

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UMA ANÁLISE TEÓRICA DOS
PARÂMETROS TÍPICOS DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS**

MACSON GIULIANO ALVES DE SOUZA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE
2017**

MACSON GIULIANO ALVES DE SOUZA

UMA ANÁLISE TEÓRICA DOS PARÂMETROS TÍPICOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Felipe Eduardo Moreira Cota

JOÃO MONLEVADE
2017

S729a

Souza, Macson Giuliano Alves de.

Uma análise teórica dos parâmetros típicos de descargas atmosféricas
[manuscrito] / Macson Giuliano Alves de Souza. - 2017.

46f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. MSc. Felipe Eduardo Moreira Cota.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de
Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Descargas Elétricas. 2. Energia elétrica - Consumo. 3. Correntes
elétricas - Medição. 4. Campos elétricos. I. Cota, Felipe Eduardo Moreira. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.31



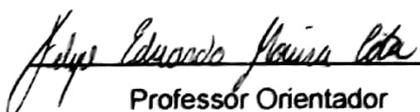
ATA DE DEFESA

Aos 15 dias do mês de dezembro de 2017, às 12 horas, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando Macson Giuliano Alves de Souza, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Felipe Eduardo Moreira Cota, Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho e Savio Figueira Corrêa. O candidato apresentou a monografia intitulada: Um análise teórica dos parâmetros típicos de descargas atmosféricas. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do candidato, com a nota média 90, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

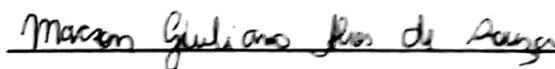
Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Felipe Eduardo Moreira Cota	90
Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho	90
Savio Figueira Corrêa	90
Média	90

João Monlevade, 15 de dezembro de 2017.


Professor Orientador

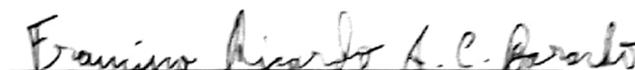
Felipe Eduardo Moreira Cota


Aluno

Macson Giuliano Alves de Souza


Professor Convitado

Sávio Figueira Correa


Professor Convitado

Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho



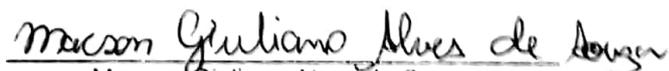
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “ Uma análise teórica dos parâmetros típicos de descargas atmosféricas” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 15 de dezembro de 2017.


Macson Giuliano Alves de Souza

Este trabalho é dedicado a incrível Senhora Iraci Ferreira de Figueiredo, a minha amada avó. Vovó, hoje a senhora está em outro plano mas sempre estará no meu coração. Dedico também ao pequeno Davi, meu amado afilhado, que chegou para alegrar e iluminar a minha vida.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ser meu guia espiritual durante essa caminhada. Afinal, ele sempre guarda o que há de melhor para mim.

Agradeço a Sra. Cléia Lúcia de Souza Alves, minha querida mãe, que sempre me estendeu a mão e me deu força quando tudo parecia impossível. Ao Sr. Edson Alves Pereira, meu querido pai, pelo apoio financeiro e por sempre acreditar que chegaria até aqui. Ao meu irmão Cleyson Alves de Souza pela confiança de sempre, e a toda a minha família. Sem dúvidas vocês foram a base de tudo.

Agradeço de forma especial ao Professor Felipe Eduardo Moreira Cota por ter aceitado ser meu orientador neste Trabalho de Conclusão de Curso. Agradeço fortemente pela sua paciência e colaboração.

Agradeço aos que se tornaram meus irmãos nessa longa caminhada: Lekko, Stuart, Mamute, Diogo, Brak. Com certeza foram momentos de muita aprendizagem e crescimento que certamente levarei pelo resto da vida.

Agradeço a todas as Repúblicas de João Monlevade que tive o prazer de conhecer e conviver, de forma especial aos queridos amigos: Priscila de Paula, Cássia Caren, Matheus Lage, Fernando Ferreira e Weld Lucas.

Por fim agradeço a todos os funcionários da Universidade Federal de Ouro Preto que contribuíram para que esse sonho se tornasse realidade.

*"Não é a força, mas a constância
dos bons sentimentos que
conduz os homens à felicidade."
– Friedrich Nietzsche*

Resumo

Desde os tempos de *Benjamin Franklin*, precursor no estudo de Descargas Atmosféricas, a comunidade científica vem se interessando pelo estudo desse fenômeno. A crescente necessidade de sistemas elétricos com maior robustez, bem como melhorias na qualidade da energia elétrica consumida, são fatores que impulsionam pesquisas e novas descobertas. Tornou-se de extrema importância não só a obtenção do conhecimento filosófico desta ocorrência, como também, a análise física dos parâmetros envolvidos nessas descargas através da coleta de dados existentes. Descarga Atmosférica pode ser definida resumidamente como o produto da reação entre as densidades de cargas que se formam nas nuvens durante uma tempestade. Nessas condições, a rigidez dielétrica do ar pode ser quebrada formando canais precursores percorridos por grandes intensidades de correntes em algum ponto da atmosfera dando origem ao fenômeno. Neste trabalho foram analisados a partir de um conjunto de informações pré-definidas, parâmetros como intensidade de campo elétrico, corrente elétrica de descarga, tempo de subida, duração de descarga, tempo de frente, dentre outros. O principal objetivo deste trabalho foi o levantamento de dados presentes na literatura sobre descargas atmosféricas, visando posteriormente afirmar e contribuir à luz das leis da física e do eletromagnetismo, com um modelo existente que represente esse fenômeno observando possíveis disparidades e distúrbios provocados pela natureza aleatória desses eventos.

Palavras-chave: Descargas Elétricas, parâmetros, corrente elétrica de descarga, canal precursor.

Abstract

Since the days of Benjamin Franklin, precursor in the study of Lightning, the scientific community has been interested in the study of this phenomenon. The growing need for electrical systems with increased robustness, as well as improvements in the quality of the electricity consumed are factors that drive research and new discoveries. It has become extremely important not only to obtain the philosophical knowledge of this event, but also the physical analysis of the parameters involved in these discharges through existing data collection. Atmospheric discharge can be defined briefly as the product of the reaction between the densities of charges that form the clouds during a storm. Under these conditions the dielectric strength of the air can be broken forming precursor channels driven by large intensities of current somewhere in the atmosphere giving rise to the phenomenon. In this work are analyzed from a set of predefined information, parameters such as electric field intensity, electric discharge current, rise time, flushing duration, ahead of time, among others. The main objective of this work is to collect data present in the literature on atmospheric discharges aiming later and under the light of the laws of physics and electromagnetism, with an existing model to represent this phenomenon observing possible disparities and disturbances provoked by nature events.

Keywords: Electrical discharges , parameters , rise time , ahead of time , electric current discharge , precursor channel.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Densidade de raios no Brasil.	2
Figura 2 – Formação da nuvem de tempestade.	7
Figura 3 – Surgimento do canal precursor na base da nuvem	8
Figura 4 – Progressão e conexão dos canais ascendente e descendente	9
Figura 5 – Corrente de retorno e efeitos agregados ao fenômeno	10
Figura 6 – Diagrama de classificação das Descargas Atmosféricas	11
Figura 7 – Subclassificação das Descargas nuvem-solo	12
Figura 8 – Esquema de uma estação fixa de medição.	14
Figura 9 – Sequência de eventos envolvidos na formação de primeira descarga utilizando a técnica de lançamento de foguete.	16
Figura 10 – Sequência de eventos envolvidos na formação de primeira descarga utilizando a técnica de indução por altitude.	17
Figura 11 – Primeiro raio induzido no Brasil.	22
Figura 12 – Estrutura elétrica da nuvem de tempestade.	24
Figura 13 – Modelo baseado em cargas pontuais	24
Figura 14 – Aplicação do método das imagens	25
Figura 15 – Resultados obtidos por RAKOV	27
Figura 16 – Modelo quantificado	28
Figura 17 – Contribuições de campo elétrico a nível do solo (cargas estáticas).	29
Figura 18 – Superposição dos campos elétricos a nível do solo	30
Figura 19 – Pontos de observação a nível do solo	31
Figura 20 – Comparação do Perfil de Campo Elétrico em P1	32
Figura 21 – Comparação do Perfil de Campo Elétrico em P1 pelo tempo de descida das cargas	34
Figura 22 – Perfil de Campo Elétrico em P1 para um descarga positiva	35
Figura 23 – Perfil de Campo Elétrico em P1 por tempo de descida da carga para um descarga positiva	36
Figura 24 – Perfil de Campo Elétrico para o modelo teórico quando se varia a posição do observador.	37
Figura 25 – Perfil de Campo Elétrico para medições no Morro do Cachimbo e San Salvatore quando se varia a posição do observador.	38
Figura 26 – Perfil de Campo Elétrico para uma descarga positiva quando se varia a posição do observador.	39

Lista de tabelas

Tabela 1 – "Ranking"brasileiro da densidade de descargas atmosféricas.	3
Tabela 2 – "Ranking"mineiro da densidade de descargas atmosféricas.	3
Tabela 3 – Centros de pesquisa pelo mundo	13
Tabela 4 – Estações em operação.	15
Tabela 5 – Ocorrências de Descargas nuvem-solo pelo mundo.	15
Tabela 6 – Parâmetros de descargas positivas ocorridas no Monte San Salvatore. .	20
Tabela 7 – Quadro comparativo dos parâmetros de descargas negativas <i>Leaders</i> . .	20
Tabela 8 – Quadro comparativo dos parâmetros de descargas positivas <i>Leaders</i> . .	20
Tabela 9 – Base de dados para descargas preliminares.	21
Tabela 10 – Base de dados para descargas subsequentes.	21
Tabela 11 – Comparação entre os parâmetros de descargas naturais e descargas artificiais.	22

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Preliminares	3
1.2	Relevância e Motivação	4
1.3	Objetivos do Trabalho	4
1.4	Metodologia de Desenvolvimento	4
1.5	Organização do Trabalho	5
2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	6
2.1	Processo de Formação das nuvens de tempestade	6
2.2	Definição de Descargas Atmosféricas	7
2.3	Processo de Formação de Descargas	8
2.4	Classificação dos tipos de Descargas	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Medição de descargas naturais	13
3.2	Medição de descargas artificiais	15
3.2.1	Técnica de indução por lançamento de foguetes	15
3.2.2	Técnica de indução por laser e jatos de água	18
3.3	Parâmetros de descargas: conceitos gerais	18
3.4	Parâmetros de descargas obtidos em medições	19
4	MODELAGEM DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	23
4.1	Estrutura elétrica das nuvens de raios	23
4.2	Distribuição de cargas elétricas nas nuvens de raios	23
4.3	O modelo idealizado por RAKOV	24
5	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	28
5.1	Perfil do Campo Elétrico a Nível do Solo: Cargas estáticas	28
5.2	Perfil do Campo Elétrico a Nível do Solo: Cargas dinâmicas	31
5.2.1	Perfil do Campo Elétrico de cargas dinâmicas considerando um observador estático	32
5.2.2	Perfil do Campo Elétrico de cargas dinâmicas considerando mudanças de posição do observador	36
6	CONCLUSÕES	40
6.1	Considerações Finais	40
6.2	Trabalhos Futuros	40

ANEXO A – NOMENCLATURAS PRESENTES NA LITERATURA	42
REFERÊNCIAS	45

1 Introdução

É de grande complexidade o monitoramento da presença de raios em um determinado local. Isso deve-se à aleatoriedade associada a eles, o que poderia ser a resposta para a famosa frase: *"Um raio não cai duas vezes no mesmo lugar"*. A dificuldade pode estar em trabalhar com eventos estritamente aleatórios, impossibilitando localizações exatas. Logo, há que se considerar probabilidades e incertezas.

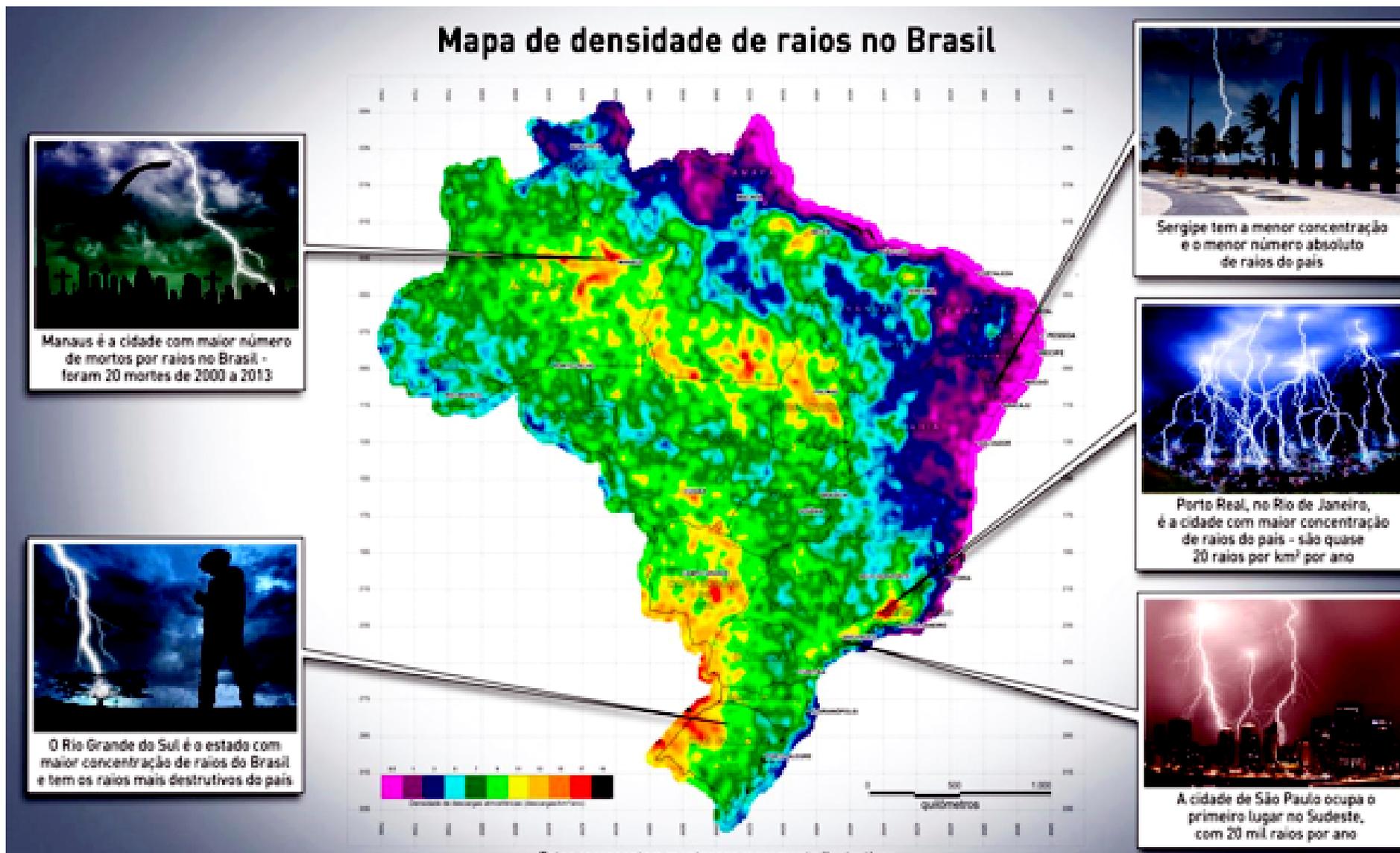
Estudos estatísticos foram realizados e os dados demonstram que a ocorrência de mortes por raios é grande. O principal órgão brasileiro que realiza estes estudos é o grupo de eletricidade atmosférica - (ELAT) do Instituto de Pesquisas Espaciais - (INPE). O ELAT foi criado em 1995 e é o primeiro grupo de pesquisas da área no Brasil, tendo sua origem no desenvolvimento de pesquisas espaciais desde 1979. É considerado uma referência mundial em eletricidade atmosférica.

A Figura 1 representa o mapa de densidade de raios no Brasil, com algumas curiosidades sobre as diversas regiões do país. Pode-se observar que na região norte Manaus possui o maior índice de mortes causadas por descargas atmosféricas. Foram 20 mortes no período 2000-2013. A região sul é o local que apresenta ocorrências dos raios mais destrutivos, em consequência da grande humidade presente no ar e no solo. Nota-se que a região nordeste apresentou as menores densidades de descargas atmosféricas devido ao seu clima quente e seco, com poucas ocorrências de tempestades. Na região sudeste, São Paulo lidera com aproximadamente 20 mil raios por ano.

As informações contidas na Figura 1 são baseadas em um parâmetro que indica a frequência de incidência das descargas em determinadas regiões. Esse parâmetro é chamado de índice N_g e pode variar em razão das manifestações de tempestades, altitude e características do relevo local. O índice N_g auxilia na avaliação da quantidade de raios que atingem todas as regiões do país.

No Brasil, a cidade com maior incidência de raios é Porto Real-RJ. Estudos apontam que, no estado de Minas Gerais, Juiz de Fora possui a maior densidade de descargas. Abaixo, as Tabelas 1 e 2 mostram o ranking das 10 cidades do Brasil e as 10 cidades do estado de Minas Gerais que apresentam as maiores densidades de descargas atmosféricas respectivamente. O "ranking" da Tabela 1 é liderado por cidades localizadas na região sudeste, principalmente nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, com exceção da cidade de Forquethinha que fica no sul do país.

Figura 1 – Densidade de raios no Brasil.



Fonte: Extraído de ELAT (2016b).

O relevo da região sudeste é caracterizado por apresentar serras e planaltos, que contribuem para a ocorrência de descargas atmosféricas. O clima tropical de altitude é predominante nesta região e, em razão das altitudes elevadas, as temperaturas caem drasticamente favorecendo a formação de tempestades.

Tabela 1 – "Ranking" brasileiro da densidade de descargas atmosféricas.

Município	UF	Densidade de descargas	Ranking
Porto Real	RJ	19,66	1º
Barra do Piraí	RJ	18,09	2º
Valença	RJ	17,31	3º
Rio das Flores	RJ	17,11	4º
Juiz de Fora	MG	17,03	5º
Belmiro Braga	MG	16,74	6º
Matias Barbosa	MG	16,63	7º
Rio Preto	MG	16,6	8º
Piau	MG	16,34	9º
Forquethinha	RS	16,13	10º

Fonte: Extraído de ELAT (2016e).

Tabela 2 – "Ranking" mineiro da densidade de descargas atmosféricas.

Município	UF	Densidade de descargas	Ranking
Juiz de Fora	MG	17,03	1º
Belmiro Braga	MG	16,71	2º
Matias Barbosa	MG	16,63	3º
Rio Preto	MG	16,6	4º
Piau	MG	16,34	5º
Coronel Pacheco	MG	16,08	6º
Chácara	MG	15,82	7º
Santa Bárbara do Monte Verde	MG	15,58	8º
Ewbank da Câmara	MG	15,58	9º
Santos Dumont	MG	15,55	10º

Fonte: Extraído de ELAT (2016f).

1.1 Considerações Preliminares

Desde os tempos pré-históricos, o fenômeno de descargas atmosféricas era observado com grande estimo. Naturalmente, naquela época, com a ausência de informações, o homem nunca foi capaz de extraí-lo do campo filosófico. Eventos dessa natureza eram reverenciados e associados aos Deuses em virtude do seu poder destrutivo. A convivência com tais eventos possibilitou o uso de práticas de prevenção relativamente eficientes para a era vivida.

Dentre elas, era comum chefes de tropas romanas ordenarem aos seus soldados que não apontassem suas lanças para cima em dias de fortes tempestades. Assim, evitariam baixas nas tropas causadas por descargas decorrentes da atração pelo poder das pontas. Ainda hoje, o fenômeno de descargas gera muitas descobertas e seu estudo se torna constante no meio científico.

Somente no séc. XVIII, em 1751, experimentos de *Benjamim Franklin* nos Estados Unidos comprovaram a natureza elétrica das descargas atmosféricas. Tal descoberta fomentou o estudo na Europa até os dias atuais.

1.2 Relevância e Motivação

O estudo dos efeitos causados pelo fenômeno de descargas atmosféricas possibilita o reconhecimento de certos padrões nas diversas regiões de incidência. Atualmente, um tema de grande importância nesse sentido, diz respeito a proteção dos sistemas elétricos contra agentes externos que possam provocar falhas e perdas em equipamentos.

Sob essa ótica, o conhecimento e personalização de atributos desse fenômeno, ajudam na elaboração de práticas consistentes de proteção dos sistemas elétricos, evitando possíveis desdobramentos danosos causados por sua ocorrência.

Por ser o primeiro trabalho nesta área na UFOP, que ainda não trabalha nessa linha de pesquisa, acredita-se que esta pesquisa abrirá novos caminhos para o desenvolvimento do tema dentro da universidade.

1.3 Objetivos do Trabalho

O objetivo principal do presente trabalho é analisar os parâmetros envolvidos no fenômeno de descargas atmosféricas, com a finalidade de estabelecer correlações entre dados desses eventos ocorridos nas mais variadas partes do mundo. Simulações serão utilizadas para o levantamento do perfil de campo elétrico no solo em virtude da ocorrência de descargas atmosféricas, levando-se em consideração uma base de dados existente.

1.4 Metodologia de Desenvolvimento

A metodologia está fundamentada no uso de ferramentas computacionais para simulação do perfil de campo elétrico no solo, em decorrência de uma descarga atmosférica nuvem-solo. Na literatura atual, encontram-se várias técnicas para a modelagem desse campo elétrico. No presente trabalho será utilizado a teoria do cálculo de campos elétricos estáticos e dinâmicos, levando-se em consideração cargas pontuais.

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em 5 capítulos.

O Capítulo 1 tem caráter introdutório. O mesmo apresenta uma contextualização histórica do tema em estudo, curiosidades sobre descargas atmosféricas, motivação e relevância do tema nos dias atuais. Finaliza expondo a metodologia utilizada.

O Capítulo 2 contém as especificações do tema proposto. Define cada etapa do processo de formação de descargas atmosféricas, desde a formação de nuvens de tempestade até a composição plena da descarga. Também caracteriza e rotula, por meio da nomenclatura existente, cada tipo de descarga presente na literatura.

No Capítulo 3 realiza-se a revisão bibliográfica do tema em questão, destacando os principais resultados compreendidos nos trabalhos durante décadas de estudo. Apresenta-se uma visão geral das características estruturais necessárias nas medições, bem como os parâmetros extraídos desses bancos de dados.

No Capítulo 4 é apresentado um modelo físico-matemático para o fenômeno de descargas atmosféricas a fim de quantificar o campo elétrico a nível do solo. Os resultados desse modelo são mostrados e discutidos.

No Capítulo 5 é aplicado o modelo proposto a fim de verificar e ratificar os resultados já existentes. É realizada também, uma discussão mais aprofundada das características do perfil de campo elétrico a nível do solo, levando em consideração cargas elétricas estáticas e em movimento.

No Capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho, bem como uma proposta para trabalhos futuros.

2 Descargas Atmosféricas

Na investigação dos parâmetros de descargas atmosféricas, torna-se relevante iniciar com uma análise da essência do fenômeno. As nuvens de tempestades são fontes naturais de ocorrência dessas descargas. Conhecidas também por Cumulonimbos, essas têm como parte estrutural a forma de tripolos elétricos, ou seja, a distribuição de cargas internas resultam em três polos constituídos de n-cargas que interagem entre si com o propósito de formar descargas atmosféricas (OLIVEIRA, 2007).

2.1 Processo de Formação das nuvens de tempestade

Nuvens de tempestades são constituídas a partir da intensidade de ventos no sentido vertical. Este processo causa instabilidade e aumenta a taxa de umidade, resultando em uma nuvem que atinge altitudes e temperaturas abaixo do grau de congelamento. Estas são condições ideais para formação da *Cumulonimbos*. Os ventos verticais são originados principalmente da diferença de pressão e temperatura existentes. Sabe-se que o ar mais quente, de menor densidade, tende a subir e o ar mais frio, de maior densidade desce. Essa troca de posição gera polos na estrutura das nuvens, e quanto maior a intensidade das correntes de ar, mais intenso será o processo de eletrificação. A figura 2 demonstra o processo de formação da nuvem de tempestade.

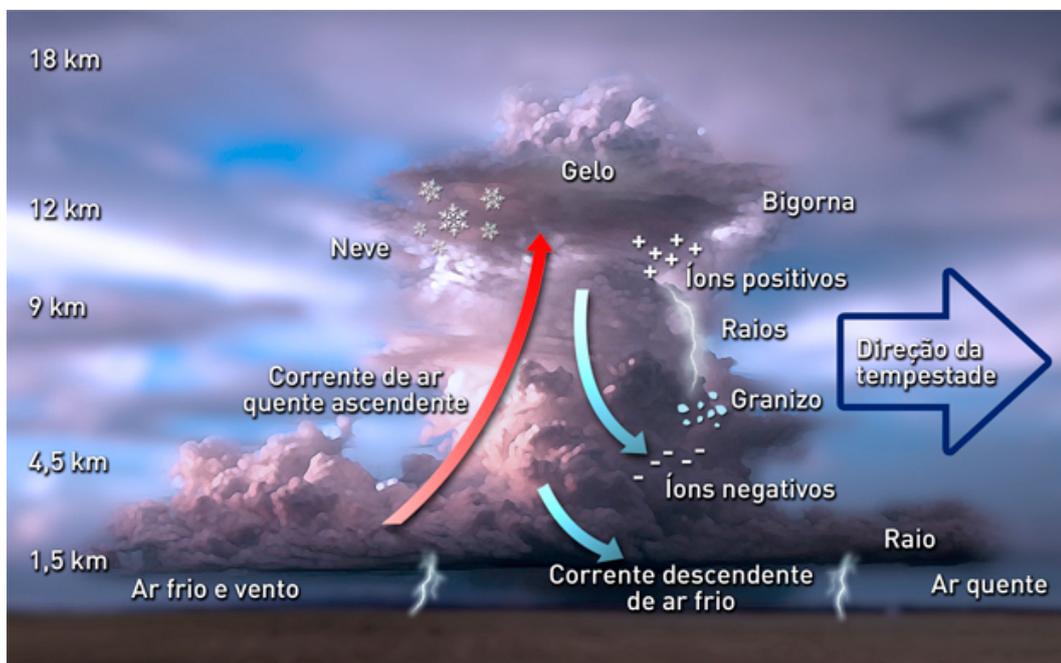
Nuvens de tempestades possuem diâmetros médios aproximados entre 10 e 20km, atingindo velocidades compreendidas entre 40 e 50 km/h com durações médias entre 30 e 90 minutos (JR; PINTO, 2000).

O processo de formação de tempestades isoladas acontece a partir da reunião de nuvens *Cumulos*. Essas, são nuvens brancas que se formam a aproximadamente 1km de altura, se estendendo verticalmente e horizontalmente por algumas centenas de metros. Estabelecidas as condições favoráveis, essas nuvens agrupam-se aumentando consideravelmente seu tamanho e a partir de então são chamadas de *Cumulus Congestus*. Nesta etapa, a nuvem pode chegar a uma altura entre 3 e 5 km do solo em relação ao topo e estende-se no horizonte a alguns quilômetros de distância. Em certas situações a nuvem pode não progredir para uma tempestade típica e encerra seu desenvolvimento neste ponto. Porém, em situações de tempestades, a nova nuvem passa por fases até a formação de temporais.

Na fase de desenvolvimento, com a contínua evolução da nuvem, o movimento ascendente do ar é capaz de superar o nível de congelamento. Correntes de ar carregam gotículas de água e gelo para o topo da nuvem e no instante em que a velocidade dessas partículas se torna maior que a velocidade do ar ascendente interno, ocorre a geração de correntes descendentes de ar. Após esse processo, a nuvem encontra-se no estágio maduro quando ocorrem a maioria das chuvas e relâmpagos devido aos movimentos ascendentes e

descendentes dos ventos e crescimento das partículas internas. Os ventos podem atingir velocidades de 100 km/h e o diâmetro da nuvem nessa fase é cerca de 10 km, podendo alcançar alturas de até 20 km(ELAT, 2016c).

Figura 2 – Formação da nuvem de tempestade.



Fonte: Extraído de ELAT (2016a).

Na terceira e última fase prevalece a diminuição das correntes de ar descendentes. Neste momento há uma diminuição de chuvas e relâmpagos, e uma minimização da altura do topo em relação ao solo. Segundo ELAT (2016c), o maior número de nuvens de tempestade com topos de 20 km parece ocorrer na Austrália, Indonésia e Nova Guiné.

2.2 Definição de Descargas Atmosféricas

Com o entendimento prévio da formação de tempestades, sob a ótica inicial do fenômeno de Descargas, tem-se a possibilidade de formular uma definição para esses fenômenos. Portanto, define-se descargas atmosféricas como um evento de natureza aleatória, cujo estabelecimento se dá por meio de fortes interações entre os centros de cargas no sistema nuvem-solo. Como produto desse contato, geram-se intensos campos elétricos associados a correntes elétricas na ordem de milhares de ampères, além de efeitos luminosos e sonoros de alta intensidade.

Segundo Visacro (2005), uma descarga atmosférica se refere a uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera. Um fenômeno complexo que decorre do fluxo de uma corrente impulsiva intensa e curta, que traça um percurso da nuvem para algum local na atmosfera e vice-versa. Por vezes, essa corrente atinge a superfície terrestre.

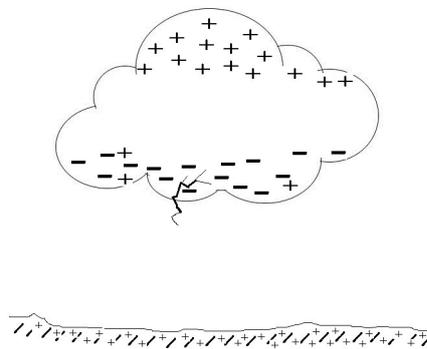
2.3 Processo de Formação de Descargas

Sabe-se que a nuvem, sendo o maior propulsor do fenômeno de Descargas Atmosféricas, é o início do mecanismo de formação desse acontecimento.

Por meio dos processos mencionados anteriormente, a nuvem de tempestade *Comulonimbos* é carregada com uma enorme densidade de cargas elétricas, sobretudo na base da nuvem. Em razão desse acúmulo, por indução, o solo sob a nuvem apresenta grandes concentrações de cargas opostas às cargas das nuvens de tempestade. Essas cargas podem ser da ordem de dezenas de Coulombs. Fisicamente, pelo poder de atração, cria-se uma diferença de potencial no sistema solo-nuvem e um campo elétrico é formado entre a parte inferior da nuvem e a superfície do solo, onde encontram-se as densidades de cargas. A quantidade de cargas envolvidas, bem como a intensidade do campo elétrico gerado poderá sofrer variações em função do tipo de solo e das condições climáticas de cada região. De forma gradativa, quando a densidade de cargas na nuvem chega a um determinado valor, gera-se um campo elétrico que é capaz de romper a rigidez dielétrica do ar (em torno de 30kV/cm). Como consequência dessa ruptura inicial, ocorre uma descarga preliminar (*Leader*) onde aparece o canal ionizado como pode ser visto na Figura 3.

O canal ionizado possui comportamento condutor. O acréscimo de cargas negativas originada das nuvens se acumula na extremidade do canal. Pelo poder das pontas, a geração de campo elétrico ocorre de maneira semelhante ao processo anterior. Descargas semelhantes às iniciais se formam e a extensão do canal aumenta de maneira sequencial, gerando-se então um longo canal ionizado rumo ao solo. Caso as condições descritas se mantenham, o canal poderá progredir em torno de 50 metros por estágio, em um intervalo de 50 μ s, apresentando ramificações em alguns casos (OLIVEIRA, 2007).

Figura 3 – Surgimento do canal precursor na base da nuvem

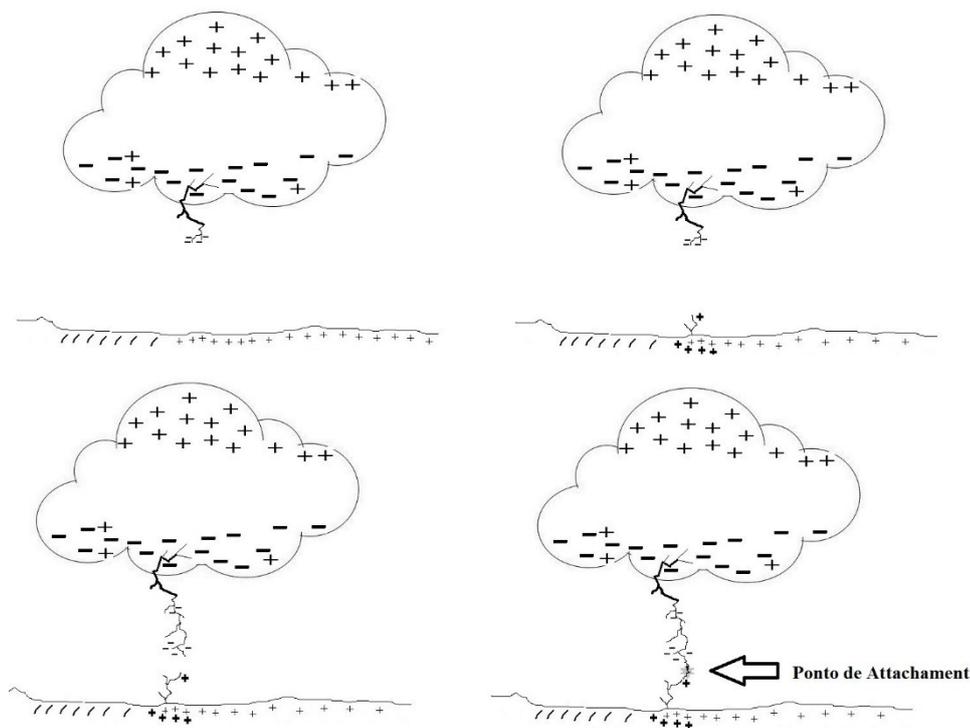


Fonte: Adaptado de Visacro (2005).

Enquanto o canal descendente avança no sentido da terra por atração, há um aumento na densidade de cargas no solo e um conseqüente aumento do campo elétrico naquela região. Pela teoria de campos elétricos sabe-se que este é inversamente proporcional à distância. Logo, quanto menor a distância entre o canal descendente e a terra, maior intensidade terá o campo elétrico induzido na região. No momento em que o canal descendente atinge certa distância em relação ao solo, ele induz na terra um campo elétrico muito forte capaz de gerar descargas iniciais ascendentes, que se reproduzirão consecutivamente de forma similar ao canal descendente.

Quando a distância entre canal descendente e ascendente chegam a um determinado valor ocorre o que é conhecido como descarga de salto, que tem por objetivo interligar os dois canais formando, assim, uma descarga nuvem-solo completa. Este ponto de conexão é chamado de ponto de *attachment* e pode ser apreciado na figura 4.

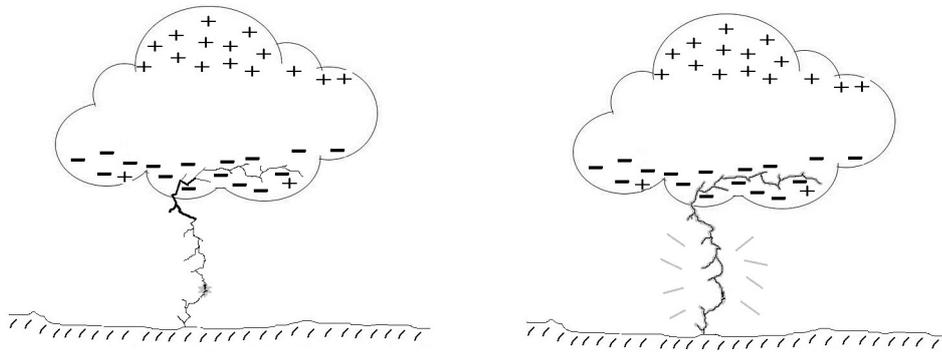
Figura 4 – Progressão e conexão dos canais ascendente e descendente



Fonte: Adaptado de Visacro (2005).

Quando há o fechamento, o canal descendente entra em contato direto com o solo. Analogamente, pode-se relacionar o ponto de *attachment* como o fechamento do circuito nuvem-solo. Como em qualquer outro circuito, percebe-se que uma corrente circulará no sentido de neutralizar todas as cargas envolvidas no canal interconectado. Na literatura define-se como corrente de retorno. Em conseqüência desse fenômeno, nota-se a presença dos efeitos luminoso e sonoro associados.

Figura 5 – Corrente de retorno e efeitos agregados ao fenômeno



Fonte: Adaptado de Visacro (2005).

A Figura 5 apresenta a fase final da formação da descarga, na qual os canais já se encontram conectados e o efeito luminoso é caracterizado pela passagem da corrente de retorno.

2.4 Classificação dos tipos de Descargas

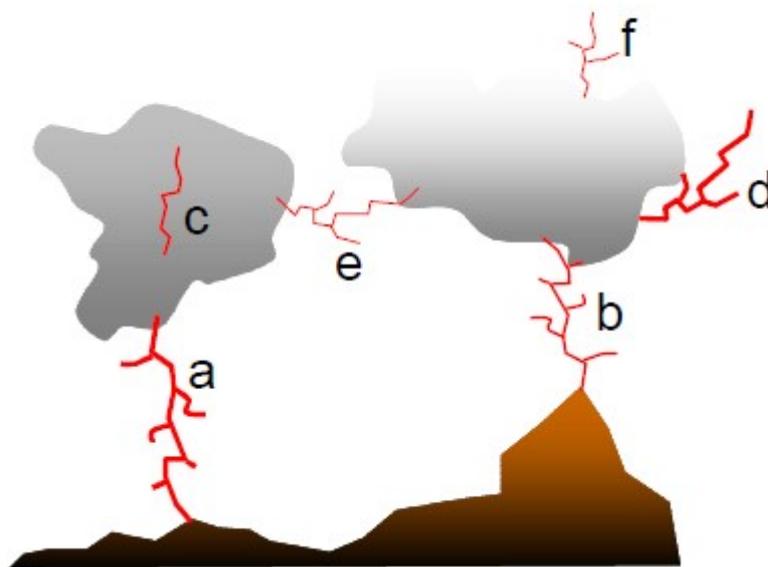
Na literatura pode-se encontrar diversos tipos de Descargas Atmosféricas. Podemos utilizar a seguinte classificação, segundo SHIGIHARA (2005):

- (a) - Descargas nuvem solo;
- (b) - Descargas solo-nuvem;
- (c) - Descargas intranuvem;
- (d) - Descargas para o ar;
- (e) - Descargas entre nuvens;
- (f) - Descargas nuvem para cima.

Apesar da raridade de ocorrências de alguns tipos de descargas é importante ter a ideia de que essencialmente o fenômeno é o mesmo, independentemente da classificação. Desta, as diferenciações podem ser analisadas por meio das observâncias de seus parâmetros.

Descargas no solo ocorrem com uma frequência muito elevada se comparadas com descargas nas nuvens. Entende-se por descargas no solo: Descargas nuvem-solo/solo-nuvem caracterizadas, principalmente, pela transferência de cargas para a terra por meio do avanço do canal ionizado.

Figura 6 – Diagrama de classificação das Descargas Atmosféricas



Fonte: Extraído de SHIGIHARA (2005).

Descargas solo-nuvem ocorrem com menor frequência, sendo observadas em regiões montanhosas e torres, onde o canal progride no sentido da nuvem (ELAT, 2016d).

Dentro do conjunto de Descargas na nuvem têm-se as descargas intranuvem, descargas para o ar, descargas entre nuvens e descargas nuvens para cima. Basicamente, a grande diferença entre estes tipos está na direção da evolução do canal ionizado. No caso das descargas intranuvem, o canal é formado na região interna da nuvem de tempestade por meio da atração das cargas presentes. Como resultante desse processo é perceptível a formação de uma região de alta luminosidade. Descargas intranuvem representam cerca de 70% do total segundo ELAT (2016e). O canal ionizado por vezes pode extrapolar o perímetro da nuvem de tempestade, podendo avançar para outra nuvem ou até mesmo para uma região aleatória na atmosfera.

Estima-se que, 90% das descargas atmosféricas, inclusive no Brasil, são classificadas como nuvem-solo, sendo os 10% restantes divididos entre as outras ocorrências. Em virtude disso, prioriza-se neste estudo as descargas do tipo nuvem-solo/solo-nuvem. (RAKOV; UMAN, 2003).

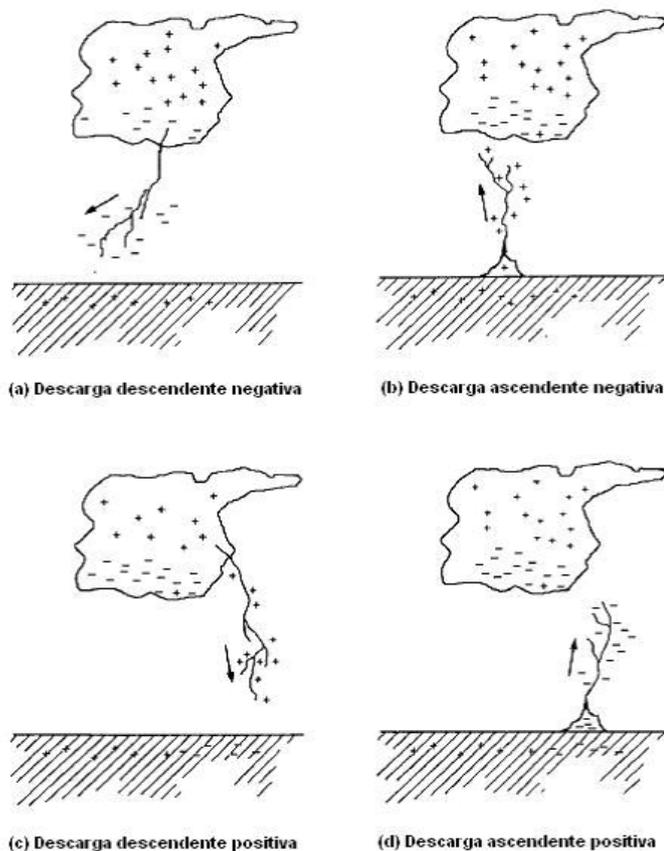
Realizando essas considerações, é possível ainda criar uma subclassificação quanto à polaridade das cargas transferidas para o solo/nuvem, e a orientação de desenvolvimento do canal ionizado (RAKOV; UMAN, 2003).

- (a) - Descarga descendente negativa;
- (b) - Descarga ascendente negativa;
- (c) - Descarga descendente positiva;

(d) - Descarga ascendente positiva.

Dentro da perspectiva de orientação do canal ionizado, é razoável classificar como ascendentes (solo-nuvem) descargas cujo o formação do canal se inicia no solo em direção a nuvem. Entretanto, canais formados no sentido contrário dão origem as Descargas descendentes (nuvem-solo). Canais podem ser formados tanto por cargas positivas quanto por cargas negativas. No caso das descargas descendentes, a classificação positiva ou negativa depende da polaridade da densidade de cargas presentes na base da nuvem. Para descargas ascendentes, essa classificação tem relação com a polaridade da densidade de cargas presentes no solo.

Figura 7 – Subclassificação das Descargas nuvem-solo



Fonte: Extraído de Rakov e Uman (2003).

3 Revisão Bibliográfica

Vários trabalhos são realizados em estações espalhadas pelo mundo e resultados importantes de medições foram obtidos ao longo dos anos de estudos. Foram realizadas análises e comparações a fim de compreender as características desses fenômenos.

3.1 Medição de descargas naturais

A técnica de medição em torres instrumentadas representa atualmente os resultados mais seguros de correntes de descargas. Geralmente, essas torres estão situadas em elevadas regiões montanhosas, o que leva a crer numa maior incidência do fenômeno. A Tabela 3 demonstra de forma condensada os estudos realizados em estruturas elevadas ao longo de décadas.

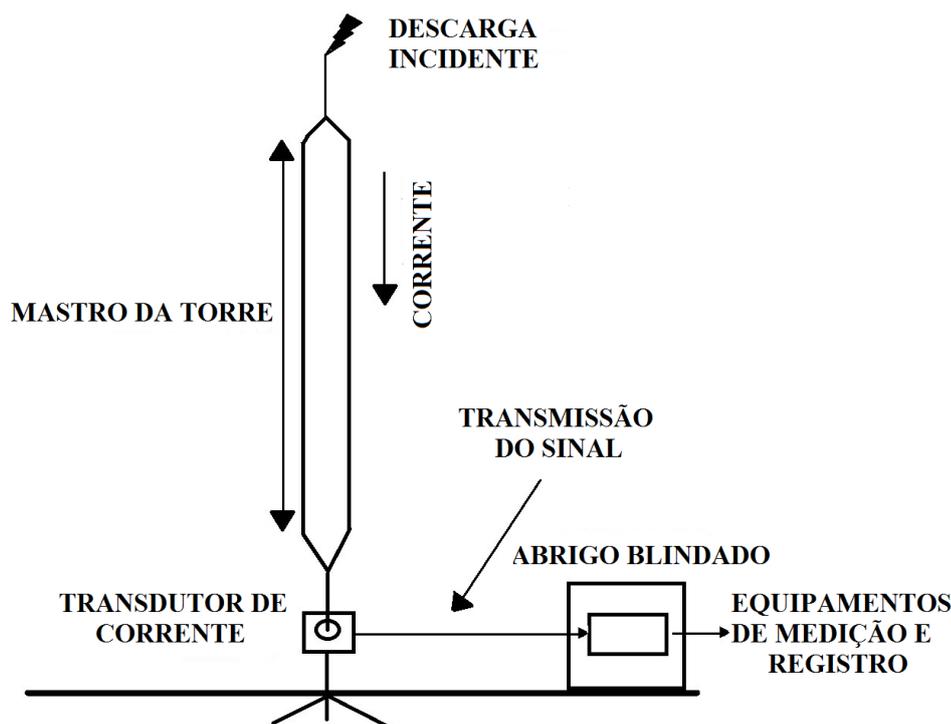
Tabela 3 – Centros de pesquisa pelo mundo

Estrutura	Localização	Solo	Altura (m)
Empire State Building	Nova Iorque, USA	Plano	410
Torres separadas de 400m	Monte San Salvatore Lugano Suíça	Montanha, 912m acima do nível do mar	70
Torre de TV de Ostankino	Moscou, Rússia	Plano	540
Duas Torres de TV	Sasso di Pale e Monte Orsa, Itália	Montanha, 993m acima do nível do mar	40
Torre de pesquisa de CSIR	Pretória, África do Sul	Colina, 1400m acima do nível do mar	60
Torre Canadian National	Toronto, Canadá	Plano	553
Torre de Peissenberg	Hoher Peissenberg, Alemanha	Montanha, 493m acima do nível do mar	160
Torre St. Chrischona	Basel, Suíça	Montanha, 493m acima do nível do mar	160
Morro do Cachimbo	Minas Gerais, Brasil	Montanha, 1453m acima do nível do mar	60
Chaminé de Fukui	Fukui, Japão	Plano	200
Torre Meteorológica	Makai, Japão	Plano	150

Fonte: Extraído de Rakov e Uman (2003).

Foram construídas várias estações de medição em diversas partes do mundo. Além de considerar questões do relevo local, as estações precisam contar com um elemento transdutor, composto de bobinas e sensores que respondem significativamente a variações das condições normais no local. São responsáveis pelo transporte de informações aos sistemas de medição que normalmente se localizam próximos às torres.

Figura 8 – Esquema de uma estação fixa de medição.



Fonte: Adaptado de Visacro (2005).

É importante ressaltar que há presença de interferências eletromagnéticas envolvidas nos circuitos de medição e isso faz com que abrigos possuam atributos construtivos quanto à sua blindagem eletromagnética e aterramento elétrico. A Figura 8 representa de forma simplificada um esboço de uma estação de medição.

Apesar da evolução no estudo de descargas atmosféricas, atualmente existem poucas estações em operação. A Tabela 4 destaca algumas estruturas em funcionamento.

No Brasil em 1985, foi instalada na região de Belo Horizonte- MG a estação Morro do Cachimbo; um projeto arrojado da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), que a partir de 1998 contou com a parceria da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais). A estação está localizada a 1453 m acima do nível do mar e conta com uma torre instrumentada de 60m onde tem-se estrutura necessária para realização das medições.

Tabela 4 – Estações em operação.

Países	Torres Instrumentadas	Comprimento
Austria	Gaisberg Tower	100 metros
Brasil	Morro do Cachimbo	60 metros
Canadá	CN Tower	533 metros
Alemanha	Peissenberg Tower	160 metros
Japão	Tokyo Sky Tree	634 metros
Suíça	Santis Tower	124 metros

Fonte: Extraído de Rakov (2014).

Os diversos trabalhos realizados desde a década de 70 se concentram nas investigações das correntes induzidas nesses fenômenos, bem como na análise de parâmetros dessas ondas.

Uma descarga negativa nuvem-solo é composta de 3 a 5 sequências (Leader/descargas de retorno) e apresentam um intervalo de ocorrência de aproximadamente 60 ms. Ocasionalmente ocorrem em um mesmo canal duas sequências com intervalos de 1ms (RAKOV, 2010). Na Tabela 5 encontra-se a frequência em % de descargas nuvem-solo do total de fenômenos registrados em algumas localidades no mundo. Segundo Rakov (2014) descargas preliminares representam 45% do total de descargas pelo mundo.

Tabela 5 – Ocorrências de Descargas nuvem-solo pelo mundo.

Localidade	Frequência em %	Referência(s)
Flórida	17	(Rakov,1994)
New-México	14	(Rakov,1994)
Sri Lank	21	(Coorey e Jayaratne,1994)
Suécia	18	(Coorey e Perez,1994)
Brasil	20	(Saba et al.,2006)
Arizona	19	(Saraiva et al.,2008)

Fonte: Extraído de Rakov (2012).

3.2 Medição de descargas artificiais

Com o advento da tecnologia, aliado à necessidade da realização de simulações, pode-se produzir descargas artificiais. As técnicas de produção artificiais dessas descargas serão abordadas mais detalhadamente nesta seção.

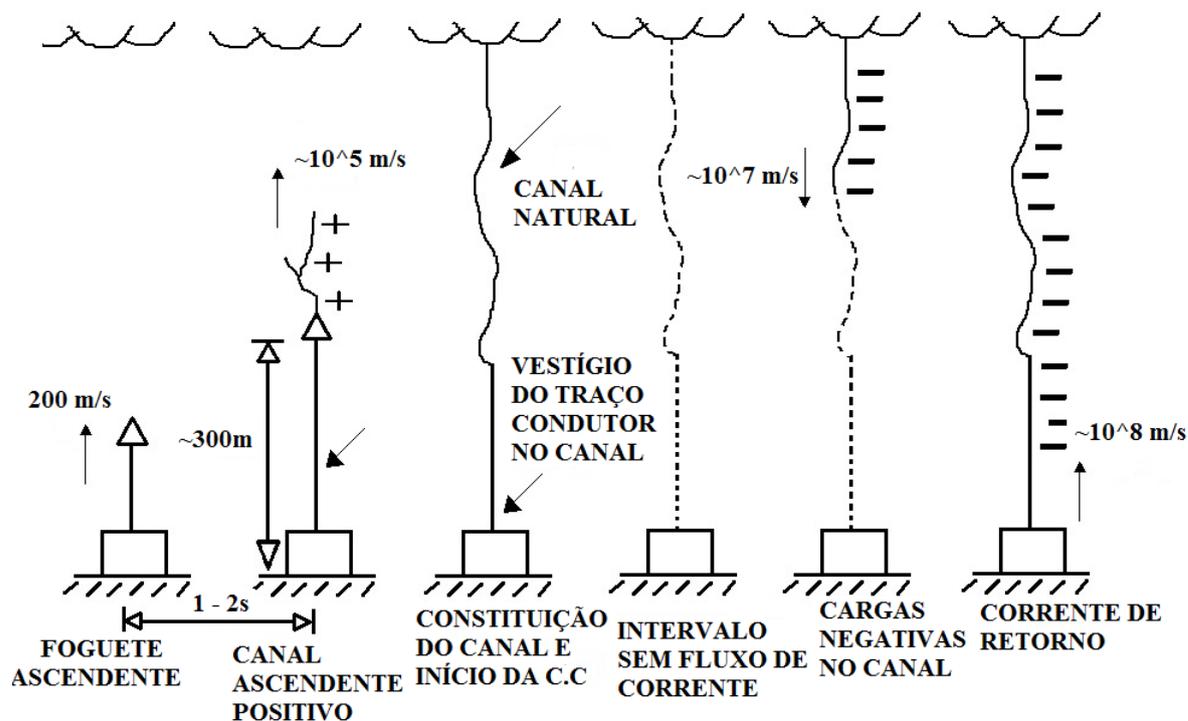
3.2.1 Técnica de indução por lançamento de foguetes

O princípio básico consiste na técnica de lançamento de foguetes que produz um percurso condutor de elevada altitude em relação a terra, capaz de desenvolver canais

disruptivos que se conectarão ao canal induzido pelo lançamento do foguete. Essa conexão ligará os canais da nuvem até a estação de lançamento, caracterizando desse modo um Descarga Atmosférica propriamente dita.

Nos momentos que antecedem ao surgimento do canal precursor de descarga, o campo na região inferior da nuvem de tempestade se torna muito intenso. Na região sob a nuvem, o campo varia entre valores de 4 a 20 KV/m, dependendo das condições de altitude, latitude e relevo. (VISACRO, 2005). O foguete é lançado em direção à nuvem de tempestade podendo alcançar até 600m de altura. Ele ficará conectado a terra por meio de um fio condutor. Se as características climáticas forem favoráveis, poderá ocorrer o surgimento de pequenas descargas elétricas neste condutor acoplado ao foguete por meio do rompimento dielétrico do ar. Essas descargas por sua vez, formarão um canal ionizado ascendente que se conectará ao canal precursor descendente, dando origem a um canal de descarga nuvem-solo. Após o fechamento entre os canais, o condutor servirá como caminho para a corrente de retorno que flui pelo canal de descarga até a base de lançamento onde estão os dispositivos transdutores para realização das medições.

Figura 9 – Sequência de eventos envolvidos na formação de primeira descarga utilizando a técnica de lançamento de foguete.

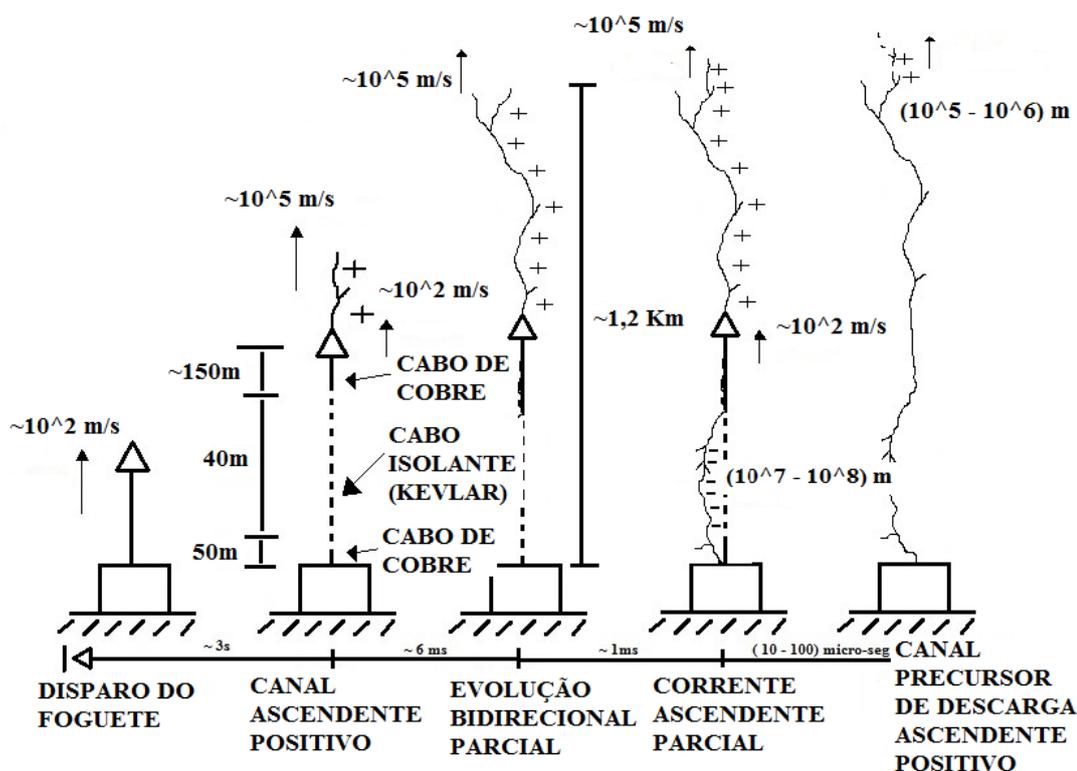


Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (2003).

Buscando o aperfeiçoamento da onda de corrente produzida por descargas induzidas, a técnica desenvolvida anteriormente foi modificada. O fio condutor que viaja acoplado ao foguete agora não se constitui totalmente de material condutor; apenas uma parcela

que está conectada diretamente ao foguete possui condutividade. A parte inferior do condutor é conectada a outro tipo de material isolante, que conseqüentemente se conecta a base de lançamento. O processo é semelhante a formação de descargas naturais, ocorre a evolução dos canais a partir do comprimento do condutor, podendo ocasionar um possível fechamento entre eles. A corrente de retorno avança pelo canal induzido neutralizando as cargas envolvidas. Esse método foi chamado de indução por altitude.

Figura 10 – Sequência de eventos envolvidos na formação de primeira descarga utilizando a técnica de indução por altitude.



Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (2003).

Devido à natureza aleatória do fenômeno, nem sempre obtém-se sucesso nestas técnicas de indução de descargas, sendo necessário vários lançamentos na produção de uma descarga artificial. Atualmente, das instituições de destaque na aplicação desta técnica, podemos evidenciar o centro de *Camping Blanding* na Flórida (EUA). Estudos dessa natureza são realizados no Brasil pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial.

Segundo Visacro (2005), a vantagem do uso da técnica de medição por meio do lançamento de foguetes está no número de descargas analisadas por ano. Nas torres de alturas médias se obtém de 5 a 12 medições de descargas naturais por ano. Por outro lado, a técnica de lançamento de foguetes possibilita a medição de 15 a 40 descargas induzidas por ano.

3.2.2 Técnica de indução por laser e jatos de água

Embora atualmente esteja restrita ao ambiente laboratorial, a técnica de geração de descargas artificiais a partir de laser é utilizada nos Estados Unidos, Canadá e Japão. Notou-se que com 40% de intensidade de campo elétrico necessário para quebra da rigidez do ar, é possível induzir descargas.

A margem de sucesso na geração de descargas por meio desta técnica é maior em 50% comparando-se aos raios induzidos por foguetes. Atualmente, ainda não foi possível gerar uma descarga na atmosfera por meio desta técnica. Estudos apontam um melhor resultado utilizando lasers de frequências entre o infravermelho e o ultravioleta. (ELAT, 2016d).

Tentativas também são realizadas no sentido de indução por meio de jatos de água, que muito embora já se tenha registros de sucesso na utilização dessa técnica em laboratório, na atmosfera não houve sucesso na reprodução dessas descargas.

Tanto técnicas que utilizam torres instrumentadas, quanto aquelas de lançamentos de foguetes são consideradas medições diretas por dizerem respeito a parâmetros intrínsecos do fenômeno. Existem ainda medições de forma indireta que analisam questões precedentes à descarga. A frequência de tempestades em um determinado local chamada de índice ceraúnico, os contadores de descargas que realizam análises do pulso eletromagnético emitido por correntes de retorno e o espectro de frequência são parâmetros utilizados na medição indireta desse fenômeno.

3.3 Parâmetros de descargas: conceitos gerais

Antes de iniciar as investigações dos parâmetros envolvidos em medições, torna-se importante compreender e ratificar os conceitos de cada medida obtida, bem como sua significância nas ondas de corrente de retorno que são de interesse nas pesquisas. Várias particularidades estão compreendidas no estudo dessas ondas. Os dados fornecidos são tratados e constituem a entrada para um sistema mais sofisticado de detecção. O exame desses parâmetros contribuem na busca de padrões e previsões de descargas nas diversas áreas de estudo. A seguir, uma breve contextualização será realizada a fim de apurar de maneira ótima o conhecimento presente em cada parâmetro de medição.

Amplitude da corrente de Descarga ou valor de pico: é o maior valor de corrente registrado. Segundo Visacro (2005), as ondas da primeira corrente de descarga negativa são constituídas por dois picos, sendo o segundo superior ao primeiro em grande parte das coletas realizadas. O conhecimento da corrente de pico é de grande relevância no estudo da engenharia de proteção contra descargas atmosféricas, haja visto, que os projetos de equipamentos de tal proteção passam pela análise desses valores.

Carga transferida por descarga: É obtida a partir da integração no tempo da corrente de descargas de retorno, levando em conta a duração da descarga. Esse dado permite estimar

a quantidade de acúmulo de carga no canal precursor de descarga que posteriormente será transferida para a terra.

Tempo de frente de onda: O tempo compreendido entre o início da onda de corrente até o seu primeiro pico. A obtenção desse parâmetro é pertinente pela influência exercida sobre os valores de tensão induzida por descargas. Porém, obter o tempo de frente desta onda não é tarefa fácil, visto que a captura do instante inicial é de grande dificuldade.

Tempo de meia onda: Se caracteriza pelo tempo em que a corrente tem sua intensidade reduzida a 50% após o maior pico registrado. Segundo Visacro (2005), o tempo de meia onda é bem superior ao tempo de frente, e não há grandes dificuldades em obter tal parâmetro pois este independe do instante inicial.

Tempo de duração de descarga: É o tempo compreendido entre o início da onda de corrente até sua neutralização completa, dando fim a uma descarga atmosférica plena. De acordo com as medições de *Berger (1975)*, um conjunto de descargas subsequentes tem em média 180ms de duração. No caso de *flashes* positivos, o valor médio é de 85ms e para primeira descarga negativa, o tempo médio é de 13ms.

Derivada máxima: É identificada onde a derivada da onda de corrente tem o maior valor, ocorrendo próximo ao primeiro pico.

Energia de descarga: É encontrada integrando-se o quadrado da corrente no tempo de duração da descarga.

$$W = \int_0^t [i(t)]^2 dt \quad (3.1)$$

onde: W é a energia dada em $A^2 \times s$

i é a corrente elétrica em A

3.4 Parâmetros de descargas obtidos em medições

O estudo dos parâmetros contribuíram para o processo de previsão, identificação e detecção de características das correntes constituintes no fenômeno de descargas atmosféricas. Chegou-se a resultados de grande importância, com conclusões que levarão ao maior entendimento desses eventos.

O trabalho de *Berger (1975)*, no Monte San Salvatore, mostrou-se relevante, por constituir uma das principais bases de dados. Extraíu-se parâmetros tanto de descargas preliminares como de descargas de retorno e análises foram efetivadas de acordo com as condições vigentes. Visacro et al. (2004) apresentou resultados significativos nas medições na estação do Morro do Cachimbo.

Abaixo as Tabelas 6, 7 e 8 apresentam dados comparativos das medições no Morro do Cachimbo e no Monte San Salvatore.

Tabela 6 – Parâmetros de descargas positivas ocorridas no Monte San Salvatore.

Parâmetros	Estação de San Salvatore
	Mediana (50%)
Valor de pico (kA)	35
Carga total (C)	80
Tempo de frente (μs)	22
Tempo de meia onda (μs)	230
Duração total (ms)	180
Derivada máxima (kA/ μs)	2,4
Energia armazenada por unidade de resistência	6

Fonte: Adaptado de Berger (1975).

Tabela 7 – Quadro comparativo dos parâmetros de descargas negativas *Leaders*.

Parâmetros	Estação de San Salvatore	Morro do cachimbo
	Mediana(50%)	Mediana (50%)
Valor de pico (kA)	30	45
Carga total (C)	4,5	5,2
Tempo de frente (μs) (10%-30%)	5,6/3,8	7/4,8
Tempo de meia onda (μs)	75	53,5
Duração total (ms)	85	-
Derivada máxima (kA/ μs)	12	19,4
Energia armazenada	5,5	10,7

Fonte: Extraído de (VISACRO, 2005).

Tabela 8 – Quadro comparativo dos parâmetros de descargas positivas *Leaders*.

Parâmetros	Estação de San Salvatore	Morro do cachimbo
	Mediana(50%)	Mediana (50%)
Valor de pico (kA)	12	16
Carga total (C)	0,95	0,99
Tempo de frente (μs)(10%-30%)	0,75/0,67	0,88/0,67
Tempo de meia onda (μs)	32	16,4
Duração total (ms)	13	-
Derivada máxima (kA/ μs)	40	30
Energia armazenada	0,6	0,63

Fonte: Extraído de (VISACRO, 2005).

As Tabelas 9 e 10 exibem a base de dados utilizada nas medições realizadas nas estações de medições supracitadas.

Por meio da análise das Tabelas acima, percebe-se uma discrepância entre os parâmetros observados. Possíveis causas para diferença nos valores observados incluem:

Tabela 9 – Base de dados para descargas preliminares.

Local	Número de registros
Estação Morro do Cachimbo	31
Estação de San Salvatore	101

Fonte: Extraído de (RAKOV; UMAN, 2003).

Tabela 10 – Base de dados para descargas subsequentes.

Local	Número de registros
Estação Morro do cachimbo	59
Estação de San Salvatore	135

Fonte: Extraído de (RAKOV; UMAN, 2003).

- O número de amostras relativamente pequeno no Brasil;
- Influência geográfica sobre os parâmetros apresentados;
- Posicionamento distinto entre os sensores de corrente instalados nas torres em virtude de suas alturas (60 m - Brasil / 70 m - Suíça).

A posição dos sensores não deveria exercer influência nas medições. Porém, na investigação dos parâmetros de descargas subsequentes que naturalmente apresentam tempos de subida mais curtos, pode haver registros de distúrbios. Segundo *Rakov (2010)*, a parte inferior da torre instrumentada sofre mais com o processo transiente se comparado com a parte superior.

Takami e Okabe (2007) apresentam medições de correntes de descargas de retorno em linhas de transmissão onde as alturas variam de 40 a 140 metros. Realizou-se o estudo com base nas 120 formas de onda coletadas entre os anos de 1994 a 2004. A corrente média de pico registrada foi de 29 kA, valor próximo dos resultados medidos por *Berger et al.*

Diendorfer, Pichler e Mair (2009), realizaram medições de flashes negativos na torre *Gaisberg* (100 metros) no período de 2000 a 2007. A corrente de pico observada foi de 9,2 kA. O trabalho de *Diendorfer, Pichler e Mair (2009)* até o ano de 2010 havia registrado um total de 615 *flashes*, o que seria o maior banco de dados registrado até aquele ano.

Resultados mais recentes foram encontrados na estação Morro do Cachimbo. A partir de 2010, a estação teve sua estrutura ampliada o que possibilitou novas medições.

Visacro e Guimarães (2014) realizaram comparações entre os parâmetros de correntes de primeira descarga medidos na estação do Morro do Cachimbo, com os dados citados no trabalho de investigação de correntes produzidas por descargas induzidas por foguetes de *Thottappillil et al. (1995)*.

Tabela 11 – Comparação entre os parâmetros de descargas naturais e descargas artificiais.

Parâmetros	Primeiras descargas plenas – Média geométrica (mín.-máx.)	Descargas induzidas por foguetes – Média geométrica (mín. - máx.)
Valor de pico(KA)	1,65(0,19-4,54)	0,12(0,02-0,76)
Tempo de subida(ms)	0,06(0,019-0,22)	0,42(0,1-1,8)
Duração de descarga(ms)	0,41(0,12-1,11)	2(0,6-7,6)
Tempo de meia onda(ms)	0,16(0,049-0,38)	0,8(0,19-3,6)
Carga envolvida(C)	0,32(0,09-0,79)	0,13(0,03-0,38)
Intervalo entre descargas(ms)	0,33(0,09-2,00)	7,7(0,7-156)

Fonte: Extraído de Visacro e Guimarães (2014).

A Tabela 11 mostra um quadro comparativo entre as duas medições. Pode-se observar que o valor de pico de corrente nas medições de primeira descarga no Morro do Cachimbo é mais intensa. O tempo de subida das ondas de correntes coletadas na estação Morro do Cachimbo é cerca de 7 vezes menor, ou seja, as descargas ocorrem mais rapidamente. A transferência de carga envolvida nas medições do Morro do Cachimbo é cerca de 3 vezes maior quando comparada as medições de *Thottappillil et al. (1995)*. Essa diferença entre as cargas envolvidas pode ser explicada levando em consideração que as descargas induzidas são limitadas aos equipamentos necessários para a indução.

Figura 11 – Primeiro raio induzido no Brasil.



Fonte: Extraído de UOL (2004)

4 Modelagem de Descargas Atmosféricas

Na busca de verificar e quantificar os efeitos desse fenômeno, faz-se necessário a criação de um modelo matemático válido para Descargas Atmosféricas. Para que esta representação seja válida, é indispensável um conhecimento do fenômeno antes mesmo da sua formação. Neste capítulo, serão abordadas etapas anteriores aos eventos, como o processo de eletrificação e densidade de cargas elétricas que se organizam dentro da nuvem. Por fim, de posse dessa informação e baseado na física do processo, é apresentado um modelo aproximado do fenômeno de descargas atmosféricas.

4.1 Estrutura elétrica das nuvens de raios

Entender o processo de eletrificação das nuvens, por vezes, se torna uma tarefa difícil. Esse obstáculo está condicionado ao fato de que as nuvens são estruturas muito grandes, volumosas e complexas. Por essa razão, uma análise detalhada se torna mais custosa.

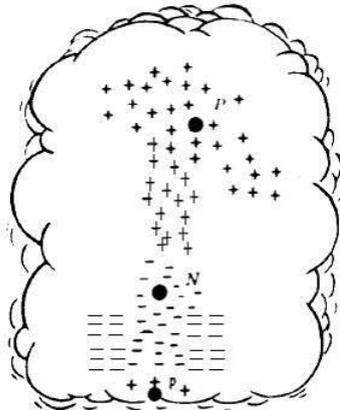
Os processos de eletrificação das nuvens de tempestade estão relacionados com a dinâmica dos ventos e sua estrutura física (gotículas de nuvem, cristais de gelo, dentre outras partículas) (*RAKOV; UMAN, 2003*).

A nuvem de trovão se desenvolve a partir de uma pequena nuvem de tempo firme, por meio do movimento de parcelas de ar que ocorrem internamente. Pelo processo adiabático (sem transferência de calor), o ar é condensado em pequenas partículas contendo água e essas partículas passam por uma mudança de estado físico, à medida que a temperatura vai diminuindo de acordo com a altura da nuvem em relação ao solo. A saturação das partículas de água começa em 0°C onde inicializa o processo de formação de cristais de gelo. Segundo *Rakov e Uman (2003)*, acredita-se que a maior parte da eletrificação está entre 0°C e -40°C , onde coexistem gotículas de água e cristais de gelo, formando assim uma região mista.

4.2 Distribuição de cargas elétricas nas nuvens de raios

O processo descrito na seção 4.1 resulta em íons livres que se concentram em diferentes regiões das nuvem. Esses íons, também chamados de hidrometeoros, formam a estrutura elétrica básica da nuvem de tempestade. Tal estrutura, propõe uma densidade de cargas positivas localizadas no topo da nuvem, uma densidade de cargas negativas posicionadas no centro da nuvem e uma porção de cargas de menor densidade, dispostas na base da nuvem.

Figura 12 – Estrutura elétrica da nuvem de tempestade.



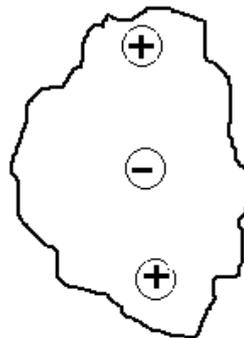
Fonte: Extraído de Rakov e Uman (2003).

É importante ressaltar que cargas de sinais opostos irão coexistir no solo, independentemente da polaridade de carga líquida na nuvem que é mostrada na Figura 12.

4.3 O modelo idealizado por RAKOV

Partindo da referência de distribuição de cargas elétricas explanada na seção 4.2, um modelo proposto por *Rakov e Uman (2003)* é apresentado para modelar descargas atmosféricas. A densidade de cargas elétricas vista anteriormente é aproximada por 3 pontos na nuvem, formando um tripolo vertical em que cada ponto representa o volume de cargas elétricas simétricas entre si. Em concordância com a Lei de Gauss, esse volume pode uniformizar-se em uma superfície esférica, sendo possível pensar sob a ótica de cargas pontuais.

Figura 13 – Modelo baseado em cargas pontuais

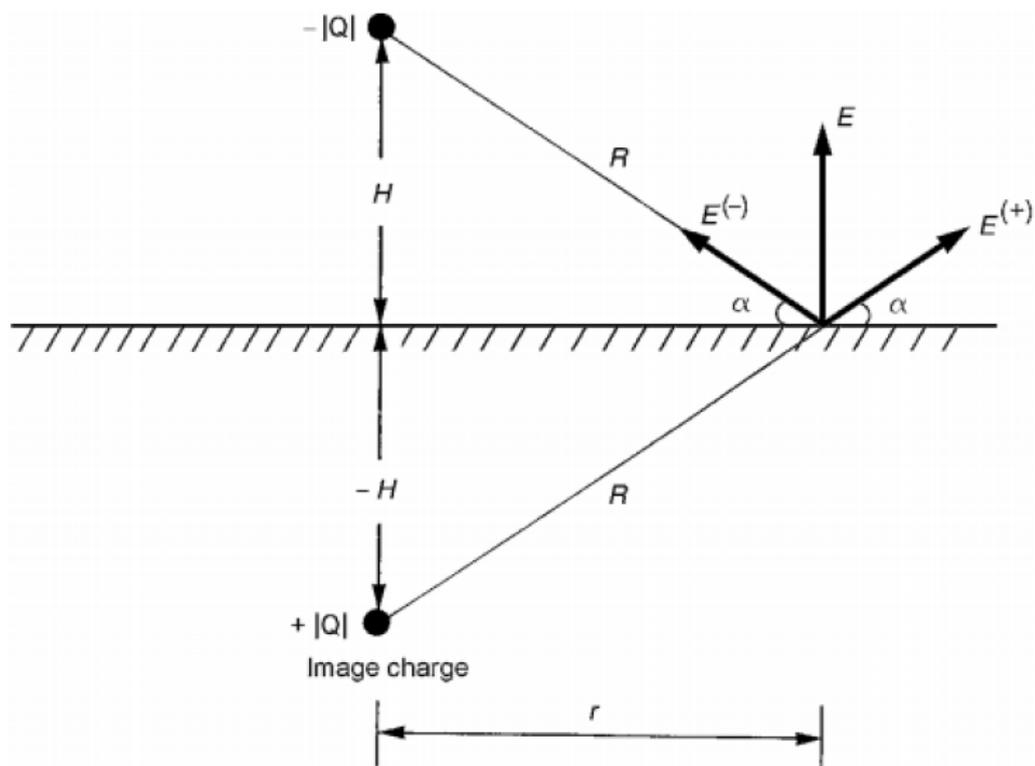


Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (2003).

Essas aproximações tornam-se necessárias pois dão suporte ao embasamento matemático utilizado no modelo proposto. Como já dito anteriormente, o fenômeno de descargas atmosféricas implica na formação de um canal carregado que se estende entre a nuvem e solo para um caso de descargas nuvem-solo. Por esse canal, viajam cargas elétricas em altas velocidades. O modelo propõe que a densidade de cargas, agora aproximada por uma carga pontual, desça em direção ao solo em uma taxa de $50\text{m}/50\mu\text{s}$ até que ocorra a formação da descarga por completo.

Em razão da simetria do problema e considerando o solo uma superfície perfeitamente condutora, é admissível que cada carga pontual terá uma imagem associada de igual magnitude e sinal contrário, equidistantes ao plano do solo como é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Aplicação do método das imagens



Fonte: Extraído de Rakov e Uman (2003).

Na Figura 14, temos os seguintes símbolos

H é a distância da carga em relação ao solo.

R é a distância entre a carga e o ponto de cálculo de \mathbf{E} .

r é a distância no solo entre o ponto de incidência e o ponto de cálculo de \mathbf{E} .

$E(-)$ é a componente tangencial do vetor campo elétrico da carga real.

$E(+)$ é a componente tangencial do vetor campo elétrico da imagem da carga.

α é o ângulo entre o plano do solo e a componente do campo elétrico normal.

Por meio dessas premissas, é possível calcular o campo elétrico \mathbf{E} a nível do solo. Segundo *Jr e Buck (2013)* o campo elétrico de uma carga pontual baseado na Figura 14, é dado por:

$$|\mathbf{E}| = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(H^2 + r^2)} \quad (4.1)$$

Na figura 14 é notável que as componentes do campo elétrico tangencial se cancelam devido a sua carga e imagem, como é previsto da condição de fronteira. Logo, as componentes normais dos campos elétricos (carga + imagem) se somam. Dessa forma, é possível calcular o campo elétrico pela contribuição das componentes normais ao plano do solo.

$$|\mathbf{E}| = |\mathbf{E}(+)|\cos(90^\circ - \alpha) + |\mathbf{E}(-)|\cos(90^\circ - \alpha)$$

$$|\mathbf{E}| = 2 * |\mathbf{E}(+)|\cos(90^\circ - \alpha)$$

$$|\mathbf{E}| = 2 * |\mathbf{E}(+)|\sen(\alpha) \quad (4.2)$$

Pelas relações trigonométricas no triângulo da figura 14 e realizando a substituição da equação 4.1 na equação 4.2 têm-se:

$$\sen(\alpha) = \frac{H}{R}$$

$$|\mathbf{E}| = \frac{2|Q| * H}{4\pi\epsilon_0 R^2 * R}$$

$$|\mathbf{E}| = \frac{2|Q|H}{4\pi\epsilon_0 R^3}$$

$$|\mathbf{E}| = \frac{|Q|H}{2\pi\epsilon_0 R^3}$$

Pelo Teorema de Pitágoras substituído no passo anterior têm-se:

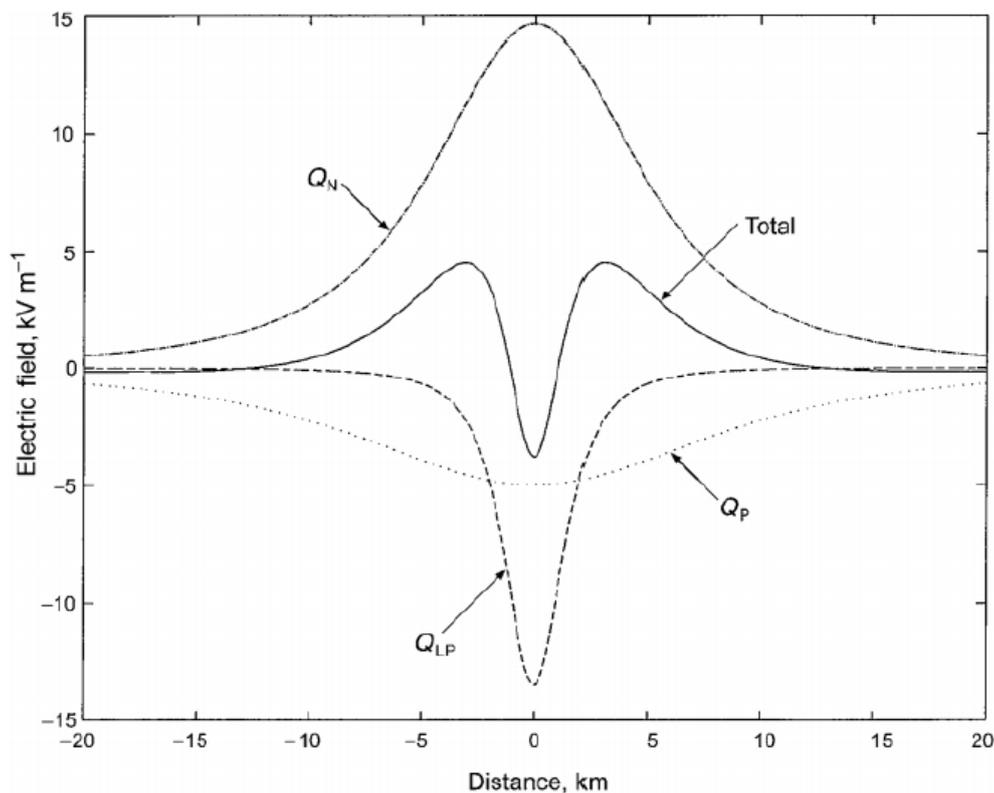
$$|\mathbf{E}| = \frac{|Q|H}{2\pi\epsilon_0[\sqrt{(H^2 + r^2)}]^3}$$

$$|\mathbf{E}| = \frac{|Q|H}{2\pi\epsilon_0(H^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.3)$$

A equação 4.3 representa o cálculo do campo elétrico a nível do solo. Para o cálculo do campo elétrico total resultante das contribuições de todas as cargas presentes no modelo, deve-se utilizar o princípio da superposição.

A figura 15 apresenta os resultados obtidos a partir do modelo proposto por *Rakov e Uman (2003)*. No gráfico consta as contribuições de campo elétrico gerado por cada carga, bem como o campo elétrico total após a aplicação da superposição.

Figura 15 – Resultados obtidos por RAKOV



Fonte: Extraído de Rakov e Uman (2003).

onde:

Q_N é a curva de campo elétrico a nível do solo em razão das cargas negativas.

Q_P é a curva de campo elétrico a nível do solo em razão das cargas positivas.

Q_{LP} é a curva de campo elétrico a nível do solo em razão da porção menor de cargas positivas na base da nuvem.

Total é a curva de campo elétrico a nível do solo em razão da contribuição das 3 porções de cargas.

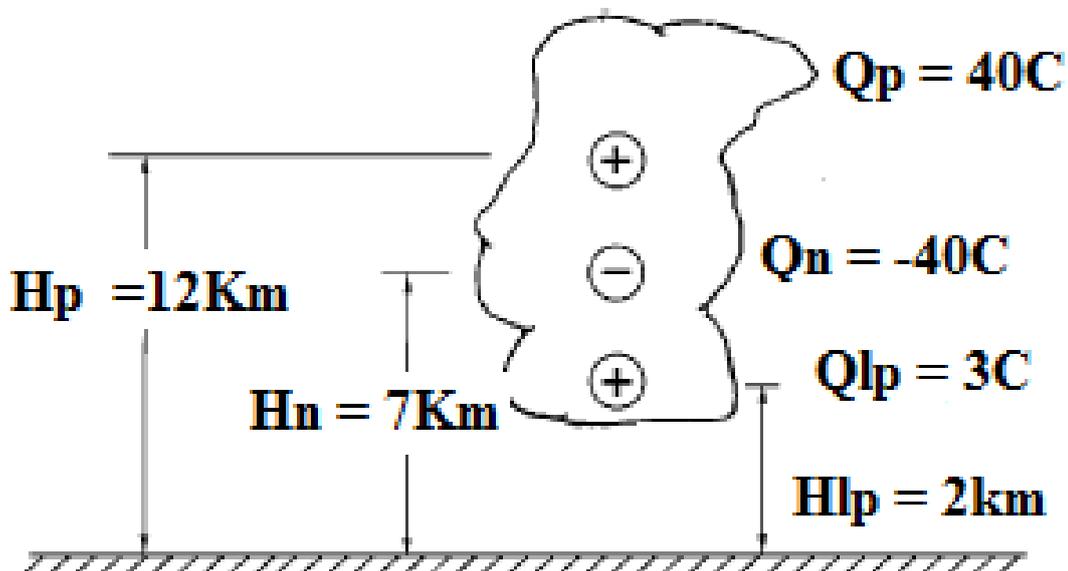
5 Implementação do modelo proposto

A fim de reforçar os conceitos teóricos apresentados faz-se necessária a realização de uma simulação, objetivando não só ratificar os resultados encontrados no modelo proposto, como também expor particularidades existentes na busca de um entendimento mais amplo e especificado. O campo elétrico calculado a nível do solo é observado sob duas visões, sendo a primeira levando em consideração que cargas se encontram estáticas na nuvem, e a segunda analisando a partir do deslocamento de cargas da nuvem para o solo.

5.1 Perfil do Campo Elétrico a Nível do Solo: Cargas estáticas

A idealização do modelo proposto por *Rakov e Uman (2003)* é mostrada na Figura 16 numa representação quantitativa. As duas cargas principais de 40C e -40C tem alturas de 12.000 metros e 7.000 metros do solo respectivamente. Na base da nuvem encontra-se a carga de 3C à 2.000 metros do solo.

Figura 16 – Modelo quantificado



Fonte: Extraído de Rakov e Uman (2003).

onde:

Q_N é intensidade de cargas negativas.

Q_P é intensidade de cargas positivas.

Q_{LP} é intensidade da carga menor positiva.

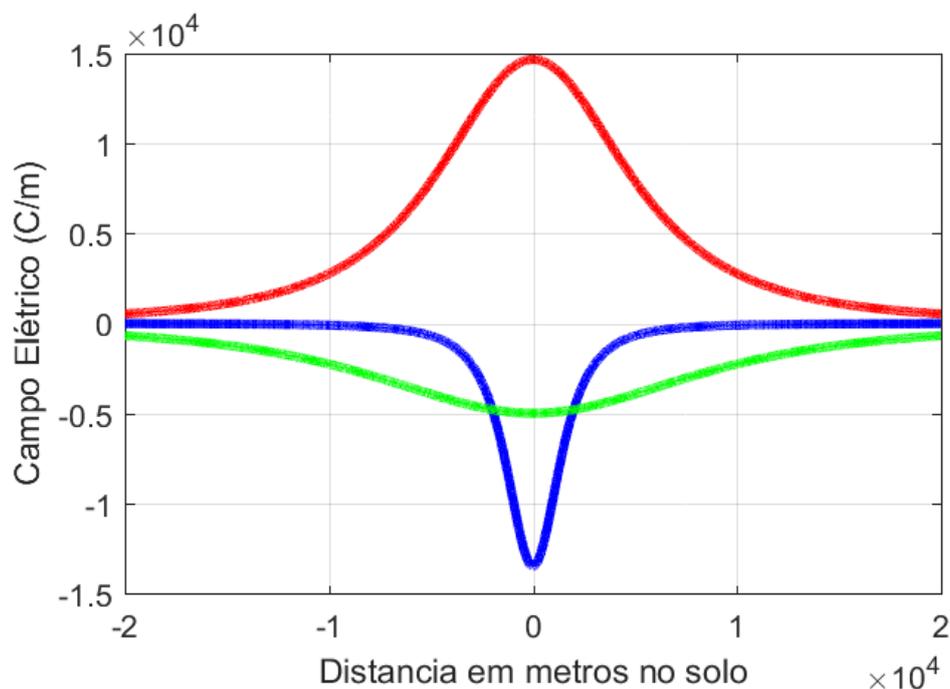
H_P é a altura da carga positiva em relação ao solo.

H_N é a altura da carga negativa em relação ao solo.

H_{LP} é a altura da carga positiva na base da nuvem em relação ao solo.

O cálculo do campo elétrico observado, deve-se inicialmente a contribuição das cargas presentes de maneira isolada, mantendo as cargas estáticas em relação ao solo, ou seja, quando não há variação na altura das cargas. A Figura 17 mostra o campo elétrico a nível do solo, proveniente das contribuições das cargas estáticas na nuvem.

Figura 17 – Contribuições de campo elétrico a nível do solo (cargas estáticas).



Fonte: Do autor.

Pode-se observar a ocorrência de mudanças na intensidade do campo elétrico a nível do solo. Nota-se na Figura 17, que à medida que a distância observada a nível do solo aumenta, o campo elétrico diminui em módulo e a taxa de atenuação depende da altura da carga em relação ao solo. O campo elétrico diminuirá mais lentamente quanto mais distante estiver a carga do solo.

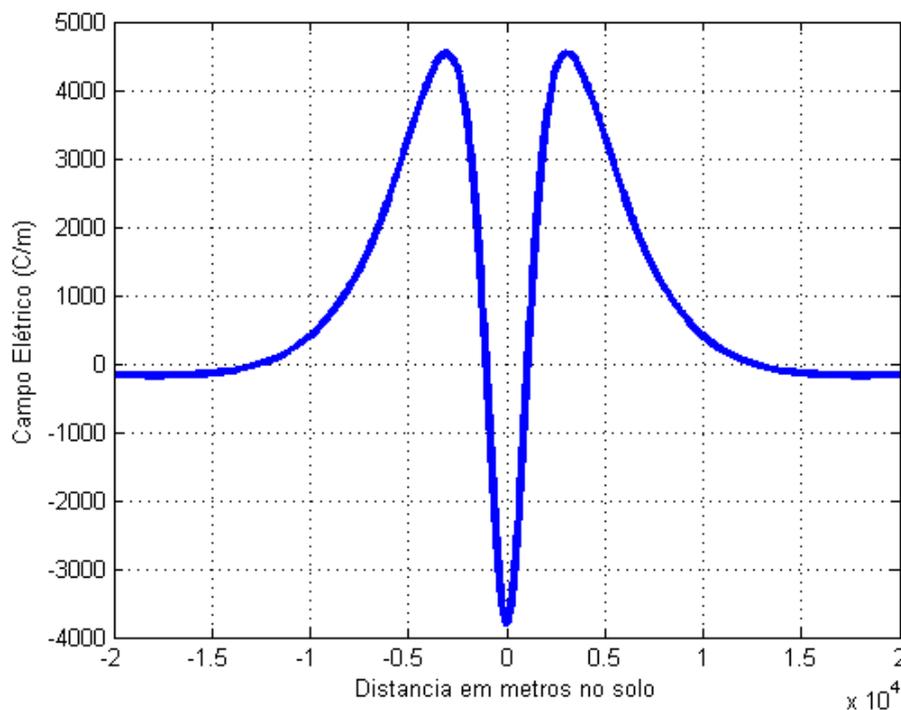
A curva em verde expressa o campo elétrico a nível do solo, proveniente de 40C do centro da nuvem. Neste caso, ocorre variação do $|E|$ a medida em que o ponto de observação a nível do solo é alterado, e nota-se que o valor do campo elétrico diminui. Como a carga de 40C está a uma distância maior do solo em relação a carga negativa principal, essa diminuição acontece de maneira mais lenta. Isso pode ser notado pela menor inclinação da curva verde em relação a curva vermelha que representa o campo elétrico a nível do solo gerado por -40C de carga no centro da nuvem.

Analisando a curva em azul, torna-se evidente que a variação de campo elétrico está diretamente ligada a altura da carga em relação ao solo. Pode-se observar que a inclinação da curva em azul é ainda maior em relação as outras duas curvas, ou seja, a redução da intensidade de campo elétrico é mais acentuada.

Uma análise da variação de campo elétrico pode ser feita para os casos de observação eletrostática. Nas cargas positivas, o campo elétrico apresenta variações negativas e para as cargas negativas, o campo elétrico apresenta variações positivas. Esse fato pode ser explicado meramente pela convenção da física. O campo elétrico, por se tratar de uma grandeza vetorial, possui módulo, direção e sentido. As linhas de campo elétrico criadas por cargas positivas tem um sentido de afastamento; as linhas de campo elétrico criadas por cargas negativas, tem um sentido de aproximação.

A Figura 18 representa o perfil de campo elétrico a nível do solo proveniente da contribuição das 3 densidades de cargas localizadas na nuvem. Assim, levando em consideração a simetria do problema, o princípio da superposição é aplicável e as parcelas de campo elétrico das respectivas cargas são somadas.

Figura 18 – Superposição dos campos elétricos a nível do solo



Fonte: Do autor.

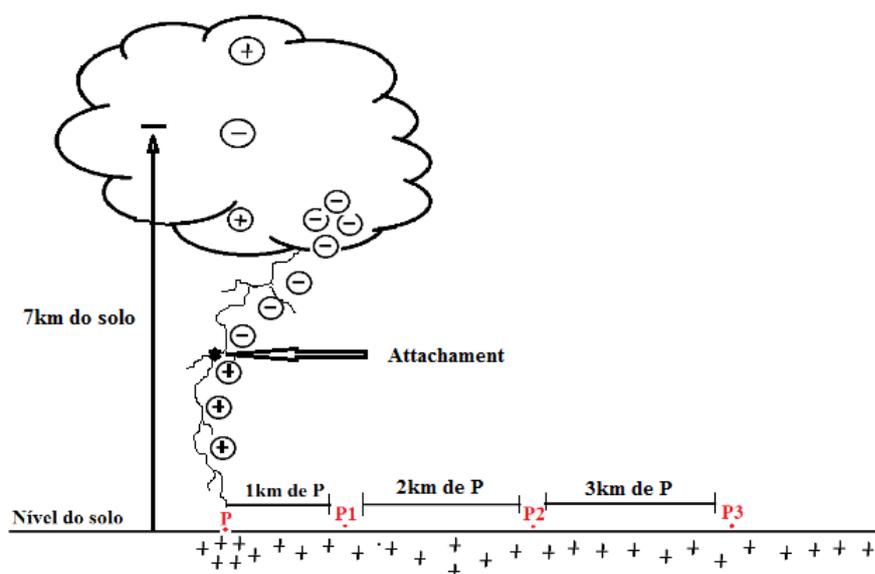
Deve-se observar que no caso da superposição, há uma mudança de polaridade do campo elétrico. Se fixarmos um ponto inicial a nível do solo, a intensidade de campo elétrico será priorizada pela carga mais baixa, localizada na base da nuvem. À medida que o ponto de observação se desloca a nível do solo, a contribuição de campo elétrico

gerada pela carga negativa central cresce, tornando-se a maior parte do campo elétrico total. Com um avanço ainda maior do ponto de observação, a parcela de campo elétrico gerada pela carga positiva se intensifica, fazendo com que a mesma se torne principal no campo elétrico total. A distância em que o campo inverte a sua polaridade é chamada de distância reversa.

5.2 Perfil do Campo Elétrico a Nível do Solo: Cargas dinâmicas

É comum em uma descarga atmosférica nuvem-solo que a formação do canal ionizado não contemple todas as cargas do sistema. Sendo assim, o canal é carregado por uma parcela de cargas existentes. A Figura 19 mostra o processo de formação de uma descarga negativa nuvem-solo aplicada ao modelo difundido por *Rakov e Uman (2003)*, sob a perspectiva da distância entre a descarga e o observador representado pelos pontos P1, P2 e P3.

Figura 19 – Pontos de observação a nível do solo



Fonte: Do autor.

Neste trabalho, o objetivo é trabalhar com a movimentação de 4 densidades de cargas em direção ao solo, distribuídas linearmente sobre o canal ionizado. A primeira movimentação se refere ao deslocamento de (-15C) e representa o modelo teórico proposto por *Rakov e Uman (2003)*; já a segunda movimentação (-4.5C) representa as medições feitas no Monte San Salvatore na Suíça; a terceira movimentação (-5.2C) diz respeito as medições na estação Morro do Cachimbo no Brasil, e a quarta movimentação (80C) representa uma descarga positiva nuvem-solo. O modelo teórico da distribuição de cargas na nuvem já apresentado é adaptado visando uma melhor representação para o caso de

descargas positivas. No topo da nuvem está localizada uma densidade de cargas de 90C, ao centro uma densidade de -90C e na base uma densidade de 3C.

O canal de descarga é formado a partir de 80C, distribuídos uniformemente pelo canal e seguindo em direção ao solo. O cálculo do perfil de campo elétrico leva em consideração o princípio da superposição e as outras cargas presentes no modelo são incorporadas. É importante ressaltar que o conjunto de gráficos gerados a partir de agora leva em consideração o solo como referência de posição zero.

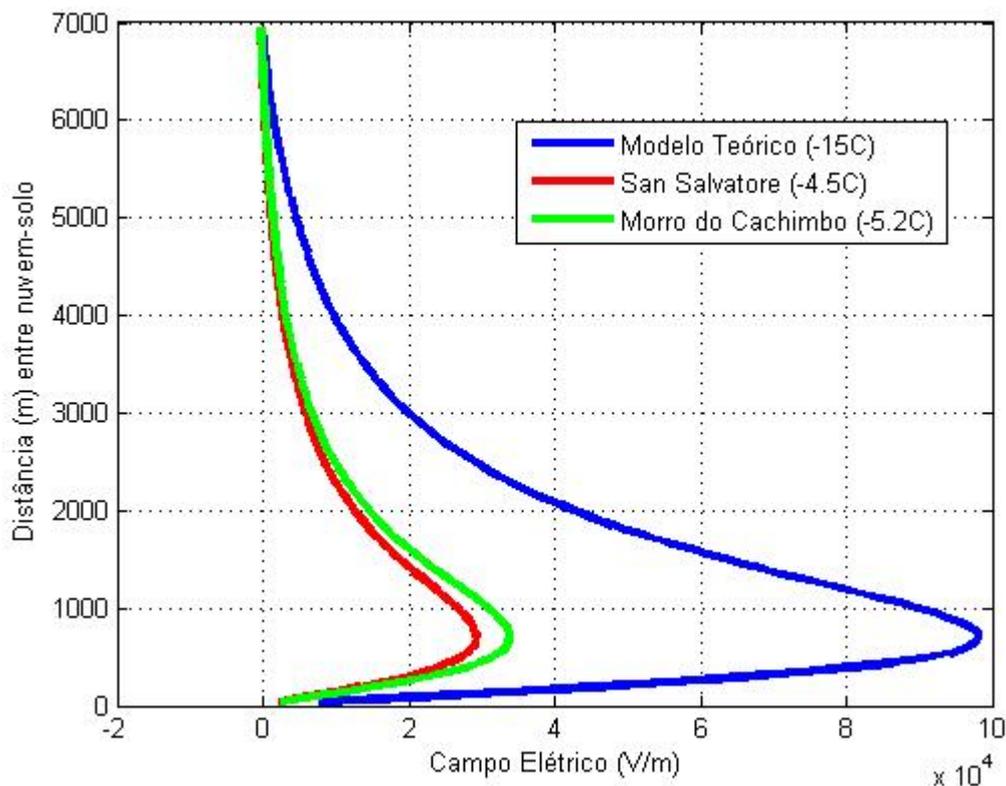
É razoável que todas as medições sejam realizadas a nível do solo e não exatamente na superfície, pois o solo representa um plano neutro e portanto tem potencial zero.

5.2.1 Perfil do Campo Elétrico de cargas dinâmicas considerando um observador estático

Todos os gráficos traçados abaixo dizem respeito ao perfil de potencial a nível do solo, quando o observador se encontra estático a 1km do ponto de incidência.

A Figura 20 traça uma comparação do perfil de campo elétrico entre o modelo teórico e as medições realizadas nas estações do Morro do Cachimbo e San Salvatore.

Figura 20 – Comparação do Perfil de Campo Elétrico em P1



Fonte: Do autor.

Pode-se observar pelas curvas, que a intensidade de campo elétrico está diretamente relacionada à quantidade de carga induzida no canal ionizado e às distâncias tanto da carga até o solo quanto do ponto de observação em relação ao ponto de incidência. Essa intensidade aumenta à medida que a carga se aproxima do solo para os 3 casos e isso pode ser explicado tanto pela lei de Coulomb, como também pela indução de cargas que ocorre simultaneamente no solo contribuindo para a formação de um campo elétrico resultante mais forte.

Analisando o mesmo ponto a nível do solo para os 3 casos, o valor de pico é atingido quando as densidades de cargas encontram-se a pouco menos de 1000 metros do solo, no qual ocorre a conexão dos canais ascendentes e descendentes (ponto de *attachement*). Em virtude de uma maior força elétrica entre as cargas do sistema, o pico da curva representa o momento de fechamento dos canais, onde está concentrada a maior energia na formação da descarga. Após atingir o pico, o campo elétrico cai drasticamente até próximo de zero. Essa queda traduz a etapa de neutralização das contribuições de cargas apresentadas no modelo, sendo esta a última fase do fenômeno.

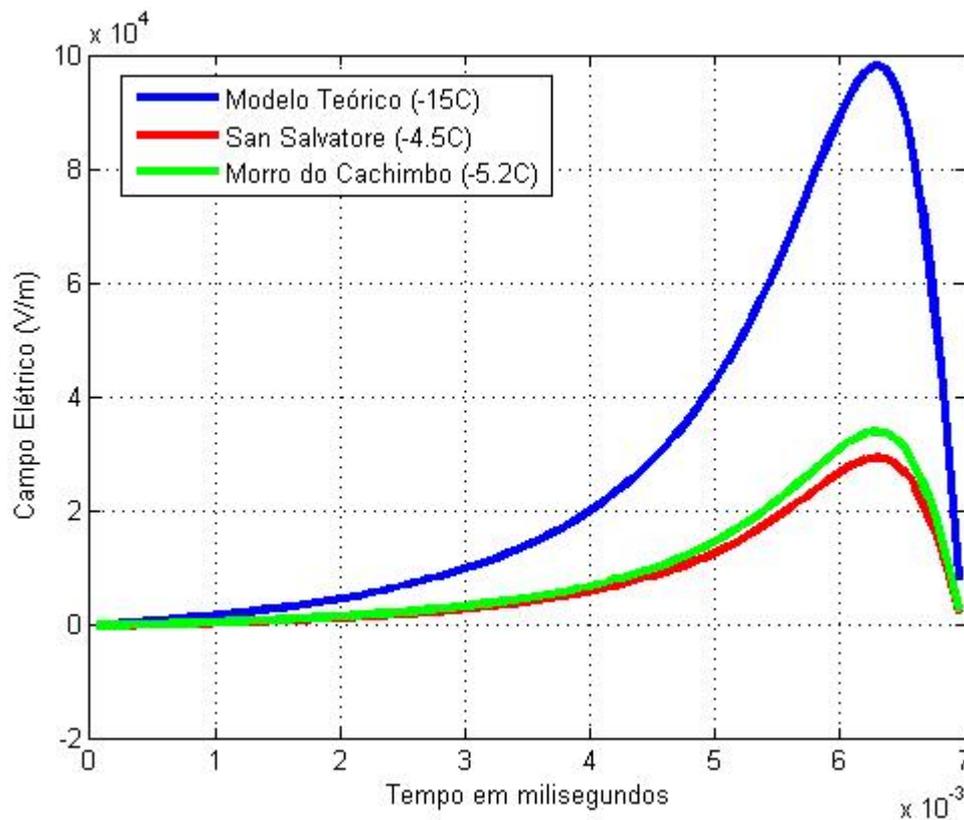
É interessante observar a presença de uma pequena intensidade de campo elétrico residual após a etapa de neutralização. Esse campo pode ter sido gerado por cargas ainda presentes no solo. Esse resíduo também pode estar relacionado ao tipo de solo da região em estudo. Parâmetros como ionização e resistividade do solo podem impactar nos valores de campo elétrico esperado.

A Figura 21 demonstra o perfil de campo elétrico pelo tempo de avanço da carga em direção ao solo. Este avanço é produto do aumento na densidade de cargas provocado pelos processos de eletrificação da nuvem, no qual há uma ruptura da rigidez dielétrica do ar formando o canal ionizado. Sabe-se que esse avanço é dado à uma taxa de $50\text{m}/50\mu\text{s}$ conforme sugerido por *Rakov e Uman (2003)*.

Nota-se pelas curvas, que o crescimento de campo elétrico para o modelo teórico se inicia imediatamente com a progressão do canal; já para os casos em San Salvatore e Morro do cachimbo esse crescimento é mais discreto, iniciando em aproximadamente 2ms após a formação do canal descendente de descarga.

Os picos das curvas acontecem em aproximadamente 6,5ms e após esse tempo ocorre a neutralização do canal até 7ms, sendo este o tempo total de descida da carga até o solo.

Figura 21 – Comparação do Perfil de Campo Elétrico em P1 pelo tempo de descida das cargas

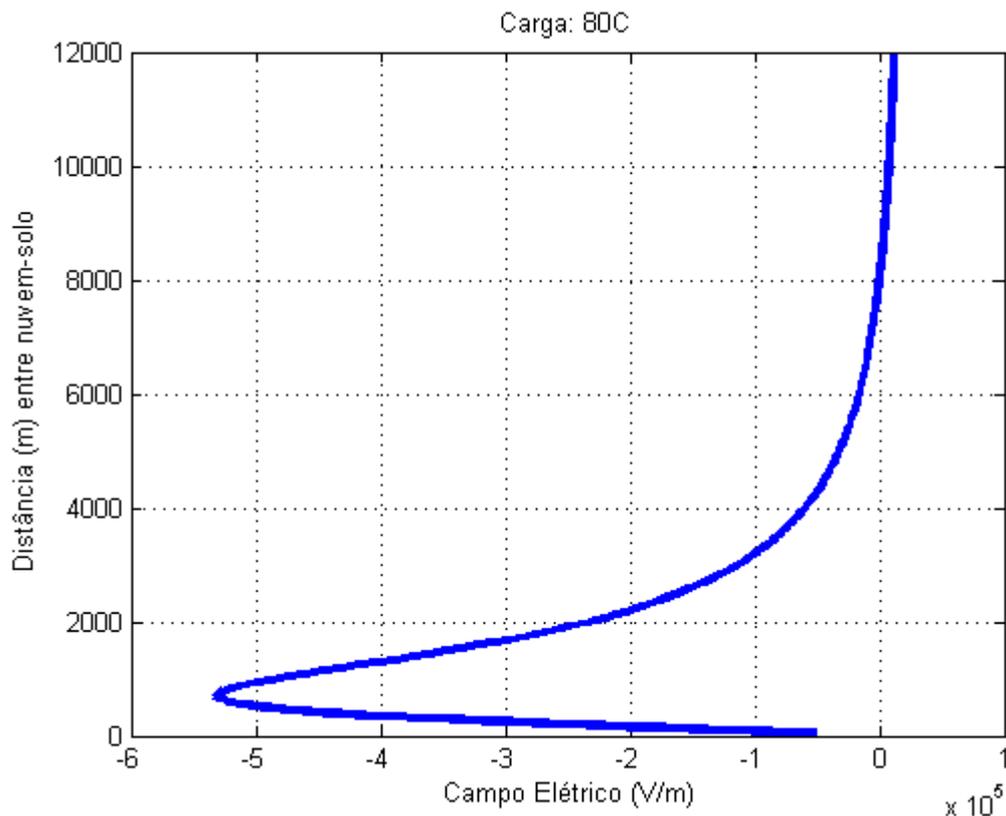


Fonte: Do autor.

A figura 22 refere-se ao perfil de campo elétrico devido ao deslocamento de 80C de carga da nuvem para o solo, dando origem a uma descarga positiva.

Pode-se observar que o campo elétrico torna-se mais negativo à medida que a carga se aproxima do solo. Outro fato que é constatado pela análise da curva é a reversão de polaridade do campo elétrico quando a carga está a uma altura de aproximadamente 8000 metros do solo. Essa inversão ocorre no momento em que a contribuição da carga principal (80C) para o campo elétrico resultante torna-se maior que a contribuição das outras cargas do sistema.

Figura 22 – Perfil de Campo Elétrico em P1 para um descarga positiva



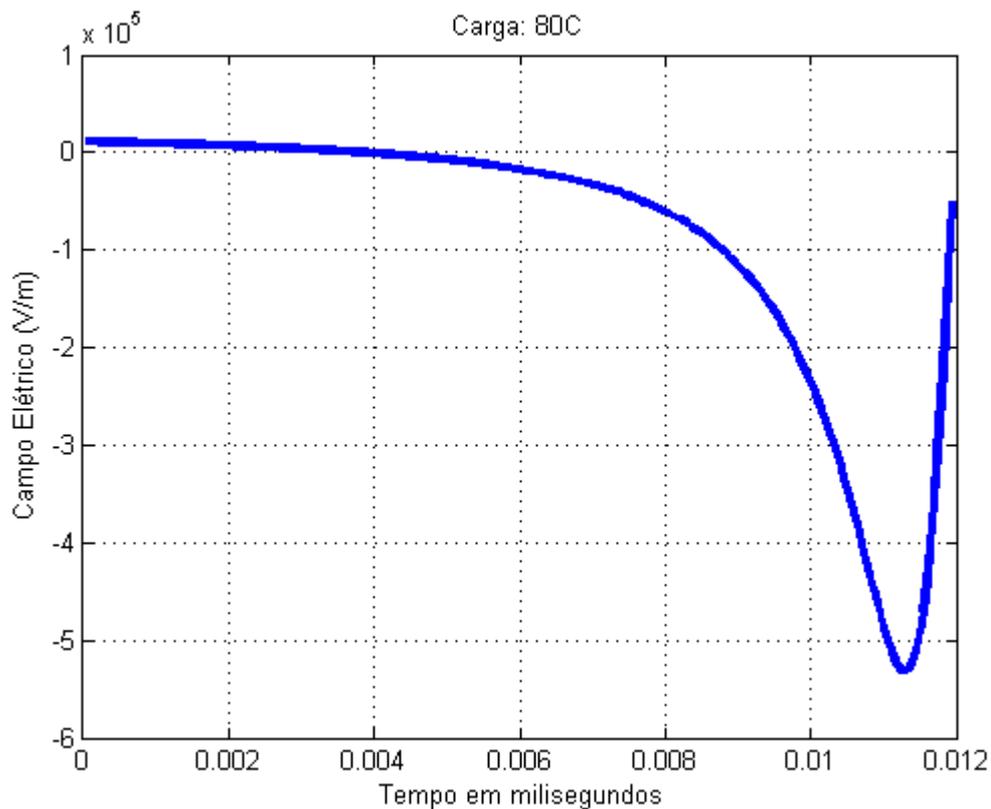
Fonte: Do autor.

O pico da curva, da ordem de megavolts, é atingido quando a carga está a uma altura de aproximadamente 1000 metros do solo, no ponto de conexão dos canais. Neste instante, há uma forte interação entre as cargas dos canais e da superfície contribuindo assim para uma elevação do campo elétrico resultante.

Após esse momento, há um fechamento do canal de descarga, e em seguida uma neutralização do mesmo. Isso pode ser observado pela queda drástica de campo elétrico observada na curva.

A figura 23 refere-se ao campo elétrico gerado pela descida de 80C de carga, pelo tempo total até a neutralização do canal. Observa-se na curva que o campo elétrico apresenta uma inversão de polaridade em aproximadamente 2,5ms após o início da formação do canal. Em aproximadamente 11ms o campo elétrico tem seu valor de pico em módulo. Após esse tempo, que envolve altas energias, o canal é neutralizado e a queda do campo elétrico é visível até que se consolide por completo a descarga.

Figura 23 – Perfil de Campo Elétrico em P1 por tempo de descida da carga para um descarga positiva



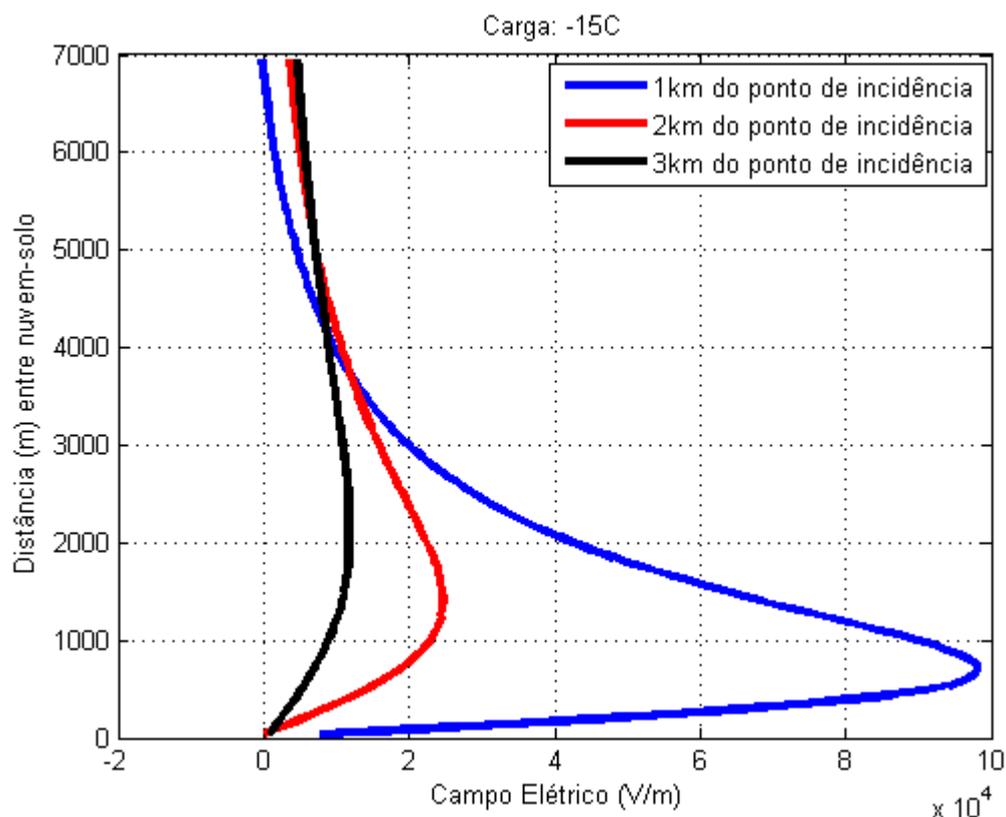
Fonte: Do autor.

5.2.2 Perfil do Campo Elétrico de cargas dinâmicas considerando mudanças de posição do observador

Nesta etapa todos os gráficos gerados dizem respeito ao perfil de campo elétrico de cargas dinâmicas a nível do solo, à medida que é alterada a posição do observador, no caso 1km, 2km e 3km do ponto de incidência.

A figura 24 mostra o perfil de campo elétrico a nível do solo, gerado pela descida de -15C de carga, quando a posição do observador é alterada.

Figura 24 – Perfil de Campo Elétrico para o modelo teórico quando se varia a posição do observador.



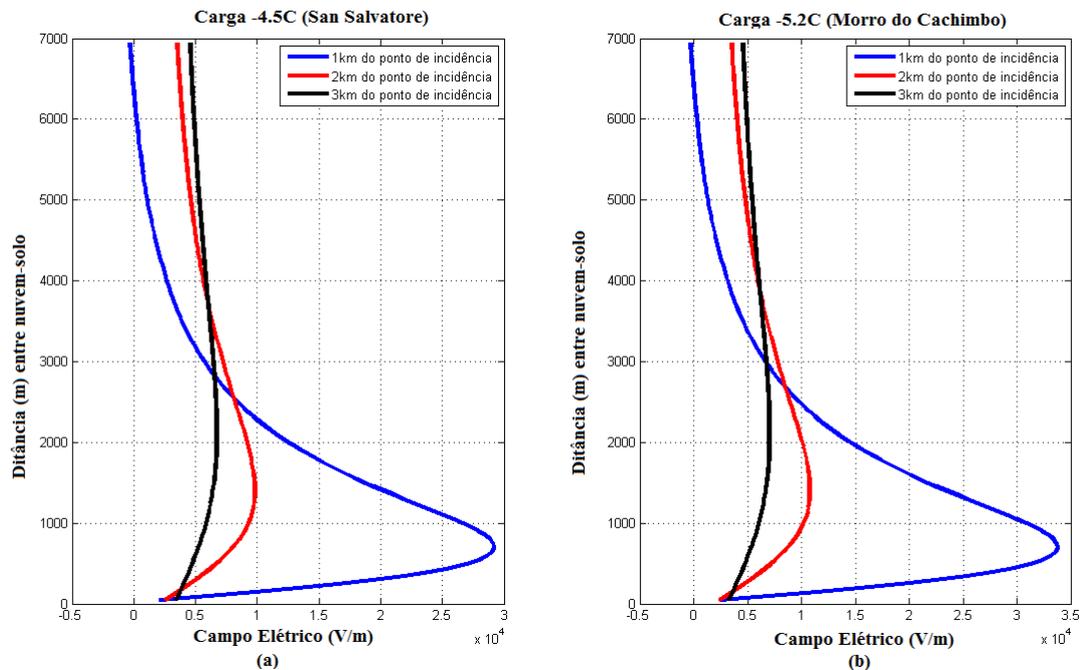
Fonte: Do autor.

Nota-se uma diminuição de campo elétrico à medida que o observador se afasta do ponto de incidência. Para um observador a 1km, pode-se perceber que a intensidade de campo elétrico evolui e chega a zerar devido a neutralização do canal e das cargas presentes no solo. As distâncias de 2km e 3km se atenuam praticamente na mesma proporção. Pode-se observar ainda um campo elétrico residual, já que existem cargas elétricas que não foram neutralizadas pela descarga.

A medida que o ponto de observação é alterado, o valor de pico do campo elétrico atenua em quase 80% do primeiro ponto de observação (1km) para o segundo (2km). Há também uma atenuação em aproximadamente 50% quando compara-se o segundo ponto de observação com o terceiro (3km).

As Figuras 25(a) e 25(b) expressam o perfil de campo elétrico a nível do solo, gerado pela descida de $-4.5C$ (San Salvatore) e $-5.2C$ (Morro do Cachimbo), quando a posição do observador se altera.

Figura 25 – Perfil de Campo Elétrico para medições no Morro do Cachimbo e San Salvatore quando se varia a posição do observador.

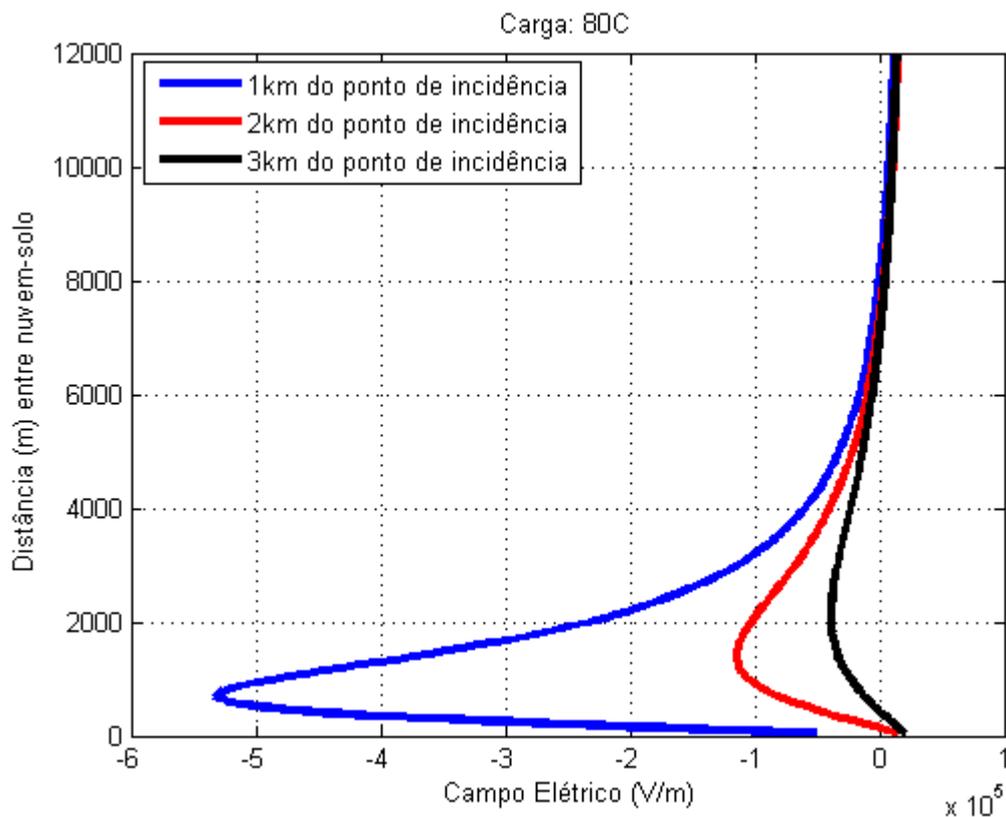


Fonte: Do autor.

Em ambos os casos, a intensidade de campo elétrico a 1km do ponto de incidência é mais acentuada se comparada com as outras distâncias do observador. Novamente para as duas descargas apresentadas existe um campo elétrico residual, que é maior quando o observador encontra-se a 3km do ponto de incidência. Isso deve-se a interação de cargas presentes no solo após o fenômeno. Como esperado, o pico de campo elétrico se reduz drasticamente em ambos os casos à medida que o observador é deslocado.

A figura 26 mostra o perfil de campo elétrico a nível do solo originado de uma descarga positiva ($80C$), quando a posição do observador é alterada.

Figura 26 – Perfil de Campo Elétrico para uma descarga positiva quando se varia a posição do observador.



Fonte: Do autor.

Ao contrário das descargas negativas, para o caso de descargas positivas a atenuação do campo elétrico foi proporcionalmente a mesma para as 3 distâncias observadas. Apesar da semelhança no processo de formação, as descargas positivas além de serem menos frequentes, envolvem campos elétricos mais intensos e por conseguinte uma maior energia.

A descarga de retorno é mais intensa quando comparada a uma descarga negativa. Sendo assim, na etapa de neutralização do canal há uma inibição de cargas elétricas a maiores distâncias, e por essa razão não há campo residual para as distâncias observadas no modelo.

6 Conclusões

6.1 Considerações Finais

Este trabalho traz uma abordagem teórica sobre o fenômeno de descargas atmosféricas iniciando por uma pesquisa diversificada sobre estudos já realizados na área, passando pelas particularidades envolvidas na formação desse fenômeno e concluindo com simulações baseadas e adaptadas de um modelo de descarga já existente.

Os resultados fornecidos pela pesquisa foram satisfatórios. Além de serem sustentados pelo modelo, estão em concordância com as leis básicas da física e do eletromagnetismo associado ao processo. Em todos os casos vistos, observou-se um perfil de Campo Elétrico coerente tanto para descargas positivas quanto para descargas negativas, a medida que houve variação nos parâmetros do modelo estudado.

A pesquisa do perfil de campo elétrico sob incidência de descargas atmosféricas, traz uma contribuição para os sistemas de proteção de energia elétrica. Através desses estudos, é possível realizar uma boa previsão da ação deste fenômeno em determinadas áreas, podendo assim prevenir faltas de energia nos grandes centros de consumo.

Este trabalho é considerado um projeto piloto na área de descargas atmosféricas na UFOP. A realização deste, torna-se de extrema importância para o fomento da pesquisa deste tema dentro da universidade, por conter um levantamento de dados considerável que servirá de ponto de partida para novas pesquisas.

6.2 Trabalhos Futuros

A evolução do canal ionizado foi modelada utilizando a teoria de campos elétricos para cargas pontuais, considerando uma distribuição uniforme de cargas pelo canal. Como pesquisas futuras para o tema em questão, sugere-se a consideração de uma distribuição não uniforme de cargas pelo canal. Ainda é proposto dar continuidade ao levantamento de informações a respeito de descargas atmosféricas, uma vez que o tema é novo, podendo surgir novas informações a todo momento.

Uma nova observação em relação a trabalhos futuros, seria realizar a pesquisa de outros modelos utilizados para a representação de descargas atmosféricas, utilizando na modelagem valores reais de medição.

Outra proposta é a realização de um estudo de viabilidade da instalação de uma torre instrumentada na região do Médio Piracicaba (região de João Monlevade em Minas Gerais).

Pode-se também fazer uma pesquisa mais aprofundada do processo de eletrificação das nuvens sob o olhar da física e da química envolvidas, objetivando na construção de um modelo representativo que considere a geometria molecular das cargas na nuvem.

ANEXO A – Nomenclaturas presentes na literatura

Na literatura encontram-se diversas fontes de pesquisas relacionadas a estes eventos. Entretanto, pode-se perceber a ocorrência de alguns questionamentos quanto aos variados termos que estão relacionados a este fenômeno. Em virtude disso, houve a necessidade da padronização destes conceitos com o objetivo de esclarecer tais princípios.

A Tabela aborda diversos termos e definições que surgiram ao longo do estudo de Descargas Atmosféricas e seus respectivos significados na língua inglesa, que é o idioma presente na maioria dos trabalhos relacionados ao tema (VISACRO, 2005).

Em Português	Em Inglês	Definição
Raio ou Descarga Atmosférica	<i>Lightning</i>	Corresponde ao fenômeno relacionado com a evolução e o fechamento de canais ionizados, incluindo grande fluxo de corrente.
Relâmpago	<i>Lightning</i>	Efeito luminoso devido ao aquecimento do canal de Descarga, pelo fluxo de corrente.
Trovão	<i>Thunder</i>	Efeito sonoro gerado pelo grande deslocamento de ar nos arredores do canal ionizado.
Descarga Atmosférica Plena	<i>Flash</i>	Corresponde a Descargas que são constituídas por uma ou mais descargas de retorno.
Descarga Elétrica	<i>Electric discharge</i>	Fluxo de cargas a partir de um objeto eletrificado. Podendo haver um processo disruptivo em um meio isolante ou ainda um descarregamento em meio condutor.
Canal Precursor de Descarga	<i>Stepped leader</i>	Corresponde a evolução do canal ionizado por passos da ordem de 50m/50 microseg.
Distância de salto final	<i>Final jump away</i>	É a distância crítica entre canais ascendentes e descendentes. A partir de uma descarga elétrica disruptiva final é formado do canal de descarga.
Raio de atração	<i>Attractive radius</i>	Distância entre o canal descendente e a estrutura terrestre onde ocorrerá o fechamento do canal de descarga provocado por ela.
Distância entre a indução do canal ascendente	<i>Strinking distance</i>	Distância crítica entre o canal descendente e a estrutura terrestre a partir da qual se dá o surgimento de canal(s) ascendente(s)

Canal Descendente	<i>Downward Leader</i>	Se refere a propagação descendente do canal a partir de uma nuvem de tempestade.
Canal Ascendente	<i>Upward Leader</i>	Se refere a propagação ascendente do canal a partir do solo.
Canal de descarga	<i>Discharge Channel</i>	Constituído da união entre canais ascendentes e descendentes. O núcleo do canal é envolvido por um envelope de corona onde se concentram as cargas elétricas.
Corrente de Retorno	<i>Return Stroke</i>	Corrente que flui pelo canal de descarga após seu fechamento. Tal corrente é baseada na neutralização das cargas acumuladas no envelope de corona do canal de descarga.
Descarga de Retorno	<i>Stroke</i>	Representa o fluxo de corrente de retorno correspondente a uma descarga elétrica pelo canal.
Primeira Descarga de Retorno	<i>First Stroke(s)</i>	Primeira descarga de retorno de uma descarga atmosférica plena.
Descarga(s) de retorno subsequente(s)	<i>Subsequent Stroke(s)</i>	Conjunto de descargas subsequentes à primeira descarga de retorno de uma Descarga plena.
Corrente de recarregamento do canal de Descarga	<i>Dart leader current</i>	Corrente de valor reduzido correspondente ao deslocamento de cargas negativas vindas de uma descarga de retorno negativa anterior.
Processo de conexão ou de fechamento do canal de descarga.	<i>Attachment Process</i>	Corresponde ao ponto de conexão entre o canal ascendente e descendente. A partir dessa união é formado o canal de descarga.

Fonte: Extraído de Visacro (2005).

Referências

- BERGER, K. Parameters of lightning flashes. *Electra*, v. 41, p. 23–37, 1975. 19, 20
- DIENDORFER, G.; PICHLER, H.; MAIR, M. Some parameters of negative upward-initiated lightning to the gaisberg tower (2000–2007). *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 51, n. 3, p. 443–452, 2009. 21
- ELAT, G. de E. A. *Conceitos Meteorológicos*. 2016. Acessado em 02 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php>>. 7
- ELAT, G. de E. A. *Densidade de raios no Brasil*. 2016. Acessado em 18 de fevereiro de 2016. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/infografico.-densidade.de.raios.no.brasil.php>>. 2
- ELAT, G. de E. A. *Estágio das tempestades*. 2016. Acessado em 19 de fevereiro de 2016. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/evolucao.php>>. 7
- ELAT, G. de E. A. *Estágio das tempestades*. 2016. Acessado em 15 de março de 2016. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tecnicas/inducacao.por.laser.e.jatos.de.agua.php>>. 11, 18
- ELAT, G. de E. A. *Ranking Brasileiro de Densidade de Descargas*. 2016. Acessado em 19 de fevereiro de 2016. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/docs/Ranking_BR.pdf>. 3, 11
- ELAT, G. de E. A. *Ranking Mineiro de Densidade de Descargas*. 2016. Acessado em 19 de fevereiro de 2016. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/docs/Ranking_MG.pdf>. 3
- JR, P. J. P.; PINTO, I. R. C. de A. *Tempestades e relâmpagos no Brasil*. [S.l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 6
- JR, W. H. H.; BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. 26
- OLIVEIRA, R. Z. de. *Sistema para Medição de Parâmetros de Canais Ascendentes de Descargas Atmosféricas na Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGE, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica - CPDEE, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 12 2007. 6, 8
- RAKOV, V. Lightning parameters for engineering applications (keynote speech). In: IEEE. *Electromagnetic Compatibility (AP EMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on*. [S.l.], 2010. p. 1120–1123. 15, 21
- RAKOV, V. Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies. In: DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING - UNIVERSITY OF FLORIDA, GAINESVILLE, FLORIDA. *EGAT, Bangkok, Thailand November 7, 2012*. [S.l.], 2012. 15

- RAKOV, V. Cigre technical brochure on lightning parameters for engineering applications. In: DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING - UNIVERSITY OF FLORIDA, GAINESVILLE, FLORIDA. *Lightning Protection (IV SIPDA), 2014 International Symposium on*. [S.l.], 2014. 15
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. *Lightning: physics and effects*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. 11, 12, 13, 16, 17, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 31, 33
- SHIGIHARA, M. Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de medições diretas em estruturas altas. *São Paulo*, 2005. 10, 11
- TAKAMI, J.; OKABE, S. Observational results of lightning current on transmission towers. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 547–556, 2007. 21
- THOTTAPPILLIL, R. et al. Properties of m components from currents measured at triggered lightning channel base. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 100, n. D12, p. 25711–25720, 1995. 22
- UOL. *Primeiro raio induzido no Brasil*. 2004. Acessado em 14 de novembro de 2017. Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/decifrando_os_raios_imprimir.html>. 22
- VISACRO, S. *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. [S.l.]: Artliber, 2005. 7, 8, 9, 10, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 42, 44
- VISACRO, S.; GUIMARÃES, M. Recent lightning measurements and results at morro do cachimbo station. In: *Proc. 23rd International Lightning Detection Conference and 5th International Lightning Meteorology Conference, Tucson, Arizona, USA*. [S.l.: s.n.], 2014. 22
- VISACRO, S. et al. Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at morro do cachimbo station. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 109, n. D1, 2004. 19