo, a descarga pode atingir um objeto próximo, como uma árvore ou poste, e o efeito da corrente elétrica pode se propagar para um objeto ou pessoa próxima através de condução ou radiação. Esse tipo de descarga também é conhecido como descarga lateral ou próxima.

6 Crenças sobre os Raios

6.1 Mitologia Nórdica

A mitologia nórdica inclui várias histórias e crenças relacionadas a tempestades e descargas atmosféricas. Thor, o deus do trovão e da guerra, é uma das figuras mais conhecidas da mitologia nórdica associada a raios e tempestades.

De acordo com as lendas, Thor empunhava um martelo mágico chamado Mjolnir, que era capaz de criar trovões e raios quando era jogado. Os antigos nórdicos acreditavam que a presença de trovões e relâmpagos era uma manifestação da ira de Thor contra os inimigos dos deuses.

Em algumas histórias, os raios eram vistos como uma forma de comunicação entre os deuses e os mortais. Acredita-se que os raios também possam ser uma forma de purificação, com Thor usando seus poderes para limpar a terra dos males e influências negativas.

Os antigos nórdicos também tinham rituais e práticas para se proteger de tempestades e raios. Por exemplo, eles acreditavam que a queima de fogueiras durante as tempestades poderia ajudar a afastar os raios e evitar danos.

A mitologia nórdica ainda tem um lugar na cultura popular, especialmente em relação a Thor e seu papel como o deus do trovão e dos raios.

6.2 Mitologia Suméria

A mitologia suméria é uma das mais antigas do mundo, datando de cerca de 4000 a.C. Embora a mitologia suméria não tenha um deus específico do trovão ou dos raios, há várias referências a tempestades e descargas atmosféricas em suas histórias e lendas.

Uma das figuras mais conhecidas da mitologia suméria é Enlil, o deus da tempestade, que controlava o vento, a chuva e os trovões. Ele era frequentemente retratado segurando uma arma com a qual ele poderia criar trovões e relâmpagos.

Os antigos sumérios também acreditavam que as tempestades eram um sinal de descontentamento dos deuses. Eles acreditavam que, quando os deuses estavam descontentes com a humanidade, eles enviariam tempestades e outras manifestações climáticas para demonstrar sua ira.

Além disso, havia práticas e rituais para se proteger de tempestades e raios na mitologia suméria. Por exemplo, acredita-se que a queima de incenso e oferendas aos deuses poderia ajudar a afastar tempestades e evitar danos causados por descargas atmosféricas.

6.3 Mitologia Babilônica

A mitologia babilônica, que se desenvolveu a partir da cultura suméria, também faz referência a tempestades e descargas atmosféricas em suas histórias e lendas.

O deus babilônico Adad, também conhecido como Ishkur, era o deus da tempestade, da chuva e dos trovões. Ele era frequentemente retratado com um raio na mão e acreditava-se que tinha o poder de controlar as tempestades.

Na mitologia babilônica, assim como na suméria, as tempestades eram frequentemente vistas como uma manifestação da ira divina. Acredita-se que, quando os deuses estavam insatisfeitos com a humanidade, eles poderiam enviar tempestades, chuvas torrenciais e raios para demonstrar sua ira.

Os babilônios também desenvolveram rituais para se protegerem contra tempestades e raios. Eles acreditavam que oferecer sacrifícios aos deuses poderia ajudar a afastar as tempestades e evitar danos causados por descargas atmosféricas.

6.4 Mitologia Egípcia

A mitologia egípcia também tem várias referências a tempestades e descargas atmosféricas em suas histórias e crenças religiosas.

Um dos deuses mais associados com as tempestades e raios na mitologia egípcia é Seth. Ele era frequentemente retratado segurando uma lança ou um raio, e acredita-se que ele tinha o poder de controlar o vento e as tempestades. Hórus, o deus falcão, também era às vezes associado com tempestades e raios, especialmente quando ele assumia sua forma como o deus da guerra.

Assim como em outras culturas antigas, as tempestades e raios eram frequentemente vistos como um sinal da ira divina na mitologia egípcia. Por exemplo, a história do deus Rá, que era o deus sol, mostra que ele se tornou irado com a humanidade e enviou tempestades para punir aqueles que o haviam ofendido.

Os antigos egípcios também desenvolveram amuletos e outras práticas para se protegerem contra tempestades e raios. Por exemplo, eles acreditavam que usar amuletos em forma de escaravelho podia ajudar a afastar as tempestades e evitar danos causados por descargas atmosféricas.

6.5 Mitologia Grega

A mitologia grega também tem várias referências a tempestades e descargas atmosféricas em suas histórias e crenças religiosas.

Um dos deuses mais associados com as tempestades e raios na mitologia grega é Zeus, o deus

do trovão e do raio. Ele é frequentemente retratado segurando um raio e é considerado o governante do céu e do clima. As tempestades e descargas atmosféricas eram frequentemente vistas como uma expressão do poder e da ira de Zeus.

Acredita-se que o mito de Prometeu seja uma das histórias mais antigas na mitologia grega sobre como os humanos descobriram o fogo. Na história, Prometeu rouba o fogo dos deuses e o dá aos humanos, mas como punição, Zeus o acorrenta a uma rocha e ordena que uma águia coma seu fígado todos os dias. A imagem de um raio atingindo uma rocha e incendiando-a é frequentemente usada como símbolo desta história.

Os antigos gregos acreditavam que Zeus podia controlar as tempestades e descargas atmosféricas, mas também acreditavam que as tempestades eram um resultado da luta entre os deuses e os titãs, ou uma resposta a comportamentos humanos ofensivos. Além disso, muitas práticas religiosas gregas envolviam oferecer sacrifícios aos deuses para acalmar a ira de Zeus e evitar as tempestades.

6.6 Mitologia Maia

A mitologia maia, assim como outras mitologias mesoamericanas, tem uma forte ligação com fenômenos atmosféricos, incluindo as descargas atmosféricas. Os maias acreditavam que os deuses controlavam o clima e o tempo, e as tempestades e descargas atmosféricas eram consideradas uma forma de comunicação divina.

Um dos principais deuses maias associados às tempestades e aos raios era Chaac, o deus da chuva. Ele era frequentemente representado com uma faca de pedra e era responsável por trazer as chuvas necessárias para o cultivo das plantações. Os maias acreditavam que Chaac controlava os raios e as tempestades com sua faca, e que podia enviá-los como uma forma de punição ou bênção.

Outra figura importante na mitologia maia relacionada às descargas atmosféricas é o deus K'awiil, que era frequentemente representado como um homem com um raio na mão. K'awiil era associado ao comércio, à prosperidade e à guerra, e os maias acreditavam que ele podia usar o raio para proteger ou destruir os humanos, dependendo de suas ações.

Os maias também acreditavam que as tempestades e descargas atmosféricas eram uma forma de comunicação divina, e que os deuses podiam enviar mensagens ou avisos através desses eventos. Por exemplo, uma tempestade ou raio durante um ritual religioso era visto como um sinal de aprovação dos deuses.

6.7 Mitologia Asteca

Na mitologia asteca, os raios eram associados ao deus Tláloc, que era responsável pela chuva, relâmpagos e trovões. Tláloc era um dos principais deuses da mitologia asteca e era adorado como um deus da fertilidade e da agricultura.

De acordo com a lenda, Tláloc usava seus raios para fertilizar a terra e trazer a chuva necessária para as colheitas. No entanto, os astecas também acreditavam que Tláloc poderia lançar raios como uma forma de punição para aqueles que o desrespeitavam ou desobedeciam suas ordens.

Além disso, os astecas também acreditavam que as pessoas poderiam ser transformadas em raios depois de morrerem. Esses raios se juntavam ao poder de Tláloc e eram capazes de controlar a chuva e os trovões, ajudando a trazer a fertilidade para a terra e proteger as colheitas.

6.8 Mitologia Inca

Na mitologia inca, o deus dos raios era conhecido como Illapa, ou às vezes chamado de Catequil. Ele era um dos deuses mais importantes do panteão inca e era considerado responsável por trazer a chuva necessária para a agricultura. Illapa também era associado aos raios e trovões e considerado um deus temido e poderoso.

Os incas acreditavam que Illapa usava seus raios para castigar aqueles que desobedeciam suas ordens ou eram desrespeitosos. Diz-se que, quando os incas foram conquistados pelos espanhóis, Illapa se retirou para as montanhas e ainda é venerado por alguns povos andinos como um espírito protetor.

6.9 Mitologia Aborígine

As culturas aborígenes da Austrália têm uma forte conexão com a natureza e acredita-se que os fenômenos atmosféricos, incluindo as descargas atmosféricas, são influenciados por forças espirituais. Embora haja muitas culturas aborígenes na Austrália, cada uma com suas próprias crenças e histórias, há algumas crenças comuns sobre os raios e tempestades.

Para muitas culturas aborígenes, as descargas atmosféricas são consideradas uma manifestação da força espiritual conhecida como o "Caminho do Raio" ou o "Caminho do Trovão". Acredita-se que essa força espiritual seja capaz de se mover através da terra e do céu, e que possa ser convocada por aqueles que possuem um conhecimento especial.

Os aborígenes também acreditam que os raios são uma manifestação da força vital da Terra, e que sua energia pode ser canalizada para propósitos específicos, como cura ou proteção. Os raios são

frequentemente vistos como uma forma de comunicação entre os seres humanos e o mundo espiritual.

Além disso, muitas culturas aborígenes acreditam que os raios são uma manifestação da ira dos espíritos ou ancestrais descontentes. Eles acreditam que os raios podem ser evocados como uma forma de punição ou para alertar as pessoas sobre comportamentos inadequados.

Os aborígenes australianos também têm histórias e lendas sobre criaturas mitológicas que estão associadas aos raios e tempestades. Por exemplo, o povo Yolngu do norte da Austrália acredita na existência do Guirrimbirra, um espírito do raio que é conhecido por suas habilidades de cura e que é muitas vezes convocado durante cerimônias religiosas.

A lenda aborígene dos "irmãos raios" é uma história que fala sobre a origem dos raios. Segundo essa lenda, havia dois irmãos que eram muito próximos e sempre estavam juntos. Um dia, eles se apaixonaram pela mesma mulher e começaram a brigar por ela.

A luta entre os irmãos foi tão intensa que suas armas de pedra começaram a faiscar e a produzir sons estrondosos. Quando um dos irmãos atingiu o outro com sua arma, uma enorme descarga elétrica surgiu no céu, seguida de um trovão ensurdecedor.

Os aborígenes acreditavam que essa luta entre os irmãos gerou os primeiros raios e trovões. Desde então, os irmãos raios continuaram a lutar, gerando novas descargas elétricas a cada golpe de suas armas.

Para os aborígenes, os raios eram vistos como um sinal de poder e força, e a história dos irmãos raios simbolizava a luta pela vida e pelo amor. Essa lenda é um exemplo de como diferentes culturas e povos criaram mitos e histórias para explicar a origem dos fenômenos naturais que os rodeavam.

6.10 Mitologia Chinesa

Na mitologia chinesa, os raios são associados ao deus do trovão, Lei Gong. Ele é frequentemente retratado com um martelo ou um machado de batalha, que ele usa para criar trovões e raios.

Lei Gong é considerado um deus protetor que mantém o equilíbrio entre o céu e a terra, e acredita-se que ele é responsável por trazer chuvas para fertilizar as colheitas. Ele também é um deus guerreiro que é chamado em tempos de guerra para proteger os soldados chineses.

Na cultura chinesa, acredita-se que os raios têm poderes curativos e protetores. Os chineses costumam pendurar imagens do deus do trovão em suas casas e negócios para se protegerem de raios e trovões. Além disso, também é comum fazer ofertas e orações a Lei Gong em templos dedicados a ele.

6.11 Mitologia Eslava

Na mitologia eslava, o deus do trovão é Perun. Ele é retratado como um homem forte com cabelos longos e barba. Perun é considerado o deus mais poderoso do panteão eslavo e seu símbolo é um machado de batalha ou martelo.

Perun é frequentemente retratado lançando raios e trovões do céu com seu martelo, e é creditado por trazer chuva e fertilidade à terra. Ele é também considerado um deus guerreiro, e acredita-se que tenha ajudado os eslavos a vencerem várias batalhas contra seus inimigos.

Na mitologia eslava, acreditava-se que as tempestades com raios eram causadas por Perun lutando contra os espíritos malignos e demônios que habitavam o céu. As pessoas frequentemente faziam oferendas a Perun para apaziguar sua ira e garantir sua proteção contra os perigos das tempestades.

6.12 Mitologia Gaulesa

A mitologia dos gauleses, um povo celta que habitava a região que é hoje a França, é pouco conhecida devido à falta de registros escritos. No entanto, alguns historiadores acreditam que a deusa Taranis era a divindade associada aos raios e trovões pelos gauleses.

De acordo com a crença, Taranis era uma deusa guerreira com um martelo ou machado na mão, que controlava o tempo, a chuva e as tempestades. Ela era frequentemente retratada com um raio, simbolizando seu poder sobre as descargas atmosféricas. Taranis também era vista como uma deusa protetora dos guerreiros gauleses e era frequentemente invocado em batalhas.

Embora não haja muitas informações sobre a mitologia dos gauleses, acredita-se que sua crença em Taranis e sua associação com raios e trovões tenham sido significativas para a cultura e a religião do povo celta.

6.13 Mitologias Africanas

A África é um continente com grande diversidade cultural e, consequentemente, com uma rica variedade de mitologias a respeito dos trovões e raios. Em muitas culturas africanas, esses fenômenos naturais são considerados sagrados e associados a divindades ou espíritos.

Na mitologia iorubá, por exemplo, Shango é o deus do trovão e do fogo, e é frequentemente representado segurando um machado de duas lâminas e vestindo roupas vermelhas e brancas. Ele é considerado um dos orixás mais importantes e é associado a várias virtudes, como a justiça, a honestidade e a coragem.

Já na mitologia bantu, que engloba várias culturas de países como Angola, Moçambique e África

do Sul, o trovão é frequentemente associado ao espírito do ancestral. Diz-se que, quando um ancestral está irritado ou precisa enviar uma mensagem, ele faz isso através dos trovões e raios.

Outras culturas africanas também possuem suas próprias mitologias a respeito dos trovões e raios, como os ashanti de Gana, os himba da Namíbia e os zulu da África do Sul. Em geral, essas mitologias destacam a importância desses fenômenos naturais na vida das pessoas e como eles podem ser interpretados de diferentes maneiras, dependendo da cultura e da crença de cada um.

6.14 Mitologia Indígena do Brasil

Diferentes povos indígenas brasileiros possuem mitos e lendas que explicam a origem dos raios. Na mitologia Tupi-Guarani, por exemplo, o deus trovão Tupã é o responsável pelos raios e trovões, que são seus instrumentos de poder. Acredita-se que Tupã lançava raios para punir aqueles que quebravam suas leis ou desrespeitavam a natureza.

Já para os índios Xavante, os raios são resultado da disputa entre dois irmãos: Omo e Iri. Omo, que representa o raio, é o irmão mais novo e sempre tenta superar o irmão mais velho, Iri, que representa o trovão. Durante a luta entre os dois, Omo lança raios para atingir o irmão, que responde com trovões.

Os índios Karajá acreditam que os raios são causados por uma cobra gigante, chamada de Bojigi, que vive no fundo dos rios. Quando a cobra sai da água, ela cospe raios que atingem as pessoas e as árvores. Para se proteger, os Karajá costumam fazer oferendas à cobra e evitar entrar nos rios durante tempestades.

Essas são apenas algumas das muitas histórias e mitos indígenas que explicam a origem dos raios e trovões. Essas narrativas refletem a forte relação que os povos indígenas têm com a natureza e como eles buscam entender e respeitar os fenômenos naturais que os cercam.

6.15 Mitologia dos povos indígenas norte-americanos

Diferentes povos nativos da América do Norte têm mitologias que explicam a origem e o significado dos raios. Abaixo estão algumas dessas mitologias:

- Para os Navajos, os raios são os arcos das divindades do trovão, que disparam flechas para afastar os espíritos malignos e purificar o ar. O trovão é o som das flechas quebrando o ar, e a chuva que cai após a tempestade é a água que as flechas arrastam consigo.
- Para os índios da Tribo dos Pés Pretos, os raios são causados por uma serpente gigante que vive nas nuvens e protege as pessoas da fome e da doença. Quando a serpente se move, seus raios iluminam a terra e trazem a chuva.

- Na mitologia dos Índios Hopi, os raios são os braços do Deus da Chuva, que usa sua arma mágica para combater as forças do mal. A eletricidade dos raios é a manifestação do poder divino que protege a terra e seus habitantes.
- Para os índios da Tribo dos Sioux, os raios são causados por um pássaro gigante que vive no céu e bate suas asas para produzir trovões. O pássaro é visto como um mensageiro divino que traz bênçãos para o povo.

Essas são apenas algumas das muitas mitologias indígenas que existem sobre os raios na América do Norte. Cada tribo tem sua própria interpretação e suas próprias histórias para explicar esses fenômenos naturais.

6.16 Mitologia esquimó

Na mitologia da Groenlândia, os raios são associados a uma figura chamada Qasavaraq, uma entidade sobrenatural responsável pela criação de tempestades e pelo lançamento de raios. Acredita-se que ele habite as montanhas e os fiordes da Groenlândia e que seja capaz de lançar raios em pessoas e animais que o desrespeitem ou o irrite. Alguns contos populares descrevem Qasavaraq como um ser perigoso e vingativo que pode causar a morte de quem o enfrentar. Por essa razão, muitos groenlandeses acreditam que é preciso ter muito respeito e reverência por essa entidade e que é necessário realizar oferendas e rituais para acalmá-lo e evitar a sua ira.

6.17 Mitologia árabe

Na mitologia árabe, os raios eram considerados uma manifestação da vontade divina. Eles eram associados a várias divindades, como Shango, deus da tempestade e do trovão, que era adorado pelos iorubás da Nigéria e do Benin. Alguns árabes acreditavam que os raios eram disparados por um arco celestial, que era uma espécie de arco-íris feito de fogo e que se estendia do céu à terra. Outros acreditavam que os raios eram disparados por um pássaro mítico chamado Anqa, que era o símbolo da divindade suprema do Islã, Alá. Ainda há outras histórias e lendas sobre raios na mitologia árabe, variando de acordo com as regiões e as crenças locais.

6.18 Mitologia Indo-européia

A mitologia indo-europeia, que se originou em uma área que se estendia da Índia ao leste até a Europa Ocidental, tinha várias divindades relacionadas aos raios. Na religião hindu, por exemplo, o deus Indra era considerado o senhor dos raios e trovões, e era frequentemente retratado segurando um

raio em sua mão. Na mitologia grega, o deus do trovão era Zeus, que usava raios como arma. Na mitologia romana, o equivalente a Zeus era Júpiter, também relacionado aos raios e trovões.

A mitologia indo-europeia também tinha uma figura conhecida como Perkūnas, que era o deus do trovão nas religiões bálticas, incluindo a lituana e a letã. Ele era geralmente retratado como um guerreiro com um martelo, e era frequentemente associado à proteção contra doenças e desastres naturais.

Em outras culturas indo-europeias, como a celta, os raios eram frequentemente associados a divindades femininas, como a deusa irlandesa Brigid, que era a deusa da poesia, da cura e do fogo, entre outras coisas. O deus nórdico Thor também era relacionado com os raios, sendo frequentemente representado segurando um martelo e viajando em uma carruagem puxada por cabras.

6.19 Mitologia anglo-saxã

A mitologia saxã, também conhecida como mitologia anglo-saxã, é a coleção de crenças, lendas e tradições dos antigos povos germânicos que habitavam a Inglaterra na Idade Média. Embora não haja muitas referências específicas sobre raios na mitologia saxã, sabe-se que os povos germânicos em geral atribuíam grande importância a Thor, deus do trovão e dos raios.

Na mitologia saxã, Thor era conhecido como Thunor ou Thunraz, e era visto como um deus poderoso e protetor, capaz de controlar os elementos e combater inimigos com seu martelo mágico, o Mjolnir. De acordo com algumas lendas, Thor era capaz de invocar raios e trovões com seu martelo, e era frequentemente associado a tempestades violentas e poderosas.

Além de Thor, outros deuses e deusas da mitologia saxã também tinham poderes relacionados aos elementos e fenômenos naturais, incluindo a chuva, o vento e o mar. No entanto, não há muitas histórias ou lendas específicas sobre raios na mitologia saxã, e as referências a Thor e aos trovões e raios geralmente aparecem de forma mais genérica e simbólica.

6.20 Mitologia Ugarítica

A mitologia ugarítica é uma religião antiga que foi praticada no que é hoje a Síria e o Líbano durante o segundo milênio antes de Cristo. Embora a mitologia ugarítica não seja especificamente sobre raios, havia uma deusa chamada Shapash, que era a deusa do sol, justiça e verdade. Ela era frequentemente retratada com um raio em sua mão e era considerada uma deusa poderosa que podia proteger e iluminar a humanidade. Além disso, Baal, o deus da tempestade, também era frequentemente associado a raios e trovões, já que ele controlava o clima e era considerado responsável pelas tempestades.

6.21 Tradição Judaica

Na tradição judaica, há diversas referências a trovões e raios, que geralmente são vistos como manifestações da presença divina. Por exemplo, na Bíblia hebraica, no livro de Êxodo, há o relato da descida de Deus no Monte Sinai em meio a trovões, relâmpagos e uma espessa nuvem. Em outro trecho da Bíblia, no livro de Jó, o personagem central é descrito como ouvindo a voz de Deus nos trovões.

De maneira geral, os trovões e raios são vistos na tradição judaica como um sinal da força e poder de Deus, mas também podem ser vistos como um castigo divino ou como um alerta para a necessidade de se arrepender dos pecados. Além disso, a crença em amuletos protetores contra raios é comum em algumas comunidades judaicas tradicionais.

Na tradição judaica, raios são frequentemente associados à ira divina e ao poder de Deus. Em Êxodo 9:23-24, Deus envia um raio e granizo como um sinal de Sua ira contra o faraó do Egito, enquanto que em Jó 28:26, trovões e relâmpagos são descritos como parte da obra de Deus e um reflexo da Sua sabedoria. Na literatura rabínica, também há menção de raios como parte da punição divina para aqueles que desobedecem a Deus. Por exemplo, é dito que a cidade de Sodoma foi destruída por um raio como punição por sua maldade.

O Talmud é uma compilação de escritos judaicos que inclui ensinamentos rabínicos e comentários sobre a Torá e outras tradições judaicas. Embora o Talmud faça menção a raios e trovões em alguns trechos, ele não aborda especificamente mitologia ou crenças religiosas relacionadas a esses fenômenos naturais. Em geral, o Talmud enfatiza a importância de temer a Deus e seguir seus mandamentos, mas não fornece informações detalhadas sobre interpretações mitológicas ou simbólicas de fenômenos naturais.

6.22 Raios na Bíblia

A Bíblia menciona raios em várias passagens, principalmente como um sinal da ira divina. Um exemplo é o livro de Êxodo, capítulo 19, onde descreve a aproximação de Deus no Monte Sinai com trovões e raios. Outra passagem conhecida é a de Jó 28:26, que diz: "Quando deu à chuva um peso e estabeleceu um caminho para o relâmpago dos trovões, então viu a sabedoria e a declarou; firmou-a e a esquadrinhou". Também há menções a raios em outras passagens, como no livro de Ezequiel e no Salmo 77. Em geral, a Bíblia usa a imagem de raios para demonstrar o poder divino e a manifestação da sua presença de maneira majestosa e impressionante.

No Novo Testamento, o livro de Apocalipse descreve trovões e raios como parte do juízo final de Deus sobre o mundo (Apocalipse 8:5, 11:19, 16:18). O Evangelho de Mateus também menciona

trovões e raios em conexão com a segunda vinda de Cristo (Mateus 24:27). Em geral, trovões e raios são usados na Bíblia como símbolos da presença, poder e julgamento de Deus.

Os trovões são mencionados em vários salmos da Bíblia, geralmente como um sinal da presença poderosa e majestosa de Deus. Aqui estão algumas referências:

- Salmo 18:13: "O Senhor trovejou dos céus; o Altíssimo levantou a sua voz com granizo e carvões ardentes."
- Salmo 29:3: "A voz do Senhor ouve-se sobre as águas; o Deus da glória troveja; o Senhor está sobre as muitas águas."
- Salmo 77:18: "A voz do teu trovão estava no céu; os relâmpagos iluminaram o mundo; a terra tremeu e abalou-se."
- Salmo 81:7: "Na angústia me invocaste, e te livre; respondi-te no lugar oculto dos trovões; provei-te nas águas de Meribá."

Em todos esses casos, os trovões são usados para enfatizar a grandeza, a soberania e a autoridade de Deus.

No livro de Ezequiel, na Bíblia, há diversas menções a trovões, principalmente no capítulo 1, que descreve a visão da glória de Deus. No versículo 13, por exemplo, é dito que "no meio do fogo havia uma semelhança de quatro seres viventes, e esta era a sua aparência: tinham a semelhança de homem". No versículo 24, é descrito que "ouvindo eu o ruído das suas asas, como o ruído de muitas águas, como a voz do Onipotente, quando fala, como o ruído de um arraial; ouvi também o ruído das rodas junto a eles, como o ruído de grandes águas". Em outras partes do livro, como no capítulo 10, os trovões também são mencionados como sinais da presença divina e do julgamento divino sobre os pecados do povo.

No Evangelho de Mateus, há uma referência a trovões e raios no momento da crucificação de Jesus. Segundo o relato, no momento em que Jesus morreu, houve um grande terremoto e o véu do templo rasgou-se em dois, do alto até em baixo. Além disso, o texto afirma que "o centurião e os que com ele guardavam Jesus, vendo o terremoto e as coisas que haviam sucedido, tiveram grande temor e disseram: Verdadeiramente este era Filho de Deus"(Mateus 27:54). Embora o texto não mencione diretamente trovões e raios, a descrição do terremoto e da rasgação do véu do templo sugere um evento de grande magnitude e poder, que pode ser interpretado como um sinal divino. É possível que a imagem de trovões e raios esteja implícita nessa descrição, como uma metáfora para o impacto da morte de Jesus sobre seus seguidores e a sociedade em geral.

No Apocalipse, livro bíblico que relata a visão profética de João sobre o fim dos tempos, os trovões são mencionados como uma das sete pragas que caem sobre a Terra. No capítulo 16, versículo 18, é dito: "E houve vozes, e trovões, e relâmpagos, e um grande terremoto, como nunca houve desde que há homens sobre a Terra, um terremoto tão grande, tão forte". Nesse contexto, os trovões representam a ira divina e a destruição que acompanham o fim dos tempos.

Aula 3 - Formação de Nuvens de Tempestade

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- **Formação de nuvens de tempestade** \Rightarrow As nuvens de tempestade se formam quando uma parcela de ar quente e úmido sobe na atmosfera e se resfria, causando a condensação do vapor de água presente no ar. Existem vários fatores que podem causar essa elevação do ar, como os efeitos orográficos (quando o ar úmido é forçado a subir ao encontrar uma montanha, por exemplo), as correntes de advecção (quando o ar quente é transportado horizontalmente e se encontra com uma massa de ar frio), a convergência de ventos e a convecção (quando o Sol aquece a superfície terrestre e gera correntes ascendentes de ar quente). Quando essas parcelas de ar quente e úmido se elevam, formam as nuvens de tempestade, que podem resultar em raios, trovões, chuvas fortes e outros fenômenos meteorológicos intensos.
- **Conceitos base \Rightarrow Processo de Formação das Nuvens**
 - **Processo:** Formação da Nuvem
 - **Combustível:** parcela de ar quente e umido
 - **Catalizador:** advecção, efeitos orográficos, convergência de ventos, convecção.
- **Tipos de Nuvem:**
 - **Cirrus:** são nuvens finas, brancas e com aparência fibrosa. Geralmente são encontradas em altitudes elevadas e indicam tempo bom, mas podem indicar mudanças no clima em algumas situações.
 - **Cumulus:** são nuvens brancas e fofas, com uma aparência de "algodão". Elas podem se formar em altitudes diferentes, mas geralmente indicam tempo bom.

- **Stratus:** são nuvens cinzentas e uniformes, com uma aparência plana e baixa. Elas geralmente se formam em altitudes baixas e indicam tempo nublado ou chuvoso.
 - **Nimbostratus:** são nuvens densas e escuras que geralmente se formam em altitudes baixas e médias. Elas indicam chuva ou neve.
 - **Cumulonimbus:** são nuvens grandes e volumosas, com uma aparência em forma de bigorna. Elas se formam em altitudes elevadas e são frequentemente associadas a tempestades, raios e ventos fortes.
 - **Stratocumulus:** são nuvens baixas e espessas, com uma aparência de "bolos" ou "bolas". Elas geralmente indicam tempo nublado, mas podem se dissipar rapidamente.
 - **Altostratus:** são nuvens brancas ou cinzentas que aparecem em camadas. Elas geralmente indicam tempo bom, mas também podem indicar mudanças no clima.
 - **Cirrostratus:** são nuvens finas e transparentes que parecem um véu branco. Elas geralmente indicam tempo bom, mas também podem indicar a chegada de uma frente fria.
 - **Cirrocumulus:** são nuvens pequenas e redondas que parecem bolinhas brancas. Elas geralmente indicam tempo bom, mas também podem indicar a chegada de uma frente fria.
- **Estágios de Evolução de uma Nuvem de Tempestade** ⇒ A nuvem Cumulonimbus (Cb) é uma nuvem de tempestade que pode se formar a partir de um Cumulus quando há calor e umidade suficientes na atmosfera para alimentar sua formação. A evolução de uma nuvem Cb pode ser dividida em quatro estágios principais:
 - **Estágio de Desenvolvimento:** Neste estágio, a nuvem Cb é caracterizada por um grande volume de ar ascendente, que pode ser visto como uma torre em forma de cogumelo. A base da nuvem está a uma altitude relativamente baixa, e o topo da nuvem pode se estender a grandes altitudes. Neste estágio, a nuvem está ganhando energia e crescendo rapidamente.
 - **Estágio de Maturidade:** Neste estágio, a nuvem Cb atinge seu tamanho máximo e é caracterizada por uma grande área de precipitação. O ar ascendente continua a alimentar a nuvem, mas a área de precipitação começa a se espalhar para fora da nuvem. Neste estágio, a nuvem pode produzir trovões, relâmpagos e ventos fortes.
 - **Estágio de Dissipação:** Neste estágio, a nuvem Cb começa a perder sua energia e a se dissipar. A precipitação se torna menos intensa e a base da nuvem começa a se elevar.

Neste estágio, ainda podem ocorrer trovões e ventos fortes, mas a intensidade geral da tempestade está diminuindo.

- ***Estágio de Dissipação Completa:*** Neste estágio, a nuvem Cb se dissipou completamente e não há mais energia disponível para sustentá-la. A tempestade está completamente acabada, e a área afetada começa a se recuperar.

2 Temas impactantes, dúvidas e questionamentos

Até aqui tudo bem, o processo de desenvolvimento de uma nuvem de tempestade está claro e compreensível, mas tenho uma dúvida cruel: em um programa antigo do *Discovery Channel*, chamado de *Mortes Estranhas*, há um episódio que narra a morte de um vendedor de bíblias que morreu tostado por um raio em um dia de sol, na porta de um provável cliente (Agradou a Deus, Ele levou pra casa). Além dos raios laterais (que saem de uma nuvem de tempestade e caem em qualquer lugar), existe a possibilidade de o raio ter se formado em condições de tempo bom? Se sim, gostaria de conhecer o mecanismo.

Aula 4 - Campo magnético terrestre na alta atmosfera, camadas ionosféricas

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- ***Como Se formam os Raios*** \Rightarrow Os raios são formados por cargas elétricas que se acumulam em nuvens de tempestade. Quando essas cargas atingem um nível crítico, a resistência do ar é rompida e ocorre uma descarga elétrica em direção ao solo ou entre nuvens. Essa descarga é vista como um flash brilhante de luz, e é acompanhada por um som alto conhecido como trovão. Nesta aula, estuda-se o que acontece nas camadas superiores da atmosfera.
- ***Magnetosfera*** \Rightarrow A magnetosfera é a camada mais externa da Terra, que se estende até a magnetopausa, situada a uma distância variável entre 10 e 15 vezes o raio da Terra. Ela é delimitada na parte inferior pela ionosfera, que se estende em torno de 1000 km acima da superfície terrestre. A magnetosfera é uma região dominada pelo campo magnético da Terra, que influencia a dinâmica do plasma presente na região, composto principalmente de prótons e elétrons. Na parte voltada para o Sol, as linhas de fluxo magnético são achatadas devido à ação do vento solar, enquanto na extremidade oposta, a magnetosfera se alonga.
- ***Plasmasfera*** \Rightarrow A Plasmasfera é a região da alta atmosfera terrestre onde ocorrem os primeiros fenômenos associados às tempestades na Terra e está acoplada à região F da ionosfera. Descargas atmosféricas podem causar a propagação de ondas eletromagnéticas naturais de baixa frequência que se dirigem para as camadas mais altas da atmosfera e entram na Plasmasfera, propagando-se em formato espiralado entre os polos Norte e Sul. Essas ondas, geralmente na ordem de 5-10 kHz no espectro de frequência, são detectadas como assobios atmosféricos

Whistlers. O estudo dos Whistlers está relacionado ao processo de compreensão da dinâmica da magnetosfera e das propriedades magnetoionicas dos elétrons e íons, que podem afetar a propagação de sinais eletromagnéticos neste meio.

- ***Ionosfera*** \Rightarrow A ionosfera é uma região da atmosfera terrestre que se estende entre cerca de 60 km e 1000 km de altitude, e é composta por íons e elétrons livres. É uma região altamente eletricamente condutiva e é influenciada pela radiação solar e pelas correntes elétricas que fluem na magnetosfera da Terra.

A ionização da atmosfera superior é produzida pela radiação ultravioleta e pelos raios cósmicos que bombardeiam a atmosfera terrestre, o que resulta na ionização dos átomos e moléculas presentes. Os íons e elétrons livres na ionosfera interagem com as ondas eletromagnéticas, permitindo a propagação de sinais de rádio e televisão por longas distâncias, além de influenciar a transmissão de dados de sistemas de navegação por satélite.

A ionosfera é dividida em várias camadas que são determinadas pela sua altura e densidade. As camadas da ionosfera são:

- ***Camada D:*** A camada D é a mais próxima da superfície da Terra e está localizada entre 60 e 90 km de altitude. Esta camada é a mais densa de todas as camadas da ionosfera e é composta principalmente por íons N^+ e O_2^+ . A camada D é responsável pela reflexão das ondas de rádio de alta frequência (HF) e é por isso que é usada para comunicações de longa distância.
- ***Camada E:*** A camada E está localizada acima da camada D, entre 90 e 120 km de altitude. Esta camada é menos densa do que a camada D e é composta principalmente de íons O^+ e NO^+ . A camada E é importante para comunicações de rádio devido à sua capacidade de refletir ondas de rádio de frequência muito alta (VHF).
- ***Camada F1:*** A camada F1 está localizada acima da camada E, entre 150 e 200 km de altitude. Esta camada é menos densa do que as camadas D e E e é composta principalmente por íons O^+ e H^+ . A camada F1 é importante para comunicações de rádio devido à sua capacidade de refletir ondas de rádio de frequência ultra-alta (UHF).
- ***Camada F2:*** A camada F2 é a camada mais alta da ionosfera e está localizada entre 200 e 500 km de altitude. Esta camada é composta principalmente de íons O^+ e H^+ e é menos densa do que as camadas D, E e F1. A camada F2 é importante para comunicações de rádio devido à sua capacidade de refletir ondas de rádio de frequência muito alta (VHF) e é a camada mais utilizada para comunicações de longa distância.

Distúrbios na ionosfera polar podem ocasionar interrupções na comunicação por ondas curtas, conhecidos como “apagões de rádio”. Além disso, correntes elétricas induzidas na ionosfera podem influenciar o fornecimento de energia e causar corrosão em oleodutos, entre outros problemas. Os raios cósmicos são divididos em partículas primárias, que permeiam o espaço interplanetário, e partículas secundárias, que surgem a partir de interações com outras partículas presentes na atmosfera. Quando hádrons incidem na alta atmosfera, geralmente sofrem interações de natureza forte ao colidir com núcleos atmosféricos como nitrogênio e oxigênio. Quando a energia das partículas de hádrons atinge cerca de 10^9 eV, ocorre uma cascata de partículas, conhecida como Chuveiro de Partículas ou Avalanche de Partículas Cósmicas. Essas interações sucessivas geram uma série de partículas secundárias, incluindo mésons.

A avalanche de partículas cósmicas, por sua vez, é utilizada como base para a teoria de eletrização da nuvem denominada ***Runaway Breakdown***.

Aula 5 - Eventos Luminosos Transientes

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- ***O que são Eventos Luminosos Transientes*** \Rightarrow Eventos Luminosos Transientes (ELTs) são fenômenos luminosos de curta duração que ocorrem na atmosfera superior da Terra, como flashes de raios, explosões solares, auroras, entre outros. Esses eventos geram perturbações na ionosfera e na magnetosfera, afetando a propagação de sinais de rádio e sistemas de navegação, além de poderem causar danos em satélites e redes elétricas. Os ELTs são estudados por cientistas para melhor compreender a dinâmica da atmosfera superior da Terra e seus efeitos no ambiente espacial e terrestre.

Tipos de ELTs \Rightarrow Existem vários tipos de Eventos Luminosos Transientes (ELTs), alguns dos quais incluem:

- ***Raios***: Descargas elétricas atmosféricas que ocorrem durante tempestades e produzem flashes de luz brilhantes.
- ***Explosões solares***: Liberação repentina de energia na atmosfera do Sol, que pode produzir flashes de luz visíveis na Terra.
- ***Meteoro***: Quando um objeto de tamanho variável entra na atmosfera da Terra e começa a queimar devido à fricção com a atmosfera, pode produzir um flash de luz conhecido como meteoro.
- ***Relâmpagos globulares***: Descargas elétricas que ocorrem na atmosfera superior e são mais difíceis de observar do que os raios, mas ainda assim produzem flashes de luz.

- **Outros fenômenos elétricos:** Há vários outros tipos de ELTs que ocorrem em diferentes partes da atmosfera e são causados por diferentes processos elétricos, como *sprites*, *elves* e *blue jets*.
- **ELTs exógenos** ⇒ Os ELTs que ocorrem na alta atmosfera são:
 - **Sprites:** *Sprites* são um tipo de Evento Luminoso Transiente (ELT) que ocorre acima de tempestades elétricas intensas. Eles são caracterizados por uma rápida e brilhante emissão de luz na atmosfera superior da Terra, a cerca de 50 a 90 km de altitude. Essa emissão de luz tem uma aparência semelhante a um raio em forma de cenoura e pode se estender por dezenas de quilômetros acima da tempestade. Os *sprites* geralmente são observados durante a noite, pois sua luz é ofuscada pela luz do sol durante o dia. Eles foram descobertos em 1989 e são uma das muitas descobertas recentes de fenômenos elétricos na atmosfera superior da Terra.
 - **Blue Jets:** *Blue jets* são outro tipo de evento luminoso transitório (ELT) que ocorrem na alta atmosfera. Eles são descargas elétricas que se propagam para cima a partir do topo das nuvens de tempestade, atingindo altitudes de até 50 km acima da superfície da Terra. Os *blue jets* geralmente apresentam uma cor azulada devido à emissão de linhas espectrais de nitrogênio ionizado e ocorrem em uma escala de tempo de algumas dezenas de milissegundos a alguns segundos. Eles foram descobertos em 1994, e desde então foram estudados em detalhes para entender melhor a física dos processos atmosféricos que ocorrem durante tempestades.

Blue Starters: *Blue starters* são um tipo de descarga elétrica atmosférica de alta altitude, semelhante aos *sprites* e *blue jets*. Eles são caracterizados por uma rápida descarga elétrica ascendente que ocorre acima das tempestades eletromagnéticas e se estende até a borda da ionosfera, cerca de 50 a 90 km acima da superfície da Terra. Eles geralmente aparecem como uma bola azul brilhante, com duração de alguns milissegundos a poucos segundos. Ainda há muitos mistérios sobre esses eventos luminosos transientes, e pesquisas em andamento buscam entender melhor suas características e mecanismos de formação.
 - **Gigantic Jets:** *Gigantic Jets*, também conhecidos como jatos gigantes em português, são eventos luminosos transientes que ocorrem na alta atmosfera da Terra, acima das tempestades elétricas. Eles são caracterizados por serem descargas elétricas em forma de jatos de plasma altamente energéticos que se propagam para cima a partir do topo das nuvens

de tempestade, atingindo altitudes de até 90 km acima da superfície da Terra. Os *Gigantic Jets* são muito mais raros do que outros tipos de ELTs, como os *sprites* e *blue jets*, e foram descobertos apenas na última década, com o avanço da tecnologia de monitoramento atmosférico.

- ***Elves***: “*Elves*” (Emissões de Luz e Vibrações Atmosféricas) são fenômenos ópticos de curta duração e altamente luminosos que ocorrem na alta atmosfera terrestre, a cerca de 90 km de altitude. São produzidos por descargas elétricas na atmosfera inferior, especialmente por raios que atingem as nuvens de tempestade. Os “*Elves*” têm uma forma circular ou elíptica e podem se expandir rapidamente, com uma duração que varia de alguns milissegundos a alguns segundos. O nome “*Elves*” é um acrônimo para “*Emissions of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources*”
- ***Raios Globulares ou Raios Bola***: Os raios globulares, também conhecidos como bola de fogo, são fenômenos elétricos naturais que ocorrem na atmosfera durante as tempestades elétricas. Eles são caracterizados por uma esfera luminosa de plasma que se move rapidamente através do ar, com duração de apenas alguns segundos. Os raios globulares são muito raros e pouco compreendidos pela ciência, mas acredita-se que eles sejam uma forma de descarga elétrica que se forma dentro da nuvem de tempestade, em vez de se originar do solo como os raios convencionais. Alguns estudos sugerem que os raios globulares podem ser relacionados a outras formas de descargas atmosféricas, como *sprites* e *blue jets*.

2 Curiosidades Mitológicas

Na mitologia, raios globulares são frequentemente associados a eventos sobrenaturais ou divinos. Por exemplo, na cultura africana, os raios globulares eram considerados manifestações da ira dos deuses ou espíritos ancestrais. Em algumas lendas nórdicas, os raios globulares eram vistos como o trabalho de elfos ou espíritos malignos. Já na cultura hindu, os raios globulares eram interpretados como a presença do deus *Shiva*, e em algumas lendas, eles são descritos como um círculo de fogo que cerca a deidade.

Embora a ciência moderna tenha fornecido explicações para a natureza dos raios globulares, eles ainda são considerados misteriosos e incompreendidos em muitas culturas. Como resultado, eles ainda são associados a eventos sobrenaturais e divinos em algumas tradições.

No Brasil, os raios bola são conhecidos popularmente como “*fogo-fátuo*” ou “*fogo-corredor*”.

Na cultura popular brasileira, esses fenômenos estão associados a superstições e lendas regionais, geralmente relacionadas a assombrações e espíritos.

Por exemplo, em algumas regiões do interior do país, acredita-se que os fogo-fátuos são espíritos de pessoas que morreram de forma trágica e que ficaram presos na Terra. Já em outras regiões, esses fenômenos são considerados um mau presságio, indicando que uma tragédia está por acontecer.

Os fogo-fátuos também são frequentemente mencionados na literatura brasileira, em obras que retratam a cultura e a vida no interior do país. Alguns exemplos são os contos de Guimarães Rosa, como “*A Hora e a Vez de Augusto Matraga*” e “*A Terceira Margem do Rio*”, que exploram a relação entre a natureza e o sobrenatural na vida dos personagens.

O Boitatá é uma lenda do folclore brasileiro, presente em diversas regiões do país, especialmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Ele é descrito como uma serpente de fogo que tem como principal característica a capacidade de cuspir fogo pelos olhos, semelhante a um raio bola.

De acordo com a lenda, o Boitatá é o guardião das matas e das florestas e protege os animais dos caçadores que ameaçam a natureza. Por isso, ele é muito respeitado pelos índios e pelos povos da região.

A figura do Boitatá também é usada para explicar fenômenos naturais, como a formação de raios bola, que muitas vezes são associados à presença do Boitatá na região. Essa crença é comum em comunidades rurais, onde os relatos de avistamentos de Boitatá e raios bola são mais frequentes.’

Aula 6 - Teoria do Carregamento de Tempestades

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- **Modelos de Carregamento de Uma Nuvem** \Rightarrow Recentes pesquisas sugerem que o modelo atual de tempestades consiste em uma configuração tripolo. Durante um flash nuvem-solo com grande momento de carga, os flashes negativos têm uma duração notavelmente mais curta em comparação aos flashes positivos, indicando que os *flashes* de polaridade negativa que se conectam com o solo são cerca de dez vezes mais comuns do que os flashes de polaridade positiva. Isso se deve à proximidade do solo com as cargas negativas localizadas na região inferior das tempestades.

O crescimento das gotas de chuva começa na parte inferior da nuvem, quando as gotas de diferentes tamanhos e velocidades de queda se fundem por coalescência. Enquanto a gotícula captura mais umidade, pedaços de granizo (*graupel*) são criados, geralmente em níveis mais elevados da nuvem. O desenvolvimento e crescimento do granizo continuam até que a gravidade vença a força de convecção, responsável pelo processo de crescimento do granizo. O crescimento das partículas de precipitação continua até que seu tamanho e concentração se tornem tão grandes que não possam mais ser suportados pelo arrasto ascendente e, portanto, começam a cair em direção à superfície. Quando a nuvem ultrapassa a isoterma de 0 °C, ela é definida como nuvem fria e os processos de formação de gelo tornam-se dominantes. O princípio da eletrização por atrito e contato é mais evidente e os processos de eletrização da nuvem são mais eficientes na presença de gelo (granizo).

Nuvens frias são formadas acima da isoterma, apresentam grande desenvolvimento vertical e condições favoráveis para precipitação, podendo ter ação da força cisalhante que forma uma

“Bigorna”. Nuvens quentes, por outro lado, são formadas abaixo da isoterma de 0 °C e apresentam pouca ou nenhuma condição de precipitação.

Hipótese de carregamento por convecção ⇒ A hipótese de carregamento por convecção é uma das formas de carregamento elétrico das nuvens. Esse processo ocorre devido à movimentação vertical do ar, que é causada pela diferença de temperatura entre a superfície terrestre e a atmosfera. Durante esse processo, o ar quente e úmido sobe, enquanto o ar frio e seco desce.

À medida que o ar quente sobe, ele encontra uma região mais fria e entra em processo de resfriamento. Com isso, o vapor de água presente no ar condensa, formando gotículas de água que se agrupam e formam as nuvens. Durante esse processo de condensação, a liberação de energia pode gerar uma diferença de potencial elétrico entre as diferentes regiões da nuvem.

Essa diferença de potencial elétrico pode gerar um campo elétrico intenso na atmosfera, que pode resultar em descargas elétricas, como raios. A hipótese de carregamento por convecção é uma das teorias que tentam explicar a origem dos raios nas nuvens.

Hipótese de Carregamento por Precipitação ⇒ A hipótese de carregamento por precipitação é uma das teorias que explicam a formação de cargas elétricas nas nuvens. Essa teoria sugere que a colisão e a fragmentação de gotículas de água e cristais de gelo dentro de nuvens de tempestade podem gerar cargas elétricas separadas.

Nas nuvens, existem regiões com grande concentração de gotículas de água e cristais de gelo em suspensão. Essas partículas são transportadas pelas correntes de ar dentro da nuvem e colidem entre si, gerando eletricidade estática. À medida que a nuvem cresce e se desenvolve, a força de convecção pode separar as cargas elétricas e gerar uma diferença de potencial elétrico entre as partes superior e inferior da nuvem.

A hipótese de carregamento por precipitação é uma das hipóteses que explicam a formação de cargas elétricas em nuvens de tempestade, juntamente com a hipótese de carregamento por convecção e a hipótese de carregamento por atrito. Acredita-se que esses três processos podem trabalhar em conjunto para produzir as cargas elétricas observadas nas nuvens de tempestade.

Hipótese de carregamento por runaway breakdown ⇒ *Runaway breakdown* é um fenômeno atmosférico que pode ocorrer em nuvens de tempestade e que pode contribuir para a geração de descargas elétricas, incluindo raios. Esse processo envolve a ionização do ar em altas altitudes, o que pode ocorrer devido à interação entre partículas carregadas, como elétrons, e moléculas de ar.

Quando uma nuvem de tempestade é carregada eletricamente, pode ocorrer a formação de um

campo elétrico muito forte no seu interior. Esse campo elétrico pode acelerar elétrons a altas velocidades, que colidem com moléculas de ar e ionizam o gás. Quando isso acontece, é possível que ocorra um processo de cascata, em que as partículas carregadas geradas pelas colisões aceleram ainda mais elétrons, gerando mais ionização e assim por diante. Esse processo de cascata é chamado de *runaway breakdown*.

O resultado do *runaway breakdown* é a formação de uma região altamente ionizada na nuvem de tempestade, que pode contribuir para a geração de descargas elétricas, incluindo raios. O processo de avalanche de elétrons gerado pelo *runaway breakdown* é capaz de produzir elétrons de alta energia, que podem colidir com moléculas de ar e gerar novas ionizações, aumentando ainda mais a corrente elétrica na nuvem e a probabilidade de descargas elétricas.

2 Temas impactantes, dúvidas e questionamentos

- Embora sejam hipóteses elaboradas e até sofisticadas, sempre há algum ponto onde a hipótese falha. Uma hipótese não explica um aspecto, porém a que explica o aspecto faltante gera lacunas a serem preenchidas. De fato, me parece ser uma coleção de processos ou hipóteses um modelo mais adequado para o problema do carregamento da nuvem de tempestade. Nota: seria complicado, se não impossível, fazer a comprovação ou prova de qualquer hipótese a respeito, mesmo porque só temos acesso a informações fragmentadas. Por exemplo: consigo gerar eletricidade estática friccionando meus pés no carpete, se utilizar meias - consigo demonstrar como funciona a eletrização por fricção. Porém, quando se trata de ampliar este conhecimento para que englobe o carregamento das nuvens, a história é outra. Surgem perguntas: como se define realmente a eletricidade em questão? é estática, convencional ou não convencional? São íons perambulando pela nuvem, partículas eletrizadas se movendo, ou existe uma nuvem eletrônica altamente energética em algum canto da nuvem que seja responsável pelo acúmulo de cargas na nuvem? Isoladamente, conseguimos medir e classificar tais fenômenos, porém, em conjunto em um ambiente como uma nuvem, não se consegue mais do que elaborar modelos que dê talvez um horizonte próximo de previsão. Neste ponto, entra em questão o paradoxo do pato: se meu modelo é de uma ordem a mais ou a menos que o de outra pessoa, qual o problema? A princípio nenhum!!!

Aula 7 - Campos Elétricos em Tempestades

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- ***Campos Elétricos em Tempestades*** \Rightarrow Para medir o campo elétrico atmosférico, é comum utilizar técnicas que consideram a diferença de potencial em uma coluna vertical de ar, com altura Δz em relação ao solo. A partir dessa relação, é possível determinar o campo elétrico através da fórmula $E = \frac{\Delta V}{\Delta z}$, em que o sinal do campo elétrico é o mesmo da diferença de potencial. Em condições de tempo bom, o campo eletrostático atmosférico é verticalmente orientado para baixo, ou seja, é negativo, pois a atmosfera é carregada positivamente, enquanto o solo possui uma polaridade oposta, com cargas negativas.

Durante as tempestades, os flashes negativos de descargas CG e IC são predominantes próximos e abaixo delas. Estudos recentes mostram que os fortes campos elétricos dentro das tempestades geram fluxos de elétrons de alta energia, cujas variações são estudadas por meio do Thunderstorm Ground Enhancement (TGE), um novo campo de estudo. O processo de avalanche de elétrons na atmosfera, também chamado de Relativistic Runaway Electron Avalanche ou Runaway Breakdown, é utilizado para correlacionar matematicamente o fluxo de partículas mensuradas com as perturbações do campo elétrico atmosférico local (entre -10 e -30 kV/m) por meio de sensores de campo elétrico.

- ***Desenvolvimento de Campo Elétrico Na Nuvem de Tempestade*** \Rightarrow Os fenômenos atmosféricos conhecidos como descargas elétricas são gerados a partir de campos elétricos que podem atingir valores entre 100 e 300 kV/m. Entretanto, para que esses campos elétricos surjam na atmosfera, são necessários outros processos. Atualmente, existem dois tipos de mecanismos

aceitos para o carregamento dos hidrometeoros e a separação de cargas elétricas: os mecanismos indutivos e os mecanismos não-indutivos. Esses processos são responsáveis por gerar a eletricidade necessária para as descargas elétricas na atmosfera.

Mecanismos não indutivos \Rightarrow Os mecanismos não indutivos de carregamento de hidrometeoros são aqueles que não envolvem diretamente a indução eletromagnética, mas sim a transferência de elétrons por colisões entre partículas. Dentre os principais mecanismos não indutivos, destacam-se:

- **Camada elétrica dupla:** De acordo com essa hipótese, é assumido que ocorre a formação de uma camada elétrica dupla nas interfaces entre a água e o ar, o gelo e o ar ou o gelo e a água, devido à orientação das moléculas de água. Em relação à separação de cargas, geralmente há mais cargas removidas da região externa da camada dupla do que das internas, resultando em um excesso de cargas internas deixadas para trás após a colisão das partículas.
- **Efeito triboelétrico:** É o processo de geração de eletricidade estática por atrito entre dois materiais diferentes. Quando as gotas de água ou cristais de gelo colidem uns com os outros, ou com outros objetos na nuvem, pode ocorrer a transferência de elétrons, gerando a separação de cargas.
- **Efeito termoelétrico:** É o processo de geração de eletricidade estática por variações de temperatura. Quando há variações de temperatura dentro da nuvem, como na região de crescimento do granizo, podem ocorrer gradientes de potencial elétrico, gerando a separação de cargas.
- **Efeito fotoelétrico:** É o processo de geração de eletricidade estática por radiação eletromagnética. Quando a luz solar ou outras formas de radiação atingem a nuvem, pode ocorrer a ionização de átomos e moléculas, gerando elétrons livres que podem se depositar na superfície dos hidrometeoros e gerar a separação de cargas.

Esses mecanismos podem atuar em conjunto com os mecanismos indutivos na geração de campos elétricos na atmosfera e na formação de descargas atmosféricas.

Mecanismos Indutivos \Rightarrow O mecanismo indutivo de transporte de carga em nuvens é baseado na separação de cargas elétricas por meio do movimento relativo entre as partículas eletricamente carregadas. Esse movimento relativo pode ser causado pelo processo de colisão entre as partículas, pela sedimentação de partículas com diferentes tamanhos ou pela interação de partículas com o campo elétrico da nuvem.

Uma vez que as partículas estão eletricamente carregadas, elas são sujeitas à força elétrica que age sobre elas no campo elétrico da nuvem. As partículas menores são geralmente carregadas positivamente, enquanto as maiores são carregadas negativamente. Isso ocorre porque as partículas menores têm uma maior relação superfície-volume do que as maiores, o que as torna mais propensas a perder elétrons durante a colisão ou interação com o campo elétrico.

Conforme as partículas carregadas se movem na nuvem, elas criam um campo elétrico local que pode induzir a carga em outras partículas próximas. Esse processo de indução e transporte de carga pode continuar até que as partículas atinjam uma camada onde o arrasto ascendente não é mais capaz de mantê-las suspensas, e então começam a cair em direção à superfície como precipitação.

Esse mecanismo de transporte de carga pode ocorrer em todas as camadas da nuvem, desde a região inferior onde a coalescência das gotas é predominante até a região superior onde a formação de gelo e granizo ocorre. O resultado final desse processo é uma separação de cargas elétricas, com a região superior da nuvem carregada negativamente e a região inferior carregada positivamente, o que pode levar ao surgimento de uma descarga elétrica.

Mecanismo de Captura de Íons \Rightarrow O mecanismo de captura de íons é um dos mecanismos indutivos de transporte de carga que ocorre na nuvem durante a formação de descargas elétricas. Esse mecanismo envolve a captura de íons presentes na atmosfera pela superfície das gotas de água e cristais de gelo na nuvem.

Os íons presentes na atmosfera são formados por processos como a radiação cósmica, raios-X solares e raios cósmicos. Quando esses íons são capturados pela superfície das gotas de água e cristais de gelo, eles transferem sua carga elétrica para essas partículas. Como resultado, as partículas ficam eletricamente carregadas.

Esse processo é importante para o carregamento da nuvem, pois as partículas carregadas eletricamente podem interagir com outras partículas na nuvem e transferir sua carga elétrica. Isso pode levar à formação de regiões carregadas positiva e negativamente na nuvem, o que é um pré-requisito para a ocorrência de descargas elétricas.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Comprovação de teoria: O carregamento de uma nuvem de tempestade e consequente formação de campo elétrico são resultados de vários processos que ocorrem simultaneamente. Problema complexo de se resolver. Existe teoria do tudo para os raios?

Aula 8 - Revisão do Conteúdo

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Roadmap

1.1 Aula 1 - Engenharia das Descargas Atmosféricas

Aula expositiva sobre o tema engenharia dos raios. O objetivo da disciplina é versar sobre raios de A a Z, capacitando o aluno a compreender, modelar e explicar os diversos fenômenos da Eletricidade atmosférica. Descargas atmosféricas são fenômenos comuns, já observados desde a antiguidade. Porém, pouco ou nada se sabe sobre sua origem. As descargas atmosféricas são fenômenos com grande impacto em nossa rotina, tanto econômicos, ambientais quanto sociais. As mortes por raios, embora sejam numericamente pouco significativas, são um tema sério e relevante, embora os impactos ambientais e econômicos sejam de maior monta e também importantes. Há muitos mitos e verdades acerca dos raios, entre os quais vale citar que pequenos objetos de metal que comumente temos junto ou no corpo não são suficientes para que o raio entenda que há um caminho de menor resistência para o solo e que para-raios não são certeza de que a estrutura ou pessoa não sejam atingidas por raios. Do ponto de vista normativo, já existem no Brasil normas ABNT e NRs, inclusive leis municipais regulamentando projetos e instalações de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) e segurança de instalações elétricas, de modo a mitigar os efeitos dos raios. A mitologia mundial é repleta de contos e histórias sobre os raios, se referindo a um deus/deusa particular, ou à comunicação divina, ou mesmo seres folclóricos que dão origem a raios.

1.2 Aula 2 - Atividade Remota

Atividade remota sobre o *Vídeo 1 - Mistérios da Ciência: O Poder dos Raios (Dublado) - Documentário*.

Sinopse: Os raios são mais rápidos que uma bala e seis vezes mais quentes que a superfície do sol. Eles duram menos de uma fração de segundo e podem transformar areia em vidro. Diariamente cerca de oito milhões de raios atingem a Terra. Embora este fenômeno natural seja um dos mais observados, ele ainda está envolto em mistérios. Neste episódio, os telespectadores irão acompanhar a incrível jornada de um raio desde o espaço até o interior do corpo humano. Para isso, iremos à Darwin, na Austrália, cidade onde acontecem algumas das tempestades com relâmpagos mais violentas da Terra. No centro de uma monstruosa nuvem de tempestade observaremos as forças misteriosas que provocam um raio. Novas descobertas dramáticas e experiências chocantes revelam que os raios são um dos fenômenos mais estranhos, destrutivos e importantes do planeta.

Sugestão do Professor: levar ao menos uma dúvida para discussão em sala de aula.

1.3 Aula 3 - Formação de Nuvens de Tempestade

As nuvens de tempestade se formam quando uma parcela de ar quente e úmido sobe na atmosfera e se resfria, causando a condensação do vapor de água presente no ar. Existem vários fatores que podem causar essa elevação do ar, como os efeitos orográficos (quando o ar úmido é forçado a subir ao encontrar uma montanha, por exemplo), as correntes de advecção (quando o ar quente é transportado horizontalmente e se encontra com uma massa de ar frio), a convergência de ventos e a convecção (quando o Sol aquece a superfície terrestre e gera correntes ascendentes de ar quente). Quando essas parcelas de ar quente e úmido se elevam, formam as nuvens de tempestade, que podem resultar em raios, trovões, chuvas fortes e outros fenômenos meteorológicos intensos. A receita de produção de nuvens envolve 2 elementos: parcela de ar úmido (Combustível) e um processo de resfriamento e condensação (Catalisador). Dentre os diversos tipos de nuvem, a que é comumente associada às tempestades e tempo ruim é a *Cumulonimbus*, cujo desenvolvimento envolve 3 fases (Para algumas bibliografias, 4): Estágio de Desenvolvimento, Estágio de Maturidade, Estágio de Dissipação e (para algumas bibliografias) Estágio de Dissipação Completa.

1.4 Aula 4 - Campo magnético terrestre na alta atmosfera, camadas ionosféricas

A magnetosfera é a região do espaço em torno da Terra que é influenciada pelo campo magnético terrestre, formando uma espécie de escudo protetor contra as partículas carregadas que vêm do Sol. A plasmasfera é uma parte da magnetosfera que contém plasma denso, com densidade de elétrons mais elevada que a média. Já a ionosfera é uma camada da atmosfera terrestre que contém íons e elétrons, e que se estende desde cerca de 50 km a mais de 1.000 km de altitude. A ionosfera é importante para as

comunicações de rádio de longa distância, refletindo as ondas de rádio de volta à Terra. Todas essas regiões têm importância significativa para as comunicações e para a proteção contra as partículas carregadas do Sol.

1.5 Aula 5 - Eventos Luminosos Transientes

Eventos Luminosos Transientes (ELTs) são fenômenos luminosos de curta duração que ocorrem na atmosfera superior da Terra, como flashes de raios, explosões solares, auroras, entre outros. Esses eventos geram perturbações na ionosfera e na magnetosfera, afetando a propagação de sinais de rádio e sistemas de navegação, além de poderem causar danos em satélites e redes elétricas. Os ELTs são estudados por cientistas para melhor compreender a dinâmica da atmosfera superior da Terra e seus efeitos no ambiente espacial e terrestre.

1.6 Aula 6 - Teoria do Carregamento de Tempestades

Recentes pesquisas sugerem que o modelo atual de tempestades consiste em uma configuração tripolo. Durante um flash nuvem-solo com grande momento de carga, os flashes negativos têm uma duração notavelmente mais curta em comparação aos flashes positivos, indicando que os *flashes* de polaridade negativa que se conectam com o solo são cerca de dez vezes mais comuns do que os flashes de polaridade positiva. Isso se deve à proximidade do solo com as cargas negativas localizadas na região inferior das tempestades.

Existem várias hipóteses para explicar como as nuvens se carregam eletricamente, sendo as principais:

- **Carregamento por convecção:** Nessa hipótese, as correntes de convecção dentro da nuvem separariam as cargas, produzindo um excesso de cargas na parte superior e uma deficiência de cargas na parte inferior da nuvem.
- **Carregamento por precipitação:** Nessa hipótese, as gotículas de água ou cristais de gelo que se formam dentro da nuvem colidem e se separam eletricamente, gerando uma separação de cargas.
- **Runaway breakdown:** Nessa hipótese, elétrons livres na atmosfera colidem com átomos e moléculas da nuvem, ionizando-os e criando um processo em cadeia que resulta em uma separação de cargas dentro da nuvem.

Essas hipóteses podem ocorrer simultaneamente ou isoladamente, pois nenhuma explica totalmente o efeito do carregamento das diversas camadas da nuvem de tempestades.

1.7 Aula 7 - Campos Elétricos em Tempestades

Para medir o campo elétrico atmosférico, é utilizada a diferença de potencial em uma coluna vertical de ar com altura Δz em relação ao solo. O campo eletrostático é verticalmente orientado para baixo em condições de tempo bom, pois a atmosfera é carregada positivamente, enquanto o solo é negativo. Durante tempestades, flashes negativos de descargas CG e IC são predominantes. Os fortes campos elétricos dentro das tempestades geram fluxos de elétrons de alta energia, estudados por meio de Thunderstorm Ground Enhancement (TGE), e o processo de avalanche de elétrons na atmosfera, também chamado de Runaway Breakdown, é utilizado para correlacionar o fluxo de partículas com as perturbações do campo elétrico atmosférico local.

Aula 9 - Iniciação de um raio e tipos de raios

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- **Processo de um Relâmpago** \Rightarrow O processo de um relâmpago é dividido em várias fases. Primeiramente, o raio começa em regiões da nuvem com um forte campo elétrico. Uma descarga pouco visível, conhecida como líder escalonado (stepped leader), move-se em saltos em direção ao solo. Quando o líder se aproxima do solo, um líder ascendente (upward leader) é liberado a partir de objetos elevados próximos ao solo, completando assim o canal do relâmpago. Com o canal completo, a descarga de retorno (return stroke) é iniciada, transportando cargas entre o solo e a nuvem com correntes de 10 kA até 150 kA. Devido ao aquecimento ôhmico, a temperatura no núcleo do canal do relâmpago pode atingir 30.000 K. A primeira descarga de retorno pode ser seguida por descargas de retorno subsequentes, cada uma delas precedida por um Dart Leader que se propagará pelo mesmo canal já ionizado. Essa série de descargas de retorno é composta por flashes de relâmpago, e o número de descargas de retorno subsequentes corresponde à multiplicidade dos flashes. Em geral, a duração total do flash é menor que 1 segundo, enquanto os intervalos de tempo entre as descargas de retorno são da ordem de 100 milissegundos.
- **Trovões** \Rightarrow Existem dois processos distintos que produzem trovões, cada um em frequências diferentes. O trovão é gerado principalmente pelo aquecimento rápido do canal condutivo do raio em resposta ao intenso fluxo de corrente [Few, 1969]. Durante um golpe típico, o pulso de corrente no canal condutor é da ordem de $3 \times 10^4 A$. Essa corrente aquece rapidamente o ar ($3 \times 10^4 K$ em $5 \times 10^{-6} s$), gerando uma pressão de $10^6 Pa$. A intensidade das pressões que se sobrepõem cria uma onda de choque que se propaga supersonicamente (acima de $3300 \frac{m}{s}$)

[Rakov and Uman, 2003]. Essas ondas de choque rapidamente decaem para ondas acústicas, e como resultado, cada golpe irradia ondas acústicas ao longo do comprimento do canal.

Os trovões produzidos por raios intra-nuvem apresentam baixas amplitudes e baixo pico de frequências se comparados com os trovões dos raios que atingem o solo (CG) [Holmes et al., 1971; Johnson, 2012]. O modelamento acústico requer um conhecimento da estrutura de propagação, ou seja, do ambiente. Infelizmente, as tempestades possuem estruturas atmosféricas complicadas e difíceis de medir. Devido a velocidade do som no ar ser proporcional ao quadrado da temperatura, a velocidade do som precisa também decrescer com a altitude, o que resulta em ondas acústicas refratadas para cima. Consequentemente, o trovão raramente é ouvido a mais de 25 km de distância de um raio, devido à refração [Fleagle, 1949].

Devido à variação de temperatura durante uma tempestade, da falta de precisão na avaliação das informações do vento acima da superfície e das diferentes topografias, geralmente não é possível avaliar com precisão os efeitos da refração sobre o sinal dos trovões. Os trovões viajam a partir do relâmpago na forma de ondas, devido à compressão súbita do ar em volta do canal do raio. Se o som da parte inferior do raio chegar a um observador antes das ondas sonoras da parte superior do raio, o trovão é ouvido pelo observador. Se as ondas sonoras fizerem uma curva para cima, para longe do observador, o relâmpago pode ser visto, mas os trovões não serão ouvidos.

- ***Tipos de Raios*** \Rightarrow 4 tipos básicos:

- ***Raio Nuvem-Solo (CG)***: Um raio nuvem-solo é uma descarga elétrica que ocorre entre uma nuvem e o solo. Esse tipo de raio pode ocorrer de duas maneiras: o raio pode sair da base da nuvem e atingir o solo, ou pode ser iniciado por uma descarga ascendente que parte do solo em direção à nuvem.

A descarga ascendente pode ser iniciada por objetos elevados no solo, como edifícios ou árvores, que criam um campo elétrico intenso o suficiente para ionizar o ar ao redor. Isso forma um canal de descarga que se estende em direção à nuvem, permitindo que a descarga elétrica viaje para cima do solo.

O raio nuvem-solo é geralmente mais intenso do que um raio intra-nuvem, pois a descarga elétrica deve viajar por uma distância maior e superar a resistência do ar para atingir o solo. A corrente elétrica em um raio nuvem-solo pode variar de algumas dezenas de milhares a centenas de milhares de amperes e pode produzir temperaturas no canal de descarga de até 30.000 Kelvin. Além disso, a rápida expansão do ar aquecido pode gerar uma onda de

choque que produz o trovão que ouvimos após a descarga elétrica.

- **Raio Intra-Nuvem (IC):** Um raio intra-nuvem é um tipo de descarga elétrica que ocorre completamente dentro de uma única nuvem de tempestade. É o tipo mais comum de raio, representando cerca de 80% de todos os raios que ocorrem na Terra.

Durante uma tempestade, as nuvens ficam eletricamente carregadas, com cargas positivas acumulando-se nas partes superiores e negativas nas partes inferiores. À medida que o campo elétrico dentro da nuvem aumenta, ocorre uma descarga elétrica entre as regiões carregadas. Este tipo de raio é chamado de intra-nuvem, pois não se conecta diretamente com o solo.

Os raios intra-nuvem podem se apresentar de várias formas, como ramificações ou descargas mais lineares, e podem durar vários segundos. Eles também podem ser responsáveis por fenômenos como trovões e relâmpagos que parecem piscar dentro da nuvem.

- **Raio Nuvem-Nuvem (CC):** O raio nuvem-nuvem é um tipo de descarga elétrica que ocorre entre duas nuvens eletricamente carregadas de polaridade oposta. Geralmente, as nuvens com carga elétrica oposta se aproximam e descarregam a energia acumulada na forma de um raio que pode ser visível ou não. Esse tipo de raio é menos comum do que o raio nuvem-solo ou o raio intra-nuvem, mas ainda assim é uma forma importante de transferência de energia elétrica na atmosfera. Os raios nuvem-nuvem podem ocorrer entre nuvens dentro de uma mesma tempestade ou entre nuvens de tempestades diferentes.

- **Raio Nuvem-Céu(CS):** O termo "raio nuvem-céu" é comumente usado para se referir a raios que se propagam da nuvem para a atmosfera superior, em vez de atingir o solo. Esse tipo de raio é menos comum do que raios nuvem-solo, mas ainda pode ser perigoso, especialmente para aviões e outras aeronaves que voam na região afetada.

Os raios nuvem-céu geralmente ocorrem em tempestades elétricas muito intensas, onde a carga elétrica acumulada na nuvem é tão grande que a descarga elétrica pode se propagar para a atmosfera superior, atingindo altitudes de até 80 km acima do solo. Esse tipo de raio é conhecido como "sprite" e é um fenômeno atmosférico fascinante.

Ao contrário dos raios nuvem-solo, os raios nuvem-céu não produzem trovões audíveis, pois o som produzido pela descarga elétrica se propaga para o espaço aberto, sem atingir a superfície terrestre. No entanto, as ondas de rádio geradas pela descarga elétrica podem ser detectadas por equipamentos de rádio amador e científicos, permitindo que os pesquisadores estudem esses fenômenos com mais detalhes.

• **Outros Tipos de Raios** ⇒

- ***Raio Quase-Horizontal ou Aranha:*** O raio quase-horizontal, também conhecido como raio aranha, é um tipo de raio que se desenvolve horizontalmente a partir de uma nuvem tempestuosa. Esse tipo de raio é mais comumente observado em tempestades de vento ou tempestades de granizo. O raio quase-horizontal se parece com uma teia de aranha, com raios secundários se estendendo a partir do raio principal.

Esse tipo de raio é diferente dos raios nuvem-solo, nuvem-nuvem e intra-nuvem, que se desenvolvem verticalmente. O raio quase-horizontal ocorre quando o campo elétrico horizontal na base da nuvem é suficientemente forte para ionizar o ar e produzir um raio que se propaga horizontalmente. À medida que o raio se expande, ele pode criar ramos secundários que se estendem horizontalmente, dando a aparência de uma teia de aranha.

O raio quase-horizontal é uma forma menos comum de raio e pode ser mais difícil de observar do que outros tipos de raios, já que geralmente ocorre em altitudes mais elevadas e pode ser obscurecido por outras nuvens. No entanto, é um fenômeno fascinante e único que continua a intrigar cientistas e entusiastas do clima.

- ***Descargas Tornádicas:*** As descargas tornádicas, também conhecidas como raios de tornado, são um tipo de descarga elétrica que ocorre durante tornados e tempestades severas. Essas descargas são diferentes dos raios normais, pois ocorrem em um ambiente altamente dinâmico e em um padrão circular em torno do tornado.

As descargas tornádicas podem assumir várias formas, incluindo filamentos finos, bolas de fogo, esferas luminosas, entre outras. Elas são mais comuns em tornados intensos e podem ser extremamente perigosas para pessoas que estejam perto do tornado.

As descargas tornádicas ocorrem porque os tornados criam um forte campo elétrico, que pode ionizar o ar e criar um caminho para a corrente elétrica. A intensidade da descarga pode variar de alguns ampères a centenas de milhares de ampères.

- ***Raios Estratosféricos:*** Os Raios Estratosféricos são eventos elétricos transientes que ocorrem na estratosfera, entre cerca de 20 e 50 km de altitude. Eles foram descobertos na década de 1980, quando os astronautas da nave espacial Columbia observaram uma série de flashes de luz azul e vermelha acima de tempestades em desenvolvimento.

Esses raios são muito diferentes dos raios convencionais que ocorrem na troposfera, tanto em termos de sua localização quanto de sua aparência. Eles se propagam horizontalmente ao invés de verticalmente, e são muito mais extensos do que os raios normais, podendo se estender por centenas de quilômetros. Além disso, eles geralmente ocorrem em conjunto com as tempestades, mas não são diretamente associados aos raios intra-nuvem ou nuvem-

solo que produzem trovões.

Os raios estratosféricos são produzidos por descargas elétricas muito poderosas que ocorrem no interior das tempestades, e que produzem pulsos de radiação eletromagnética de baixa frequência. Esses pulsos, por sua vez, interagem com a atmosfera superior, produzindo as características luzes azuis e vermelhas.

Os raios estratosféricos são extremamente raros e difíceis de detectar. A maioria das pessoas nunca viu um, e eles só foram observados a partir do solo em algumas ocasiões. No entanto, eles são um tópico de grande interesse para os cientistas, porque sua compreensão pode ajudar a melhorar nosso conhecimento sobre os processos elétricos nas tempestades, bem como sobre as interações entre a atmosfera superior e a radiação cósmica.

- **Raios Piroclásticos:** Os raios piroclásticos são uma forma de descarga elétrica atmosférica que ocorre durante erupções vulcânicas explosivas. Durante uma erupção, cinzas, gases e outros materiais são ejetados para a atmosfera, criando nuvens de cinzas carregadas eletricamente. Essas nuvens podem gerar raios piroclásticos, que se assemelham aos raios comuns, mas são muito mais poderosos e perigosos.

Os raios piroclásticos são criados quando as partículas carregadas eletricamente na nuvem de cinzas colidem e se separam, criando uma diferença de potencial elétrico. Quando essa diferença de potencial se torna grande o suficiente, uma descarga elétrica pode ocorrer, criando um raio piroclástico.

Esses raios são extremamente perigosos, pois podem percorrer grandes distâncias e causar incêndios, explosões e danos estruturais. Eles também podem ser acompanhados por trovões e fortes rajadas de vento, tornando as condições ainda mais perigosas para aqueles que estão próximos à erupção vulcânica.

- **Raios Nuvem-Ar:** Raios Nuvem-Ar, também conhecidos como Descargas Elétricas de Nuvem para Ar (DENA), são um tipo de raio que ocorre dentro de uma nuvem de tempestade e descarrega para o ar, em vez de atingir o solo. Essas descargas elétricas são semelhantes aos raios intra-nuvem, mas em vez de permanecer dentro da nuvem, eles se estendem para fora dela.

Os raios nuvem-ar são geralmente menos intensos e menos comuns do que os raios nuvem-solo, mas ainda podem ser perigosos para aeronaves que voam através de uma tempestade com raios, uma vez que os raios nuvem-ar podem se estender por vários quilômetros além da nuvem. Além disso, esses raios podem ser um indicador de outras condições meteorológicas perigosas, como granizo e ventos fortes, que podem afetar a aviação e a

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Poderia dizer que estou impressionado com a complexidade do assunto, inclusive dizer que estou impressionado com o fenômeno dos raios, mas seria mentir para mim mesmo. O que mais me impressiona é, ao ver uma simulação de descarga atmosférica como a vista em sala de aula, imaginar minúsculos centros de carga por onde o raio dá saltos. No artigo do Rakov que utilizamos para fazer as simulações de descargas, não me lembro quando, a descrição do artigo dava a entender que as distribuições de carga no centro da nuvem são praticamente iguais, ou seja, no centro de carga não há diferenciação de concentração de carga que seja significativa. Imagine que este centro de carga está em movimento, é um corolário que estas cargas também estarão. É razoável que, dentro do centro de carga, haja uma diferenciação maior que permita um campo elétrico de ruptura, e que o raio comece a partir deste ponto. De resto, é razoável supor que estes minúsculos centros de carga se distribuam aleatoriamente ao longo do assim suposto centro de carga e conseqüentemente, na nuvem. O resto, é seleção de Bernoulli.....

Aquele vídeo do algoritmo *Depth First* mostrando uma simulação simples de raio, utilizando para isto a construção de um labirinto aleatório, não é simples nem está incompleto: está mal explicado!!! Poderíamos montar um labirinto em 3D somente com as idéias acima apresentadas, calcular correntes de pico através dos equacionamentos do Rakov e tentar apresentar uma nova teoria de formação de raios. É só uma idéia!!!

Aula 10 - Energia dissipada durante um raio

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- **Energia dissipada durante o processo de um raio** \Rightarrow A energia dissipada por um raio varia muito e depende de vários fatores, como a carga elétrica do raio, a distância percorrida pelo raio, o tipo de solo e as condições atmosféricas locais. Em média, estima-se que um raio típico carregue uma carga elétrica de cerca de 30 Coulombs e tenha uma corrente elétrica de cerca de 30.000 Ampères. Essa corrente elétrica pode gerar uma energia de cerca de 1 bilhão de joules, o que é equivalente à energia necessária para acender uma lâmpada de 100 watts por mais de 3 anos. No entanto, é importante lembrar que esses números são apenas médias e que a energia dissipada por um raio pode ser muito maior em certos casos, como quando atinge um objeto ou estrutura específica.
- **Indo mais a fundo** \Rightarrow As descargas elétricas atmosféricas apresentam dois tipos diferentes de correntes. A primeira e mais intensa é a corrente de retorno, que tem uma intensidade entre 10 e 100 kA e duração de 100 a 200 μs . O pico de corrente estimado para uma corrente de retorno é de cerca de 300 kA em regiões temperadas e 450 a 500 kA em regiões tropicais. O outro tipo de corrente é a corrente lateral corona, que corresponde ao movimento radial de íons e elétrons em direção ao solo. A potência térmica dissipada é de cerca de $2,2 \cdot 10^10 W$, com um valor de corrente inicial de $I_0 = 22$ kA. As descargas atmosféricas contêm uma enorme quantidade de energia, o que pode resultar em incêndios florestais, mortes e ferimentos em animais, danos em edifícios, sistemas de comunicação, linhas de energia e sistemas elétricos. Aviões e ônibus espaciais também não estão totalmente seguros contra raios. A maior parte da energia é dissipada pela parte resistiva da coluna de ar, que aparece como calor ou energia térmica que eleva

a temperatura do canal. A temperatura da coluna é tão elevada que produz perturbações acústicas conhecidas como "trovões". A energia total radiada considerando a corrente de retorno e a corrente lateral corona como uma só corrente (return stroke-lateral corona) é da ordem de $3,23 \cdot 10^3 J$. A energia térmica alcança um valor de pico da ordem de $10^{10} W$.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Imagino como seria a equação desta energia: um mesmo evento dissipa potência através de 3 rotas distintas (Acústica, Luminância e Efeito Joule) e o que sobra ainda é capaz de fazer um estrago enorme aqui embaixo. Ainda bem que vamos ver o assunto em detalhes mais à frente do curso, estou interessado nestas equações.

Aula 11 - Tempestades como geradores de energia

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- ***Tempestades Como Geradores Elétricos*** \Rightarrow As tempestades podem ser consideradas verdadeiros geradores elétricos naturais, capazes de produzir tensões e correntes elétricas de grande magnitude. O processo de formação de cargas elétricas nas nuvens se dá através de diversos mecanismos, tais como a colisão entre as partículas de gelo e água presentes na nuvem, a separação de cargas na interface entre o gelo e a água, o processo de coalescência das gotículas de água, entre outros.

Esses processos acabam por gerar um gradiente de potencial elétrico dentro da nuvem, podendo atingir valores da ordem de milhões de volts. Quando esse gradiente é suficientemente grande, ocorre uma descarga elétrica, que pode ser observada na forma de relâmpagos.

Durante a descarga elétrica, ocorre uma intensa corrente elétrica que se propaga através da atmosfera e é capaz de aquecer o ar a temperaturas da ordem de 30.000 graus Celsius. Esse aquecimento acaba por expandir rapidamente o ar ao redor do canal da descarga, gerando ondas sonoras que são percebidas como trovões.

Além dos relâmpagos, as tempestades também podem produzir outros fenômenos elétricos, tais como as correntes de retorno, que ocorrem quando a descarga elétrica é atraída pelo solo ou por objetos próximos à superfície terrestre, e os raios globulares, que são descargas elétricas esféricas que ocorrem em condições especiais e podem atingir até vários metros de diâmetro.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

É um tema recorrente na minha cabeça não ter a visão macro da dinâmica - seria mais fácil simplesmente modelar a tempestade como um grande gerador de Van Der Graaf e ser feliz, mas não é assim que funciona. Modelar a atmosfera como um grande gerador é útil, mas não passa de um modelo que representa parcialmente a realidade. Substituir um fenômeno esparsos por parâmetros concentrados é o que a gente mais fez no curso, porém, o que o modelamento não mostra são os detalhes: o que acontece na atmosfera é, em muitos aspectos, diferente do que o modelo representa.

Aula 12 - Circuito Elétrico Atmosférico Global

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

- ***Circuito Elétrico Atmosférico Global*** \Rightarrow é possível modelar a atividade elétrica da Terra e sua atmosfera com um circuito elétrico global. Este modelo é composto por diferentes elementos elétricos, tais como fontes de energia, resistores e capacitores, que representam os processos elétricos que ocorrem na Terra e na sua atmosfera.

Por exemplo, a fonte de energia primária no circuito elétrico global é a radiação solar, que é absorvida pela atmosfera e pela superfície terrestre, gerando diferenças de potencial elétrico. Estas diferenças de potencial elétrico são transportadas por correntes elétricas atmosféricas e terrestres, através de resistores que representam a resistência dos diferentes materiais que compõem a Terra e sua atmosfera.

Além disso, existem capacitores que representam as diferentes camadas da atmosfera e da ionosfera, que armazenam cargas elétricas e geram campos elétricos. Estes campos elétricos interagem com as partículas carregadas presentes na atmosfera e na ionosfera, gerando diferentes fenômenos, tais como raios, auroras e perturbações geomagnéticas.

Assim, o modelo do circuito elétrico global pode ser útil para entender e descrever os processos elétricos que ocorrem na Terra e na sua atmosfera, permitindo prever e detectar eventos como tempestades geomagnéticas e perturbações atmosféricas que possam afetar a tecnologia e as comunicações.

Circuito Elétrico Atmosférico Local \Rightarrow entender a distribuição de carga e os fenômenos de acoplamento na atmosfera através de modelos de circuitos elétricos atmosféricos locais pode fornecer informações importantes sobre o comportamento eletrostático e eletrodinâmico da

baixa atmosfera da Terra. Além disso, permite a análise da geração e propagação de enormes fluxos de cargas elétricas das nuvens para o solo ou linhas de transmissão, o que pode levar a perturbações nos sistemas condutores de corrente elétrica. A compreensão desses fenômenos é essencial para garantir a segurança e confiabilidade das redes elétricas e de telecomunicações.

Um circuito elétrico atmosférico local é um modelo que representa a distribuição de cargas elétricas e correntes na atmosfera em uma região específica. Ele pode ser usado para estudar os efeitos da atividade elétrica na atmosfera, como relâmpagos, tempestades e auroras, bem como seus efeitos em sistemas elétricos, como linhas de transmissão de energia. O modelo inclui elementos como capacitores, indutores e resistores, que representam as diferentes características da atmosfera, como sua condutividade elétrica, sua capacidade de armazenamento de carga e a presença de campos magnéticos. O circuito elétrico atmosférico local pode ser usado para simular e prever o comportamento da atmosfera em uma determinada região, o que pode ser útil para diversos fins, como a prevenção de danos causados por descargas elétricas em equipamentos elétricos e a proteção de infraestrutura crítica, como torres de transmissão e antenas.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Mesmo da aula anterior.

Aula 13 - Física das descargas atmosféricas

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Contextualização A física das descargas atmosféricas é um campo de estudo que se dedica a compreender os processos físicos envolvidos nas descargas elétricas que ocorrem na atmosfera, como os raios.

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais de alta energia que envolvem a transferência de cargas elétricas entre nuvens, entre nuvens e a Terra, ou dentro de uma única nuvem. Elas ocorrem devido a uma diferença de potencial elétrico significativa entre duas regiões na atmosfera, que pode ser causada por processos de eletrificação das nuvens, movimento vertical de partículas carregadas, entre outros fatores.

Existem vários tipos de descargas atmosféricas, sendo os raios nuvem-terra (cloud-to-ground) os mais conhecidos e estudados. Esses raios são caracterizados por uma corrente elétrica intensa que percorre um caminho condutor entre uma nuvem carregada eletricamente e a superfície da Terra. Essa corrente é composta por pulsos de alta velocidade chamados de líderes, que são descargas elétricas ascendentes e descendentes que procuram estabelecer um caminho condutor através do ar ionizado.

A formação de um raio envolve uma série complexa de processos físicos, incluindo a ionização do ar, a formação de líderes e o desenvolvimento de um canal condutor para a corrente elétrica. Durante o processo, ocorrem colisões entre partículas eletricamente carregadas, a geração de campos elétricos intensos, a criação de plasma e o aquecimento do ar, resultando em emissões de luz (relâmpagos) e sons (trovões).

A física das descargas atmosféricas é estudada utilizando uma combinação de observações em campo, experimentos laboratoriais e modelagem computacional. Os pesquisadores procuram entender os mecanismos fundamentais que governam a ocorrência, a propagação e os efeitos das descargas

atmosféricas, a fim de melhorar a previsão de tempestades e desenvolver medidas de proteção contra raios.

Modelo do Canal de Descargas Ao considerar o Modelo de Fonte-Carga para descrever a propagação de um Leader de relâmpago, fazemos a consideração de que a propagação é unidirecional e unipolar. Nesse modelo, a alteração do campo elétrico total no solo, produzido pelo Leader ao longo de um canal (L), pode ser descrita pela seguinte fórmula:

$$\Delta E = -\frac{\lambda_q}{2\pi\epsilon} \left[\frac{1}{D} - \frac{1+H_T^2}{\sqrt{H_T^2+D^2}} \right] \quad (1)$$

Onde $D = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$. Se considerarmos o processo do líder escalonado e da descarga de retorno, a carga elétrica final será reduzida a um ponto onde a variação de carga é $\Delta Q = \lambda_q H_T$. Isso ocorre porque a descarga de retorno neutraliza a carga elétrica do líder escalonado (Stepped Leader). Nesse caso, o campo elétrico pode ser definido da seguinte forma:

$$\Delta E = -\frac{2\Delta Q H_T}{4\pi\epsilon \sqrt{(H_T^2+D^2)^3}} \quad (2)$$

Modelo Leader Bi-direcional No modelo do Leader Bi-direcional, consideramos uma propagação bidirecional e bipolar do *Stepped Leader*, onde são admitidos dois canais de propagação a partir de um ponto inicial localizado em H_T , com orientações e polaridades opostas. Nesse caso, a distribuição de carga λ_q varia linearmente em relação ao comprimento do canal do líder escalonado.

Por assumir a mesma velocidade para os líderes positivos e negativos, a variação total do campo elétrico em solo, produzido pelo canal do líder, pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta E = \frac{K}{2\pi\epsilon} \left[\frac{H_T}{\sqrt{4H_T^2+D^2}} \right] + \frac{K}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{2H_T + \sqrt{4H_T^2+D^2}}{D} \right] \quad (3)$$

sendo $\lambda_q = -KH_T$. A variação final do campo elétrico no solo após este processo pode ser calculado pela expressão:

$$\Delta E = \frac{\Delta Q}{4\pi\epsilon} \left[\frac{-2H_T}{\sqrt{4H_T^2+D^2}} + \ln \left(\frac{2H_T + \sqrt{4H_T^2+D^2}}{D} \right) \right] \quad (4)$$

onde $\Delta Q = KH_T^2$ e demais variáveis no S.I.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Nada que os livros e artigos não possam sanar.

Aula 14 - Revisão do Conteúdo

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Roadmap

1.1 Iniciação de um raio e tipos de raio

A iniciação de um raio ocorre em diferentes etapas. Primeiro, há o desenvolvimento de um forte campo elétrico dentro de uma nuvem de tempestade. Isso resulta em uma descarga elétrica chamada de líder escalonado, que se move em direção ao solo em saltos. Quando o líder escalonado se aproxima do solo, ocorre a liberação de um líder ascendente a partir de objetos elevados próximos ao solo, completando o caminho para o raio.

Existem diferentes tipos de raios que podem ocorrer durante uma tempestade. Os mais comuns são os raios intra-nuvem (IC) e os raios nuvem-solo (CG). Os raios IC ocorrem dentro da nuvem, envolvendo o movimento de cargas elétricas entre diferentes regiões da mesma nuvem. Os raios CG são aqueles que se estendem do topo da nuvem até o solo, conectando a nuvem e o solo com uma descarga elétrica intensa.

Além desses, também existem outros tipos de raios menos comuns, como os raios nuvem-nuvem, que ocorrem entre diferentes nuvens, e os raios ascendentes, que se originam no solo e se propagam em direção à nuvem. Esses diferentes tipos de raios podem apresentar características distintas em relação à sua aparência, intensidade e duração.

O estudo dos diferentes tipos de raios é importante para entender os mecanismos envolvidos nas descargas elétricas atmosféricas e os riscos associados a elas, como incêndios, danos em estruturas e riscos para a segurança humana.

1.2 Energia dissipada durante um raio

Durante um raio, ocorre a dissipação de uma grande quantidade de energia. A descarga do raio consiste em diferentes correntes elétricas, sendo a mais intensa a corrente de retorno, que dura cerca de 100-200 microssegundos e tem uma intensidade entre 10.000 e 100.000 amperes. O pico de corrente estimado para a corrente de retorno pode chegar a 300.000 amperes em regiões temperadas e 450.000-500.000 amperes em regiões tropicais.

A dissipação de energia durante um raio ocorre principalmente devido à parte resistiva do canal de ar percorrido pela corrente elétrica. Essa dissipação se manifesta como calor ou energia térmica, aumentando a temperatura do canal do raio. A temperatura no núcleo do canal do raio pode atingir valores extremamente altos, da ordem de 30.000 Kelvin.

A energia total dissipada durante um raio é significativa e pode ter diferentes efeitos observáveis, como incêndios florestais, danos em estruturas, sistemas de comunicação, linhas de energia e sistemas elétricos. A energia térmica dissipada durante um raio pode chegar a um valor de pico em torno de 10 bilhões de watts (10^{10} W).

É importante compreender a dissipação de energia durante os raios para avaliar os riscos associados a eles e implementar medidas de proteção adequadas para prevenir danos e minimizar os perigos potenciais.

1.3 Tempestades Como Geradores de Energia

As tempestades são fenômenos atmosféricos que podem funcionar como poderosos geradores elétricos. Durante uma tempestade, ocorrem processos que levam à separação de cargas elétricas dentro das nuvens e entre as nuvens e a superfície da Terra. Isso cria um campo elétrico significativo, resultando em descargas elétricas, como raios.

A formação de nuvens de tempestade envolve a ascensão de ar quente e úmido, que, ao subir, esfria e condensa, formando gotículas de água e cristais de gelo. Durante esse processo, as colisões entre as partículas resultam na separação de cargas elétricas, com cargas positivas concentradas nas partes superiores das nuvens e cargas negativas nas partes inferiores.

Essa separação de cargas cria um campo elétrico verticalmente orientado dentro da nuvem. À medida que o campo elétrico se intensifica, ocorre a formação de líderes elétricos, que são descargas elétricas invisíveis que se movem em direção ao solo ou entre as nuvens.

Quando um líder elétrico alcança o solo ou entra em contato com outro líder elétrico, ocorre uma descarga elétrica visível conhecida como raio. O raio é uma descarga elétrica intensa e de curta duração que equilibra as cargas elétricas entre a nuvem e o solo ou entre as nuvens.

Durante a ocorrência de raios, correntes elétricas extremamente altas são geradas, atingindo valores de dezenas a centenas de milhares de amperes. Essas correntes elétricas resultam em uma dissipação significativa de energia, aquecendo o ar ao redor do canal do raio a temperaturas extremamente altas.

As tempestades, portanto, funcionam como geradores elétricos naturais, convertendo a energia potencial elétrica armazenada na separação de cargas em energia cinética durante as descargas elétricas dos raios. O estudo e compreensão desses processos são essenciais para a previsão e mitigação de riscos relacionados a raios e tempestades, bem como para o desenvolvimento de tecnologias de proteção contra descargas elétricas.

1.4 Circuito Elétrico Atmosférico Global e Local

Circuito Elétrico Atmosférico Global O Circuito Elétrico Atmosférico Global é um sistema complexo de correntes elétricas que ocorrem na atmosfera da Terra. Envolve a interação entre a ionosfera, a atmosfera inferior e a superfície terrestre, formando um circuito elétrico completo.

Na ionosfera, localizada a uma altitude de cerca de 60 a 1.000 km, ocorrem processos de ionização, nos quais partículas carregadas são formadas devido à interação com a radiação solar. Essa região é influenciada principalmente pela luz ultravioleta do Sol.

A atmosfera inferior, incluindo a troposfera e a estratosfera, é onde ocorrem os fenômenos meteorológicos, como tempestades e nuvens. Durante as tempestades, a separação de cargas elétricas cria campos elétricos intensos. Descargas elétricas, como raios, ocorrem para equilibrar essas cargas e transferir energia entre a atmosfera e a superfície terrestre.

A superfície da Terra, por sua vez, atua como uma parte condutora do circuito, permitindo a transferência de cargas elétricas entre a atmosfera e a terra. A topografia, a cobertura vegetal e a presença de corpos d'água afetam a distribuição e a intensidade das correntes elétricas.

Esse circuito elétrico global é influenciado por vários fatores, como a atividade solar, a composição da atmosfera, as características geográficas e as condições meteorológicas locais. Além disso, fenômenos como as correntes de jato, as frentes atmosféricas e as variações na condutividade atmosférica também desempenham um papel importante na dinâmica desse circuito.

O estudo do Circuito Elétrico Atmosférico Global é fundamental para entender os processos elétricos na atmosfera, a ocorrência de fenômenos meteorológicos e a influência das correntes elétricas na ionosfera. Também é relevante para o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e previsão de tempestades, bem como para a proteção de infraestruturas sensíveis a descargas elétricas, como sistemas de energia e comunicações.

Circuito Elétrico Atmosférico Local O Circuito Elétrico Atmosférico Local refere-se ao sistema de correntes elétricas que ocorrem em uma área específica da atmosfera durante a ocorrência de tempestades e descargas elétricas. É uma parte do Circuito Elétrico Atmosférico Global e está intimamente relacionado às condições meteorológicas locais.

Durante as tempestades, ocorre a separação de cargas elétricas dentro das nuvens, resultando na formação de campos elétricos intensos. Esses campos elétricos podem criar uma diferença de potencial significativa entre a nuvem e a superfície terrestre, estabelecendo assim um circuito elétrico local.

Nesse circuito, as nuvens atuam como a fonte de energia, fornecendo a carga elétrica e gerando campos elétricos intensos. As descargas elétricas, como os raios, ocorrem para equalizar essa diferença de potencial, permitindo a transferência de carga elétrica entre a nuvem e a superfície terrestre.

A superfície terrestre desempenha um papel importante como uma parte condutora do circuito. Através de objetos elevados, como edifícios, árvores ou montanhas, ocorre a ionização do ar e a formação de líderes ascendentes, que são canais condutivos que se estendem em direção à nuvem. Esses líderes ascendentes são responsáveis pela formação dos canais de retorno, nos quais ocorre a descarga de retorno, conectando a nuvem à superfície terrestre.

O Circuito Elétrico Atmosférico Local é influenciado por uma variedade de fatores, incluindo a intensidade das tempestades, a presença de partículas carregadas na atmosfera, a condutividade atmosférica e as características da superfície terrestre. A topografia, a presença de corpos d'água e a vegetação também podem afetar a dinâmica desse circuito.

O estudo do Circuito Elétrico Atmosférico Local é essencial para compreender a geração de descargas elétricas, a formação de raios e os efeitos associados, como trovões e fenômenos luminosos transientes, como os sprites. Além disso, é importante para a proteção de infraestruturas e para a segurança humana durante tempestades, permitindo o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e previsão de descargas elétricas.

1.5 Física das Descargas Atmosféricas

A física das descargas atmosféricas é um campo de estudo que se dedica a compreender os processos físicos envolvidos nas descargas elétricas que ocorrem na atmosfera, como os raios.

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais de alta energia que envolvem a transferência de cargas elétricas entre nuvens, entre nuvens e a Terra, ou dentro de uma única nuvem. Elas ocorrem devido a uma diferença de potencial elétrico significativa entre duas regiões na atmosfera, que pode ser causada por processos de eletrificação das nuvens, movimento vertical de partículas carregadas,

entre outros fatores.

Existem vários tipos de descargas atmosféricas, sendo os raios nuvem-terra (cloud-to-ground) os mais conhecidos e estudados. Esses raios são caracterizados por uma corrente elétrica intensa que percorre um caminho condutor entre uma nuvem carregada eletricamente e a superfície da Terra. Essa corrente é composta por pulsos de alta velocidade chamados de líderes, que são descargas elétricas ascendentes e descendentes que procuram estabelecer um caminho condutor através do ar ionizado.

A formação de um raio envolve uma série complexa de processos físicos, incluindo a ionização do ar, a formação de líderes e o desenvolvimento de um canal condutor para a corrente elétrica. Durante o processo, ocorrem colisões entre partículas eletricamente carregadas, a geração de campos elétricos intensos, a criação de plasma e o aquecimento do ar, resultando em emissões de luz (relâmpagos) e sons (trovões).

A física das descargas atmosféricas é estudada utilizando uma combinação de observações em campo, experimentos laboratoriais e modelagem computacional. Os pesquisadores procuram entender os mecanismos fundamentais que governam a ocorrência, a propagação e os efeitos das descargas atmosféricas, a fim de melhorar a previsão de tempestades e desenvolver medidas de proteção contra raios.

Aula 15 - Energia das Descargas Atmosféricas

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Contextualização A energia das descargas atmosféricas, como raios e raios, é um fenômeno natural de grande magnitude que ocorre durante tempestades elétricas. Essas descargas resultam em uma rápida liberação de energia elétrica na atmosfera, gerando fortes campos elétricos e magnéticos.

A energia de uma descarga atmosférica é impressionante. Um único raio pode liberar energia na faixa de vários bilhões de joules. Essa energia é gerada através do movimento rápido de cargas elétricas dentro das nuvens e entre as nuvens e a superfície da Terra.

A energia das descargas atmosféricas é capaz de aquecer o ar ao seu redor a temperaturas extremamente altas, resultando em um rápido aumento de temperatura e uma expansão explosiva do ar, o que gera o som característico do trovão. Além disso, a energia elétrica liberada pode causar danos significativos a estruturas, árvores, equipamentos eletrônicos e até mesmo representar riscos para seres humanos e animais.

Devido à sua alta energia e capacidade de causar danos, a compreensão e o estudo da energia das descargas atmosféricas são importantes para a segurança e a proteção contra raios. Pesquisas científicas e tecnológicas têm sido realizadas para desenvolver sistemas de detecção e prevenção de raios, bem como para entender melhor os mecanismos envolvidos nas descargas atmosféricas e sua interação com o ambiente.

Energia das Descargas Atmosféricas Um raio consiste em vários raios que ocorrem em sequência através de canais ionizados. Cada raio é separado por $40\mu s$. Às vezes, há pausas entre os raios que podem ser observadas pelo olho humano, resultando em um efeito de piscar do raio. A duração média

de um flash completo varia de 70ms a 250ms e geralmente é composto por cerca de quatro raios individuais separados por intervalos de microssegundos.

A eletrificação predominante na atmosfera é conhecida como eletrificação "de tempo bom". Além disso, apenas uma pequena parte do planeta é coberta por tempestades a qualquer momento. No entanto, cálculos usando modelos globais de Circuitos Elétricos Atmosféricos sugerem que há uma diferença de potencial de 200.000 a 500.000 volts entre a ionosfera e a superfície da Terra, sendo a Terra o polo negativo. Isso corresponde a uma média de 100 a 140 volts por metro, resultando em uma corrente contínua de aproximadamente mil amperes fluindo da atmosfera para o solo durante condições de tempo bom. Uma maneira alternativa de medir o campo elétrico de um raio a uma determinada distância D é fornecida pela seguinte equação:

$$E = \frac{M}{D^3} + \frac{1}{cD^2} \frac{dM}{dt} + \frac{1}{c^2D} \frac{d^2M}{dt^2} \quad (1)$$

Onde E é o campo elétrico a uma distância D de uma nuvem de tempestade, sendo significativamente maior em comparação com a dimensão da distribuição de carga dentro da nuvem. M representa o momento total das cargas elétricas na nuvem no tempo $t - D/c$, sendo c a velocidade da luz.

As medidas do pico de corrente de um raio podem variar de 5.000A a 20.000A, e correntes ainda maiores, acima de 200.000A, já foram registradas. Um raio pode transferir 10^{20} elétrons em uma fração de segundo e alcançar um pico de corrente de até 10kA. Estima-se que um raio possua energia suficiente para acender 150 milhões de lâmpadas por segundo ou alimentar uma lâmpada de 100 watts por três meses.

A temperatura do raio na atmosfera circundante pode atingir valores entre 8.000°C e 33.000°C, cerca de cinco vezes mais quente do que a superfície do Sol.

De fato, a energia dos raios é o que causa o som do trovão. Quando ocorre uma descarga elétrica intensa e repentina durante uma tempestade, a alta temperatura resultante aquece o ar ao seu redor rapidamente. Esse rápido aumento de temperatura causa uma expansão explosiva do ar, gerando uma onda de choque que se propaga em todas as direções. Essa onda de choque é o que percebemos como o trovão.

O som do trovão pode ser extremamente alto e estrondoso, podendo ser ouvido a grandes distâncias. A intensidade e a duração do som podem variar dependendo da distância entre o observador e o local onde o raio ocorreu. Quanto mais próximo o observador estiver do raio, mais alto e imediato será o som do trovão. À medida que a distância aumenta, o som pode se tornar mais abafado e prolongado.

Assim, a energia liberada pelos raios durante as tempestades elétricas é o que gera o som caracte-

rístico do trovão, proporcionando uma experiência auditiva poderosa e muitas vezes impressionante durante os eventos atmosféricos.

A duração da corrente de retorno determina o raio inicial do canal de um raio. Estudos indicam que a intensidade total do espectro de um raio está relacionada com o raio inicial do canal. A ionização e a energia térmica têm uma relação linear, e a energia de dissociação do canal está correlacionada com a energia térmica e de ionização por unidade de comprimento.

A energia por unidade de comprimento é diretamente proporcional ao quadrado do raio inicial para diferentes tipos de descargas Nuvem-Solo. Isso significa que, à medida que o raio inicial do canal aumenta, a energia por unidade de comprimento também aumenta de forma proporcional ao quadrado desse raio. Isso ressalta a importância do tamanho inicial do canal de raio na determinação da energia envolvida na descarga.

No modelo eletrodinâmico, os Dart Leaders e Return Strokes são descritos como Ondas Eletromagnéticas (OEM) que se propagam ao longo do canal de um raio. Essas ondas eletromagnéticas são geradas pela rápida descarga de eletricidade eletroestática durante um raio.

O Dart Leader é uma onda eletromagnética que se propaga rapidamente da nuvem em direção ao solo. Ele cria um caminho ionizado pelo qual a descarga principal do raio (Return Stroke) seguirá. O Return Stroke é uma onda eletromagnética subsequente que se propaga ao longo do canal ionizado criado pelo Dart Leader, em direção à nuvem.

A Energia dissipada por unidade de comprimento de um raio é igual a:

$$\frac{\varepsilon}{L} = \lambda_q^2 \left[\frac{1}{2} + \log \left(\frac{E_{break}}{E_{cloud}} \right) \right] \quad (2)$$

A energia do canal do raio pode ser dividida em três partes, quando a energia ε é rapidamente depositada dentro do canal pelo Return Stroke, antes da expansão radial do canal do raio. Essas partes são:

- **Energia térmica:** A energia térmica é a energia associada ao aquecimento do canal do raio. Ela resulta do rápido aumento da temperatura devido à dissipação de energia durante a descarga. Essa energia é responsável por elevar a temperatura do canal, podendo atingir valores extremamente altos $\Rightarrow \varepsilon_{thermal} = \pi r_{init}^2 L (1 + f) \frac{3}{2} n_{atomic} \kappa T$.
- **Energia de dissociação molecular:** A energia de dissociação molecular está relacionada à quebra de ligações moleculares ao longo do canal do raio. Durante a descarga, a energia depositada é capaz de separar as moléculas presentes no canal, levando à formação de íons e radicais livres $\Rightarrow \varepsilon_{disso} = \pi r_{init}^2 L n_{molec} \tau_{disso}$.

- **Energia de ionização:** A energia de ionização é a energia necessária para remover elétrons de átomos ou moléculas, resultando na formação de íons. No canal do raio, a alta energia depositada pelo Return Stroke é capaz de ionizar as partículas presentes, aumentando significativamente a concentração de íons ao longo do canal $\Rightarrow \epsilon_{ioniz} = \pi r_{init}^2 L n_{atomic} f \tau_{ioniz}$.

Onde r_{init} é o raio inicial em m , L é o comprimento do canal em m , T é a temperatura em K , f é a média de ionização ($f = 0,97$) e $\kappa = 1,38 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$ é a constante de Boltzmann. n_{atomic} é o número esperado de densidade atômica no canal do raio, n_{molec} é o número médio esperado de moléculas no canal, $\tau_{disso} = 9,8 \text{ eV}$ é a energia de dissociação de uma molécula de N_2 , e $\tau_{ioniz} = 14,5 \text{ eV}$ é a energia para a ionização atômica do Nitrogênio. As moléculas de N_2 no ar são facilmente dissociadas no canal do raio, então $n_{molec} = 0.5 n_{atomic}$.

A densidade linear de carga no canal do raio, denotada por λ_q , está diretamente relacionada a essas diferentes formas de energia. Ela representa a quantidade de carga elétrica por unidade de comprimento ao longo do canal do raio. O campo elétrico de Breakdown (E_{break}) e o campo elétrico dentro da tempestade (E_{cloud}) são parâmetros que influenciam a dissipação de energia no canal do raio.

Incluindo as 3 equações de energia na equação da Energia dissipada por unidade de comprimento de um raio, temos:

$$r_{init} = \lambda_q \left[\frac{1}{2} + \log \left(\frac{E_{break}}{E_{cloud}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \times (\pi n_{atomic})^{-\frac{1}{2}} \times \left[(1+f) \frac{3}{2} \kappa T + \frac{1}{2} \tau_{disso} + f \tau_{ioniz} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Assim, o raio final do canal, após a expansão por aquecimento pode ser dada como:

$$r_{final} = r_{init} \left[\frac{2}{5} + \frac{6}{5} (1+f) \frac{T}{T_{atmosfera}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Onde $T_{atmosfera}$ é a temperatura da atmosfera fora do canal de descarga.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Nada que os livros e artigos não possam sanar.

Aula 16 - NBEs e Campo Elétrico Abaixo da Tempestade

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Pulsos Bipolares Estreitos Os Pulsos Bipolares Estreitos (*Narrow Bipolar Pulses - NBPs*) são um tipo de descarga atmosférica intranuvem que ocorre durante tempestades elétricas. Esses pulsos são caracterizados por sua curta duração e forte emissão de radiofrequência (*RF*) no espectro de frequência muito alta (*VHF*).

Os *NBPs* são observados comumente em regiões tropicais e subtropicais, mais do que em regiões temperadas. Eles estão associados à iniciação de descargas intranuvem sem a formação de líderes escalonados, o que significa que eles não requerem o processo de formação gradual de canais elétricos como outros tipos de descargas.

Existem dois tipos principais de *NBPs*: os Pulsos Bipolares Estreitos Positivos (*Narrow Positive Bipolar Pulses - NPBP*s) e os Pulsos Bipolares Estreitos Negativos (*Narrow Negative Bipolar Pulses - NNBPs*). Os *NPBP*s ocorrem em altitudes de aproximadamente 6 km a 15 km, enquanto os *NNBP*s ocorrem em altitudes entre 15 km e 21 km.

Os campos elétricos medidos durante os *NBPs* são relativamente baixos, com valores em torno de 22.7 V/m para *NPBP*s e 17.6 V/m para *NNBP*s. Essas descargas representam áreas de estudo importantes para entender melhor os processos elétricos na atmosfera durante as tempestades.

Atualmente, os sistemas *wireless* operam em frequências que variam de 2.4 GHz a 5.8 GHz . Essas faixas de frequência são escolhidas porque são livres e abertas para uso por qualquer pessoa. Observações recentes da radiação de micro-ondas proveniente de relâmpagos despertaram interesse no estudo de seus efeitos em redes de comunicação sem fio.

Cientistas observaram uma forte radiação de micro-ondas em 1.63 GHz associada a eventos de relâmpagos do tipo nuvem-solo, como *NBPs*, *Steep Leader*, *Dart Leader* e retorno do raio. Medições

detectaram radiação de micro-ondas em ondas milimétricas a 37.5 GHz a partir de um retorno do raio a uma distância inferior a 5 km . O sinal teve uma duração de 20 a $60 \mu\text{s}$. A intensidade máxima de radiação espectral foi superior a $10^{-19} \text{ W}/(\text{m}^2\text{Hz})$, ou aproximadamente -180 dB .

Essas descobertas têm aumentado a conscientização sobre o impacto potencial da radiação de micro-ondas induzida por relâmpagos em sistemas de comunicação sem fio. Pesquisas adicionais são necessárias para entender melhor e mitigar esses efeitos, a fim de garantir uma comunicação sem fio confiável e ininterrupta na presença de atividade de relâmpagos.

Campo Elétrico Abaixo da Tempestade Durante condições de tempo bom, o campo elétrico vertical oscila em torno de valores negativos, pois o potencial elétrico aumenta com a altura. Isso significa que uma antena vertical terá um potencial positivo em relação à sua base fixada no solo.

No entanto, durante uma tempestade, o campo elétrico vertical pode se tornar muito grande, da ordem de 4 kV/m , e geralmente muda de sinal (polaridade) a partir dos valores negativos. Essas oscilações no campo elétrico vertical são causadas pelo movimento das nuvens, que se deslocam de forma relativamente lenta, influenciando as variações do campo elétrico também no solo.

As nuvens carregadas de uma tempestade podem induzir uma distribuição desigual de cargas no solo, criando diferenças de potencial significativas entre diferentes pontos. À medida que as nuvens se movem, o campo elétrico pode variar devido a alterações na distribuição de carga atmosférica.

Essas variações no campo elétrico são um dos fatores que contribuem para a ocorrência de descargas atmosféricas, como raios. Quando o campo elétrico atinge um valor crítico, pode ocorrer a quebra dielétrica do ar, resultando em uma descarga elétrica intensa entre as nuvens e o solo, equilibrando momentaneamente as diferenças de potencial.

Consideremos então, uma superfície plana e condutora. O campo elétrico vertical sobre esta superfície pode ser escrita como:

$$E_z = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int \frac{M(t')dt}{r^3} + \frac{M(t')}{ct^2} + \frac{\frac{dM(t)}{dt}}{rc^2} \right] \quad (1)$$

Ainda:

$$H_\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{M(t')}{r^2} + \frac{\frac{dM(t)}{dt}}{rc} \right] \quad (2)$$

Onde E_z é o campo elétrico vertical em V/m . H_ϕ é o campo magnético tangencial em A/m . ϵ_0 é a permissividade no espaço livre $((36\pi \times 10^9)^{-1})$ em F/m . $M(t)$ define o momento elétrico vertical em A.m . $I(t)$ representa o dipolo de corrente da antena em A . l é o comprimento do dipolo da antena em metros. r é a distância da fonte até o observador em metros. c é a velocidade da luz em m/s e t' é

por definição igual a $(t - d/c)$.

Se consideramos $I(t) = I \cos(\omega t)$, reescrevenmos as equações anteriores como:

$$\begin{aligned} E_z &= -\frac{Il}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{\sin(\omega t')}{\omega r^3} + \frac{\cos(\omega t')}{cr^2} - \frac{w \sin(\omega t')}{rc^2} \right] \\ H_\phi &= \frac{Il}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{\cos(\omega t')}{r^2} - \frac{\omega \sin(\omega t')}{rc} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Das equações anteriores podemos obter o campo elétrico das componentes de radiação, indução e eletrostática, como segue:

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{2 \frac{dM(t')}{dt}}{10^7 r} \\ E_i &= -\frac{60M(t')}{r^2} \\ E_e &= -\frac{1.8 \times 10^{10} \int M(t') dt}{r^3} \end{aligned} \quad (4)$$

Estas equações representam muito bem o comportamento do campo elétrico em suas componentes de radiação, indução e eletrostática, do que se esperaria para medidas feitas abaixo de 2 km de altitude, a partir do nível do solo.

O pico da componente de radiação do campo elétrico médio para descargas atmosféricas (*strokes*) pode ser estimado fazendo:

$$E_r \cong \frac{300}{r} \quad (5)$$

Já o pico da componente de radiação do campo elétrico médio para uma descarga de retorno (return stroke), é estimado pela relação:

$$E_r \cong \frac{260}{r} \quad (6)$$

Quando o termo eletrostático é calculado com $\int \frac{dM(t')}{dt} = 1.5 \times 10^3 \frac{Am}{s}$, tem-se:

$$E_e \cong \frac{3 \times 10^4}{r^3} \quad (7)$$

Para considerar uma estimativa mais próxima da realidade, podemos assumir uma concentração de cargas de 20 C numa tempestade, a uma altura média de 2,5 km, e obter uma estimativa de campo elétrico, para os raios, como:

$$E_e \cong \frac{10^6}{r^3} \quad (8)$$

Que é um campo elétrico muito próximo dos valores hoje mensurados por equipamentos específicos de monitoramento do campo elétrico atmosférico local. O campo elétrico de tempo bom corresponde a um campo medido em dia de céu claro, desprovido de nuvens. Este campo é vertical com orientação para baixo, cujo valor próximo à superfície terrestre varia entre 100 - 300 V/m .

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Pode haver alguma interferência em altas frequências numa comunicação Wireless entre uma Estação - satélite - Estação? Sim, descargas atmosféricas, como relâmpagos, podem causar interferência em comunicações wireless entre uma estação terrestre e um satélite. Isso ocorre devido aos seguintes fatores:

- **Emissão de ruído eletromagnético:** Uma descarga atmosférica, especialmente os raios, produz uma intensa emissão de energia eletromagnética em um amplo espectro de frequências, incluindo altas frequências. Essa emissão pode interferir nos sinais de comunicação wireless, causando degradação do sinal ou perda de conexão.
- **Atenuação do sinal:** A descarga atmosférica, dependendo da sua proximidade e intensidade, pode causar atenuação significativa nos sinais de comunicação wireless. O caminho percorrido pelo sinal pode ser afetado pela ionização eletrostática causada pela descarga, resultando em perda de potência do sinal e redução da qualidade da comunicação.
- **Sobrecarga dos circuitos:** Descargas atmosféricas próximas podem gerar pulsos de alta corrente e tensão que podem ser induzidos nos cabos e equipamentos de comunicação. Esses pulsos de energia podem causar danos aos circuitos eletrônicos, resultando em falhas na comunicação.

Para mitigar os efeitos da interferência causada por descargas atmosféricas, são adotadas medidas como a utilização de sistemas de proteção contra surtos, aterramento adequado dos equipamentos e a implementação de protocolos de detecção e correção de erros nas transmissões. Além disso, a monitorização do clima e a suspensão temporária das comunicações durante tempestades severas podem ser realizadas para evitar problemas devido às descargas atmosféricas.

Aula 17 - Representação do Campo Elétrico Por Descargas

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Contextualização O sensor Field Mill é um dispositivo essencial na detecção e medição do campo elétrico na atmosfera. Ele consiste em um conjunto de placas condutoras sensíveis ao campo elétrico, dispostas em um arranjo circular ou em formato de moinho. Essas placas são eletricamente isoladas e podem girar livremente em torno de um eixo central.

O princípio de funcionamento do sensor Field Mill baseia-se na interação entre as placas condutoras e o campo elétrico ambiente. Quando um campo elétrico está presente, ocorre uma redistribuição de cargas nas placas do sensor. Isso cria uma diferença de potencial entre as placas, que é medida e registrada por meio de circuitos eletrônicos associados ao sensor.

A rotação das placas é realizada por um motor ou por forças do vento. À medida que as placas giram, diferentes áreas são expostas ao campo elétrico, permitindo a medição em diferentes direções. A taxa de rotação das placas pode variar dependendo da aplicação e das necessidades de amostragem do campo elétrico.

O sensor Field Mill é amplamente utilizado em estudos meteorológicos e de descargas atmosféricas. Ele fornece informações valiosas sobre as características do campo elétrico na atmosfera, como sua intensidade, direção e variabilidade temporal. Esses dados são cruciais para entender os processos elétricos que ocorrem nas tempestades e outros fenômenos atmosféricos, além de contribuir para a previsão e monitoramento de tempestades e descargas elétricas.

É importante ressaltar que o sensor Field Mill é um dos vários tipos de sensores utilizados para medir o campo elétrico atmosférico. Outros métodos de medição, como sensores de carga, antenas e

radares, também são empregados para obter uma visão abrangente e precisa das propriedades elétricas da atmosfera. A combinação desses diferentes sensores e técnicas de medição contribui para um melhor entendimento dos fenômenos elétricos na atmosfera e sua relação com o clima e o meio ambiente.

Representação do Campo Elétrico Por Descargas Atualmente, não é possível prever com precisão a ocorrência de um raio com base nos valores de campo elétrico medidos pelo Field Mill. Altos valores de campo elétrico não garantem necessariamente que ocorrerá uma descarga, e também não é possível distinguir o comportamento do campo elétrico para descargas entre nuvem e solo ou descargas intra-nuvem.

O desafio está em determinar as circunstâncias em que tais previsões podem ser feitas de forma confiável, minimizando a taxa de alarmes falsos. Estima-se que o campo elétrico próximo ao solo seja proporcional à quantidade de carga elétrica presente.

O campo elétrico total (E_{total}) é dado por:

$$E_{total} = \frac{QH}{2\pi\epsilon_0 (H^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

onde Q é o montante de carga elétrica [C] no centro onde o raio se origina, H é a altura [m] do centro de cargas elétricas na nuvem, ϵ_0 é a permissividade elétrica [F/m] e E_{total} é a média do campo elétrico abaixo da tempestade [V/m].

Do exemplo dado em sala, a distância estimada é dada por:

$$D = \sqrt{\left[\frac{QH}{2\pi\epsilon_0 E_{total}} \right]^{2/3} - H^2} \quad (2)$$

Outra expressão também é usada para estimar a distância de uma descarga atmosférica a partir das informações de um sistema de monitoramento. Usando a latitude e a longitude reportada por uma rede de monitoramento, cada *stroke* pode ter a distância estimada (em km) até um ponto de localização pretendido, através da equação:

$$D = 2R_e \arcsen \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\theta_0 - \theta_e}{2} \right) + \cos(\theta_0) \cos(\theta_e) \sin^2 \left(\frac{\phi_0 - \phi_e}{2} \right)} \right) \quad (3)$$

onde $R_e = 6378\text{km}$ é o raio médio da Terra, assumindo uma forma esférica. θ_0 é a latitude do ponto de localização (em graus), ϕ_e é a latitude do raio predito pela rede de monitoramento, θ_e é a longitude do ponto pretendido (em graus), e ϕ_e é a longitude do raio estimado pela rede de monitoramento, também em graus. Com esta equação é possível estimar o pico de corrente da descarga atmosférica

I , medida com um campo elétrico E , e com distância estimada por uma rede de monitoramento D , usando a equação de regressão derivada por Rakov et. al. (1992):

$$I = 1,5 - 0.037DE \quad (4)$$

onde, I é a corrente elétrica em kA e considerado negativo, E , é positivo e em V/m , e D é a distância estimada em km . Segundo estudos esta expressão apresenta uma diferença percentual entre o pico de corrente teórico (calculado pela equação anterior) e o pico de corrente estimado por uma rede de monitoramento de descargas atmosféricas, e que pode ser dada como:

$$\Delta I\% = \frac{|I_{estimado}| - |I_{teorico}|}{|I_{estimado}|} \times 100 \quad (5)$$

Perfil de Campo Elétrico Os estudos realizados por Moore et al. (1959) e Malan (1963) sugerem que durante os estágios iniciais e de maturidade de uma nuvem de tempestade, ocorre um acúmulo de cargas elétricas positivas em sua base inferior, próxima à superfície terrestre. Essa eletrificação inicial pode ser identificada nas medições do perfil do campo elétrico local pela mudança de polaridade na intensidade do campo mensurado.

De acordo com os estudos apresentados por Golde (1977), os estágios de uma tempestade podem ser identificados pela observação do perfil do campo elétrico local dessa tempestade.

À medida que o evento avança, a nuvem de tempestade atinge o estágio de maturidade, e íons positivos começam a descer juntamente com a precipitação, resultando no surgimento de picos secundários no gradiente de potencial, conhecidos como comportamentos duplos do potencial em curtos intervalos de tempo, associados à direção da precipitação.

A fase de dissipação da tempestade é caracterizada pelo gradiente de potencial, que indica o fim do processo de oscilação das cargas dentro da nuvem. Durante essa fase, é observada uma variação prolongada do gradiente, e o estágio seguinte corresponde à dissipação completa da tempestade.

Ao analisar o perfil do campo elétrico de um raio, é possível estudar a forma de onda do campo elétrico (E) e a forma de onda do campo magnético (B).

Processos J e K Os processos J e K são fenômenos elétricos que ocorrem durante descargas atmosféricas, como raios. Eles estão relacionados às variações do campo elétrico entre as diferentes etapas da descarga.

O processo J refere-se a uma mudança relativamente estável no campo elétrico que ocorre durante o intervalo de tempo entre as descargas principais, conhecidas como “*return strokes*”. O campo elétrico durante o processo J pode ter uma mudança positiva ou negativa, e é geralmente menor do

que a mudança de campo devido à corrente contínua da descarga principal. Diferente da descarga principal, o processo J não está associado a um canal luminoso entre a nuvem e o solo.

Por outro lado, o processo K envolve variações rápidas e relativamente pequenas no campo elétrico que ocorrem entre as descargas principais, em intervalos de tempo de 2 a 20 milissegundos. Essas variações, conhecidas como “*K-changes*”, são superpostas à mudança geral do campo elétrico associado ao processo J. O processo K é frequentemente interpretado como a ocorrência de pequenas descargas ou “*streamers*” que se movem dentro da nuvem, fornecendo uma contribuição para as variações do campo elétrico entre as descargas principais.

A interpretação exata dos processos J e K e seu papel na dinâmica das descargas atmosféricas ainda é objeto de estudo e debate entre os pesquisadores. Diferentes teorias e observações têm sido propostas para explicar esses processos, e pesquisas adicionais são necessárias para um melhor entendimento de sua natureza e mecanismos subjacentes.

A figura 1 mostra as etapas de um processo de descarga, visto no espectro óptico:

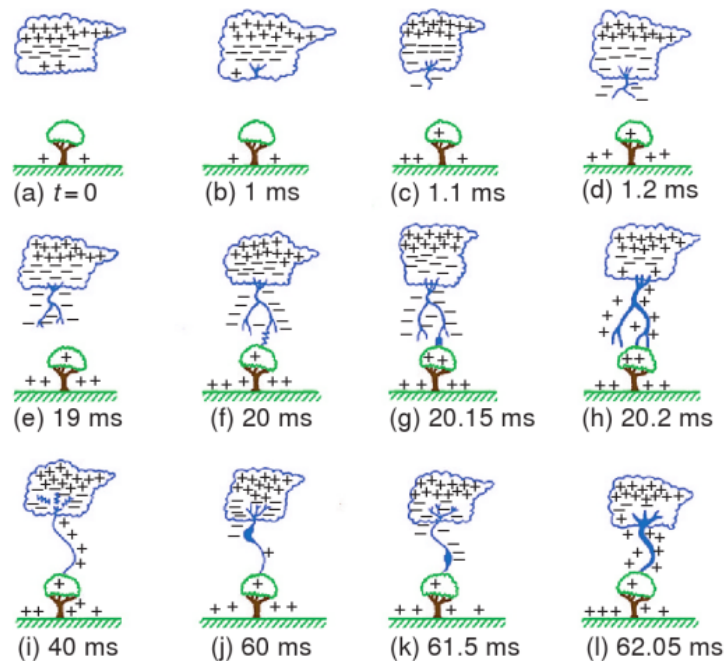


Figura 1: Esquemático para ilustrar alguns dos processos que levam a um raio no solo que carrega o solo negativamente. (a) Distribuição de carga na nuvem, (b) Quebra Inicial, (c-e) Líder Escalonado, (f) Processo de conexão, (g e h) Primeira descarga de retorno, (i) Processos K e J, (j e k) Líder em dardo e (l) Segunda descarga de retorno. [Adaptado de M. Uman, *The Lightning Discharge*, Academic Press, Inc., Nova York, 1987, p. 12, Direitos autorais 1987, com permissão da Elsevier.]

Etapas explicadas:

- **(a) Distribuição de carga na nuvem:** Nesta etapa, a nuvem contém uma separação de cargas positivas e negativas. Tipicamente, a parte inferior da nuvem está carregada negativamente,

enquanto a parte superior está carregada positivamente.

- **(b) Quebra Inicial:** Uma região da nuvem próxima ao solo experimenta um campo elétrico forte, o que leva à iniciação de uma pré-quebra. Esse processo envolve o desenvolvimento de canais de ionização que conectam a nuvem ao solo.
- **(c-e) Líder escalonado:** O líder escalonado é uma série de canais luminosos e escalonados que se propagam de cima para baixo a partir da nuvem em direção ao solo. Consiste em uma série de descargas rápidas ou degraus, cada uma durando microssegundos. O líder escalonado busca um caminho de menor resistência em direção ao solo, ramificando-se e se estendendo de maneira irregular.
- **(f) Processo de conexão:** Quando o líder escalonado se aproxima do solo, estabelece-se uma conexão entre ele e um líder invisível em movimento ascendente chamado líder em dardo. Essa conexão é conhecida como processo de conexão.
- **(g e h) Primeira descarga de retorno:** A primeira descarga de retorno é o canal luminoso principal que transporta a maior parte da corrente do raio do solo para cima. Ocorre após o processo de conexão e se desloca rapidamente ao longo do caminho estabelecido pelo líder escalonado. A primeira descarga de retorno é a parte brilhante e visível do raio.
- **(i) Processos K e J:** Após a primeira descarga de retorno, pode haver variações no campo elétrico conhecidas como processos K e J. O processo K refere-se a flutuações menores e rápidas no campo elétrico, enquanto o processo J representa uma mudança mais lenta e gradual no campo elétrico.
- **(j e k) Líder “dart”:** Após a primeira descarga de retorno, um novo líder chamado líder “dart” se propaga de cima para baixo a partir da nuvem em direção ao solo. O líder “dart” segue um caminho mais direto e menos ramificado em comparação com o líder escalonado.
- **(l) Segunda descarga de retorno:** O líder “dart” atinge o solo, e ocorre uma segunda descarga de retorno, semelhante à primeira. Essa segunda descarga de retorno geralmente é menos intensa do que a primeira.

Esses processos descrevem a sequência geral de eventos que levam a um flash no solo que carrega o solo negativamente. Referências visuais ou esquemas podem fornecer uma representação mais detalhada e precisa desses processos.

Componente M Uma evidência óptica rara em alta velocidade do mecanismo da componente M de onda-guiada, adaptada de Jiang et al. (2014), é mostrada na Figura 2. Nos quadros (a) e (b), um líder de recuo (parte negativa) se desenvolve ao longo de um ramo decadente de um líder positivo ascendente iniciado a partir de uma torre de 112 m. Havia pelo menos seis ramos de líder positivo ascendente, a maioria dos quais são muito fracos para serem vistos na reprodução. Um canal portador de corrente conectado à torre é claramente visível nos seis quadros. No quadro (c), o líder de recuo se conecta ao canal aterrado, a 350 m acima do topo da torre (R. Jiang, comunicação pessoal, 8 de janeiro de 2018), e lança uma onda M incidente em direção à ponta da torre. Em algum momento entre os quadros (c) e (d), a onda M incidente chega à ponta da torre e produz uma onda M refletida no solo, o que causa o brilho e a extensão da parte superior do canal do líder de recuo (veja os quadros e e f). (Também pode haver reflexão parcial a partir do ponto de junção que não é considerado parte da componente M.) Vale ressaltar que o evento mostrado na Figura 2 é um pulso de ICC, que pode ser um evento de modo misto (Zhou et al., 2015), uma vez que a altura do ponto de junção (350 m) acima do topo da torre é inferior a 1 km. No entanto, este evento ilustra essencialmente o mecanismo da componente M.

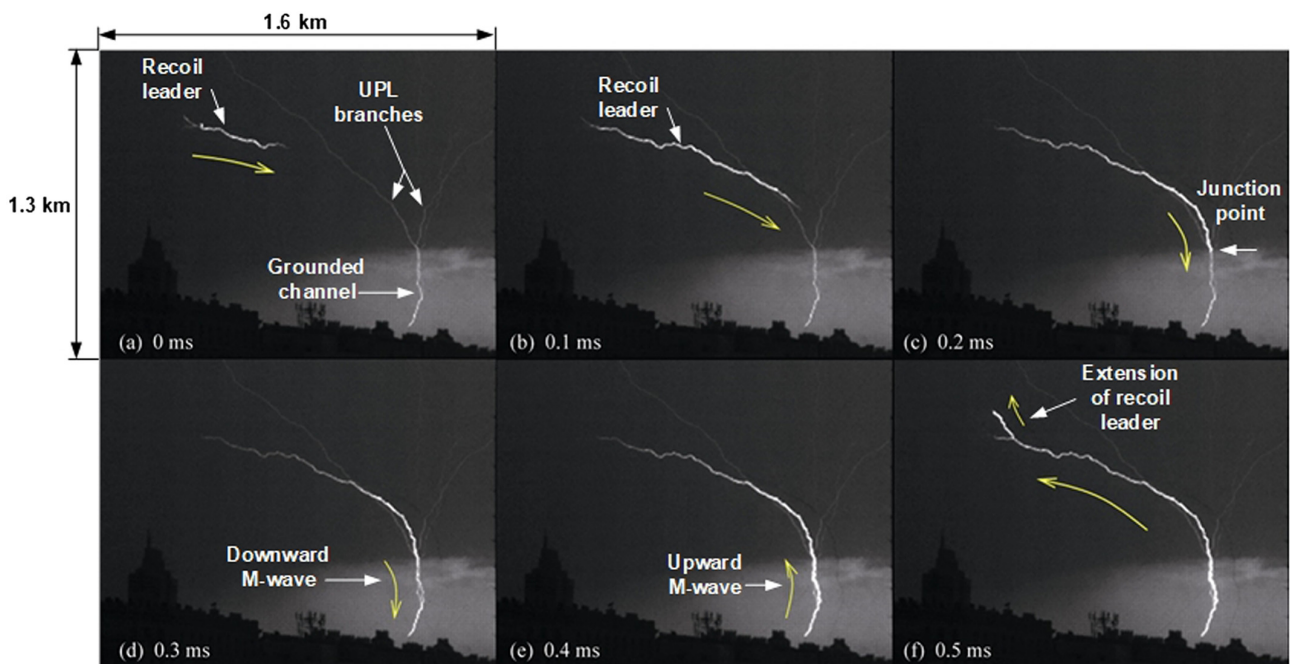


Figura 2: Evidência óptica do mecanismo da componente M de onda-guiada exibido por um pulso inicial de corrente contínua ascendente de um relâmpago negativo iniciado a partir de uma torre de 112 m. Mostradas nas figuras (a) a (f) estão seis quadros consecutivos separados por $100 \mu s$, nos quais é possível observar um líder de recuo em um ramo decadente de um líder positivo ascendente que faz conexão com o canal aterrado e portador de corrente e inicia uma onda M descendente ao longo desse canal, do ponto de junção à ponta da torre, seguida por uma onda M ascendente refletida no solo que refaz e estende o canal do líder de recuo. Adaptado de Jiang et al. (2014)

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Nada que os livros e artigos não possam sanar. Depois de fazer o trabalho sobre descargas negativas descendentes nuvem-solo, também não é surpresa alguma um tema semelhante.

Aula 18 - Raios e o Setor Elétrico

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Contextualização Os raios representam um fenômeno natural que envolve uma descarga elétrica intensa entre as nuvens e a superfície da Terra. Essas descargas elétricas podem ter efeitos significativos no setor elétrico, especialmente nas redes de distribuição e transmissão de energia.

Os raios podem causar interrupções no fornecimento de energia elétrica, danificar equipamentos e infraestrutura elétrica e, em casos extremos, provocar incêndios. A alta corrente e voltagem envolvidas em um raio podem sobrecarregar os sistemas de proteção e causar falhas em transformadores, linhas de transmissão e outros componentes elétricos.

Para proteger as redes elétricas contra os efeitos dos raios, são utilizados dispositivos de proteção, como para-raios. Esses dispositivos são projetados para interceptar e desviar as descargas elétricas dos raios, direcionando-as com segurança para o solo e evitando danos às instalações elétricas.

Além disso, as empresas do setor elétrico implementam programas de manutenção e inspeção regulares para identificar e reparar danos causados por raios. Isso inclui a revisão de sistemas de proteção, verificação da integridade das estruturas e a substituição de equipamentos danificados.

Raios e o Setor Elétrico As teorias mencionadas afirmam que a corrente no condutor de fase de uma linha de transmissão influencia o raio de atração, que é a distância estimada entre o canal descendente do raio e uma estrutura terrestre onde ocorrerá eventual ruptura do dielétrico.

Quando há correntes mais altas nos condutores de fase, isso resulta em maiores campos elétricos ao redor dos condutores. Esses campos elétricos se somam ao campo elétrico da atmosfera durante uma tempestade, o que facilita o processo de ionização do ar.

Altos potenciais nas linhas de transmissão podem resultar em correntes mais altas nos condutores de fase, o que, por sua vez, aumenta o campo elétrico ao redor desses condutores. Esse aumento no campo elétrico pode influenciar o raio de atração, fazendo com que a descarga do raio seja atraída mais facilmente para as estruturas próximas aos condutores.

É importante considerar essas teorias ao projetar e proteger linhas de transmissão e estruturas elétricas, levando em conta a influência da corrente, campo elétrico e potencial nas características de atração dos raios. Dessa forma, medidas adequadas de proteção, como o uso de para-raios e a manutenção regular dos sistemas de proteção, podem ser implementadas para minimizar os riscos associados aos raios.

Acidentes com Descargas Atmosféricas O parâmetro "energia por unidade de resistência" é calculado integrando o quadrado da corrente durante o intervalo de duração de uma corrente de retorno. Esse cálculo permite determinar a quantidade de energia transferida para uma vítima quando ela é percorrida por uma corrente de uma descarga atmosférica.

A potência dissipada por uma corrente durante o fluxo por uma vítima pode ser expressa como Ri^2 , onde R é a resistência da vítima. Integrando essa expressão ao longo do tempo e dividindo pelo valor da resistência, obtemos o parâmetro "energia por unidade de resistência".

Esse parâmetro é utilizado para avaliar os efeitos e a severidade dos acidentes causados por descargas atmosféricas em seres humanos ou equipamentos. Ele fornece uma medida da quantidade de energia transferida para a vítima durante a passagem da corrente elétrica, levando em consideração a resistência do caminho percorrido.

É importante considerar esses parâmetros ao projetar sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e ao desenvolver diretrizes de segurança para evitar acidentes e minimizar os riscos associados às correntes elétricas resultantes de raios.

Formalização da Energia por Unidade de Resistência A energia transferida para um condutor em função de sua resistência é dada por:

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2(t) \frac{l}{d} \quad (1)$$

onde:

- $F(t)$: força eletrodinâmica
- $i(t)$: corrente elétrica

- μ_0 : permeabilidade magnética do meio ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)
- l : comprimento do condutor
- d : distância entre condutores paralelos

Outras Considerações Na grande maioria das descargas nuvem-solo, a energia por unidade de resistência, calculada através da integração do quadrado da corrente, apresenta um valor mediano da ordem de $5 \times 10^4 \text{ A}^2\text{s}$.

A ordem de grandeza da impedância do corpo humano ao percurso de uma corrente de descarga é estimada entre 300 e 600 Ω . Se considerarmos a resistência de uma vítima como sendo 500 Ω , a corrente de descarga seria capaz de transferir aproximadamente $2.5 \times 10^4 \text{ kJ}$ de energia ($500\Omega \times 5 \times 10^4 \text{ A}^2\text{s}$).

Se o tempo de duração da corrente for de 0.5s, isso corresponde a uma dissipação de potência média de 50.000 kW ($\frac{2.5 \times 10^4 \text{ kJ}}{0.5\text{s}}$). Essa potência é cerca de 10.000 vezes superior à potência de um chuveiro elétrico residencial e é suficiente para causar parada cardiorrespiratória e, eventualmente, carbonização dos tecidos da vítima.

Esses números destacam a extrema periculosidade das descargas atmosféricas e os riscos associados a ser atingido por uma corrente de descarga. É fundamental adotar medidas de proteção adequadas e seguir as diretrizes de segurança para minimizar esses riscos e garantir a segurança das pessoas em situações de tempestades elétricas.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Nem tenho condições de imaginar o que seria 10000 vezes superior à potência de um chuveiro residencial.....

Aula 19 - Sistemas de Monitoramento

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Contextualização O monitoramento de raios é uma atividade importante para fins de prevenção, segurança e pesquisa relacionados a descargas atmosféricas. Existem diferentes métodos e tecnologias utilizados para monitorar a ocorrência de raios. Alguns dos principais métodos de monitoramento de raios incluem:

- ***Sistemas de detecção de descargas atmosféricas:*** Esses sistemas utilizam sensores eletromagnéticos para detectar as características elétricas das descargas atmosféricas, como a corrente, a taxa de subida e a polaridade. Eles podem ser baseados em antenas direcionais ou em sensores distribuídos em uma determinada área.
- ***Localização de raios por triangulação:*** Ao utilizar uma rede de sensores de descargas atmosféricas em diferentes locais, é possível determinar a localização aproximada de um raio por meio da triangulação dos dados coletados pelos sensores. Isso ajuda a identificar a área onde ocorreu a descarga.
- ***Sensores de campo elétrico e magnético:*** Esses sensores são capazes de medir as variações do campo elétrico e magnético causadas por uma descarga atmosférica. Eles são úteis para monitorar a intensidade e a proximidade dos raios.
- ***Redes de detecção de raios por satélite:*** Satélites equipados com sensores de raios são capazes de detectar e localizar descargas atmosféricas em grandes áreas geográficas. Esses sistemas fornecem informações valiosas sobre a distribuição espacial e temporal dos raios em escala global.

O monitoramento de raios desempenha um papel fundamental na prevenção de danos causados por descargas atmosféricas, especialmente em setores como aviação, energia, telecomunicações e atividades ao ar livre. Além disso, os dados coletados pelo monitoramento de raios são utilizados para pesquisas científicas, estudos climáticos e aprimoramento de modelos de previsão de tempestades.

Porque Monitorar Raios O monitoramento de raios é essencial por diversas razões:

- ***Segurança em aeroportos:*** A detecção de raios é crucial para garantir a segurança dos voos, permitindo que as operações sejam interrompidas ou suspensas quando há risco de raios nas proximidades do aeroporto.
- ***Prevenção de acidentes e proteção civil:*** O monitoramento de raios auxilia na prevenção de acidentes relacionados a descargas atmosféricas, como incêndios em áreas florestais, explosões em locais com substâncias inflamáveis e danos a infraestruturas críticas. Também permite alertar e proteger a população em caso de tempestades severas.
- ***Agricultura e atividades ao ar livre:*** O monitoramento de raios é importante para a proteção de trabalhadores agrícolas e atividades ao ar livre, evitando exposição a raios durante atividades como plantio, colheita e práticas esportivas.
- ***Lançamentos de satélites:*** Durante o lançamento de satélites, é necessário monitorar a presença de raios nas proximidades para garantir a segurança das operações espaciais.
- ***Telecomunicações:*** Descargas atmosféricas podem interferir e danificar equipamentos de telecomunicações. O monitoramento de raios ajuda a identificar áreas de maior risco e tomar medidas preventivas para evitar danos à infraestrutura de comunicação.
- ***Companhias elétricas:*** O monitoramento de raios é crucial para as companhias elétricas, permitindo identificar áreas propensas a descargas e tomar medidas para proteger as linhas de transmissão e distribuição de energia, reduzindo interrupções no fornecimento de eletricidade.

Além disso, o monitoramento de raios coleta informações vitais para fornecer assessoria de curto e longo prazo sobre a sensibilidade e vulnerabilidade das comunidades em relação às tempestades. Essas informações são essenciais para auxiliar no planejamento e prevenção de eventos extremos no futuro. Um exemplo disso é o monitoramento de raios para identificar e controlar as queimadas em florestas causadas por raios. Ao assegurar essa capacidade de monitoramento, podemos lidar de forma mais eficiente com situações críticas e estar preparados para enfrentar eventos extremos.

Tipos de Onda de Descargas Atmosféricas

Ondas de Superfície As ondas de superfície de descargas atmosféricas são ondas eletromagnéticas que se propagam ao longo da superfície da Terra após a ocorrência de uma descarga atmosférica, como um raio. Essas ondas são geradas devido às correntes intensas e abruptas que ocorrem durante uma descarga atmosférica.

Essas ondas de superfície podem ser divididas em duas categorias principais: ondas de superfície de baixa frequência (ELF, na sigla em inglês) e ondas de superfície de muito baixa frequência (VLF, na sigla em inglês).

As ondas de superfície ELF possuem frequências na faixa de 3 Hz a 3 kHz, enquanto as ondas de superfície VLF possuem frequências na faixa de 3 kHz a 30 kHz. Essas frequências relativamente baixas permitem que as ondas de superfície de descargas atmosféricas se propaguem por longas distâncias ao longo da superfície terrestre.

Essas ondas de superfície podem ser detectadas e medidas por meio de técnicas de monitoramento, como redes de sensores distribuídos. A análise dessas ondas pode fornecer informações sobre a localização e características das descargas atmosféricas, além de auxiliar na previsão e monitoramento de tempestades.

Além disso, as ondas de superfície de descargas atmosféricas também podem causar interferência em sistemas de comunicação e eletrônicos. Essas interferências podem afetar a qualidade do sinal e até mesmo danificar equipamentos sensíveis.

Ondas de Céu As Ondas de Céu, também conhecidas como Ondas Eletromagnéticas de Baixa Frequência (*ELF - Extremely Low Frequency*), são um tipo de onda eletromagnética que é gerada por descargas atmosféricas, como raios. Essas ondas têm frequências inferiores a 300 Hz e se propagam pela atmosfera terrestre.

As Ondas de Céu são especialmente interessantes devido à sua capacidade de se propagar grandes distâncias e atravessar obstáculos naturais, como montanhas e oceanos. Elas podem ser detectadas e medidas em estações receptoras especializadas, conhecidas como *VLF/LF (Very Low Frequency/Low Frequency)* ou *ELF receivers*.

Essas ondas têm aplicações em diferentes áreas, como comunicações submarinas, monitoramento de atividades sísmicas, estudos climáticos e estudos de ionosfera. Além disso, as Ondas de Céu também são utilizadas em pesquisas científicas para entender melhor as descargas atmosféricas e seu impacto no ambiente.

Uso nos sistemas de Monitoramento As Descargas Atmosféricas, também conhecidas como Raios, podem gerar ondas eletromagnéticas na faixa de frequência *VLf* (*Very Low Frequency*) que são chamadas de *Sferics* (abreviação de "*atmospherics*"). Essas ondas se propagam pela atmosfera e são detectadas por receptores especializados.

Os estudos de Budden (1951), Wait (1961) e Lee (1986) demonstraram que as ondas *VLf* têm a capacidade de se propagar por longas distâncias devido ao comportamento da ionosfera como um condutor perfeito. A ionosfera é uma região da atmosfera que contém partículas ionizadas e, devido a suas propriedades elétricas, permite a propagação eficiente das ondas *VLf*.

Essas ondas *VLf* são utilizadas para diversos fins, como monitoramento de atividades atmosféricas, estudos climáticos e pesquisas científicas. Além disso, as *Sferics* podem fornecer informações valiosas sobre a ocorrência de descargas atmosféricas em determinadas áreas geográficas.

É importante ressaltar que as ondas *VLf* têm características de propagação específicas e são distintas das ondas de rádio convencionais utilizadas em comunicações diárias, como rádio *AM/FM*.

A propagação em *VLf* a longas distâncias pode ocorrer devido a uma combinação de ondas de superfície e ondas de céu. Essa combinação pode resultar em interferência, principalmente devido à ocorrência de combinação destrutiva das ondas.

As ondas de superfície se propagam ao longo da superfície terrestre, enquanto as ondas de céu são refletidas pela ionosfera e retornam à superfície. Quando essas duas ondas se encontram, podem ocorrer fenômenos de interferência construtiva ou destrutiva.

Na interferência construtiva, as ondas se somam e resultam em um reforço mútuo, o que pode levar a um aumento da intensidade do sinal. Já na interferência destrutiva, as ondas se anulam parcial ou totalmente, resultando em uma diminuição da intensidade do sinal.

A interferência pela combinação destrutiva das ondas pode causar áreas de sombra ou regiões onde o sinal é atenuado, prejudicando a recepção adequada das transmissões em *VLf*. Em monitoramento de raios, a estimativa de distância entre pontos de interferência destrutiva máxima é de cerca de 400 *km*.

Campo Elétrico Atmosférico O campo elétrico atmosférico é a grandeza que descreve a força elétrica exercida em uma carga elétrica devido à presença das cargas na atmosfera. Ele é definido como a razão entre o potencial elétrico (ou potencial eletrostático) sobre uma carga elétrica e a distância entre os dipolos elétricos.

As linhas de campo elétrico são representações gráficas que mostram a direção e intensidade do campo elétrico em diferentes pontos do espaço. No caso do campo elétrico atmosférico, as linhas de campo são radiais, ou seja, partem das cargas positivas (*C+*) e terminam nas cargas negativas (*C-*).

Além disso, essas linhas de campo são refletivas, o que significa que elas podem ser refletidas ou desviadas quando encontram obstáculos ou outras cargas elétricas.

Essas características do campo elétrico atmosférico são importantes para entender a distribuição das cargas elétricas na atmosfera durante eventos como descargas atmosféricas, como os raios. O conhecimento do campo elétrico e das linhas de campo permite estudar o comportamento das cargas elétricas na atmosfera e compreender os fenômenos relacionados, além de fornecer informações valiosas para o desenvolvimento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Sistemas De Monitoramento Os sistemas de monitoramento desempenham um papel fundamental na coleta de dados e informações em diversas áreas. No contexto dos raios, esses sistemas são especialmente importantes para garantir a segurança e fornecer dados essenciais para diferentes setores.

Um sistema de monitoramento de raios é projetado para detectar e registrar a ocorrência de descargas atmosféricas. Utilizando tecnologias avançadas, como sensores de campo elétrico, antenas e sistemas de posicionamento global (GPS), esses sistemas são capazes de identificar e rastrear a localização precisa dos raios.

Ao reunir informações precisas sobre a atividade de raios, os sistemas de monitoramento permitem uma melhor compreensão dos padrões climáticos locais e regionais, além de contribuírem para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação de danos causados por raios. Essa capacidade de monitoramento é fundamental para a tomada de decisões informadas e o planejamento eficaz, proporcionando maior segurança e proteção às comunidades em relação a eventos extremos relacionados aos raios.

LIS O Sistema de Monitoramento LIS (Lightning Imaging Sensor) é um sistema utilizado para detectar e monitorar a ocorrência de descargas atmosféricas, como os raios. O LIS é um instrumento baseado em satélites que utiliza sensores ópticos para capturar e analisar os sinais de luz gerados pelas descargas atmosféricas.

O principal objetivo do sistema LIS é fornecer informações sobre a distribuição espacial e temporal dos raios, permitindo um monitoramento em escala global. Ele é capaz de detectar e registrar informações sobre a intensidade, localização e frequência dos raios em diferentes regiões do planeta.

O sistema LIS opera detectando as emissões ópticas de curta duração e alta intensidade geradas durante uma descarga atmosférica. Essas emissões são capturadas pelos sensores do satélite e processadas para determinar a localização precisa do evento de raio.

Os dados coletados pelo sistema LIS são utilizados para diversas aplicações, incluindo estudos climáticos, previsão de tempestades, monitoramento de incêndios florestais causados por raios, análise

de interações entre raios e nuvens, entre outros. Essas informações são essenciais para entender melhor os fenômenos relacionados a descargas atmosféricas e para desenvolver estratégias de proteção e segurança em áreas afetadas por tempestades elétricas.

OTD O Sistema de Monitoramento OTD (*Ozone Mapping and Profiler Suite Total Lightning Data*) é um sistema utilizado para monitorar descargas atmosféricas, incluindo raios, em todo o mundo. Ele faz parte do conjunto de instrumentos conhecido como *Ozone Mapping and Profiler Suite* (OMPS), projetado para medir a concentração de ozônio e outros parâmetros atmosféricos.

O OTD é um instrumento baseado em satélite que usa sensores ópticos para detectar as emissões de luz geradas pelas descargas atmosféricas. Essas emissões são capturadas pelo sensor, que mede a intensidade, a localização e a duração dos eventos de descarga. O sistema OTD é capaz de detectar tanto os raios intra-nuvens quanto os raios nuvem-solo.

Uma das principais vantagens do sistema OTD é sua capacidade de detectar raios mesmo durante o dia, quando a luz solar pode interferir nas medições. Além disso, o OTD fornece informações valiosas sobre a distribuição espacial e temporal dos raios, permitindo um monitoramento abrangente das descargas atmosféricas em diferentes regiões do mundo.

Os dados coletados pelo sistema OTD são usados para diversas aplicações, como estudos climáticos, previsão do tempo, monitoramento de tempestades severas, estudos de relâmpagos em áreas vulneráveis, entre outros. Essas informações ajudam a melhorar a compreensão dos fenômenos atmosféricos e a desenvolver estratégias de proteção e segurança contra raios.

OLS O *Operational Linescan System* (OLS) é um sistema de monitoramento usado para capturar imagens e dados de sensoriamento remoto da Terra. Esse sistema é frequentemente associado ao satélite *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), que é operado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos.

O OLS é projetado para fornecer imagens noturnas de baixa resolução espacial e é capaz de detectar fontes de luz visíveis, como luzes de cidades, vilas, áreas industriais, embarcações, incêndios e outros fenômenos luminosos. Ele utiliza sensores sensíveis à luz e processamento de imagem para capturar essas informações durante as passagens orbitais do satélite.

Essas imagens são usadas para diversos fins, incluindo monitoramento de iluminação noturna, análise de padrões de assentamentos humanos, mapeamento de áreas urbanas, estudos de mudanças ambientais, monitoramento de atividades marítimas e detecção de incêndios.

O OLS tem sido uma ferramenta útil para fornecer informações sobre a distribuição e o padrão de iluminação noturna em todo o mundo, permitindo a análise de tendências e mudanças ao longo

do tempo. No entanto, é importante observar que sua resolução espacial é relativamente baixa, o que significa que detalhes finos podem não ser capturados com precisão.

É importante ressaltar que as informações específicas sobre o Sistema de Monitoramento OLS podem variar dependendo do contexto em que está sendo utilizado. Essa descrição fornece uma visão geral das características e aplicações gerais do OLS em relação ao sensoriamento remoto e monitoramento da Terra.

FORTE FORTE (*Fast On-orbit Recording of Transient Events*) é um sistema de monitoramento espacial desenvolvido pela Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA) dos Estados Unidos. Foi projetado para detectar e registrar eventos transientes eletromagnéticos na Terra, como explosões nucleares, relâmpagos, pulsos eletromagnéticos (EMPs), entre outros fenômenos de interesse.

O sistema FORTE consiste em uma constelação de microsatélites equipados com instrumentos de detecção e gravação de alta velocidade. Esses satélites são capazes de coletar dados em tempo real e armazená-los para posterior análise. Eles são projetados para capturar informações sobre a localização, intensidade, duração e outras características dos eventos transientes.

O principal objetivo do FORTE é fornecer capacidades avançadas de monitoramento e análise de eventos transientes eletromagnéticos. Esses eventos podem ter implicações importantes em áreas como segurança nacional, defesa, monitoramento de explosões nucleares, estudos de relâmpagos e compreensão dos fenômenos atmosféricos.

O sistema FORTE foi lançado em 1997 e, desde então, tem contribuído para avanços significativos na detecção e análise de eventos transientes eletromagnéticos. Os dados coletados pelo FORTE são utilizados por pesquisadores, cientistas e especialistas em diversas áreas para melhorar nossa compreensão dos fenômenos e desenvolver soluções para desafios relacionados.

É importante observar que as informações específicas sobre o sistema FORTE podem estar sujeitas a restrições e considerações de segurança, uma vez que está relacionado a atividades de defesa e monitoramento sensíveis. A disponibilidade e o acesso aos dados do FORTE podem ser controlados e regulamentados por autoridades relevantes.

WWLLN A rede WWLLN (*World Wide Lightning Location Network*) é uma rede global de detecção de raios por meio de sensores de detecção de descargas atmosféricas. Ela é composta por estações de monitoramento distribuídas em todo o mundo, que registram informações precisas sobre a localização e a intensidade das descargas atmosféricas.

A WWLLN utiliza uma abordagem de detecção baseada na medição das ondas eletromagnéticas

de baixa frequência (LF) geradas por raios. Essas ondas se propagam pela atmosfera e podem ser detectadas por sensores sensíveis instalados em diferentes locais. Ao combinar as informações coletadas por várias estações, a rede WWLLN é capaz de determinar com precisão a localização dos raios.

Além de fornecer dados sobre a localização dos raios, a WWLLN também registra informações sobre a intensidade das descargas atmosféricas, permitindo a análise de padrões e estatísticas relacionadas à atividade de raios em diferentes regiões do mundo. Esses dados são valiosos para estudos climáticos, pesquisas científicas, previsão de tempestades e monitoramento de eventos extremos.

A rede WWLLN desempenha um papel importante no monitoramento global de raios e na compreensão dos processos atmosféricos associados a eles. Suas informações são utilizadas por agências meteorológicas, instituições de pesquisa e outros usuários interessados em estudar e monitorar a atividade de raios em escala global.

BrasilDAT/RinDAT A rede BrasilDAT/RinDAT é uma rede de monitoramento de raios que opera no Brasil. Ela é composta por estações distribuídas em diferentes regiões do país, responsáveis por detectar e registrar as descargas atmosféricas que ocorrem em suas respectivas áreas de cobertura.

O objetivo principal da rede BrasilDAT/RinDAT é fornecer informações precisas e em tempo real sobre a atividade de raios no Brasil. Isso inclui dados sobre a localização, intensidade e frequência das descargas atmosféricas, permitindo a análise e o monitoramento da atividade elétrica nas nuvens.

As estações da rede BrasilDAT/RinDAT utilizam sensores eletromagnéticos para detectar os campos elétricos e magnéticos gerados pelas descargas atmosféricas. Esses sensores são capazes de captar os sinais eletromagnéticos emitidos pelos raios e transmitir as informações para um centro de processamento de dados centralizado.

Uma vez que os dados são coletados e processados, eles podem ser utilizados para diversos fins, como previsão de tempestades, monitoramento climático, estudos científicos e aplicações relacionadas à segurança e proteção de infraestruturas sensíveis, como sistemas elétricos, telecomunicações e aviação.

LDAR A Rede LDAR (*Lightning Detection and Ranging*) é um sistema de monitoramento de raios que utiliza tecnologia avançada para detectar, localizar e rastrear descargas atmosféricas. Ao contrário de outros métodos de detecção de raios, que dependem principalmente de sensores de radiofrequência, a Rede LDAR emprega técnicas de medição óptica para identificar a ocorrência de raios.

O princípio de funcionamento da Rede LDAR baseia-se na detecção da luz emitida pelos raios. Câmeras de alta velocidade e sensibilidade são instaladas em locais estrategicamente selecionados, permitindo capturar imagens dos raios em alta resolução e em tempo real. Essas imagens são processadas para determinar a localização precisa das descargas atmosféricas.

Além das câmeras, a Rede LDAR também pode incluir outros dispositivos, como sensores de campo elétrico e de campo magnético, que ajudam a complementar as informações sobre os raios. Esses sensores auxiliares permitem medir as características elétricas e magnéticas das descargas, fornecendo dados adicionais para a análise e estudo dos fenômenos atmosféricos.

A Rede LDAR é amplamente utilizada em diversas aplicações, como monitoramento meteorológico, prevenção de incêndios florestais, segurança em atividades ao ar livre e pesquisa científica. Os dados coletados pela rede são utilizados para criar mapas de atividade de raios, identificar áreas de maior incidência, estudar padrões de comportamento dos raios e fornecer alertas em tempo real para a tomada de decisões.

Com a sua capacidade de detectar e localizar raios com alta precisão, a Rede LDAR desempenha um papel importante na proteção de vidas e propriedades contra os perigos associados às descargas atmosféricas. Além disso, contribui para o avanço do conhecimento científico sobre os raios e auxilia na melhoria dos modelos de previsão e mitigação de tempestades elétricas.

ZEUS/StarNET A Rede ZEUS/STARNET é um sistema de monitoramento de raios que utiliza sensores de detecção de descargas atmosféricas para coletar dados em tempo real sobre a atividade elétrica na atmosfera. Essa rede é composta por uma série de estações distribuídas geograficamente, cada uma equipada com sensores de alta sensibilidade para detectar a ocorrência de raios.

O objetivo principal da Rede ZEUS/STARNET é monitorar e registrar a localização, intensidade e frequência de descargas atmosféricas, incluindo raios nuvem-solo e raios intra-nuvem. Essas informações são importantes para a prevenção de danos causados por raios, como incêndios, danos a infraestruturas elétricas e riscos à segurança humana.

Os sensores da Rede ZEUS/STARNET são capazes de detectar descargas atmosféricas em uma ampla faixa de frequências, permitindo um monitoramento abrangente e preciso. Os dados coletados pelos sensores são transmitidos em tempo real para um centro de processamento, onde são analisados e utilizados para gerar mapas de atividade de raios, estatísticas e alertas de raios.

A Rede ZEUS/STARNET desempenha um papel fundamental na vigilância e monitoramento de raios, fornecendo informações valiosas para diversas áreas, como meteorologia, segurança pública, aviação, indústria de energia e planejamento urbano. Com base nos dados coletados pela rede, é possível tomar medidas preventivas, como a evacuação de áreas de risco durante tempestades elétricas,

além de contribuir para a pesquisa científica sobre raios e fenômenos atmosféricos relacionados.

Tipos Clássicos de Sistemas de Detecção e Monitoramento de Raios

TOA - *Time Of Arrival* TOA (Time Of Arrival) é um conceito utilizado em sistemas de monitoramento e localização para determinar o tempo em que um sinal é recebido em um determinado ponto. Essa informação de tempo é então utilizada para calcular a distância entre o emissor do sinal e o receptor.

No contexto de raios e descargas atmosféricas, o TOA é frequentemente utilizado para localizar a posição geográfica de uma descarga com base no tempo em que o sinal de rádio gerado pela descarga é recebido em várias estações de monitoramento. Essas estações estão espalhadas em locais estratégicos e possuem relógios sincronizados para garantir a precisão na medição do tempo.

Ao receber o sinal de rádio emitido por uma descarga atmosférica, cada estação de monitoramento registra o tempo exato em que o sinal foi recebido. Esses tempos são então comparados e utilizados para calcular o tempo de chegada relativo do sinal em cada estação. Com base nesses tempos de chegada e conhecendo a velocidade de propagação do sinal de rádio, é possível determinar a distância entre a descarga e cada estação.

Ao combinar as informações de tempo e distância de várias estações de monitoramento, é possível triangular a posição estimada da descarga atmosférica. Esse método de localização baseado no TOA é amplamente utilizado em redes de detecção de raios e sistemas de monitoramento para fornecer informações precisas sobre a localização de descargas em tempo real.

O TOA também pode ser aplicado em outros contextos de monitoramento e localização, como em sistemas de posicionamento global (GPS), onde o tempo de chegada de sinais de satélites em receptores terrestres é utilizado para determinar a posição do receptor com base na diferença de tempo de chegada dos sinais. Em resumo, o TOA desempenha um papel fundamental na determinação de distâncias e localizações em sistemas de monitoramento e localização.

MDF - *Magnetic Direction Finder* MDF (Magnetic Direction Finder) é um dispositivo utilizado para determinar a direção de uma fonte de campo magnético. Ele consiste em um sistema de antenas e sensores que são sensíveis ao campo magnético e são capazes de medir sua intensidade e direção.

O MDF é comumente utilizado em várias aplicações, incluindo monitoramento de raios e detecção de descargas atmosféricas. No contexto de raios, o MDF pode ser utilizado para identificar a direção de uma descarga e auxiliar na sua localização precisa.

O princípio de funcionamento do MDF envolve a detecção das componentes horizontal e vertical

do campo magnético. O dispositivo possui antenas orientadas em direções específicas, permitindo a medição das variações do campo magnético em relação a essas direções. Com base nas leituras das antenas, é possível determinar a direção da fonte do campo magnético.

No caso específico de detecção de raios, o MDF pode ser usado para localizar a posição aproximada de uma descarga atmosférica, fornecendo informações sobre a direção em que o raio ocorreu. Essa informação pode ser combinada com outros dados, como a intensidade do campo elétrico e o tempo de chegada do sinal, para refinar ainda mais a localização da descarga.

O MDF é uma ferramenta valiosa em sistemas de monitoramento de raios, permitindo a detecção e localização precisa de descargas atmosféricas. Além disso, também é usado em outras aplicações, como navegação marítima, pesquisa geofísica e comunicações, onde a determinação da direção de campos magnéticos é essencial.

Sensores de Descargas Atmosféricas

SAFIR SAFIR (*Surveillance et Alerte par Interférométrie Radiolélectrique*) é um sistema de monitoramento e alerta que utiliza a interferometria radiolétrica para detecção e localização de fenômenos atmosféricos, como descargas atmosféricas e tempestades elétricas.

O SAFIR consiste em uma rede de estações de recepção de sinais de rádio espalhadas em uma determinada área geográfica. Essas estações medem os sinais de rádio emitidos por transmissores terrestres de rádio e televisão. Quando ocorre uma descarga atmosférica ou tempestade elétrica na região monitorada, o evento produz perturbações no campo eletromagnético, afetando os sinais de rádio recebidos pelas estações do SAFIR.

Através da interferometria radiolétrica, que envolve a análise dos sinais recebidos por múltiplas estações, é possível determinar a direção e a intensidade das perturbações causadas pelos eventos atmosféricos. Com base nesses dados, o SAFIR é capaz de detectar e localizar as descargas atmosféricas em tempo real.

Além da detecção e localização de descargas atmosféricas, o SAFIR também fornece informações adicionais, como a taxa de raios por minuto, a evolução temporal das tempestades elétricas e a identificação de tempestades severas. Essas informações são úteis para alertar e orientar as autoridades competentes, como serviços de meteorologia, defesa civil e companhias de energia, permitindo que tomem medidas adequadas para garantir a segurança das pessoas e das infraestruturas.

IMPACT IMPACT (*IMProved Accuracy from Combined Technology*) é um sistema de monitoramento e detecção de descargas atmosféricas que utiliza uma combinação de tecnologias para

melhorar a precisão e a eficácia na identificação e localização de raios.

O IMPACT é baseado na integração de várias tecnologias de detecção de raios, incluindo sensores de campo elétrico e sensores de campo magnético. Cada tecnologia fornece informações complementares sobre as características das descargas atmosféricas, permitindo uma análise mais precisa e abrangente.

Os sensores de campo elétrico medem as variações no campo elétrico atmosférico causadas pelas descargas de raios. Esses sensores são capazes de detectar a presença de descargas elétricas e fornecer informações sobre a polaridade, intensidade e duração das mesmas.

Os sensores de campo magnético medem as perturbações no campo magnético causadas pelas correntes elétricas geradas pelas descargas atmosféricas. Esses sensores ajudam a identificar a localização e a direção das descargas de raios.

O objetivo do sistema IMPACT é melhorar a capacidade de monitoramento e detecção de raios, fornecendo informações valiosas para a prevenção de danos causados por descargas atmosféricas e para a segurança das pessoas e das instalações.

LPATS LPATS (*Lightning Positioning and Tracking System*) é um sistema de monitoramento e rastreamento de raios que utiliza tecnologia TOA para detectar, localizar e acompanhar a atividade de raios em tempo real. O objetivo principal do LPATS é fornecer informações precisas sobre a localização e dos raios.

O LPATS é composto por uma rede de sensores distribuídos em uma determinada área geográfica. Esses sensores são capazes de detectar a descarga elétrica de um raio e calcular sua posição com base no tempo de chegada do sinal elétrico em diferentes locais. Ao combinar as informações de vários sensores, o sistema pode determinar a localização tridimensional do raio.

Total Lightning Sensor LS8000 O Total Lightning Sensor LS8000 é um sistema avançado de detecção de raios que fornece informações abrangentes sobre a atividade elétrica atmosférica, incluindo raios nuvem-terra (descargas em nuvem e descargas em solo) e raios intra-nuvem. O sensor é capaz de detectar e localizar raios em tempo real, permitindo um monitoramento preciso e contínuo da atividade de raios em uma determinada área geográfica.

O LS8000 utiliza tecnologia de detecção elétrica para identificar os diferentes tipos de raios. Ele é composto por múltiplos sensores espalhados em uma área de monitoramento, que captam os sinais eletromagnéticos gerados pelas descargas elétricas. Esses sinais são processados pelo sistema para determinar a localização e características dos raios detectados.

Uma das principais vantagens do LS8000 é sua capacidade de distinguir entre raios nuvem-terra

e raios intra-nuvem. Isso permite uma análise mais precisa da atividade elétrica atmosférica e uma melhor compreensão dos processos de formação de tempestades. Além disso, o sensor fornece informações em tempo real sobre a taxa de incidência de raios, a intensidade da atividade elétrica e outras métricas relevantes.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

As informações sobre os sensores parecem sair de um manual: compre o meu e seja feliz!!!

Aula 20 - Linhas de Transmissão e Distribuição

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Aprendizado da Aula

Efeito Corona O efeito corona é um fenômeno elétrico que ocorre em linhas de transmissão de alta tensão. Quando a tensão em uma linha atinge um determinado valor crítico, ocorre a ionização do ar circundante, formando uma região de descarga elétrica chamada de corona.

A corona é composta por íons e elétrons que são liberados a partir das moléculas de ar ionizado. Essas partículas carregadas podem interagir com a superfície condutora da linha de transmissão, gerando correntes elétricas que fluem para a atmosfera. A corona é visualmente perceptível como um halo luminoso ao redor dos condutores da linha.

Esse fenômeno tem algumas consequências indesejadas nas linhas de transmissão. Primeiro, a corona resulta em perdas de energia, uma vez que parte da energia elétrica é dissipada na forma de luz e calor. Essas perdas podem reduzir a eficiência da transmissão de energia.

Além disso, a corona pode produzir ruídos de rádio devido à radiação eletromagnética gerada durante o processo de ionização do ar. Esses ruídos podem causar interferência em sistemas de comunicação próximos às linhas de transmissão.

Outra preocupação relacionada ao efeito corona é o desgaste dos materiais isolantes utilizados nas linhas de transmissão. A formação da corona está associada a um estresse elétrico elevado nos isoladores, o que pode levar ao envelhecimento prematuro e à redução da vida útil desses componentes.

Para minimizar os efeitos do efeito corona, as linhas de transmissão são projetadas levando em consideração fatores como o espaçamento adequado entre os condutores, o uso de materiais isolantes apropriados e o controle da tensão nas linhas. Além disso, a utilização de cabos com superfícies lisas e a aplicação de dispositivos redutores de corona, como anéis corona, também são técnicas empregadas para mitigar esse fenômeno.

O efeito corona em linhas de transmissão de alta tensão pode atuar como um precursor para a ocorrência de raios. Durante a formação da corona, há a ionização do ar circundante, o que resulta na liberação de elétrons e íons.

Essas partículas carregadas podem interagir com partículas e moléculas presentes na atmosfera, criando um caminho de menor resistência para a descarga elétrica. Esse caminho pode ser utilizado como um "gatilho" para o desenvolvimento de um raio.

A ionização do ar e a formação da corona podem ocorrer quando a tensão elétrica na linha de transmissão atinge um valor crítico. O campo elétrico intenso nas proximidades dos condutores da linha pode ionizar o ar ao redor, criando um canal de plasma condutor.

Esse canal de plasma funciona como uma espécie de "ponte" entre a nuvem de tempestade e a linha de transmissão, permitindo que a carga elétrica flua através dele, resultando na descarga atmosférica conhecida como raio.

Embora o efeito corona possa desempenhar um papel como precursor de raios, não é o único fator envolvido na formação de uma descarga atmosférica. Outros mecanismos, como o processo de separação de cargas dentro das nuvens, também desempenham um papel significativo na geração de raios.

O efeito corona em uma torre de transmissão depende de vários fatores, incluindo:

- **Tensão elétrica:** O efeito corona ocorre quando a tensão elétrica na torre de transmissão atinge um valor crítico. Quanto maior a tensão aplicada, maior a probabilidade de ocorrer a ionização do ar e a formação da corona.
- **Geometria e espaçamento dos condutores:** A configuração e o espaçamento dos condutores na torre de transmissão afetam o campo elétrico ao redor deles. Uma configuração que resulta em um campo elétrico mais intenso pode aumentar a probabilidade de ocorrência da corona.
- **Características do ar ambiente:** A densidade e a umidade do ar circundante podem influenciar o efeito corona. O ar seco e a baixa umidade facilitam a ionização e a formação da corona.
- **Condições meteorológicas:** Fatores climáticos, como temperatura, pressão atmosférica e presença de chuva ou nevoeiro, também podem afetar o efeito corona. Mudanças nas condições meteorológicas podem alterar as propriedades elétricas do ar e, consequentemente, influenciar a formação da corona.
- **Condições da superfície da torre:** A rugosidade e a limpeza da superfície da torre de transmissão podem afetar o efeito corona. Superfícies irregulares ou sujas podem facilitar a formação da corona devido a uma maior concentração de campo elétrico em certas regiões.

- **Isolamento da torre:** A qualidade do isolamento utilizado na torre de transmissão desempenha um papel importante na ocorrência do efeito corona. Materiais isolantes de boa qualidade e devidamente dimensionados ajudam a minimizar a formação da corona.

Dimensionamento dos Fios A dimensão dos fios de uma linha de transmissão pode ter influência no efeito corona. As características geométricas, como o diâmetro e a forma dos fios, podem afetar o campo elétrico ao redor deles e, por sua vez, influenciar a formação da corona.

Quanto maior for o diâmetro do fio, menor será a intensidade do campo elétrico em sua superfície. Isso ocorre porque um fio de maior diâmetro tem uma área de superfície maior em comparação a um fio de menor diâmetro, distribuindo a carga elétrica de forma mais uniforme. Um campo elétrico mais uniforme reduz a probabilidade de ionização do ar e formação da corona.

Além do diâmetro, a forma dos fios também pode desempenhar um papel na ocorrência do efeito corona. Fios com formas irregulares, como fios com bordas ásperas ou salientes, podem gerar uma maior concentração do campo elétrico em pontos específicos. Essas irregularidades podem facilitar a formação da corona nessas regiões, aumentando a probabilidade de ocorrer o fenômeno.

Distanciamento dos Fios A distância entre os fios de uma linha de transmissão também pode ter influência no efeito corona. O espaçamento adequado entre os condutores é um aspecto importante a ser considerado para controlar a ocorrência da corona.

Quando os fios estão muito próximos um do outro, o campo elétrico intenso gerado pelo potencial elétrico entre eles pode aumentar a probabilidade de ionização do ar e formação da corona. Um espaçamento inadequado pode levar a uma maior concentração do campo elétrico em regiões específicas, facilitando a formação da corona nessas áreas.

Por outro lado, se os fios estiverem muito distantes um do outro, o campo elétrico entre eles será reduzido e a probabilidade de ocorrência da corona diminuirá. Um espaçamento maior entre os fios pode ser eficaz para minimizar o efeito corona, mas também pode levar a uma maior carga mecânica na estrutura da linha de transmissão, exigindo torres mais altas e reforçadas.

Altura da Torre De fato, a altura da torre de transmissão pode ter um efeito no fenômeno da corona. A altura da torre influencia a distância vertical entre os condutores e o solo, o que pode afetar o efeito corona de duas maneiras principais:

- **Distância do condutor ao solo:** Quando a altura da torre é maior, os condutores da linha de transmissão ficam mais afastados do solo. Essa maior distância reduz a probabilidade de ocorrência do efeito corona, pois diminui a influência das irregularidades e impurezas presentes no

solo que poderiam promover a ionização do ar.

- **Gradiente de campo elétrico:** A altura da torre também pode afetar o gradiente de campo elétrico ao redor dos condutores. Um gradiente de campo elétrico mais suave pode reduzir a probabilidade de ionização do ar e formação da corona. A altura adequada da torre pode ajudar a alcançar um campo elétrico mais uniforme, minimizando as regiões de alta concentração de carga elétrica e, assim, reduzindo o efeito corona.

Altitude A altitude pode ter um efeito no fenômeno da corona em linhas de transmissão, devido às variações nas condições atmosféricas que ocorrem em diferentes altitudes. No entanto, os efeitos específicos da altitude no efeito corona podem variar e dependem de vários fatores.

Uma mudança significativa na altitude afeta principalmente as propriedades do ar circundante, como a densidade do ar, a pressão atmosférica e a umidade. Essas mudanças podem afetar o comportamento do efeito corona de várias maneiras:

- **Densidade do ar:** Em altitudes mais elevadas, a densidade do ar é geralmente menor devido à menor pressão atmosférica. Uma menor densidade do ar pode resultar em uma menor taxa de ionização, o que pode reduzir a probabilidade de formação da corona.
- **Pressão atmosférica:** A pressão atmosférica diminui com o aumento da altitude. Isso pode levar a uma menor rigidez dielétrica do ar, facilitando a formação da corona em comparação com altitudes mais baixas. No entanto, os efeitos da pressão atmosférica na formação da corona são mais sutis e podem variar dependendo de outros fatores envolvidos.
- **Umidade:** A umidade relativa do ar também pode variar com a altitude. Em geral, a umidade mais baixa aumenta a probabilidade de ocorrência da corona, pois o ar seco facilita a ionização. No entanto, os efeitos específicos da umidade na formação da corona dependem da combinação com outros fatores, como a densidade do ar e a pressão atmosférica.

Modelo de Linhas de Transmissão e Distribuição Existem vários modelos utilizados para representar linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Esses modelos são usados para estudar o comportamento das linhas, calcular parâmetros elétricos, simular fluxo de potência, análise de curto-circuito, entre outras aplicações. Alguns dos modelos mais comuns são:

- **Modelo de Linha de Transmissão Distribuída:** Este modelo considera a linha de transmissão como uma série de elementos distribuídos ao longo da extensão da linha. Cada elemento representa a impedância, admitância e capacitância distribuída da linha. É um modelo mais

detalhado e preciso, utilizado para estudos de transientes eletromagnéticos e análises de alta frequência.

- **Modelo Pi (π):** O modelo Pi é uma simplificação da linha de transmissão, onde os parâmetros elétricos são concentrados em duas impedâncias e uma capacitância. É um modelo amplamente utilizado para estudos de fluxo de potência e análise de curto-circuito em sistemas de transmissão e distribuição.
- **Modelo T:** O modelo T é uma variação do modelo Pi, onde as impedâncias são representadas em uma configuração em forma de T. É utilizado em estudos de fluxo de potência, análise de curto-circuito e estudos de estabilidade em sistemas elétricos.
- **Modelo de Linha de Transmissão em Sequência de Componentes:** Este modelo considera a linha de transmissão como uma sequência de componentes discretos, como resistências, indutâncias e capacitâncias. Cada componente é representado separadamente, permitindo um estudo mais detalhado do comportamento da linha.

Além desses modelos, existem também modelos mais complexos e sofisticados, como o modelo de parâmetros distribuídos, o modelo de ondas viajantes (*wave propagation model*) e o modelo de elementos finitos. Esses modelos são utilizados para simulações mais avançadas e precisas, levando em consideração efeitos como perdas, reflexões e distorções em frequência.

Modelos de Acoplamento Entre Nuvem e Linha de Transmissão O acoplamento elétrico entre nuvens e linhas de transmissão ocorre principalmente devido à diferença de potencial elétrico entre a nuvem e os condutores da linha. Quando uma nuvem carregada eletricamente se aproxima de uma linha de transmissão, pode ocorrer um acoplamento elétrico que resulta em correntes indesejadas na linha. Esse acoplamento pode ser dividido em dois principais tipos:

- **Descarga Atmosférica Direta (DAD):** Quando a nuvem carregada eletricamente se aproxima o suficiente dos condutores da linha de transmissão, a diferença de potencial elétrico entre a nuvem e os condutores pode se tornar suficientemente alta para que ocorra uma descarga direta. Essa descarga, conhecida como raio, pode transferir uma grande quantidade de carga elétrica para os condutores, causando danos à linha de transmissão.
- **Descarga Atmosférica Indireta (DAI):** Mesmo que não ocorra uma descarga direta entre a nuvem e os condutores, a diferença de potencial elétrico entre eles pode induzir correntes indesejadas na linha de transmissão. Essas correntes são conhecidas como correntes de surto ou

correntes induzidas por campos eletromagnéticos transientes gerados pela nuvem. Essas correntes de surto podem causar interferências e danos aos equipamentos conectados à linha de transmissão.

Para mitigar os efeitos do acoplamento elétrico entre nuvens e linhas de transmissão, várias medidas de proteção são adotadas, incluindo:

- **Instalação de para-raios:** Os para-raios são dispositivos de proteção projetados para desviar as descargas atmosféricas diretas para o solo, evitando que atinjam os condutores da linha de transmissão.
- **Aterramento adequado:** Um sistema de aterramento adequado é essencial para fornecer um caminho seguro para a corrente de descarga atmosférica. O aterramento eficiente ajuda a desviar a energia da descarga para o solo, protegendo os equipamentos e condutores da linha.
- **Proteção de equipamentos:** Equipamentos sensíveis conectados à linha de transmissão devem ser protegidos por dispositivos de proteção contra surtos, como varistores e supressores de surto, para evitar danos causados por correntes indesejadas.

O acoplamento elétrico entre nuvens e linhas de transmissão é uma área complexa e em constante estudo. Os projetos de linhas de transmissão são desenvolvidos levando em consideração os riscos de descargas atmosféricas e a proteção adequada para minimizar os efeitos indesejados causados pelo acoplamento elétrico.

Modelo de Heilmann & Dartora Um estudo teórico realizado por Heilmann & Dartora (2014) propõe um modelo para estimar a ionização do ar e a condutividade elétrica em torno de uma linha de transmissão de 765 kV. Eles observaram que a condutividade do ar aumenta significativamente nas proximidades da linha de transmissão, em comparação com as condições normais. Esse aumento ocorre devido à quebra da rigidez dielétrica, o que favorece o processo de avalanche e aumenta a probabilidade de ocorrência de raios.

O modelo considera a presença de três condutores aéreos abaixo de uma tempestade. Em uma situação em que a altura dos condutores de fase (h_j) é igual à altura do solo (h_{solo}), fixada neste exemplo em 54 m, Heilmann & Dartora (2014) mostram que o campo elétrico do condutor (E_{cond}) pode ser estimado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\vec{E}_{cond} &= \sum_{j=1}^N \frac{V_{oj} e^{i\theta_j}}{\frac{2h_j}{a_j}} [E_{jx}\hat{a}_x + E_{jy}\hat{a}_y] \\ E_{jx} &= \frac{x}{x^2 + (y - h_j^2)^2} - \frac{x}{x^2 + (y + h_j^2)^2} \\ E_{jy} &= \frac{y - h_j}{x^2 + (y - h_j^2)^2} - \frac{y + h_j}{x^2 + (y + h_j^2)^2}\end{aligned}\tag{1}$$

O campo elétrico atmosférico abaixo da nuvem (E_{atm}), que se soma ao campo elétrico do condutor (E_{cond}), é dado por:

$$\vec{E}_{atm} = \frac{Q \cos \theta}{2\pi \epsilon_0 r^2} \hat{a}_y\tag{2}$$

O campo magnético gerado pelo condutor (H_{cond}) pode ser estimado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\vec{H}_{cond} &= \sum_{k=1}^N \frac{I_k e^{i\theta_k}}{2\pi} [H_{xk}\hat{a}_x + H_{yk}\hat{a}_y] \\ H_{xk} &= \frac{y - h_j}{x^2 + (y - h_j)^2} - \frac{y + h_j}{x^2 + (y + h_j)^2} \\ H_{yk} &= \frac{x}{x^2 + (y - h_j)^2} - \frac{x}{x^2 + (y + h_j)^2}\end{aligned}\tag{3}$$

Considerando x como a distância na direção \vec{x} ($\pm 30m$), y como a distância na direção y e θ como a diferença de fase na linha de transmissão, é possível descrever o comportamento do vetor de Poynting criado pelo condutor por unidade de área, levando em conta os efeitos do campo magnético descritos para um condutor linear. O módulo da intensidade de potência média é dado por:

$$S_{mean} = \frac{1}{2} \Re \{ \vec{E} \times \vec{H}^* \}\tag{4}$$

Ou seja, é a metade da parte real do vetor de Poynting. Com base na definição do vetor de Poynting do condutor, podemos discutir os efeitos da densidade de potência média em linhas de transmissão. Nesse contexto, Heilmann e Dartora (2014) mostraram que a densidade de energia eletromagnética (u), em comparação com a taxa de ionização do ar, pode ser expressa como:

$$u = \frac{S_{mean}}{c}\tag{5}$$

Nessa equação, S_{mean} representa o módulo da densidade de potência média em watts por metro quadrado (W/m^2), u é a densidade de energia eletromagnética em joules por metro cúbico (J/m^3), e

c é a velocidade da luz.

Ao tomar a razão da energia eletromagnética total contida em 1 metro cúbico de ar e a média da energia de ionização por molécula de ar, que é aproximadamente 14.7 eV (elétron-volts), podemos estimar o número de elétrons livres gerados por metro cúbico (\bar{e}). Esse número é da ordem de $6.7938 \times 10^{16} \frac{\bar{e}}{m^3}$. Essa magnitude está em concordância com os valores apresentados em outras literaturas, que variam de 10^{13} a $10^{19} \frac{\bar{e}}{m^3}$.

Essa relação nos fornece uma estimativa do número de elétrons livres gerados por unidade de volume de ar, permitindo uma compreensão da magnitude desse efeito em relação à densidade de energia eletromagnética presente.

Segundo teorias, a ocorrência dos chamados *pre-strikes* depende da antecipação da corrente da descarga de retorno devido à transferência de carga ao redor do condutor linear. Essa transferência de carga resulta no aumento da condutividade nas proximidades dos condutores da linha de transmissão, o que possibilita a formação de pequenas faíscas filamentosas conhecidas como *Sparks*.

Uma descarga de retorno pode ser gerada a partir do condutor quando o campo elétrico atinge um valor crítico. Esse fenômeno pode ser interpretado como a formação de um líder ascendente em um canal pré-ionizado a partir do condutor de fase da linha de transmissão.

Portanto, a probabilidade de um raio atingir uma linha de transmissão antes de atingir outro ponto é maior quando a densidade de energia eletromagnética no condutor é maior. De acordo com Uman (1984), a densidade de partículas ionizadas varia ao longo do tempo, o que influencia a velocidade do movimento de retorno.

Conclui-se, então, que uma região com uma alta taxa de ionização cria descargas corona, oferecendo condições para a formação de um canal direto com um líder descendente. Além disso, essa região pode gerar pequenas faíscas que, por sua vez, podem ser interpretadas como opções de conexão com portadores de carga durante a ocorrência de um raio.

2 Temas Impactantes, dúvidas e questionamentos

Nunca vi efeito corona sob uma perspectiva tão clara quanto nesta aula.

Aula 21 - Revisão do Conteúdo

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

1 Roadmap

1.1 Energia das Descargas Atmosféricas

A energia das descargas atmosféricas, como raios e raios, é um fenômeno natural de grande magnitude que ocorre durante tempestades elétricas. Essas descargas resultam em uma rápida liberação de energia elétrica na atmosfera, gerando fortes campos elétricos e magnéticos.

A energia de uma descarga atmosférica é impressionante. Um único raio pode liberar energia na faixa de vários bilhões de joules. Essa energia é gerada através do movimento rápido de cargas elétricas dentro das nuvens e entre as nuvens e a superfície da Terra.

A energia das descargas atmosféricas é capaz de aquecer o ar ao seu redor a temperaturas extremamente altas, resultando em um rápido aumento de temperatura e uma expansão explosiva do ar, o que gera o som característico do trovão. Além disso, a energia elétrica liberada pode causar danos significativos a estruturas, árvores, equipamentos eletrônicos e até mesmo representar riscos para seres humanos e animais.

Devido à sua alta energia e capacidade de causar danos, a compreensão e o estudo da energia das descargas atmosféricas são importantes para a segurança e a proteção contra raios. Pesquisas científicas e tecnológicas têm sido realizadas para desenvolver sistemas de detecção e prevenção de raios, bem como para entender melhor os mecanismos envolvidos nas descargas atmosféricas e sua interação com o ambiente.

1.2 NBEs e Campo Elétrico Abaixo das Tempestades

NBEs Os Pulsos Bipolares Estreitos (*Narrow Bipolar Pulses - NBPs*) são um tipo de descarga atmosférica intranuvem que ocorre durante tempestades elétricas. Esses pulsos são caracterizados por sua curta duração e forte emissão de radiofrequência (*RF*) no espectro de frequência muito alta (*VHF*).

Os *NBPs* são observados comumente em regiões tropicais e subtropicais, mais do que em regiões temperadas. Eles estão associados à iniciação de descargas intranuvem sem a formação de líderes escalonados, o que significa que eles não requerem o processo de formação gradual de canais elétricos como outros tipos de descargas.

Existem dois tipos principais de *NBPs*: os Pulsos Bipolares Estreitos Positivos (*Narrow Positive Bipolar Pulses - NPBPs*) e os Pulsos Bipolares Estreitos Negativos (*Narrow Negative Bipolar Pulses - NNBPs*). Os *NPBPs* ocorrem em altitudes de aproximadamente 6 km a 15 km, enquanto os *NNBPs* ocorrem em altitudes entre 15 km e 21 km.

Os campos elétricos medidos durante os *NBPs* são relativamente baixos, com valores em torno de 22.7 V/m para *NPBPs* e 17.6 V/m para *NNBPs*. Essas descargas representam áreas de estudo importantes para entender melhor os processos elétricos na atmosfera durante as tempestades.

Atualmente, os sistemas *wireless* operam em frequências que variam de 2.4 GHz a 5.8 GHz . Essas faixas de frequência são escolhidas porque são livres e abertas para uso por qualquer pessoa. Observações recentes da radiação de micro-ondas proveniente de relâmpagos despertaram interesse no estudo de seus efeitos em redes de comunicação sem fio.

Cientistas observaram uma forte radiação de micro-ondas em 1.63 GHz associada a eventos de relâmpagos do tipo nuvem-solo, como *NBPs*, *Steep Leader*, *Dart Leader* e retorno do raio. Medições detectaram radiação de micro-ondas em ondas milimétricas a 37.5 GHz a partir de um retorno do raio a uma distância inferior a 5 km . O sinal teve uma duração de 20 a $60 \mu\text{s}$. A intensidade máxima de radiação espectral foi superior a $10\text{-}19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{Hz})$, ou aproximadamente -180 dB .

Essas descobertas têm aumentado a conscientização sobre o impacto potencial da radiação de micro-ondas induzida por relâmpagos em sistemas de comunicação sem fio. Pesquisas adicionais são necessárias para entender melhor e mitigar esses efeitos, a fim de garantir uma comunicação sem fio confiável e ininterrupta na presença de atividade de relâmpagos.

Campo Elétrico Abaixo da Tempestade Durante condições de tempo bom, o campo elétrico vertical oscila em torno de valores negativos, pois o potencial elétrico aumenta com a altura. Isso significa que uma antena vertical terá um potencial positivo em relação à sua base fixada no solo.

No entanto, durante uma tempestade, o campo elétrico vertical pode se tornar muito grande, da

ordem de 4 kV/m, e geralmente muda de sinal (polaridade) a partir dos valores negativos. Essas oscilações no campo elétrico vertical são causadas pelo movimento das nuvens, que se deslocam de forma relativamente lenta, influenciando as variações do campo elétrico também no solo.

As nuvens carregadas de uma tempestade podem induzir uma distribuição desigual de cargas no solo, criando diferenças de potencial significativas entre diferentes pontos. À medida que as nuvens se movem, o campo elétrico pode variar devido a alterações na distribuição de carga atmosférica.

Essas variações no campo elétrico são um dos fatores que contribuem para a ocorrência de descargas atmosféricas, como raios. Quando o campo elétrico atinge um valor crítico, pode ocorrer a quebra dielétrica do ar, resultando em uma descarga elétrica intensa entre as nuvens e o solo, equilibrando momentaneamente as diferenças de potencial.

1.3 Representação do Campo Elétrico Por Descargas

O sensor Field Mill é um dispositivo essencial na detecção e medição do campo elétrico na atmosfera. Ele consiste em um conjunto de placas condutoras sensíveis ao campo elétrico, dispostas em um arranjo circular ou em formato de moinho. Essas placas são eletricamente isoladas e podem girar livremente em torno de um eixo central.

O princípio de funcionamento do sensor Field Mill baseia-se na interação entre as placas condutoras e o campo elétrico ambiente. Quando um campo elétrico está presente, ocorre uma redistribuição de cargas nas placas do sensor. Isso cria uma diferença de potencial entre as placas, que é medida e registrada por meio de circuitos eletrônicos associados ao sensor. A rotação das placas é realizada por um motor ou por forças do vento. À medida que as placas giram, diferentes áreas são expostas ao campo elétrico, permitindo a medição em diferentes direções. A taxa de rotação das placas pode variar dependendo da aplicação e das necessidades de amostragem do campo elétrico.

O sensor Field Mill é amplamente utilizado em estudos meteorológicos e de descargas atmosféricas. Ele fornece informações valiosas sobre as características do campo elétrico na atmosfera, como sua intensidade, direção e variabilidade temporal. Esses dados são cruciais para entender os processos elétricos que ocorrem nas tempestades e outros fenômenos atmosféricos, além de contribuir para a previsão e monitoramento de tempestades e descargas elétricas.

É importante ressaltar que o sensor Field Mill é um dos vários tipos de sensores utilizados para medir o campo elétrico atmosférico. Outros métodos de medição, como sensores de carga, antenas e radares, também são empregados para obter uma visão abrangente e precisa das propriedades elétricas da atmosfera. A combinação desses diferentes sensores e técnicas de medição contribui para um melhor entendimento dos fenômenos elétricos na atmosfera e sua relação com o clima e o meio

ambiente.

1.4 Raios e o Setor Elétrico

Os raios representam um fenômeno natural que envolve uma descarga elétrica intensa entre as nuvens e a superfície da Terra. Essas descargas elétricas podem ter efeitos significativos no setor elétrico, especialmente nas redes de distribuição e transmissão de energia.

Os raios podem causar interrupções no fornecimento de energia elétrica, danificar equipamentos e infraestrutura elétrica e, em casos extremos, provocar incêndios. A alta corrente e voltagem envolvidas em um raio podem sobrecarregar os sistemas de proteção e causar falhas em transformadores, linhas de transmissão e outros componentes elétricos.

Para proteger as redes elétricas contra os efeitos dos raios, são utilizados dispositivos de proteção, como para-raios. Esses dispositivos são projetados para interceptar e desviar as descargas elétricas dos raios, direcionando-as com segurança para o solo e evitando danos às instalações elétricas.

Além disso, as empresas do setor elétrico implementam programas de manutenção e inspeção regulares para identificar e reparar danos causados por raios. Isso inclui a revisão de sistemas de proteção, verificação da integridade das estruturas e a substituição de equipamentos danificados.

1.5 Sistemas de Monitoramento

O monitoramento de raios é uma atividade importante para fins de prevenção, segurança e pesquisa relacionados a descargas atmosféricas. Existem diferentes métodos e tecnologias utilizados para monitorar a ocorrência de raios. Alguns dos principais métodos de monitoramento de raios incluem:

- **Sistemas de detecção de descargas atmosféricas:** Esses sistemas utilizam sensores eletromagnéticos para detectar as características elétricas das descargas atmosféricas, como a corrente, a taxa de subida e a polaridade. Eles podem ser baseados em antenas direcionais ou em sensores distribuídos em uma determinada área.
- **Localização de raios por triangulação:** Ao utilizar uma rede de sensores de descargas atmosféricas em diferentes locais, é possível determinar a localização aproximada de um raio por meio da triangulação dos dados coletados pelos sensores. Isso ajuda a identificar a área onde ocorreu a descarga.
- **Sensores de campo elétrico e magnético:** Esses sensores são capazes de medir as variações do campo elétrico e magnético causadas por uma descarga atmosférica. Eles são úteis para monitorar a intensidade e a proximidade dos raios.

- **Redes de detecção de raios por satélite:** Satélites equipados com sensores de raios são capazes de detectar e localizar descargas atmosféricas em grandes áreas geográficas. Esses sistemas fornecem informações valiosas sobre a distribuição espacial e temporal dos raios em escala global.

O monitoramento de raios desempenha um papel fundamental na prevenção de danos causados por descargas atmosféricas, especialmente em setores como aviação, energia, telecomunicações e atividades ao ar livre. Além disso, os dados coletados pelo monitoramento de raios são utilizados para pesquisas científicas, estudos climáticos e aprimoramento de modelos de previsão de tempestades.

1.6 Linhas de Transmissão e Distribuição

Efeito Corona O efeito corona é um fenômeno elétrico que ocorre em linhas de transmissão de alta tensão. Quando a tensão em uma linha atinge um determinado valor crítico, ocorre a ionização do ar circundante, formando uma região de descarga elétrica chamada de corona.

A corona é composta por íons e elétrons que são liberados a partir das moléculas de ar ionizado. Essas partículas carregadas podem interagir com a superfície condutora da linha de transmissão, gerando correntes elétricas que fluem para a atmosfera. A corona é visualmente perceptível como um halo luminoso ao redor dos condutores da linha.

Esse fenômeno tem algumas consequências indesejadas nas linhas de transmissão. Primeiro, a corona resulta em perdas de energia, uma vez que parte da energia elétrica é dissipada na forma de luz e calor. Essas perdas podem reduzir a eficiência da transmissão de energia.

Além disso, a corona pode produzir ruídos de rádio devido à radiação eletromagnética gerada durante o processo de ionização do ar. Esses ruídos podem causar interferência em sistemas de comunicação próximos às linhas de transmissão.

Outra preocupação relacionada ao efeito corona é o desgaste dos materiais isolantes utilizados nas linhas de transmissão. A formação da corona está associada a um estresse elétrico elevado nos isoladores, o que pode levar ao envelhecimento prematuro e à redução da vida útil desses componentes.

Para minimizar os efeitos do efeito corona, as linhas de transmissão são projetadas levando em consideração fatores como o espaçamento adequado entre os condutores, o uso de materiais isolantes apropriados e o controle da tensão nas linhas. Além disso, a utilização de cabos com superfícies lisas e a aplicação de dispositivos redutores de corona, como anéis corona, também são técnicas empregadas para mitigar esse fenômeno.

O efeito corona em linhas de transmissão de alta tensão pode atuar como um precursor para a ocorrência de raios. Durante a formação da corona, há a ionização do ar circundante, o que resulta na

liberação de elétrons e íons.

Essas partículas carregadas podem interagir com partículas e moléculas presentes na atmosfera, criando um caminho de menor resistência para a descarga elétrica. Esse caminho pode ser utilizado como um "gatilho" para o desenvolvimento de um raio.

A ionização do ar e a formação da corona podem ocorrer quando a tensão elétrica na linha de transmissão atinge um valor crítico. O campo elétrico intenso nas proximidades dos condutores da linha pode ionizar o ar ao redor, criando um canal de plasma condutor.

Esse canal de plasma funciona como uma espécie de "ponte" entre a nuvem de tempestade e a linha de transmissão, permitindo que a carga elétrica flua através dele, resultando na descarga atmosférica conhecida como raio.

Embora o efeito corona possa desempenhar um papel como precursor de raios, não é o único fator envolvido na formação de uma descarga atmosférica. Outros mecanismos, como o processo de separação de cargas dentro das nuvens, também desempenham um papel significativo na geração de raios.

Modelos de Linhas de Transmissão Existem vários modelos utilizados para representar linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Esses modelos são usados para estudar o comportamento das linhas, calcular parâmetros elétricos, simular fluxo de potência, análise de curto-circuito, entre outras aplicações. Alguns dos modelos mais comuns são:

- ***Modelo de Linha de Transmissão Distribuída:*** Este modelo considera a linha de transmissão como uma série de elementos distribuídos ao longo da extensão da linha. Cada elemento representa a impedância, admitância e capacitância distribuída da linha. É um modelo mais detalhado e preciso, utilizado para estudos de transientes eletromagnéticos e análises de alta frequência.
- ***Modelo Pi (π):*** O modelo Pi é uma simplificação da linha de transmissão, onde os parâmetros elétricos são concentrados em duas impedâncias e uma capacitância. É um modelo amplamente utilizado para estudos de fluxo de potência e análise de curto-circuito em sistemas de transmissão e distribuição.
- ***Modelo T:*** O modelo T é uma variação do modelo Pi, onde as impedâncias são representadas em uma configuração em forma de T. É utilizado em estudos de fluxo de potência, análise de curto-circuito e estudos de estabilidade em sistemas elétricos.
- ***Modelo de Linha de Transmissão em Sequência de Componentes:*** Este modelo considera a

linha de transmissão como uma sequência de componentes discretos, como resistências, indutâncias e capacitâncias. Cada componente é representado separadamente, permitindo um estudo mais detalhado do comportamento da linha.

Além desses modelos, existem também modelos mais complexos e sofisticados, como o modelo de parâmetros distribuídos, o modelo de ondas viajantes (*wave propagation model*) e o modelo de elementos finitos. Esses modelos são utilizados para simulações mais avançadas e precisas, levando em consideração efeitos como perdas, reflexões e distorções em frequência.

Modelos de Acoplamento entre nuvem e linhas de transmissão O acoplamento elétrico entre nuvens e linhas de transmissão ocorre principalmente devido à diferença de potencial elétrico entre a nuvem e os condutores da linha. Quando uma nuvem carregada eletricamente se aproxima de uma linha de transmissão, pode ocorrer um acoplamento elétrico que resulta em correntes indesejadas na linha. Esse acoplamento pode ser dividido em dois principais tipos:

- **Descarga Atmosférica Direta (DAD):** Quando a nuvem carregada eletricamente se aproxima o suficiente dos condutores da linha de transmissão, a diferença de potencial elétrico entre a nuvem e os condutores pode se tornar suficientemente alta para que ocorra uma descarga direta. Essa descarga, conhecida como raio, pode transferir uma grande quantidade de carga elétrica para os condutores, causando danos à linha de transmissão.
- **Descarga Atmosférica Indireta (DAI):** Mesmo que não ocorra uma descarga direta entre a nuvem e os condutores, a diferença de potencial elétrico entre eles pode induzir correntes indesejadas na linha de transmissão. Essas correntes são conhecidas como correntes de surto ou correntes induzidas por campos eletromagnéticos transientes gerados pela nuvem. Essas correntes de surto podem causar interferências e danos aos equipamentos conectados à linha de transmissão.

Para mitigar os efeitos do acoplamento elétrico entre nuvens e linhas de transmissão, várias medidas de proteção são adotadas, incluindo:

- **Instalação de para-raios:** Os para-raios são dispositivos de proteção projetados para desviar as descargas atmosféricas diretas para o solo, evitando que atinjam os condutores da linha de transmissão.
- **Aterramento adequado:** Um sistema de aterramento adequado é essencial para fornecer um caminho seguro para a corrente de descarga atmosférica. O aterramento eficiente ajuda a desviar a energia da descarga para o solo, protegendo os equipamentos e condutores da linha.

- **Proteção de equipamentos:** Equipamentos sensíveis conectados à linha de transmissão devem ser protegidos por dispositivos de proteção contra surtos, como varistores e supressores de surto, para evitar danos causados por correntes indesejadas.

O acoplamento elétrico entre nuvens e linhas de transmissão é uma área complexa e em constante estudo. Os projetos de linhas de transmissão são desenvolvidos levando em consideração os riscos de descargas atmosféricas e a proteção adequada para minimizar os efeitos indesejados causados pelo acoplamento elétrico.

Modelo de Heilmann & Dartora (2014) Um estudo teórico realizado por Heilmann & Dartora (2014) propõe um modelo para estimar a ionização do ar e a condutividade elétrica em torno de uma linha de transmissão de 765 kV. Eles observaram que a condutividade do ar aumenta significativamente nas proximidades da linha de transmissão, em comparação com as condições normais. Esse aumento ocorre devido à quebra da rigidez dielétrica, o que favorece o processo de avalanche e aumenta a probabilidade de ocorrência de raios.

Ao tomar a razão da energia eletromagnética total contida em 1 metro cúbico de ar e a média da energia de ionização por molécula de ar, que é aproximadamente 14.7 eV (elétron-volts), podemos estimar o número de elétrons livres gerados por metro cúbico (\bar{e}). Esse número é da ordem de $6.7938 \times 10^{16} \frac{\bar{e}}{m^3}$. Essa magnitude está em concordância com os valores apresentados em outras literaturas, que variam de 10^{13} a $10^{19} \frac{\bar{e}}{m^3}$.

Essa relação nos fornece uma estimativa do número de elétrons livres gerados por unidade de volume de ar, permitindo uma compreensão da magnitude desse efeito em relação à densidade de energia eletromagnética presente.

Segundo teorias, a ocorrência dos chamados *pre-strikes* depende da antecipação da corrente da descarga de retorno devido à transferência de carga ao redor do condutor linear. Essa transferência de carga resulta no aumento da condutividade nas proximidades dos condutores da linha de transmissão, o que possibilita a formação de pequenas faíscas filamentosas conhecidas como *Sparks*.

Uma descarga de retorno pode ser gerada a partir do condutor quando o campo elétrico atinge um valor crítico. Esse fenômeno pode ser interpretado como a formação de um líder ascendente em um canal pré-ionizado a partir do condutor de fase da linha de transmissão.

Portanto, a probabilidade de um raio atingir uma linha de transmissão antes de atingir outro ponto é maior quando a densidade de energia eletromagnética no condutor é maior. De acordo com Uman (1984), a densidade de partículas ionizadas varia ao longo do tempo, o que influencia a velocidade do movimento de retorno.

Conclui-se, então, que uma região com uma alta taxa de ionização cria descargas corona, oferecendo condições para a formação de um canal direto com um líder descendente. Além disso, essa região pode gerar pequenas faíscas que, por sua vez, podem ser interpretadas como opções de conexão com portadores de carga durante a ocorrência de um raio.

Trabalho 01 - Descargas Negativas Descendentes Nuvem - Solo

Augusto Mathias Adams¹

¹*augusto.adams@ufpr.br*

14 de maio de 2023

“An electrically active thundercloud may be regarded as an electrostatic generator suspended in an atmosphere of low electrical conductivity. It is situated between two concentric conductors, namely, the surface of the earth and the electrosphere, the latter being the highly conducting layers of the atmosphere at altitudes above 50 to 60 km.” - Malan, 1967

1 Resumo do Processo de Descarga

A descarga negativa descendente em direção ao solo é o tipo mais comum e estudado de raios. Cada *flash* para o solo geralmente contém de três a cinco *strokes*, sendo que o número máximo de *strokes* já observados em um único *flash* é de 26. A maioria esmagadora, com cerca de 80% ou mais, dos *flashes* contém mais de um *stroke*. O intervalo de tempo entre os sucessivos *strokes* em um *flash* é geralmente de várias dezenas de milissegundos, embora possa ser tão grande quanto centenas de milissegundos se uma corrente contínua longa estiver envolvida ou tão pequeno quanto um milissegundo ou menos. A duração total de um *flash* é tipicamente algumas centenas de milissegundos, e a carga total transferida para o solo é de algumas dezenas de coulombs. Cerca de metade de todos os *flashes* de descargas para o solo criam mais de uma terminação no solo, com a separação espacial entre as terminações do canal podendo chegar a muitos quilômetros. Cada *stroke* é composto por um líder que se move para baixo e um líder que se move para cima no canal de retorno. O líder cria um caminho condutor entre a fonte de carga na nuvem e o solo e deposita carga negativa ao longo desse caminho, enquanto o canal de retorno percorre esse caminho, movendo-se do solo em direção à fonte de carga na nuvem e neutraliza a carga negativa do líder. O líder escalonado inicia os movi-

mentos do primeiro *stroke* de retorno intermitentemente, enquanto os líderes dos *strokes* subsequentes geralmente parecem se mover continuamente [1].

Após a quebra inicial, possivelmente entre as principais regiões de carga negativa e positiva inferiores na nuvem, o líder escalonado se propaga em direção ao solo com uma velocidade média de $2 \times 10^5 \frac{m}{s}$. Abaixo do limite inferior da nuvem, cada passo do líder tem uma duração típica de $1 \mu s$ e um comprimento de dezenas de metros, com um intervalo de tempo entre os passos de 20 a $50 \mu s$. A corrente média do líder escalonado está entre 100 e 1000 A, e o valor máximo do pulso de corrente associado a um único passo é de pelo menos 1 kA. A transição da fase do líder para a fase do canal de retorno é referida como o processo de anexação. A velocidade de propagação ascendente de um canal de retorno abaixo do limite inferior da nuvem é tipicamente entre um terço e metade da velocidade da luz, ou seja, cerca de três ordens de magnitude mais alta que a velocidade do líder escalonado. A primeira corrente do canal de retorno medida no solo sobe para um pico inicial de cerca de 30 kA (valor mediano) em alguns microssegundos e diminui para metade do valor de pico em algumas dezenas de microssegundos. O canal de retorno descarrega ao solo os vários coulombs de carga originalmente depositados no canal do líder escalonado. A onda de corrente do canal de retorno aquece rapidamente o canal para uma temperatura máxima próxima a 30.000 K e cria uma pressão de canal da ordem de 10 atm ou mais, resultando na expansão do canal, radiação óptica intensa e uma onda de choque acústica que eventualmente se torna o trovão que ouvimos à distância [1].

As descargas subsequentes ocorrem após a cessação do fluxo de corrente para o solo. Processos na nuvem chamados de processos J envolvem uma redistribuição de cargas na nuvem em uma escala de tempo de dezenas de milissegundos em resposta ao retorno de curso anterior. Transitórios ocorrendo durante o processo mais lento J são referidos como processos K. Ambos os processos J e K em descargas entre nuvens e o solo efetivamente transportam cargas negativas frescas para dentro e ao longo do canal existente (ou seus remanescentes), embora não até o solo. O líder *dart* progride para baixo a uma velocidade típica de $10^7 \frac{m}{s}$ e deposita uma carga total ao longo do canal da ordem de 1 C. A corrente de pico do líder *dart* é de cerca de 1 kA. A corrente de retorno subsequente medida no solo atinge um valor de pico de 10 a 15 kA em menos de um microssegundo e decai para metade do valor de pico em algumas dezenas de microssegundos. A derivada máxima da corrente é tipicamente da ordem de $100 \frac{kA}{\mu s}$. A velocidade média de propagação ascendente de cursos de retorno subsequentes é semelhante à dos primeiros cursos de retorno. O componente de canal de retorno de uma corrente de canal de retorno subsequente é frequentemente seguido por uma corrente contínua contínua que tem uma magnitude de dezenas a centenas de amperes e uma duração de até centenas de milissegundos. Os processos transitórios que ocorrem durante o estágio de corrente contínua contínua e servem para transportar carga negativa para o solo são referidos como componentes M. O modo de transferência

de carga M para o solo, em oposição ao modo líder-canál de retorno, requer a existência de um canal aterrado transportando corrente [1].

2 Características da Forma De Onda Detectada (\vec{E} , \vec{B})

2.1 Introdução

A forma de onda de campo elétrico típica de um raio é mostrada na figura 1:

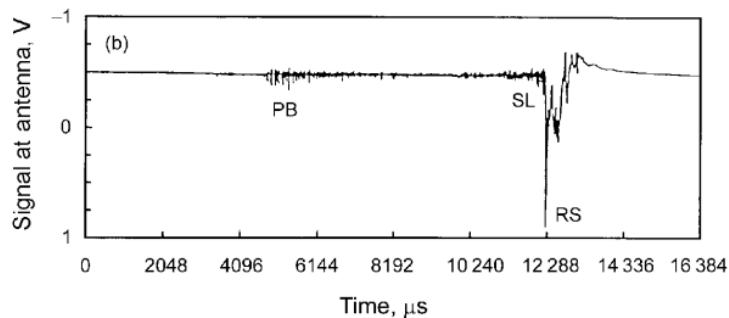


Figura 1: Forma de Onda de uma descarga negativa descendente. Em sequência à quebra inicial, há a formação do líder escalonado, o processo de anexação e a descarga de retorno. Fonte: [1]

A forma de onda do campo elétrico e magnético associada a uma descarga negativa descendente exibe características distintas ao longo do tempo.

A forma de onda do campo elétrico geralmente começa com um aumento rápido e acentuado durante a fase inicial da descarga. Esse aumento está relacionado à acumulação e liberação de carga elétrica durante o processo de ionização do canal de descarga. O campo elétrico atinge seu valor máximo durante essa fase inicial.

Após o pico inicial, o campo elétrico pode apresentar oscilações menores, conhecidas como "pulsos de campo". Esses pulsos são resultado de reflexões e interações do campo elétrico com a geometria do canal de descarga e as características do ambiente circundante. Essas oscilações podem ser observadas como variações periódicas na forma de onda do campo elétrico.

Quanto ao campo magnético, sua forma de onda está intimamente relacionada à corrente elétrica que flui durante a descarga. Durante a fase inicial da descarga, o campo magnético aumenta rapidamente, acompanhando o aumento do campo elétrico. Esse pico inicial é causado pela corrente elétrica intensa que flui na descarga.

À medida que a descarga progride, o campo magnético também pode apresentar oscilações menores, mas geralmente com menor amplitude do que o campo elétrico. Essas oscilações magnéticas estão associadas às variações na corrente elétrica ao longo do canal de descarga.

À medida que a descarga se aproxima do término, tanto o campo elétrico quanto o campo magnético diminuem gradualmente até retornarem próximos a zero. O decaimento desses campos está relacionado ao esgotamento da carga elétrica disponível e à dissipação da energia ao longo do canal de descarga.

A forma de onda do campo elétrico e magnético da descarga negativa descendente fornece informações valiosas sobre as características da descarga, como sua intensidade, duração e dinâmica. Essas informações são importantes para o estudo e compreensão dos fenômenos de descarga atmosférica, além de serem úteis para aplicações como detecção, monitoramento e proteção contra raios.

2.2 Descrição detalhada da Forma de Onda Detectada

2.2.1 Quebra Inicial (“*initial breakdown*”)

O *initial breakdown* [1], ou pré-ionização, refere-se ao processo inicial de ionização do ar que ocorre antes da formação completa da descarga atmosférica. Durante essa fase, a forma de onda do campo elétrico e magnético pode apresentar características distintas.

No caso do campo elétrico, a forma de onda durante o *initial breakdown* é caracterizada por pulsos de curta duração e alta amplitude. Esses pulsos representam os eventos de ionização localizada que ocorrem à medida que a tensão elétrica aumenta e os caminhos condutivos são estabelecidos no ar. A forma de onda do campo elétrico durante o *initial breakdown* pode ter uma aparência errática ou irregular, com oscilações de alta frequência.

Já o campo magnético durante o *initial breakdown* é geralmente de baixa amplitude e pode ser difícil de ser detectado diretamente. Isso ocorre porque a corrente elétrica associada ao *initial breakdown* é relativamente baixa em comparação com a corrente total da descarga atmosférica. No entanto, medidas indiretas e técnicas de processamento de sinal podem ser usadas para identificar o campo magnético durante essa fase.

2.2.2 Líder Escalonado (“*Stepped Leader*”)

O *stepped leader* é um processo inicial na formação de uma descarga atmosférica, que ocorre antes do retorno do raio principal. Durante o *stepped leader*, o campo elétrico e magnético exibem características distintas em suas formas de onda.

A forma de onda do campo elétrico do *stepped leader* é caracterizada por pulsos de curta duração e alta amplitude. Esses pulsos representam os avanços sucessivos do canal de descarga, que ocorrem em etapas ou "degraus" em direção ao solo. A forma de onda do campo elétrico geralmente possui

uma aparência impulsiva, com pulsos de alta frequência e amplitude variável à medida que o *stepped leader* avança.

Já o campo magnético associado ao *stepped leader* é relativamente fraco em comparação ao campo elétrico. A forma de onda do campo magnético é tipicamente de baixa amplitude e pode ser difícil de ser detectada diretamente, especialmente a longas distâncias. No entanto, equipamentos de medição sensíveis e técnicas de processamento de sinal podem ser utilizados para registrar e analisar o campo magnético durante o *stepped leader*.

2.2.3 Processo de Conexão (“Attachment Process”)

O Attachment Process (processo de conexão) é um estágio crucial durante a formação de uma descarga atmosférica, no qual a corrente elétrica do raio se conecta ao objeto condutor na superfície da Terra. Durante esse processo, o campo elétrico e magnético exibem características distintas em suas formas de onda.

A forma de onda do campo elétrico durante o *Attachment Process* é caracterizada por pulsos de curta duração e alta amplitude. Esses pulsos representam a transferência rápida de carga elétrica do raio para o objeto condutor, resultando em variações abruptas do campo elétrico próximo à área de anexação. A forma de onda do campo elétrico geralmente mostra uma alta taxa de variação, indicando a intensidade da transferência de carga elétrica durante o *Attachment Process*.

O campo magnético associado ao *Attachment Process* também exibe uma forma de onda distintiva. Geralmente, a forma de onda do campo magnético é caracterizada por pulsos de curta duração e baixa amplitude em comparação ao campo elétrico. A variação do campo magnético está diretamente relacionada à corrente elétrica que flui durante o processo de anexação.

2.2.4 Descarga de Retorno (“Return Stroke”)

O Return Stroke (descarga de retorno) é o estágio mais significativo e visível de uma descarga atmosférica, onde a corrente elétrica flui rapidamente em direção à nuvem após a conexão com o objeto condutor na superfície da Terra. Durante esse processo, o campo elétrico e magnético exibem características distintas em suas formas de onda.

A forma de onda do campo elétrico do *Return Stroke* é caracterizada por um pulso inicial de alta amplitude e curta duração, seguido por uma queda exponencial gradual. O pulso inicial, também conhecido como pulso de pico, é gerado pela rápida transferência de carga elétrica da nuvem para o solo. Em seguida, o campo elétrico diminui gradualmente em magnitude à medida que a corrente elétrica se estabiliza.

O campo magnético associado ao *Return Stroke* também possui uma forma de onda distinta. Sua forma de onda geralmente segue um padrão semelhante ao campo elétrico, com um pulso inicial de alta amplitude e uma queda exponencial gradual. A variação do campo magnético está diretamente relacionada à variação da corrente elétrica durante o retorno do golpe.

A forma de onda do campo elétrico e magnético do *Return Stroke* é caracterizada por sua rápida variação e magnitude significativa. Essas características são responsáveis pela emissão de radiação eletromagnética associada aos raios, que podem ser detectadas e medidas por equipamentos apropriados.

2.2.5 Líder “*Dart*”

O “*Dart Leader*”, ao contrário de um “*Stepped Leader*” parece se mover continuamente, ou seja, a porção mais baixa do canal do líder, chamada de “*dart*”, permanece luminosa durante a extensão do canal da nuvem para o solo. Muitas descargas subsequentes (mais de um terço dos segundos *return strokes* em canais não muito antigos) são iniciados por líderes que exibem degraus pronunciados na porção inferior do canal. Esses líderes produzem sequências regulares de pulsos que são observadas logo antes do pulso do retorno em registros de campo elétrico ou magnético distantes e são chamados de líderes *dart* em degraus.

2.2.6 Corrente Contínua

A corrente contínua, também conhecida como “*continuing current*” em inglês, é geralmente definida como a corrente de baixo nível que segue imediatamente uma descarga de retorno (*return stroke*) em uma mesma trajetória em direção ao solo. Essa corrente geralmente possui valores de dezenas a centenas de amperes e dura entre dezenas a centenas de milissegundos. Essa corrente pode ser vista como um arco quase estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo ao longo do caminho criado pela sequência ou sequências anteriores de líder e retorno de corrente.

A forma de onda da corrente contínua geralmente exibe um perfil característico, com uma amplitude relativamente constante e uma duração prolongada. Inicialmente, após o retorno de corrente, a corrente aumenta rapidamente até atingir seu valor máximo. Em seguida, ela se estabiliza em um nível mais baixo e mantém-se relativamente constante ao longo do tempo.

2.2.7 Componente M

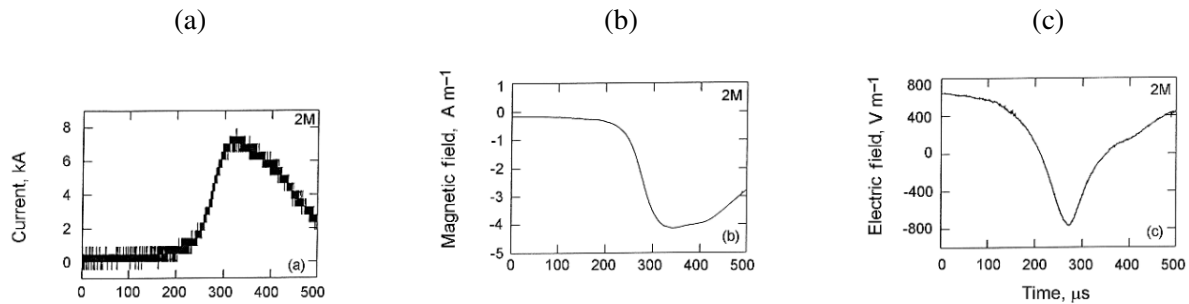
Componente M As componentes M são perturbações na corrente de relâmpagos de variação lenta, acompanhadas por aumentos na luminosidade do canal de relâmpagos. Inicialmente, Malan e Collens

(1937) relataram, a partir de registros ópticos em tempo real de relâmpagos naturais, que as componentes M são aumentos transitórios de luminosidade em canais de relâmpagos pouco luminosos e aterrados abaixo da base da nuvem. As características das formas de onda da corrente das componentes M foram primeiramente descritas por Thottappillil et al. (1995), em relâmpagos provocados por foguete. Eles descobriram que o tempo de subida de 10% a 90% da corrente da componente M varia de dezenas de microssegundos a milissegundos, com uma média geométrica de 422 μ s. As magnitudes da corrente da componente M variam de dezenas de amperes a alguns quiloampères, com uma média geométrica de 117 A. A pressão de pico dos sinais acústicos das componentes M está na mesma ordem de grandeza da sequência líder/descarga de retorno (Rakov & Uman, 2003, Capítulo 4). As componentes M podem ser as principais responsáveis pelos chamados sprites atrasados, que ocorrem dezenas de milissegundos após a descarga de retorno (por exemplo, Li et al., 2008; Yashunin et al., 2007).

Rakov et al. (1992), a partir da análise de registros de campo elétrico de relâmpagos nuvem-solo a distâncias que variam de 2,5 a 27 km na Flórida, relataram que mais da metade das formas de onda do campo elétrico das componentes M estão associadas a pulsos de campo elétrico em microssegundos. Na maioria dos casos, esses pulsos ocorrem no início das formas de onda do campo elétrico em formato de gancho das componentes M. Shao et al. (1995), que utilizaram um interferômetro de frequência muito alta (VHF) de banda estreita, descobriram que a iniciação das componentes M está geralmente associada ao desenvolvimento de um canal dentro da nuvem que se conecta ao canal que transporta a corrente contínua (CC) em direção ao solo. Observações semelhantes para pulsos de corrente contínua inicial (ICC) e componentes M em relâmpagos provocados por foguete foram relatadas por Yoshida et al. (2012) e Pilkey et al. (2013), respectivamente, por meio da imagem VHF de canais de relâmpagos usando um interferômetro VHF de banda larga e uma Matriz de Mapeamento de Relâmpagos.

Um exemplo de assinatura do campo elétrico em formato de gancho característica da componente M é encontrado na Figura 2. Tran et al. (2013), que analisaram formas de onda do campo elétrico registradas a 45 km do canal de raios provocados por foguete, relataram que as componentes M pronunciadas nos registros de corrente na base do canal são frequentemente precedidas por pulsos de campo em microssegundos (característica relatada inicialmente por Rakov et al., 2001). Acredita-se que esses pulsos sejam produzidos pela intercepção de líderes dentro da nuvem pelo canal aterrado que transporta a corrente. Durante a fase inicial de raios provocados por foguete e de relâmpagos ascendentes iniciados por torres, alguns (se não a maioria) dos chamados pulsos de corrente contínua inicial (ICC) exibem muitas semelhanças com as "clássicas" componentes M que ocorrem durante a corrente contínua após a descarga de retorno.

Figura 2: (a) Corrente, (b) campo magnético e (c) campo elétrico para um grande componente M que seguiu o segundo golpe de um relâmpago disparado por foguete em Camp Blanding, Flórida. Os campos foram registrados a uma distância de 280 m do canal de iluminação. Observe que o pico do campo elétrico ocorre significativamente antes dos picos de corrente e campo magnético. Adaptado de Rakov et al. (1998).



Trem de Pulsos Regulares (*Regular Pulse Bursts*) Um trem de pulsos regulares em uma descarga atmosférica geralmente está associado ao fenômeno conhecido como *Componente M*. O campo eletromagnético de um trem de pulsos regulares é caracterizado por variações rápidas e repetitivas na intensidade do campo elétrico e magnético ao longo do tempo.

Durante a ocorrência da componente M, são observadas oscilações de alta frequência (geralmente na faixa de 3 a 300 MHz) no campo elétrico e magnético. Essas oscilações têm amplitudes significativamente maiores do que as encontradas em outras descargas intra-nuvem ou nuvem-solo típicas.

O campo elétrico de um trem de pulsos regulares geralmente é registrado como uma série de pulsos bipolares com uma duração total de cerca de 10 a 20 microssegundos. A amplitude desses pulsos bipolares é aproximadamente um terço do valor máximo do campo elétrico observado durante um retorno típico de um raio.

É importante mencionar que, durante o trem de pulsos regulares, a polaridade dos pulsos bipolares é oposta à polaridade dos campos elétricos observados em descargas nuvem-solo negativas durante condições meteorológicas normais. Isso significa que, na primeira metade do pulso bipolar, a direção do campo elétrico é oposta à direção do campo elétrico de tempo bom. Essa inversão de polaridade é uma característica distintiva da componente M.

Portanto, o campo eletromagnético de um trem de pulsos regulares em uma descarga atmosférica, como o M-componente, exibe variações rápidas e repetitivas no campo elétrico e magnético, com polaridade inversa em relação ao campo elétrico de tempo bom.

2.2.8 Processos J e K

Processo J O processo J [2], ou "junção", ocorre na nuvem durante o intervalo de tempo entre os *Return Strokes*. Ele é identificado com um campo elétrico que apresenta uma mudança relativamente

constante em uma escala de tempo de dezenas de milissegundos. A mudança J pode ser positiva ou negativa, geralmente é menor do que a mudança do campo devido à corrente contínua e, ao contrário da mudança do campo de corrente contínua, não está associada a um canal luminoso entre a nuvem e o solo. Pequenas variações relativamente rápidas do campo elétrico, chamadas de mudanças K, também ocorrem entre os golpes geralmente em intervalos de 2-20 milissegundos, e parecem estar superpostas à mudança geral do campo elétrico associada ao processo J.

Há controvérsias em relação à interpretação física da mudança do campo entre os golpes associada ao processo "junção": a maioria dos pesquisadores associa a mudança do campo J a uma descarga na nuvem que disponibiliza carga para o topo do canal do golpe anterior, a fim de iniciar um líder de dardo, enquanto alguns indicam que o processo J pode ser independente da fonte de carga do líder *dart* e estar relacionado à remoção de carga de centros de carga envolvidos com *strokes* anteriores.

Processo K O processo K [2] é geralmente visto como um "líder de recuo" ou um pequeno *return stroke* que ocorre quando uma descarga em propagação dentro da nuvem encontra um centro de carga oposta à sua própria (Ogawa e Brook, 1964). Nessa visão, o processo J representa uma descarga de propagação lenta que inicia o processo K. Ogawa e Brook (1964) forneceram evidências a partir de medições do campo elétrico e fotográficas em raios de luz que comprovam esse caso para as mudanças K em descargas dentro da nuvem. É razoável esperar que as mudanças K nas descargas dentro da nuvem sejam semelhantes às mudanças K na parte dentro da nuvem das descargas para o solo, especialmente considerando que a distribuição dos intervalos de tempo entre as mudanças K foi encontrada por Kitagawa e Brook (1960) para ser quase idêntica tanto para descargas dentro da nuvem quanto para descargas para o solo.

Brook e Vonnegut (1960) e Kitagawa e Brook (1960) sugerem que a mudança lenta do campo J pode ser interpretada como devida à integração temporal instrumental de uma série de pequenas mudanças rápidas do campo K, com duração inferior a 1 milissegundo e mudança de momento entre algumas centenas e $1 \text{ C} - \text{km}$. Nessa visão, a mudança J é o traço suavizado do registro do campo elétrico, que na realidade consiste em um número de pequenos passos de mudança K. Ogawa e Brook (1964) afirmam que os passos associados aos processos K observados em curta distância constituem a maior contribuição para a mudança geral do campo na última fase de uma descarga dentro da nuvem. Não está claro por que o processo K deve produzir uma mudança significativa no campo, enquanto a descarga de propagação lenta que o inicia não produz, exceto talvez pelo fato de que a mudança K move uma carga relativamente grande a uma distância relativamente longa em comparação com o movimento de carga equivalente no tempo entre as mudanças K. É interessante notar que aparentemente outra visão do processo K foi sugerida por Kitagawa et al. (1962), que argumentam que a

mudança K "é evidência do movimento de líderes penetrantes em regiões frescas da nuvem, líderes cuja ocorrência deve ser determinada inteiramente pelas condições dentro da nuvem".

A figura 3 mostra as mudanças de campo elétrico durante um processo de descarga de retorno, onde os processos J e K, além de componentes M, aparecem claramente em ordem cronológica:

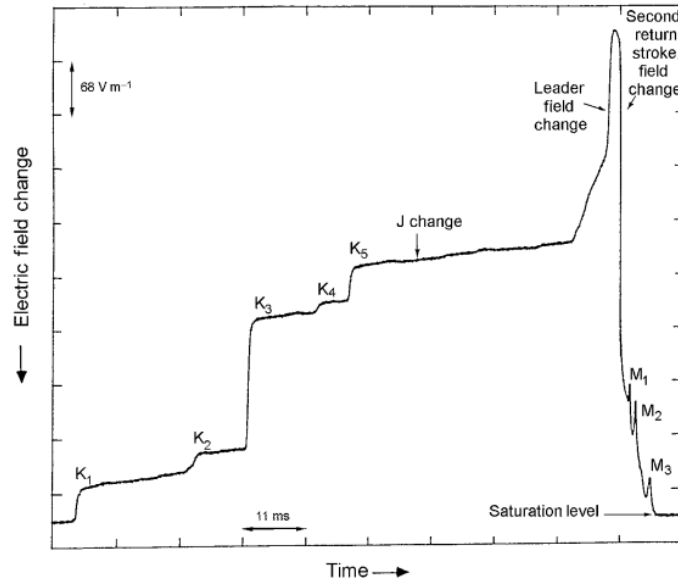


Figura 3: Uma parte do registro do campo elétrico para um relâmpago que ocorreu na Flórida em 1979 às 22h28min43s (UTC) a uma distância de 2,5 km. São identificadas cinco mudanças K pronunciadas (K1 a K5), uma mudança J, mudanças de campo de líder e golpe de retorno, e três mudanças de campo devido a componentes M (M1 a M3). Uma mudança de campo positiva (convenção de eletricidade atmosférica) se desvia para baixo. Adaptado de *Thottappillil et al. (1990)*. Fonte: [1]

3 Descrição do Modelo de Campo \vec{E} e \vec{B} (Thottappillil, 1997)

Para derivar uma expressão aproximada para o campo elétrico, vamos começar com a expressão geral para o campo eletrostático, conforme apresentado por Thottappillil et al. (1997):

$$E_z(r, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{h(t)}^{H_m} \frac{z'}{R^3(z')} \rho_l \left(z't - \frac{R(z')}{c} \right) dz' - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{H_m}{R^3(H_m)} \int_{h(t)}^{H_m} \rho_l \left(z't - \frac{R(z')}{c} \right) dz' \quad (1)$$

onde $R(H_m) = \sqrt{(H_m^2 + r^2)}$ e $h(t)$ é a altura em que o observador "vê" a extremidade inferior do canal do líder; $h(t)$ é determinado pela solução de $t = \frac{H_m - h(t)}{v} + \frac{\sqrt{h^2(t) + r^2}}{c}$.

O primeiro termo da equação 1 representa a variação do campo devido à carga no canal do líder que se estende para baixo, e o segundo termo representa a variação do campo devido ao esgotamento da carga na fonte de carga da nuvem, à medida que ela é "drenada" pelo canal do líder em expansão. A carga total no canal do líder em qualquer momento é igual à carga total removida da fonte de carga da nuvem, de modo que a carga líquida no sistema canal-fonte global é zero em todos os momentos.

Assumindo que a diferença máxima no tempo de propagação de qualquer fonte no canal até o observador é muito menor do que o tempo necessário para variações significativas nas fontes (ou seja, os efeitos de retardamento são negligenciáveis), e reescrevendo a equação 1 como:

$$E_z(r,t) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{h(t)}^{z_t} \left[\frac{z'}{R^3(z')} - \frac{H_m}{R^3(H_m)} \right] \rho_L(z',t) dz' \quad (2)$$

onde $z_t = H_m - vt$ é a altura da ponta do líder no tempo t e v é a velocidade do líder, assumida como constante.

Assumindo que $\rho_L(z',t) = \rho_L = \text{constante}$, o que corresponde a um canal líder uniformemente carregado, pode-se reescrever a equação 2 da seguinte forma:

$$E_z(r,t) = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0 r} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z_t}{r}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H_m}{r}\right)^2}} - \frac{(H_m - z_t)H_m}{r^2 \sqrt{1 + \left(\frac{z_t}{r}\right)^2}} \right] \quad (3)$$

Para um ponto de campo muito próximo, onde $H_m \geq 2r$, e para $z_t = 0$ (líder tocando o solo) ou $z_t \geq r^2$ e $z_t \geq H_m$ (líder próximo ao solo), a equação 3 é aproximada por:

$$E_z(z_t = 0) \approx \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (4)$$

Ou seja, muito próximo ao canal, a variação vertical do campo eletrostático no solo devido ao canal do líder totalmente desenvolvido diminui com a distância como r^{-1} , ao contrário da variação r^{-3} longe do canal ($H_m^2 \leq r^2$). Curiosamente, a equação 4 é exatamente a mesma expressão do campo radial produzido por uma carga linear infinitamente longa e uniforme no espaço livre.

A aproximação magnetostática para os campos magnéticos do líder geralmente é escrita em termos da corrente $I(t)$, que se supõe variar lentamente e ser a mesma em todas as alturas ao longo do canal vertical de relâmpago (por exemplo, Uman 1987, 2001). Uma formulação menos familiar, em termos da densidade de carga ρ_L , para o campo magnético do líder foi dada por Thottappillil et al. (1997). O campo magnetostático de um canal vertical de líder, cuja extremidade superior está a uma altura H_m e a extremidade inferior a uma altura $z_t = h(t)$, é dado por:

$$B_\phi(r,t) = \frac{\mu_0}{2\pi r} \left[\frac{H_m}{R(H_m)} - \frac{z_t}{R(z_t)} \right] I(t) \quad (5)$$

Para um canal totalmente desenvolvido, isto é, $z_t = 0$, a equação (5) se torna:

$$B_\phi(r,t) = \frac{\mu_0}{2\pi r} \left[\frac{H_m}{R(H_m)} \right] I(t) \quad (6)$$

A Equação 6 é a expressão para o campo magnetostático de uma linha vertical de corrente, cuja

extremidade inferior está no solo (um condutor perfeito) e a extremidade superior está a uma altura H_m . Se o ponto de observação estiver muito próximo à base do canal, de modo que $r < H_m$, a Equação 6 pode ser ainda mais simplificada para obter:

$$B_\phi(r, t) = \frac{\mu_0 I(t)}{2\pi r} \quad (7)$$

que é a mesma equação de uma linha de corrente infinitamente longa no espaço livre.

4 O que é radiação "*Narrowband*"

Definição A radiação *Narrowband* das descargas atmosféricas refere-se à emissão de ondas eletromagnéticas em uma faixa de frequência estreita durante o processo de uma descarga atmosférica, como um raio. Durante uma descarga atmosférica, os elétrons são acelerados a altas velocidades devido à intensa energia elétrica envolvida, o que resulta na emissão de radiação eletromagnética.

A característica distintiva da radiação *Narrowband* é sua largura de banda estreita, o que significa que as ondas eletromagnéticas são emitidas em frequências específicas e bem definidas. Essas frequências geralmente estão na faixa de rádio, abrangendo desde algumas centenas de kilohertz até algumas dezenas de megahertz.

A radiação *Narrowband* das descargas atmosféricas é resultado das oscilações dos elétrons durante o processo da descarga. Essas oscilações geram campos elétricos e magnéticos que se propagam como ondas eletromagnéticas. Essas ondas podem ser detectadas e medidas utilizando equipamentos especializados.

A análise da radiação *Narrowband* das descargas atmosféricas é importante para compreender os processos físicos envolvidos nas descargas elétricas, como a dinâmica das correntes elétricas e a geometria do canal de descarga, entre outros aspectos relevantes. Além disso, a radiação *Narrowband* pode ser utilizada em aplicações como detecção e monitoramento de raios, bem como em pesquisas científicas relacionadas ao clima e à atmosfera terrestre.

Embora as frequências mais comuns da radiação *Narrowband* em descargas atmosféricas estejam na faixa de rádio, é importante destacar que essa radiação não se limita apenas a essas faixas de frequência. Ela pode ocorrer em frequências mais altas ou mais baixas, dependendo das condições específicas da descarga.

Além da radiação *Narrowband*, as descargas atmosféricas também podem produzir radiação de banda larga, conhecida como "ruído atmosférico", que abrange um espectro mais amplo de frequências. Essa radiação de banda larga pode ser detectada em uma ampla faixa de frequências, desde

ondas de rádio até frequências de micro-ondas e além.

Aqui estão alguns exemplos de radiação *Narrowband* emitida por raios:

- **Radiação de frequência muito alta (VHF):** Durante as descargas atmosféricas, pode ocorrer a emissão de radiação de VHF, que abrange a faixa de frequência de aproximadamente 30 MHz a 300 MHz. Essa radiação é considerada narrowband em relação ao espectro eletromagnético geral.
- **Radiação de frequência extremamente baixa (ELF):** Os raios também podem gerar radiação de ELF, que abrange a faixa de frequência de aproximadamente 3 Hz a 3 kHz. Embora seja uma faixa de frequência relativamente baixa, a radiação de ELF ainda é considerada narrowband em comparação com o espectro eletromagnético mais amplo.
- **Ondas de rádio de frequência muito baixa (VLF):** As descargas elétricas dos raios podem criar perturbações nas ondas de rádio de VLF, que operam na faixa de frequência de aproximadamente 3 kHz a 30 kHz. Essas perturbações são caracterizadas por uma faixa estreita de frequências e podem ser detectadas por receptores VLF.

Embora os raios sejam conhecidos principalmente por sua radiação de banda larga, eles também podem gerar radiação *Narrowband* em frequências específicas, como VHF, ELF e VLF.

Um exemplo moderno de radiação *Narrowband* Os resultados da detecção de radiação eletromagnética de descargas elétricas de nuvens com propriedades incomuns foram publicados no início dos anos 80 do século passado [4]. A principal característica dessas descargas é uma explosão de alta potência de radiação de alta frequência, com frequências de 3 a 300 MHz, cujo nível excedia consideravelmente os valores para descargas típicas dentro da nuvem e descargas da nuvem para o solo. Sincronamente com a explosão de radiação de alta frequência, sensores terrestres não calibrados registraram uma variação característica no campo elétrico de baixa frequência na forma de um pulso bipolar com duração total de 10 a 20 μs (no experimento, o critério para o início do pulso de campo elétrico foi a superação da intensidade de radiação do nível base, bastante alto, em uma frequência de 3, 139 ou 295 MHz). A duração de um pulso bipolar superava em muito a duração do pulso de alta frequência registrado nas proximidades do máximo do pulso de campo elétrico, e a amplitude do pulso bipolar era cerca de $\frac{1}{3}$ do valor de pico do campo elétrico para um *return stroke* típico. Nesse caso, a direção do campo elétrico na primeira metade do período de um pulso bipolar era oposta à direção do campo de tempo bom, ou seja, o pulso bipolar tinha polaridade oposta em comparação com os surtos de campo para a descarga negativa da nuvem para o solo. O fenômeno citado é chamado de Descarga Compacta Intranuvem (CID).

5 Descrição Gráfica dos Processos M , J e K

Processos J e K Os processos J e K são fenômenos elétricos que ocorrem durante descargas atmosféricas, como raios. Eles estão relacionados às variações do campo elétrico entre as diferentes etapas da descarga.

O processo J refere-se a uma mudança relativamente estável no campo elétrico que ocorre durante o intervalo de tempo entre as descargas principais, conhecidas como “*return strokes*”. O campo elétrico durante o processo J pode ter uma mudança positiva ou negativa, e é geralmente menor do que a mudança de campo devido à corrente contínua da descarga principal. Diferente da descarga principal, o processo J não está associado a um canal luminoso entre a nuvem e o solo.

Por outro lado, o processo K envolve variações rápidas e relativamente pequenas no campo elétrico que ocorrem entre as descargas principais, em intervalos de tempo de 2 a 20 milissegundos. Essas variações, conhecidas como “*K-changes*”, são superpostas à mudança geral do campo elétrico associado ao processo J. O processo K é frequentemente interpretado como a ocorrência de pequenas descargas ou “*streamers*” que se movem dentro da nuvem, fornecendo uma contribuição para as variações do campo elétrico entre as descargas principais.

A interpretação exata dos processos J e K e seu papel na dinâmica das descargas atmosféricas ainda é objeto de estudo e debate entre os pesquisadores. Diferentes teorias e observações têm sido propostas para explicar esses processos, e pesquisas adicionais são necessárias para um melhor entendimento de sua natureza e mecanismos subjacentes. A figura 4 mostra as etapas de um processo

de descarga, visto no espectro óptico:

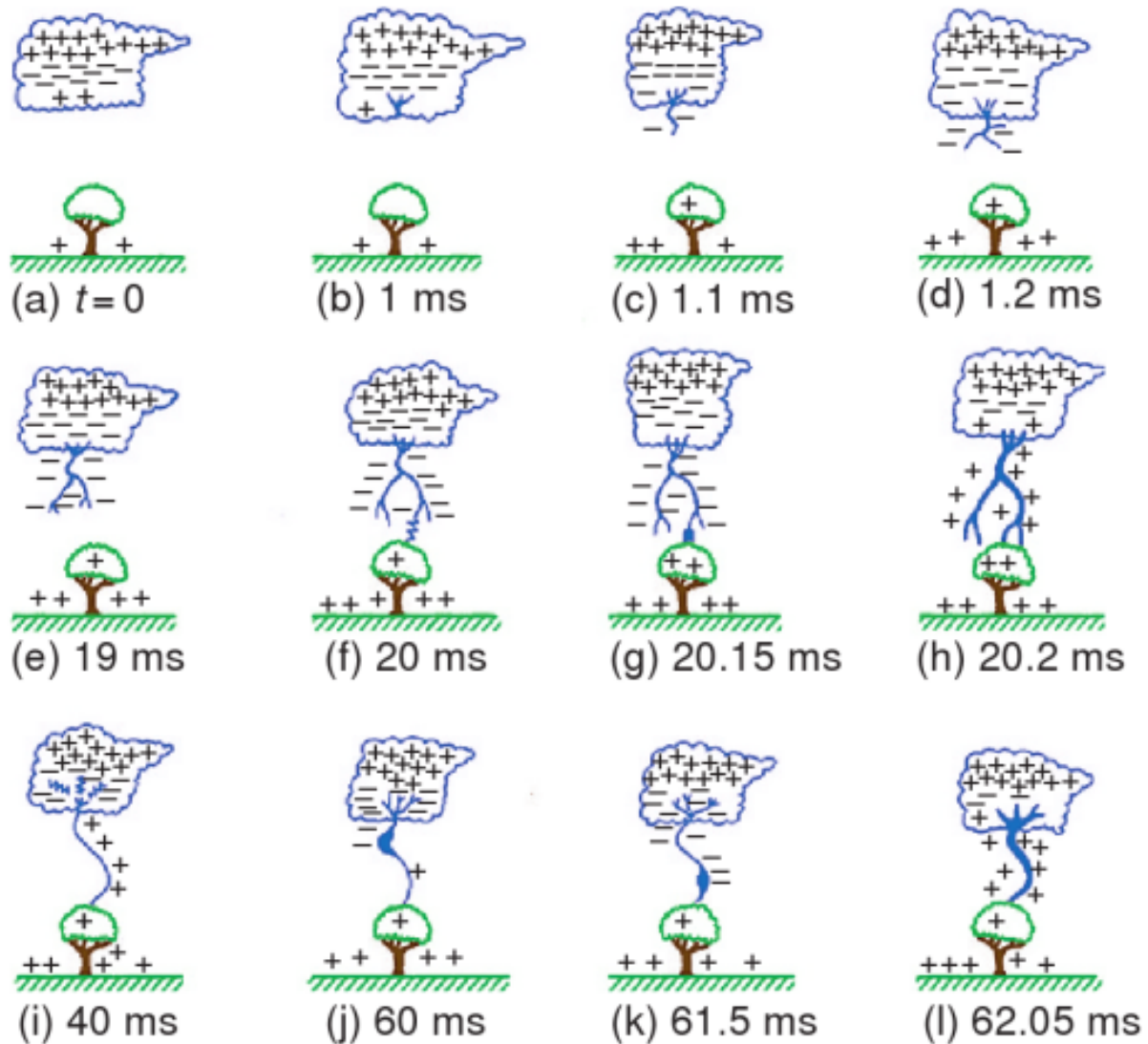


Figura 4: Esquemático para ilustrar alguns dos processos que levam a um raio no solo que carrega o solo negativamente. (a) Distribuição de carga na nuvem, (b) Quebra Inicial, (c-e) Líder Escalonado, (f) Processo de conexão, (g e h) Primeira descarga de retorno, (i) Processos K e J, (j e k) Líder em dardo e (l) Segunda descarga de retorno. [Adaptado de M. Uman, *The Lightning Discharge*, Academic Press, Inc., Nova York, 1987, p. 12, Direitos autorais 1987, com permissão da Elsevier.]

Etapas explicadas:

- **(a) Distribuição de carga na nuvem:** Nesta etapa, a nuvem contém uma separação de cargas positivas e negativas. Tipicamente, a parte inferior da nuvem está carregada negativamente, enquanto a parte superior está carregada positivamente.
- **(b) Quebra Inicial:** Uma região da nuvem próxima ao solo experimenta um campo elétrico forte, o que leva à iniciação de uma pré-quebra. Esse processo envolve o desenvolvimento de

canais de ionização que conectam a nuvem ao solo.

- **(c-e) Líder escalonado:** O líder escalonado é uma série de canais luminosos e escalonados que se propagam de cima para baixo a partir da nuvem em direção ao solo. Consiste em uma série de descargas rápidas ou degraus, cada uma durando microssegundos. O líder escalonado busca um caminho de menor resistência em direção ao solo, ramificando-se e se estendendo de maneira irregular.
- **(f) Processo de conexão:** Quando o líder escalonado se aproxima do solo, estabelece-se uma conexão entre ele e um líder invisível em movimento ascendente chamado líder em dardo. Essa conexão é conhecida como processo de conexão.
- **(g e h) Primeira descarga de retorno:** A primeira descarga de retorno é o canal luminoso principal que transporta a maior parte da corrente do raio do solo para cima. Ocorre após o processo de conexão e se desloca rapidamente ao longo do caminho estabelecido pelo líder escalonado. A primeira descarga de retorno é a parte brilhante e visível do raio.
- **(i) Processos K e J:** Após a primeira descarga de retorno, pode haver variações no campo elétrico conhecidas como processos K e J. O processo K refere-se a flutuações menores e rápidas no campo elétrico, enquanto o processo J representa uma mudança mais lenta e gradual no campo elétrico.
- **(j e k) Líder “dart”:** Após a primeira descarga de retorno, um novo líder chamado líder “dart” se propaga de cima para baixo a partir da nuvem em direção ao solo. O líder “dart” segue um caminho mais direto e menos ramificado em comparação com o líder escalonado.
- **(l) Segunda descarga de retorno:** O líder “dart” atinge o solo, e ocorre uma segunda descarga de retorno, semelhante à primeira. Essa segunda descarga de retorno geralmente é menos intensa do que a primeira.

Esses processos descrevem a sequência geral de eventos que levam a um flash no solo que carrega o solo negativamente. Referências visuais ou esquemas podem fornecer uma representação mais detalhada e precisa desses processos.

Componente M Uma evidência óptica rara em alta velocidade do mecanismo da componente M de onda-guiada, adaptada de Jiang et al. (2014), é mostrada na Figura 5 [3]. Nos quadros (a) e (b), um líder de recuo (parte negativa) se desenvolve ao longo de um ramo decadente de um líder positivo ascendente iniciado a partir de uma torre de 112 m. Havia pelo menos seis ramos de líder positivo

ascendente, a maioria dos quais são muito fracos para serem vistos na reprodução. Um canal portador de corrente conectado à torre é claramente visível nos seis quadros. No quadro (c), o líder de recuo se conecta ao canal aterrado, a 350 m acima do topo da torre (R. Jiang, comunicação pessoal, 8 de janeiro de 2018), e lança uma onda M incidente em direção à ponta da torre. Em algum momento entre os quadros (c) e (d), a onda M incidente chega à ponta da torre e produz uma onda M refletida no solo, o que causa o brilho e a extensão da parte superior do canal do líder de recuo (veja os quadros e e f). (Também pode haver reflexão parcial a partir do ponto de junção que não é considerado parte da componente M.) Vale ressaltar que o evento mostrado na Figura 5 é um pulso de ICC, que pode ser um evento de modo misto (Zhou et al., 2015), uma vez que a altura do ponto de junção (350 m) acima do topo da torre é inferior a 1 km. No entanto, este evento ilustra essencialmente o mecanismo da componente M.

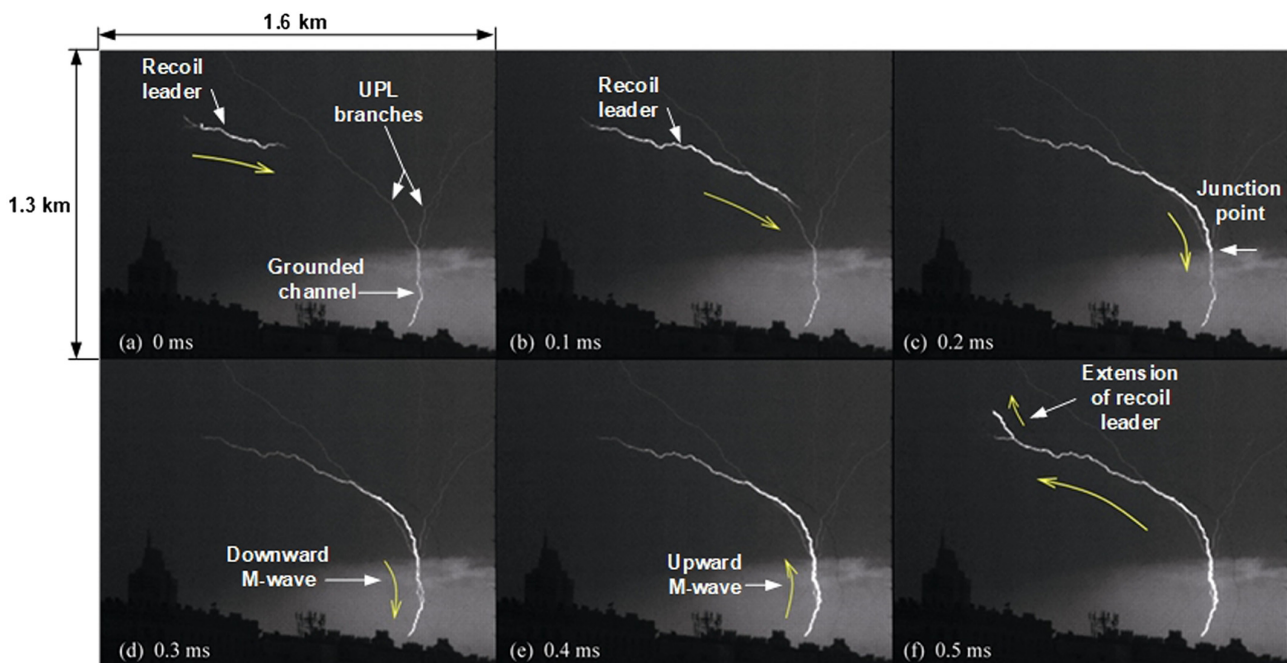


Figura 5: Evidência óptica do mecanismo da componente M de onda-guiada exibido por um pulso inicial de corrente contínua ascendente de um relâmpago negativo iniciado a partir de uma torre de 112 m. Mostradas nas figuras (a) a (f) estão seis quadros consecutivos separados por $100 \mu s$, nos quais é possível observar um líder de recuo em um ramo decendente de um líder positivo ascendente que faz conexão com o canal aterrado e portador de corrente e inicia uma onda M descendente ao longo desse canal, do ponto de junção à ponta da torre, seguida por uma onda M ascendente refletida no solo que refaz e estende o canal do líder de recuo. Adaptado de Jiang et al. (2014)

6 Referências

Referências

- [1] Rakov, V., & Uman, M. (2007). *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press.
- [2] Uman, M A. *The lightning discharge*. United States: N. p., 1987. Web.
- [3] Tran, M. D., & Rakov, V. A. (2019). An advanced model of lightning M-component. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 2296– 2317. <https://doi.org/10.1029/2018JD029604>
- [4] D. I. Iudin and S. S. Davydenko (2015). FRACTAL MODEL OF A COMPACT INTRACLOUD DISCHARGE. I. FEATURES OF THE STRUCTURE AND EVOLUTION.