

CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO:

Parâmetro da Eletricidade Atmosférica

ARMANDO HEILMANN

CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO:
Parâmetro da Eletricidade Atmosférica

Armando Heilmann

Autor

Ezequiel Burkarter

Coautor

1 ª edição

Copyright © 2020
Todos os direitos reservados
Proibido a cópia parcial ou integral, por qualquer meio ou processo, especialmente nos sistemas gráficos, fotográficos, reprográficos, fonográficos, videográficos, internet, e-book, sem autorização do autor. Vedada a memorização e/ou recuperação total ou parcial em qualquer sistema de processamento de dados e a inclusão de qualquer parte da obra em qualquer programa juscibernético. A violação dos direitos autorais é punível como crime (art. 184 e parágrafos, do Código Penal, conforme a Lei n° 10.695. de 07.01.2013) com pena de reclusão, de dois a quatro anos, e multa, conjuntamente com busca a apreensão e indenização diversas (artigo 102. 103 parágrafo único, 104. 105. 106 e 107 itens 1. 2 e 3 da Lei n° 9.610. de 19.06.1998. Lei dos Direitos Autorais). O Autor acredita que todas as informações aqui apresentadas estão corretas e podem ser utilizadas para qualquer fim legal. Entretanto, não existe qualquer garantia, explícita ou implícita, de que o uso de tais informações conduzirá sempre ao resultado esperado. Os nomes de páginas de internet e empresas, que eventualmente possam ser mencionados, foram utilizados somente com o propósito de ilustrar os exercícios e conceitos, não tendo qualquer vínculo com o livro, não garantido a sua existência nem divulgação.
Publicação independente
Créditos da capa: License: CC0 Public Domain -
https : *//www.publicdomainpictures.net/*

NOTA PARA ESTA EDIÇÃO

As figuras, quando não citado a fonte, são de autoria do próprio autor e pesquisador deste livro. Algumas imagens utilizadas neste livro foram obtidas a partir do uso do IDL, *PowerPoint* ou *CorelDRAW* X3. Imagens ou figuras que não são próprias do autor e pesquisador desta obra, foram retiradas de *sites* de acesso público (citado a fonte).

Sobre o Autor

Armando Heilmann

Bacharel/licenciado em Física (Universidade Federal do Paraná), mestre em Ciências Atmosféricas (Universidade de São Paulo - USP, no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG)), doutor em Ciências Geodésicas UFPR, ênfase em Dinâmica Orbital, Pós-Doutorado (Sistema Meteorológico do Paraná) (2012-2013) em Processos Eletrostáticos e Eletromagnéticos de Descargas Atmosféricas Aplicados à Meteorologia e (2013-2014) em Eletricidade Atmosférica e Monitoramento de Campo Elétrico Quase-Estático Atmosférico Local. Membro da *Electrostatics Society of America* e integrante do *CRT Wilson Institute for Atmospheric Electricity*, atualmente é docente do Departamento de Engenharia Elétrica - DELT/UFPR, membro do Centro de Inovação em Engenharia Elétrica - CIEL/DELT e colegiado de curso no DELT. Um dos líderes do grupo de pesquisa em Sistemas de Propagação de Sinais - DEL/UFPR e coordenador do grupo de Fenômenos da Eletricidade Atmosférica FEA/UFPR. Como pesquisador participa de projetos $P\&D$, colaborações internacionais com o *INESC TEC* (Portugal), *Atmospheric Electrodynamical Coupling - ACATMOS* do projeto LEONA (*Transient Luminous Event and Thunderstorm High Energy Emission Collaborative Network*) - na América Latina, atuando nas áreas de pesquisa: Eletricidade Atmosférica, Mapeamento de Descargas Atmosféricas, Processo de Eletrificação das Descargas Atmosféricas, Propagação e Monitoramento de Ondas Eletromagnéticas em Baixas Frequências, Detecção de Relâmpagos

em "*Low Frequencies*"e "*Short-Range*", Efeitos Locais das Tempestades com Raios, Perturbação Eletromagnética (Antenas e Fenômenos Elétricos na Alta Atmosfera) na Dinâmica Orbital de Satélites.

Sobre o Coautor

Ezequiel Burkarter

Bacharel/licenciado em Física (2004), mestrado e doutorado em Física (2006) (Universidade Federal do Paraná). Atualmente é docente do Instituto Federal do Paraná (IFPR). Tem experiência na área de Física, atuando principalmente nos seguintes temas: produção de material didático para ensino de Física e formação de professores, Efeito Kerr, estudos de molhabilidade de superfícies, tratamento de superfícies por plasma, desenvolvimento de superfícies superhidrofóbicas, técnica de deposição de materiais por *eletrospay* e *aerospray* e desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos orgânicos. Além da atuação como docente e pesquisador, também atuou na área de gestão institucional de políticas de extensão, pesquisa e inovação do IFPR entre 2012 e 2016.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Heilmann, A., Burkarter, E.

Campo Elétrico Atmosférico: Parâmetro da Eletricidade Atmosférica. 1ª. ed. - Curitiba, 2020.



SINOPSE

Esta obra apresenta a descarga atmosférica como protagonista de um dos fenômenos da eletricidade atmosférica mais intrigante e estudado durante décadas. Trata-se de uma obra única em sua formatação para aqueles que estudam ou querem compreender melhor os raios. Neste contexto, a obra inicia com uma revisão dos conceitos básicos da eletrostática e eletrodinâmica, contextualizados em cenários que exemplificam o fenômeno da descarga atmosférica. Para expôr como esta obra foi preparada considerando as fontes de informações, são considerados 5 elementos básicos:

Atualidade

Foram analisados e considerados somente alguns estudos da eletrostática e eletrodinâmica que são utilizados na modelagem de campos elétricos em nuvens de tempestade. Com um roteiro que conduz o leitor primeiramente pelos conhecimentos básicos da eletrostática e eletrodinâmica, que são utilizados para estudar o desde a alta atmosfera, descendo em direção ao solo, passando por um estudo da , campo elétrico no interior de uma nuvem de tempestade, além de uma abordagem dos modelos de circuito elétrico atmosférico global e

local, modelos de canais dos raios abaixo das nuvens de tempestade, medições e perfil do campo elétrico próximo ao solo, até chegar no estudo dos raios sobre sistemas elétricos e um modelo eletrostático de antena.

Relevância

Considerado o cenário atual das pesquisas para o qual aponta um aumento significativo no número de raios ano a ano, todo o conteúdo foi organizado de maneira apresentar somente informações, modelos e teorias acerca do parâmetro campo elétrico, seguindo basicamente uma *trajetória do raio*, que se inicia nas altas camadas da atmosfera e percorre todo o espaço até próximo ao solo, aonde muitos efeitos podem ser monitorados e estudados.

Autoridade

As informações nesta obra são resumos de estudos coletivos e colaborativos entre os cientistas e pesquisadores de renome na área da eletricidade atmosférica, que já expuseram tais informações em artigos, congressos e eventos relacionados a área da eletricidade atmosférica, mas que tem lugar nesta obra de uma maneira linear e premeditadamente organizada pelo autor, com a pretensão de contribuir com um material de apoio para estudos e pesquisas da eletricidade atmosférica. Esta obra está baseada nos principais resultados divulgados por cientistas, professores e pesquisadores da área de eletricidade atmosférica, no qual consideramos particularmente, as seguintes referências: Dr. Vernon Cooray (do Departamento de Ciências de Engenharia da Universidade de Uppsala, Suécia), Dr. Donald R. MacGorman's e Dr. W. David Rust (da NOAA - National Severe Storms Laboratory, Oklahoma, EUA), Dr. Rycroft, M. J (foi pesquisador sênior do Departamento de Engenharia Eletrônica e Elétrica da Universidade de Bath entre 2006-2016), Dr. Martin Allan Uman (Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

da Faculdade de Engenharia Herbert Wertheim da Universidade da Flórida), Dr. Earle R. Williams (MIT).

Acurácia

Sendo assim, para facilitar a compreensão e importância do campo elétrico atmosférico diante dos fenômenos da eletricidade atmosférica, todas as informações contidas nesta obra estão contextualizadas com exemplos e modelos que remetem as descargas atmosféricas. Além de trazer nas páginas finais uma sequência de exercícios, novamente contextualizados, com resolução matemática na íntegra. São informações suportadas ou por evidências científicas, dados coletados ou modelos simulados, revisados e que são considerados atuais e de referência para as pesquisas sobre raios, a partir dos estudos realizados pelos diversos pesquisadores. Embora o fenômeno das descargas atmosféricas ainda sejam um mistério, não em absoluto sabe-se muito sobre suas características físicas, e isto permite um documento igualmente de referência para estudos que consideram tal fenômeno.

Objetivo

O desafio de organizar as informações de maneira que conduza o leitor a um entendimento sobre como o parâmetro de campo elétrico é gerado e pode ser aplicado a eletricidade atmosférica, foi também uma forma de compreender a importância dos diversos estudos e pesquisas realizadas e divulgadas, mas que nem sempre são completamente entendidos ou considerado como relevantes por outras áreas da tecnologia, das exatas e até mesmo da sociedade, especialmente quando se trata de um dos fenômenos mais complexos da natureza. Informar e ensinar, compreender parte dos mistérios que cercam as descargas atmosféricas e divulgar o quão importante são as pesquisas e estudos aplicados da eletricidade atmosférica, fazem desta modesta obra, uma ferramenta de apoio para pesquisadores,

professores e alunos de graduação e pós-graduação, das áreas da tecnologia, exatas e ciências naturais.

O raio é um dos fenômenos atmosféricos mais misteriosos para os cientistas. Embora os avanços da tecnologia, da computação e do aumento do número de pesquisadores na área das ciências atmosféricas seja evidente, ainda assim questões como: qual a origem das descargas atmosféricas, como uma nuvem de tempestade se torna eletrificada, qual a relação entre partículas carregadas vindas do espaço e os processos de eletricidade da alta camada das nuvens de tempestades, são questões em aberto. Sabemos que para todos os processos eletrostáticos ou eletrodinâmicos, há a necessidade de um campo que permita o movimento das cargas elétricas no meio. A este campo dá-se o nome de campo elétrico . No que condiz os estudos das descargas atmosféricas, nas suas mais diversas formas de manifestação, cabe a ciência da eletricidade atmosférica, iniciada assim, como ciência por Benjamin Franklin a mais de 200 anos. Durante séculos os fenômenos atmosféricos são estudados e isto levou a uma melhor compreensão a cerca das fontes de eletrificação como raios cósmicos, Sol, processos de eletricidade por atrito, indução convecção, etc, e também das manifestações atmosféricas como *Sprites, elves, blue jets*, relâmpagos bola e os próprios Raios. Em se tratando de um fenômeno como o das descargas atmosféricas, o campo elétrico atmosférico é fundamental para compreendermos um pouco mais sobre este e outros fenômenos igualmente eletrizantes, e que acontecem diariamente sobre todo o globo terrestre. Não sendo possível dissociar o campo elétrico apenas num campo elétrico ao nível do solo, em detrimento de outros efeitos atmosféricos que ocorrem na alta atmosfera , este livro, portanto, não pretende esgotar as discussões acerca da complexidade de interações e relações com outros campos como, por exemplo, o campo magnético. Mas, propõe-se a apresentar um resumo, de inúmeros trabalhos científicos que exploram exclusivamente, o comportamento do campo elétrico Atmosférico, seja ele ao nível do solo, conhecido como campo elétrico Atmosférico Local, seja nas altas camadas da atmosfera. Este livro

faz uma compilação de vários trabalhos científicos que conduzirá o leitor de cursos de graduação da área de exatas e tecnológicas, a uma compreensão contextualizada entre o campo elétrico Atmosférico e um dos fenômenos mais extraordinários da natureza, o RAIO.

NOMENCLATURA UTILZADA

Raio (*Lightning*) - Termo popular para a trajetória luminosa de uma descarga atmosférica e que corresponde ao desenvolvimento de um caminho luminoso pelo qual há fluxos de corrente de retorno.

Relâmpago (*Lightning*) - Efeito luminoso visível, decorrente da temperatura no canal de descarga.

Descarga Elétrica (*Electric Discharge*) - Fluxo de cargas a partir de um objeto carregado eletricamente.

Ruptura Inicial/Preliminar (*Initial Breakdown/Preliminary Breakdown*) - Pode ser considerado como uma sequência de canais que se estendem em direções aparentemente aleatórias a partir da fonte de carga da nuvem, com um deles evoluindo para o processo de início do movimento do *leader* que se propaga ao solo. A ruptura preliminar em relâmpagos nuvem-terra negativos a distâncias rela-

tivamente grandes, produz uma sequência de pulsos bipolares de campo elétrico e magnético, ocorrendo normalmente algumas dezenas de milissegundos antes do primeiro pulso de retorno.

Leader Precursor de Descarga (*Stepped Leader*) - Quando o *leader* aproxima-se do solo a uma distância de algumas dezenas a pouco mais de uma centena de metros, as cargas elétricas no canal produzem um campo elétrico intenso entre a extremidade do *leader* e o solo, correspondente a um potencial elétrico da ordem de 100 milhões de volts.

***Leader* Descendente** (*Downward Leader*) - Caminho formado por sucessivas descargas elétricas no ar, conhecido como *leader*, que se move em ramificações, após a ruptura dielétrica do ar. Se propaga em direção ao solo a partir da nuvem de tempestade.

***Leader* Ascendente** (*Upward Leader*) - Quando o *leader* precursor da descarga, está cerca de 15m do solo, ocorre uma descarga ascendente, de forma ramificada em direção predominantemente vertical, até se conectar com o *leader* descendente.

Fechamento do Canal de Descarga (*Attachment Process*) - Estágio final do processo de desenvolvimento dos *leaders* descendente e ascendente. Configura-se como a conexão entre estes *leader* e cuja estrutura criada é por onde ocorre o fluxo de corrente de retorno.

Descarga de Retorno (*Return Stroke*) - Evento relacionado o fluxo de corrente de retorno pelo canal da descarga.

Descarga Atmosférica Plena (*flash*) - Fase de fluxo das correntes de retorno. Corresponde a um conjunto de descargas de retorno (*return stroke*), após o fechamento do canal. É constituído de um ou mais

strokes pelo canal, dependendo da existência ou não, de descargas subsequentes.

Descarga de Retorno Subsequente (*Subsequent Stroke* Conjunto de descargas de retorno (*stroke*) de uma descarga atmosférica plena (*flash*).

Canal da Descarga (*Lightning Channel*) - Canal constituído pelo encontro dos *leader* precursores ascendente e descendente, com origem na nuvem de tempestade.

Corrente de Retorno (*Return Current*) - Corrente elétrica que flui pelo canal após o fechamento (*Attachment*). A corrente de retorno causado pela rápida descarga de eletricidade. Quando o *stepped leader* faz contato com um *streamer*, a carga negativa acumulada ao longo do canal do *leader* flui rapidamente para o solo.

Processo de Recarregamento do Canal da Descarga (*Dart Leader*) - Após a dissipação do fluxo da corrente de retorno, pode ocorrer um fluxo de recarregamento do canal, através de descargas subsequentes, que se completa no mesmo ponto do *leader* incidente da descarga anterior, ou pode ocorrer a conexão com *leaders* subsequentes a dezenas de distância da descarga original.

Corrente de recarregamento do Canal da Descarga (*Dart Leader Current*) - Corrente elétrica de valor reduzida. São as cargas negativas da nuvem fluindo pelo *leader* remanescente de uma descarga de retorno negativo anterior.

Canal Piloto da Descarga (*Streamer*) - Canal ou caminho ionizado ascendente (descendente), que surge quando o *Stepped Leader* se aproxima do solo. São canais filamentosos opcionais candidatos a se

conectar com o *Stepped Leader*. Um destes filamentos irá se tornar um *Upward Leader*, e o processo de *Attachment* se reinicia.

Heat Lightning - Tipo de relâmpago que não pode ser visualizado nem ouvido em virtude da grande distância de uma nuvem *cumulo-nimbus*, comum durante o verão.

Forked Lightning - Tipo de relâmpago nuvem-solo que se abre em diversas ramificações antes de se conectar com o solo.

Ribbon Lightning - Tipo de relâmpago que possui múltiplas descargas que ocorrem no espaço com alteração relativa de sua posição.

Bead Lightning - Tipo de relâmpago que apresenta variações ao longo do canal com aspectos claros e escuros.

Spider Lightning - Tipo de relâmpago com aspecto alongado, aéreo com múltiplas ramificações horizontais, parecendo acompanhar o envoltório do desenho da nuvem, especialmente em nuvens estratiformes, e que acabem dando a impressão de uma grande *aranha* desenhada na nuvem.

Contextualização

Os raios que ocorrem em baixa altitude são: raios nuvem-solo (cloud-to-ground - CG), raios intra-nuvem (intra-cloud - IC), inter-nuvem ou nuvem-nuvem (cloud-tocloud - CC) e nuvem-ar (cloud-to-air - CA). Segundo pesquisas, cerca de 75% das ocorrências globais de raios são do tipo IC, CC e CA [58]. Entretanto, o raio nuvem-solo (CG) é mais comum e portanto mais estudado em comparação com as outras descargas atmosféricas porque pode ser estudado usando equipamentos e sensores terrestres. Os raios nuvem-solo ocorrem principalmente de duas maneiras: Através da ruptura dielétrica proveniente de cargas positivas acumuladas no topo (ou região intermediária no modelo de dipolo elétrico) da nuvem de tempestade (descargas positivas), ou da ruptura dielétrica caudas por cagas negativas acumuladas na base da tempestade. No primeiro caso, é chamado de raio nuvem-solo positivo (+CG) e o segundo caso descreve o raios negativos da nuvem para o solo (-CG) [58], [15]. Acredita-se que cerca de 90% dos raios globais a partir da base da tempestade são descargas (-CG) e que somente 10% são do tipo descargas (+CG) [58]. Os raios (+CG) apresentam maior intensidade comparado com os raios (-CG). Podendo atingir pico de corrente de aproximadamente 300 kA ou mais [18], [58]. Acima das nuvens de tempestade frequentemente ocorrem os chamados Fenômenos Transientes Luminosos (*Transient Luminous Events TLE's*) que são originados a partir de descargas atmosféricas com fortes campos elétricos nas altas altitudes. Estes campos geram avalanches de elétrons relativísticos que emitem radiação altamente energética chamada raios gama através processo de *bremsstrahlung* [48]. Nesse processo, as radiações eletromagnéticas são produzidas pela desaceleração de partículas carregadas por outras partículas igualmente carregadas. Os raios gama expulsam nêutrons do núcleo dos átomos de nitrogênio presentes na atmosfera. Os átomos de nitrogênio que perderam seus nêutrons se tornam instáveis e se decompõem liberando pósitrons no ar. Os pósitrons são o equivalente da antimatéria de elétrons, e quando um elétron e

um pósitron colidem eles se aniquilam. Esses eventos de aniquilação produzem as prolongadas explosões de raios gama nas altas altitudes [66], [18]. Retomando a descrição da ocorrência de raios da nuvem para o solo, precisamos saber que as nuvens de tempestade contêm partículas de gelo, água e gotículas de águas super-resfriadas. A medida que as partículas de gelo crescem em tamanho dentro da nuvem em função das fortes correntes de ar que permitem o movimento de subida e descida desta partícula de gelo dentro da tempestade, as partículas de gelo maiores em tamanho adquirem carga negativa e as partículas menores adquirem carga positiva, pelo processo de eletrização por atrito. Agora, devido as correntes de ar ascendentes dentro da nuvem e da gravidade, as partículas de gelo com cargas positiva e negativas tendem a se separar. As partículas de carga positiva (de menor tamanho) são elevadas para cima e as partículas mais pesadas (de carga negativa) flutuam para a parte de baixo da nuvem sob efeito da própria gravidade [18]. Esta separação de cargas produz uma alta diferença de potencial (d.d.p) dentro da nuvem de tempestade e também entre a nuvem e o solo. A diferença de potencial pode chegar a várias dezenas de milhões de volts. Assim que a diferença de potencial ultrapassa a resistência dielétrica do ar (25 kV/cm na superfície terrestre) é produzido o chamado *flash*, correntes de retorno surgem e toda a carga elétrica acumulada na nuvem é neutralizada com o processo de descarga, com grande liberação de energia. Embora o processo de iniciação ou (*start*) dos raios ainda seja um mistério, recentemente observaram que o raio nuvem-solo negativo é iniciado por um movimento de avalanche de elétrons relativísticos a partir da tempestade. Segundo estes estudos, este movimento de avalanche de elétrons relativísticos pode fornecer ionização suficiente para desempenhar um papel significativo no desencadeamento dos raios conforme relata Chilingarian et al.,(2017). [1]. Os raios (+CG) começam com uma descarga invisível chamada *Leader* [72]. Nos raios (+CG) o *leader* carrega a carga

[1]Chilingarian et al. On the Initiation of Lightning in Thunderclouds, Scientific Reports, 1-10. 7: 1371, doi:10.1038/s41598-017-01288-0, 2017

positiva do topo da nuvem de tempestade em direção ao solo e ioniza o caminho a medida que o raio se propaga no ar. O *leader* se move da nuvem para o solo em etapas ou fases, avançando e parando no espaço, em distâncias que variam de 5-20 m de comprimento com uma velocidade descendente de 10^6 m/s [75]. Cada etapa do *leader* ocorre em menos de um milionésimo de segundo. O tempo entre as etapas é de cerca de 50 milionésimos de segundo. Como resultado a carga positiva é continuamente reduzida na região da tempestade. O tempo total gasto pelo *leader* para viajar do centro principal de carga positiva da nuvem até o solo é de 10 a 20 ms. Quando o *leader* está próximo do chão, sua carga positiva induz grandes quantidades de cargas negativas a partir do solo especialmente a partir de objetos que estão acima do plano da superfície terrestre. Como as cargas opostas se atraem, o grande acúmulo de cargas negativas no solo tenta se aproximar à quantidade de carga positiva que o *leader* está carregando. Assim que o *leader* positivo atinge o solo uma centelha negativa em movimento aleatório (serpentina) surge do solo e tenta se aproximar do canal (caminho) criado pelo *leader* positivo. Quando os dois *leaders* se encontram um raio visível é criado e a este processo chamamos de descarga de retorno (*return stroke*) que se propaga para cima com uma velocidade de cerca de um terço da velocidade da luz a partir do solo e ao longo do caminho criado pelo *leader* positivo. Dessa forma, a descarga de retorno neutraliza toda a carga positiva distribuída no *leader* principal [18]. A descarga de retorno é tipicamente muito brilhante e intensa. Os valores de pico das correntes das descargas de retorno podem alcançar 300 kA [25]. Se alguma carga permanecer na nuvem após a primeira descarga outro *leader*, chamado de *dart leader* é lançado em movimento descendente sem as ocorrência das etapas de pausa no seu deslocamento até o solo. O *dart leader* se propaga com uma velocidade de $0,1 \times 10^7 - 2,3 \times 10^7$ m/s e leva cerca de 1 ms para se aproximar do solo [53]. Quando o *dart leader* se aproxima do solo outra descarga chamado de descarga subsequente de retorno surge a partir do solo e viaja de volta pelo canal até a nuvem de tempestade. Esse processo do *dart leader* e da descarga subsequente de retorno é o que permite a neutralização das

cargas dentro da tempestade. Os valores de pico de corrente nas descargas subsequentes de retorno de raios nuvem-solo positivos podem variar de 90 a 140 kA [48] . O mecanismo completo da formação de um raio é mostrado na figura (1) abaixo. Um grande número de pesquisadores observaram ao longo dos anos que os raios (+CG) seriam as descargas associadas as ocorrências de *sprites*, que é um tipo de fenômeno da classe dos Fenômenos Transientes Luminosos.

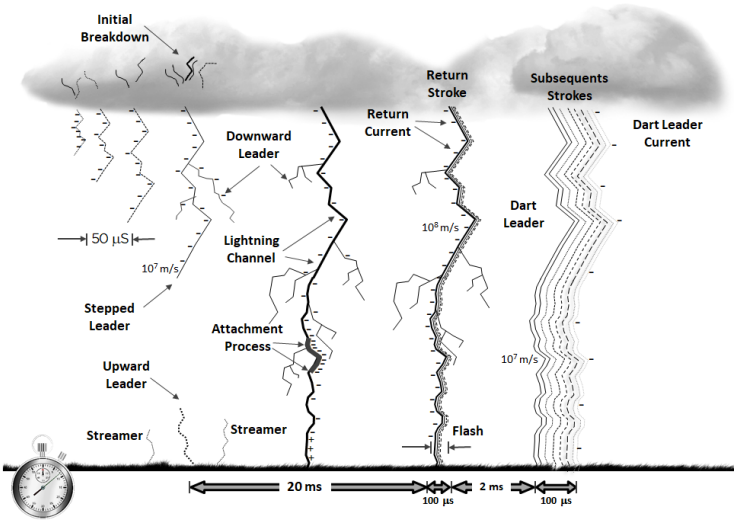

Figura 1: Mecanismo de formação de uma descarga atmosférica - nuvem-solo positivo (se considerado o topo da nuvem) ou nuvem-solo negativo se considerado a base da nuvem de tempestade.

Conteúdo

Sumário **i**

1 ELETROSTÁTICA E ELETRODINÂMICA **1**

1.1 INTRODUÇÃO À ESTRUTURA ATMOSFÉRICA 2
1.2 LEI DE COULOMB E O CAMPO ELÉTRICO 4
1.3 DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS 9
1.4 SUPERPOSIÇÃO DE CARGAS 13
1.5 CAMPO ELÉTRICO NUM CONDUTOR PLANO 16
1.6 ALTERAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO DEVIDO AO FLASH EM TEMPESTADES 18
1.7 CAMPO ELÉTRICO DEVIDO DESCARGA NUVEM-SOLO 22
1.8 CAMPO ELÉTRICO DEVIDO A *STEPPED LEADER* . . . 24
1.9 CAMPO ELÉTRICO CAUSADO POR *LEADER* DE RETORNO 27
1.10 CAMPO ELÉTRICO DEVIDO UM *FLASH* DA NUVEM . 30
1.11 CAMPO ELÉTRICO DEVIDO UM *FLASH* PARA O SOLO 31
1.12 POTENCIAL ESCALAR ELÉTRICO 33
1.13 DENSIDADE DE FLUXO ELÉTRICO 44
1.13.1 LEI DE GAUSS 47
1.13.2 LEI DE GAUSS NUMA SUPERFÍCIE ESFÉRICA 50
1.13.3 LEI DE GAUSS NUM CONDUTOR FINITO . . 52
1.14 DEFINIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA 54
1.15 QUEBRA DE RIGIDEZ DIELÉTRICA 59
1.16 CAMPO ELETROMAGNÉTICO PARA DESCARGAS DE RETORNO 61

2 PROPRIEDADES BÁSICAS DA ALTA ATMOSFERA 64
2.1 CAMPO MAGNÉTICO NA ATMOSFERA SUPERIOR . 65
2.2 ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DAS ONDAS WHISTLERS 73
2.3 PROCESSOS DE IONIZAÇÃO DA ALTA ATMOSFERA 77
2.4 CAMADAS IONOSFÉRICAS 79
2.5 EVENTOS LUMINOSOS TRANSIENTES 84
2.6 PROCESSO DE IGNIÇÃO DOS SPRITES 89
2.7 MODELO DE CAMPO ELÉTRICO PARA SPRITES . . . 90
2.8 RUÍDOS DE RÁDIO NO ESPAÇO DE FONTES TERRESTRES 94
2.9 CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA 95
2.10 INCIDÊNCIA DE DESCARGA ATMOSFÉRICA NO TEMPO E NO ESPAÇO 97
2.11 RUÍDO NA ÓRBITA DE SATÉLITES 103
2.12 PICO DE AMPLITUDE DO CAMPO ELÉTRICO 103
2.13 FLUXO DE POTÊNCIA VERTICAL A PARTIR DE TEMPESTADES 105

3 PERFIL DO INTERIOR DAS TEMPESTADES 110
3.1 TEORIA DO CARREGAMENTO 111
3.2 ESTRUTURA DINÂMICA DAS TEMPESTADES 121
3.3 CAMPO ELÉTRICO EM TEMPESTADES 124
3.4 INTENSIDADE DO CAMPO ELÉTRICO DENTRO DAS TEMPESTADES 129
3.5 ESTIMANDO A ENERGIA DISSIPADA NOS RAIOS . . 136
3.6 CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO RADIADO NO ESPECTRO DO VLF 145

4 MODELOS GLOBAIS E LOCAIS DE TEMPESTADES 150
4.1 TEMPESTADES COMO GERADORES ELÉTRICOS . . .151
4.2 MODELO DE CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL 153
4.3 MODELO DE CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO LOCAL 158

5 FÍSICA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 167
5.1 MODELO DO CANAL DE DESCARGAS 168
5.2 ENERGIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 172

6 PROPRIEDADES DA BAIXA ATMOSFERA 175
6.1 CAMPO ELÉTRICO ABAIXO DA TEMPESTADE 176
6.2 REPRESENTAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO POR DESCARGAS 185
6.3 ALERTAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E O PERFIL DE CAMPO ELÉTRICO 190
6.4 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E AS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS 191
6.5 MEDINDO O CAMPO ELÉTRICO ABAIXO DAS TEMPESTADES 199
6.6 ESTIMANDO A DISTÂNCIA DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA USANDO FIELD MILL 208

7 MODELOS RECENTES 223
7.1 RAIOS E A RUPTURA DIELÉTRICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO 224
7.2 MODELO DE UMA ANTENA ELETROSTÁTICA 230
7.3 MODELO DE MEDIDA VERTICAL DE CORRENTE . . 232
7.4 CONCEITO DE ÁREA EFETIVA DE UMA ANTENA . . 233
7.5 MODELO ELETROSTÁTICO DE ANTENA 234
7.5.1 Exercícios Contextualizados 238

Capítulo

1 ELETROSTÁTICA E ELETRODINÂMICA

Resumo do Capítulo: O campo elétrico é uma grandeza física que determina algumas propriedades do meio, pelas quais partículas carregadas podem se deslocar. Para a correta interpretação a cerca das características desta grandeza física necessita do conhecimento básico sobre as propriedades da carga elétrica, conservação de energia e força coulombiana. Desta forma este capítulo apresentará ao leitor, de forma bastante conceitual e contextualizada, tais temas além de resolver alguns exemplos, que ajudarão o leitor a seguir para os capítulos seguintes.

1.1 INTRODUÇÃO À ESTRUTURA ATMOSFÉRICA

O conhecimento da eletricidade estática dada de aproximadamente 600 A.C. Foram os Gregos os primeiros a cunhar o termo eletricidade, derivando este termo de pequenos experimentos com um pedaço de âmbar.

Por volta de 1600 o Dr. Gilbert então físico de Sua majestade a Rainha da Inglaterra, foi o primeiro a realizar alguns experimentos que utilizavam o âmbar como ferramenta para observar os primeiros fenômenos eletrostáticos.

Um oficial da engenharia do Exército Francês, chamado Coronel Charles Augustin Coulomb, desenvolveu uma balança de torção, sensível o suficiente para perceber a quantidade de força entre dois objetos que tivessem cargas estáticas de eletricidade diferentes [22], [62].

É a estrutura do átomo quem determina a natureza da eletricidade, assim, a carga elétrica é uma propriedade fundamental das partículas elementares. As partículas consideradas no estudo da eletricidade são: Elétrons, Prótons e Nêutrons (Figura:1.1) [62].

Partícula	Massa em kg	Carga em Coulomb
Elétron	$M_{\bar{e}} = 9.1x10^{-31}$	$Q_{\bar{e}} = -1.6x10^{-19}$
Próton	$M_p = 1.7x10^{-27}$	$Q_p = +1.6x10^{-19}$
Nêutron	$M_n = 1.7x10^{-27}$	$Q_n = 0$

Figura 1.1: Principais propriedades das partículas elementares.

O estudo da eletrostática culmina com a definição das propriedades das cargas elétricas. Ou seja, as cargas existem em dois

tipos, conhecidos como "positivas"e "negativas". Isto significa que uma carga positiva pode "aniquilar"uma carga equivalente de polaridade negativa, contudo uma carga positiva não pode simplesmente desaparecer por si só, e este é o *Princípio da Conservação de Carga*. Outrossim, a carga elétrica também é *quantizada*, o que significa que todas as cargas elétricas são múltiplos inteiros da unidade básica de carga, chamada de "carga elementar", e este é o *Princípio da Quantização da Carga* [3], [4].

Portanto, em eletricidade atmosférica é comum os termos de geração de cargas e separação de cargas. Contudo estes termos estão afirmando que haverá uma redistribuição sistemática das cargas no espaço, em outras palavras, as cargas vão se organizar em núcleos de cargas, distinguindo-se entre cargas positivas e cargas negativas.

No universo, como um todo, a Lei de Conservação da Carga é garantida e preservada. Então como pode haver acúmulos maiores de cargas numa região e menores em outra. A resposta está no equilíbrio de cargas.

Por exemplo, as moléculas são combinações de dois ou mais átomos. Se forem estáveis, esta estabilidade é devido às forças que atuam no interior dos átomos, deixando as moléculas eletricamente neutras.

No processo de ionização ocorre um desequilíbrio na distribuição dos elétrons. Quando atribui-se elétrons a um corpo, diz-se que o corpo está eletrizado negativamente, e quando retira-se elétrons de um corpo diz-se que está eletrizado positivamente.

A esta propriedade de adição e remoção de elétrons de átomos ou moléculas damos o nome de Processos de Ionização ou Simplesmente Ionização [62], [34].

1.2 LEI DE COULOMB E O CAMPO ELÉTRICO

Medidas experimentais conduziram a definição da correlação entre cargas elétricas e a força sentida por estas cargas, em função da distância que as separa [62]. Portanto, A Lei de Coulomb é expressa como: *Uma força que um corpo com carga exerce sobre outro corpo com carga é proporcional ao produto destas cargas elétricas. Porém, é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Sua direção está orientada ao longo da linha que separa as duas cargas*.

A ação da força eletrostática, calculada de acordo com a Lei de Coulomb, pode ser:

Força de atração: conjunto de cargas de sinais opostos Força de repulsão: conjunto de cargas de sinais iguais.

Por que a ação da força eletrostática se comporta de forma atrativa ou repulsiva. Porque segundo a lei de Charles François de Cisternay du Fay: Cargas de sinais iguais se repelem e cargas de sinais contrários se atraem [8], [34].

Assim, a Lei de Coulomb pode ser escrita como:

$$\vec{F}_{(i+1),1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{Q_i Q_{(i+1)}}{r^2} \right) , \tag{1.1}$$

onde $\vec{F}_{(i+1),1}$ corresponde a força eletrostática coulombiana que o corpo de carga (i+1) exerce sobre o corpo de carga 1 [N]. A carga elétrica (Q) em [C], distância entre as cargas (D) em [m] e ε_o como a permissividade elétrica no vácuo, de valor 8.854×10^{-12} N.m^2/C^2 [8].

Considere uma partícula (ou corpo) carregada com carga (Q). Se esta partícula for colocada no espaço, próximo de outras partículas carregadas, esta irá apresentar uma relação ou de aproximação ou afastamento, em relação às outras partículas.

Obviamente que existirá uma força eletrostática, conforme predita anteriormente, porém a região do espaço que permite a ação desta força eletrostática sobre esta partícula de carga (Q) assume o conceito de "campo".

A este campo damos o nome de campo elétrico ($\vec{E}$), que pode ser assim escrito:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \,. \tag{1.2}$$

Sua unidade S.I é [N/C], em função de ser a razão da ação da força eletrostática $\vec{F}$ [N] e a carga elétrica (Q) [C].

Esta relação exprime os princípios da Eletrostática. Disto é possível calcular qual a intensidade de campo elétrico $\vec{E}$ para um conjunto de N partículas carregadas [8].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \sum_{i=1}^{N} \frac{\left(\frac{Q_i Q_{(i+1)}}{r^2}\right)}{Q} \,, \tag{1.3}$$

Se Q_i assumir identidade (Q), então a expressão se reduz a:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{Q}{r^2}\right) \hat{a}_r. \tag{1.4}$$

De tal forma que o campo elétrico será dado em [N/C].