

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade de Tecnologia - FT  
Engenharia Elétrica**

**DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES E  
SEUS EFEITOS NA VEGETAÇÃO**

**Rafael da Silva Lopes**

**Brasília, Julho de 2016**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# **DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES E SEUS EFEITOS NA VEGETAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Elétrica submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.  
Orientador: Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva

**Brasília, Julho 2016**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Lopes, Rafael da Silva.

Descargas atmosféricas em árvores e seus efeitos na vegetação [Distrito Federal] 2016.

XI 78p., 210X295 mm. (ENE/FT/UnB, Engenheiro eletricitista, Engenharia Elétrica, 2016).

Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília, 2016.

Orientação: Dr. Prof. Alcides Leandro da Silva.

- |                         |              |
|-------------------------|--------------|
| 1. Descarga atmosférica | 2. Árvore    |
| 3. Danos                | 4. Vegetação |

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

LOPES, Rafael da Silva (2016). Descarga atmosférica em árvores e seus efeitos na vegetação. [Distrito Federal] 2016.

Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 78p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Rafael da Silva Lopes.

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Descarga atmosférica em árvores e seus efeitos na vegetação.

GRAU/ANO: Engenheiro eletricitista/2016.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Rafael da Silva Lopes

SHCES 101 Bloco B apartamento 404, Cruzeiro Novo

70650-112 Cruzeiro-Brasília, DF - Brasil

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# **DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES E SEUS EFEITOS NA VEGETAÇÃO**

**Rafael da Silva Lopes**

**Banca examinadora**

---

**Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva, UnB/ENE**

Orientador

---

**Prof. Dr. Francisco Damasceno Freitas, UnB/ENE**

Examinador interno

---

**Eng. Renato Fernandes Moraes**

Examinador externo

Brasília, Julho 2016

IV

# *DEDICATÓRIA*

Esse trabalho é dedicado ao meu paciente e incansável pai e a minha persistente e amorosa mãe, a Senhora é uma rainha.

# AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva por toda atenção e consideração prestada, sua ajuda foi imprescindível para a realização deste trabalho.

Aos meus dois pilares mais fortes, Benício Alcanjo Lopes e Solange Maria da Silva Lopes por todo apoio e dedicação, obrigado por tudo.

As minhas irmãs e amigos pela presença sempre carinhosa e acolhedora.

A todos meus colegas da engenharia que conhecem a rotina e os sacrifícios deste curso.

Ana Letícia da Silva, pelo zelo empregado e ajuda prestada. E todo sentimento do qual compartilhamos que mudaram as diretrizes da minha vida.

A todos que ficam fascinados com as descargas atmosféricas, o maior fenômeno da natureza.

Ao grupo Hewlett-Packard pela sua invenção maravilhosa.

## RESUMO

A descarga atmosférica tem um papel fundamental desde o início da vida do planeta, tem importância no equilíbrio elétrico da Terra, deposita íons de nitrogênio a cada descarga que chega ao solo e é um verdadeiro espetáculo aos olhos de quem vê. Pela sua natureza destrutiva e muitas vezes desconhecida as descargas atmosféricas levam medo ao homem desde antes de Cristo, gerando mitos e bagunçando com o imaginário do ser humano que mal pode mensurar o tamanho de seu poder. Essa monografia tem por objetivo elucidar mais sobre a mecânica física do comportamento de uma descarga atmosférica, dissertar sobre a teoria de sua formação que até os dias de hoje ainda é um mistério, e tanto quanto a sua interação com o meio ambiente e principalmente com foco nas relações com as árvores e sua vegetação ao redor, analisando de maneira qualitativa os fatores para que ocorram a descarga e seus efeitos quanto aos danos causados na árvore e sua estrutura, e radiação emitida na vegetação ao redor após a descarga ao redor da planta atingida. Com uma visão mais abrangente, veremos que não há o que temer, e sim respeitar o fenômeno que não é gigante só no nosso planeta mas no Universo.

Palavras-chaves: Descarga atmosférica, árvore, Danos, vegetação.

## **ABSTRACT**

The lightning has a fundamental role since the beginning of the planet's life, it is important in the Earth's electrical balance, deposits nitrogen ions to every lightning that reaches the ground and it is a true show in the eyes of the beholder. For its destructive and often unknown nature, lightning lead to fear man since before Christ, creating myths and messing with the human being imagination that barely can measure the size of your power. This monograph aims to elucidate more about physical mechanics of the behavior of a lightning, discourse on the theory of its formation that until nowadays is a mystery, and as far as its interaction with the environment and mostly focused in relations with trees and vegetation around. Analyzing qualitatively the factors to occur the lightning and its effects of the damage caused on around the affected plant. With a broader view, we will see that there is nothing to fear, but respect the phenomenon that is giant not only in our planet but in the universe.

Keyword: Lightning, tree, damage, vegetation.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	2
<b>2 CONCEITO DE BIOMA E VEGETAÇÃO</b>	<b>3</b>
2.1 BIOMA	3
2.2 VEGETAÇÃO	6
2.3 CARACTERIZAÇÃO DE PLANTAS NAS PROXIMIDADES DE ÁRVORES	11
2.4 CONTRIBUIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA NATUREZA ...ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
<b>3 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>16</b>
3.1 DEFINIÇÃO	16
3.2 FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS	21
3.3 CLASSIFICAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	23
3.4 FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	25
3.5 FORMA DE ONDA DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA	27
<b>4 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES</b>	<b>30</b>
4.1 RELAÇÃO ENTRE ÁRVORES E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	30
4.2 CONSEQUÊNCIAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES	32
4.2.1 PERDA DE MADEIRA E PERDA DE CASCA	32
4.2.2 SEIVA CONTIDA NA ÁRVORE	34
4.2.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA	35
4.2.4 CASCA E MADEIRA	35
4.2.5 VAPORIZAÇÃO DA UMIDADE	36
4.2.6 PRESSÃO DO FLUXO DE CORRENTE	36
4.2.7 DISSOCIAÇÃO E DESTILAÇÃO	36
4.2.8 REPULSÃO DE ELÉTRONS	37
4.2.9 RAÍZES	37
4.3 EXPLOSÃO E QUEIMADURAS DE ÁRVORES POR DESCARGA ATMOSFÉRICA	38
4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES	43
<b>5 EFEITOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA</b>	<b>44</b>
5.1 CONCEITOS BÁSICOS	44
5.2 PROPAGAÇÃO DE ONDA E EQUAÇÕES DE MAXWELL	46
5.2.1 Equações de Maxwell	46
5.2.2 Propagação de ondas	47
5.3 ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E VETOR POYNTING	48
5.3.1 Espectro eletromagnético	49
5.4 EFEITOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA VEGETAÇÃO	50
<b>6 A DESCARGA ATMOSFÉRICA E O SOLO</b>	<b>53</b>
6.1 EFEITOS NO SOLO	53
6.2 A FÍSICA DA IONIZAÇÃO DO SOLO	54
6.3 DISRUPÇÃO DO SOLO	56
6.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EFEITOS NO SOLO	59
<b>7 PROTEÇÃO DE ÁRVORES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>60</b>
<b>8 CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
8.1 PERSPECTIVAS	65

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
----------------------------------	----

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: DIFERENTES TIPOS DE BIOMAS NO PLANETA .....	5
FIGURA 2.2 BIOMAS BRASILEIROS .....	6
FIGURA 2.3: VEGETAÇÃO DO BRASIL.....	8
FIGURA 2.4: MORFOLOGIA DA PARTE AÉREA E DO SISTEMA RADICULAR DE PLANTAS LENHOSAS (ÁRVORES E ARBUSTOS) E HERBÁCEAS (DICOTILEDÔNEAS E GRAMÍNEAS).....	10
FIGURA 2.5: VEGETAÇÃO TÍPICA DE CERRADO .....	12
FIGURA 3.1: ÁRVORE SENDO ATINGIDA POR UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	17
FIGURA 3.2: ESTRUTURA ELÉTRICA DA ATMOSFERA .....	18
FIGURA 3.3: TÍPICA NUVEM CUMULONIMBUS.....	20
FIGURA 3.4: REPRESENTAÇÃO DA CONEXÃO DO CANAL PRECURSOR ASCENDENTE E DESCENDENTE..	22
FIGURA 3.5: DIVERSOS TIPOS DE DESCARGAS OBSERVADAS. DESCARGA INTRANUVEM, DESCARGA NUVEM A NUVEM, DESCARGA PARA O AR E A DESCARGA PARA O SOLO. ....	24
FIGURA 3.6: PROCESSO DE FORMAÇÃO DA CORRENTE DE RETORNO E FORMAÇÃO DE DESCARGA SUBSEQUENTE .....	25
FIGURA 3.7: FORMA DE ONDA TÍPICA DA TENSÃO DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	27
FIGURA 4.1: ILUSTRAÇÃO HIPOTÉTICA DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA EM UMA ÁRVORE. ....	30
FIGURA 4.2: A, TÍPICA RANHURA NA PERDA DE CASCA; B, RANHURA DE PERDA DE MADEIRA, MOSTRANDO A MADEIRA REMOVIDA. ....	33
FIGURA 4.3: PORÇÃO MAIS BAIXA DE UMA ÁRVORE SERIAMENTE DANIFICADA, MOSTRANDO A RACHADURA AO LONGO DO EIXO DA CICATRIZ . ....	34
FIGURA 4.4: PERDA DA CASCA DO ABETO POR DESCARGA ATMOSFÉRICA. [95] .....	38
FIGURA 4.5: PERDA DE CASCA COM UMA PERDA MENOR DE MADEIRA DE UM VÍDEIRO POR DESCARGA ATMOSFÉRICA. ....	39
FIGURA 4.6: PERDA DE CASCA NÃO USUAL, A ÁRVORE TAMBÉM APRESENTA RACHADURAS AO LONGO DO TRONCO. ....	40
FIGURA 4.7: PERDA DE MADEIRA DO ABETO. ....	41
FIGURA 4.8: ABETO SOFREU UM DANO POR EXPLOSÃO DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA. ....	41
FIGURA 4.9: ÁRVORE APÓS SOFRER UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA .....	42
FIGURA 5.1: ESTRUTURA DO CAMPO MAGNÉTICO .....	45
FIGURA 5.2: ILUSTRAÇÃO DO EFEITO ELETROMAGNÉTICO DE UMA FLUTUAÇÃO DE CARGA .....	48
FIGURA 5.3: DENSIDADE DE FLUXO DE ENERGIA (VETOR POYNTING) .....	49
FIGURA 7.1: SPDA PARA ÁRVORES MAIORES DE 3 METROS.....	61

## LISTA DE TABELAS

**TABELA 2.1: COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA ..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

**TABELA 3.1: VALORES DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA ..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

**TABELA 3.2: VALORES DA CURVA DE PROBABILIDADE DA MAGNITUDE DA CORRENTE ..... ERRO!  
INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

# 1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas estão não só no nosso dia a dia, como também fazem parte de nossa história e toda a evolução do planeta, tendo papel importantíssimo para o equilíbrio e a manutenção da vida.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O estudo sobre descargas atmosféricas tem um efeito bastante significativo quando se analisa por uma perspectiva da própria renovação da vida no planeta e sua viabilidade. Com uma interação intensa na atmosfera terrestre, as descargas atmosféricas surgem do rompimento do dielétrico heterogêneo que separa as nuvens do solo, tendo como uma de suas funções a de levar átomos antes na atmosfera para o solo. Papel fundamental na teoria do desenvolvimento da vida como o gatilho para a formação de substâncias e aminoácidos do planeta.

Diariamente em nosso planeta, milhares de árvores são atingidas por descargas atmosféricas. A árvore poderá ou não sobreviver a essas descargas, dependendo de suas características. Desde a era mais primitiva da Terra, as descargas atmosféricas apresentam uma consequência natural de sua ocorrência, diminuir a densidade populacional de plantas naquele atual modelo do planeta, podendo assim abrir a possibilidade de aparições de novas espécies e a abertura de espaços para que a vida tivesse chance de emergir ao longo do tempo.

A descarga atmosférica é um fenômeno natural que sempre impôs medo aos homens, devido às suas consequências devastadoras. As consequências desse fenômeno podem causar prejuízos na indústria, comércio e agropecuária até a morte de pessoas e animais, em alguns casos, o impacto desse ocorrido leva a sociedade a crenças e medos que dificultam a sua verdadeira interpretação e entendimento. O estudo do comportamento em relação a uma descarga atmosférica pode preservar estruturas, diminuir prejuízos, levando a menores necessidades de investimentos, otimização de custos.

Essa monografia tem por objetivo identificar e caracterizar uma descarga atmosférica e relatar suas consequências quanto à sua ocorrência em plantas de

grande e pequeno porte e suas influências na vegetação ao redor e na própria estrutura da planta até seus efeitos não visíveis abaixo do solo e nas suas raízes, tendo uma visão mais generalizada quanto às informações gerais sobre sua origem, características, efeitos sobre a atmosfera, o meio ambiente e o homem.

## 1.2 OBJETIVO

O trabalho consiste em analisar qualitativamente as descargas atmosféricas em árvores e seus efeitos no meio em que estas plantas se interagem. Visto referências de artigos e trabalhos que visam a compreensão do fenômeno e sua interação em múltiplas situações, como o efeito em pessoas com prótese [84], a análise em uma árvore de grande porte na área da universidade de Brasília [85], o aprimoramento dessa monografia.

O estudo é feito ao longo de 8 capítulos onde conceitua-se de forma mais generalizada o bioma e a vegetação, e sua influência quanto à caracterização e contribuição físico-química dada a interação com as descargas atmosféricas. As descargas atmosféricas desde sua formação, classificação e forma de onda. E a interação das descargas atmosféricas em árvores e as consequências do fenômeno em sua estrutura de forma mais detalhada, como análise dos danos na estrutura das árvores e efeitos devido a radiação eletromagnética e efeitos no solo.

## 2 CONCEITO DE BIOMA E VEGETAÇÃO

Bioma é um conjunto de diferentes ecossistemas, que possuem certo nível de homogeneidade. São as populações de organismos da fauna e da flora interagindo entre si. Vegetação é um termo geral para a vida vegetal de uma região, isso se refere às formas de vida que cobrem os solos, as estruturas espaciais ou qualquer outra medida específica ou geográfica que possua características botânicas.

### 2.1 BIOMA

Em tempos mais contemporâneos o termo bioma tem sido muito usado tanto por estudiosos quanto pela mídia. Entretanto, muitos autores o utilizam com um sentido político, sem muita preocupação com os aspectos científicos e sem precisar exatamente qual o conceito que fazem desse termo. Graças ao predomínio das diferentes formas de vida que compõem uma vegetação, esta irá apresentar diferentes fitofisionomias [1]. O termo surgiu para indicar uma unidade fisionômica de vegetação, como são as formações de floresta pluvial tropical. Uma formação apresenta uma mesma fisionomia e uma mesma condição climática, a qual é a principal responsável pela sua existência, sendo uniformes em toda a sua extensão [1, 2]. O termo bioma surgiu bem mais tarde que o termo formação. Enquanto formação referia-se apenas à vegetação, bioma abrangia também a fauna e demais organismos a ela associados. Originalmente um bioma caracterizava-se apenas pela fitofisionomia da vegetação, isto é, pelo tipo de formação, pela fauna e outros organismos associados e pelo clima reinante [2]. Com o passar do tempo, outros autores propuseram conceitos um pouco mais abrangentes para o termo bioma, incluindo também as características do solo e outras características abióticas. Importante notar que, a flora não participa como uma característica. Florestas pluviais tropicais da Amazônia e da África equatorial, são representantes de um mesmo tipo de bioma, embora tenham floras bastante distintas. Um determinado tipo de bioma não é reconhecido pela sua flora, mas sim pela sua fitofisionomia.

Fitofisionomias diferentes correspondem a tipos de Biomas diferentes mesmo que existam similaridades florísticas [4].

O conceito e o sistema de classificação de biomas de Walter [5] é interessante, seja por sua natureza essencialmente ecológica, seja pela facilidade em classificar os diferentes biomas do mundo. O Planeta é dividido em nove zonas climáticas, distribuídas aproximadamente em faixas latitudinais [5]. A elas correspondem o que chama de zono biomas:

- ZB I - Clima equatorial úmido e quente, com vegetação de florestas pluviais tropicais;  
Exemplo: Brasil, Colômbia.
- ZB II - Clima tropical, com vegetação de florestas estacionais;  
Exemplo: Centro Oeste brasileiro, Bolívia.
- ZB III - Clima subtropical árido, com desertos quentes;  
Exemplo: Chile, sul da Argentina.
- ZB IV - Clima mediterrâneo, com vegetação esclerófila;  
Exemplo: Estados Unidos, África do Sul.
- ZB V - Clima quente-temperado sempre úmido, com florestas subtropicais;  
Exemplo: África equatorial, norte da Austrália.
- ZB VI - Clima temperado úmido, com florestas temperadas caducifólias;  
Exemplo: Coreia do Sul, China.
- ZB VII - Clima temperado árido, com estepes ou desertos;  
Exemplo: Egito, Argélia.
- ZB VIII - Clima boreal, com florestas de coníferas;  
Exemplo: Japão, Canadá.
- ZB IX - Clima polar, com vegetação de tundra;  
Exemplo: Noruega, Rússia.

A Fig. 2.1 mostra os diferentes biomas ao redor do globo terrestre separados por zono biomas e características de sua vegetação.

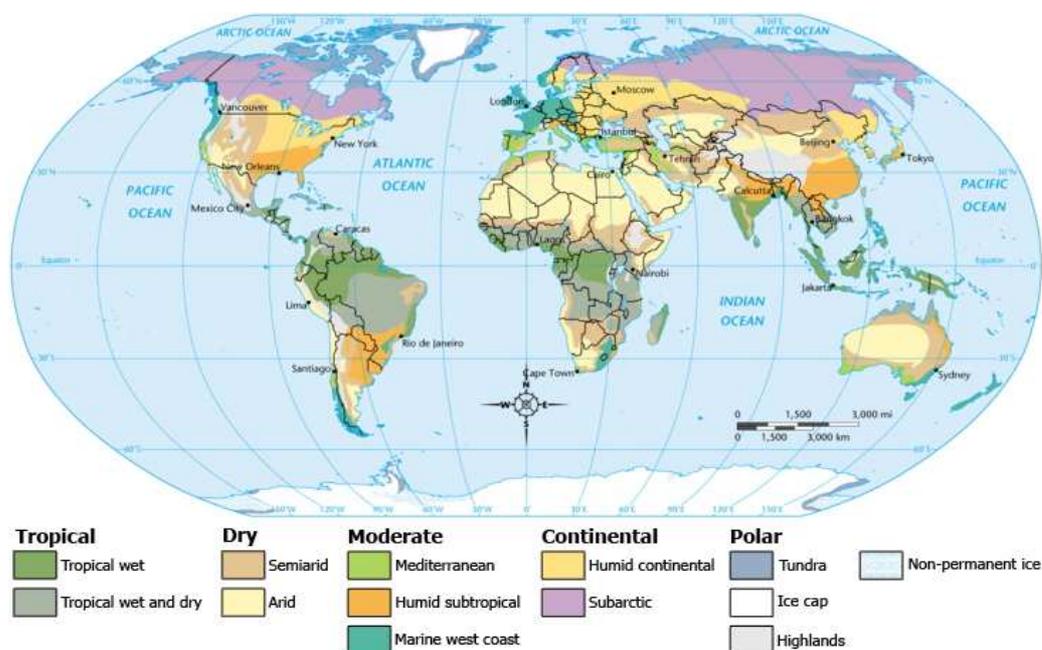
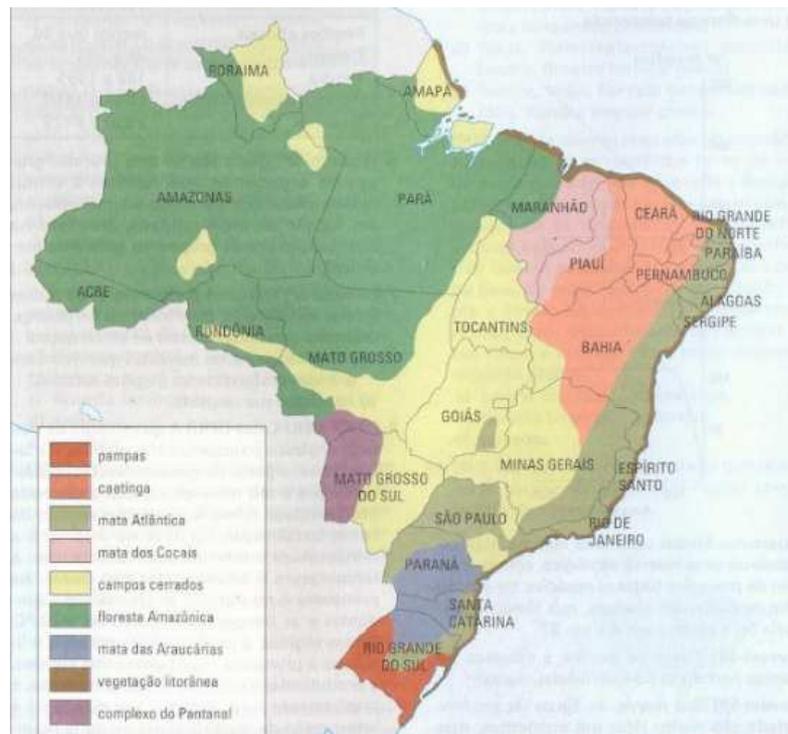


Figura 2.1: Diferentes tipos de biomas no planeta [86]

### 2.1.1 BIOMAS BRASILEIROS

A classificação dos Biomas ocorrentes no Brasil, embora possivelmente ainda imperfeita, incompleta, concorda razoavelmente com o mapa de vegetação do Brasil, publicado pelo IBGE, onde foi usado o sistema segundo Veloso & Góes-Filho [7]. Considerado como Bioma uma área do espaço geográfico, com dimensões até pouco superior a um milhão de quilômetros quadrados, representada por um tipo uniforme de ambiente, identificado e classificado de acordo com o macroclima, a fitofisionomia, o solo, a altitude e a eventual recorrência de fogo natural [7]. O território brasileiro, com cerca de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, possui uma grande variedade de características naturais (solo, relevo, vegetação e fauna), que interagem entre si formando uma composição natural única, no Brasil são seis tipos biomas; Amazônico, Mata Atlântica, Pantanal, Pampas, Caatinga e Cerrado [8]. O bioma Cerrado é usado como parâmetro para a análise das árvores e plantas atingidas por descargas atmosféricas, base desta monografia.



**Figura 2.2 Biomas brasileiros [87]**

O bioma Cerrado é a segunda maior formação vegetacional do Brasil. Sua formação possui fisionomia mais comum composta de árvores e arbustos baixos coexistindo com uma camada gramínea. No entanto, existem várias outras fisionomias, indo desde cerradão arbóreo até campos limpos, o que corresponde a 20% do território nacional abrangendo oito estados brasileiros (Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Bahia, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Piauí e o Distrito Federal) [2, 3].

## 2.2 VEGETAÇÃO

Juntamente com o relevo, o clima, a rede hidrográfica e os solos, a vegetação compõe o meio físico de uma região. A vegetação interage com todos esses elementos da paisagem mas quando em relação com o homem e suas atividades, ela é também integrante do meio ambiente. Entretanto, de todos esses elementos

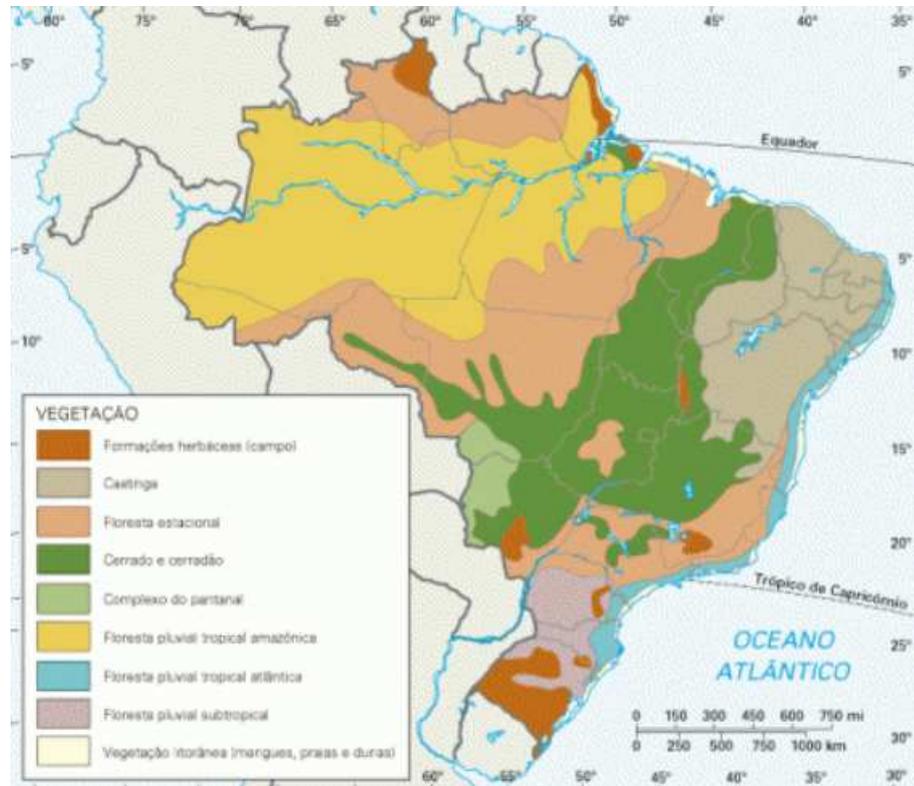
fisiográficos, a vegetação é mais vulnerável às ações antrópicas, podendo, rapidamente, perder sua composição e sua estrutura originais [9].

A vegetação é considerada também como um conjunto de plantas e associações vegetais que vivem em um mesmo lugar e, em geral, formando um tapete sobre a superfície terrestre. A umidade, a temperatura, a água, como características básicas de certas plantas, fazem com que se fale, respectivamente de vegetação higrófito, xerófito e mesófito. As zonas da vegetação da Terra são amplas franjas dispostas frequentemente como cinturões desde o equador aos polos em correspondência com as zonas climáticas e com as latitudes. A vegetação como conceito socioecológico é estudada cientificamente pela Ecologia. A Sociologia Vegetal interessa-se pelas comunidades e associações vegetais” [10].

A vegetação representa a cobertura vegetal que se sobrepõe às formas de relevo continentais, colonizando diferentes tipos de solos, e mesmo de rochas expostas [9]. Conforme as condições climáticas e pedológicas das regiões, a vegetação manifesta uma aparência, um aspecto visual característico, a que os geógrafos chamam de “fisionomia”. Esta fisionomia é determinada pela estrutura da formação vegetal, tanto no sentido horizontal como no sentido vertical [9]. A estrutura horizontal é verificada pelo grau de proximidade ou de afastamento dos vegetais, levando-se em conta seu porte, esse fato nos conduz à noção de densidade, maior ou menor. A estrutura vertical considera a vegetação quando disposta em camadas sobrepostas, ou estratos, com vegetais de diferentes alturas em sobreposição natural. Nesse sentido, é comum referir-se a um estrato herbáceo, um estrato arbustivo e um ou mais estratos arbóreos [9]. Com exceção das formações herbáceas todas as demais formações vegetais possuem mais de um estrato, resultando daí sua maior ou menor complexidade estrutural [9, 10, 11].

Outra característica importante para se identificar um tipo de vegetação é a sua composição florística, ou seja, a sua flora típica. Vegetação e flora não se confundem. A vegetação se manifesta pela sua fisionomia e pela sua composição florística, ocupando certo espaço geográfico, já a flora vem a ser a quantidade de espécies botânicas que compõem um tipo de vegetação [11]. Considera-se a vegetação como a flora que, ao longo dos tempos, veio se adaptando às condições

climáticas e aos solos [9]. A Fig. 2.3 ilustra a distribuição da vegetação por todo o território brasileiro.

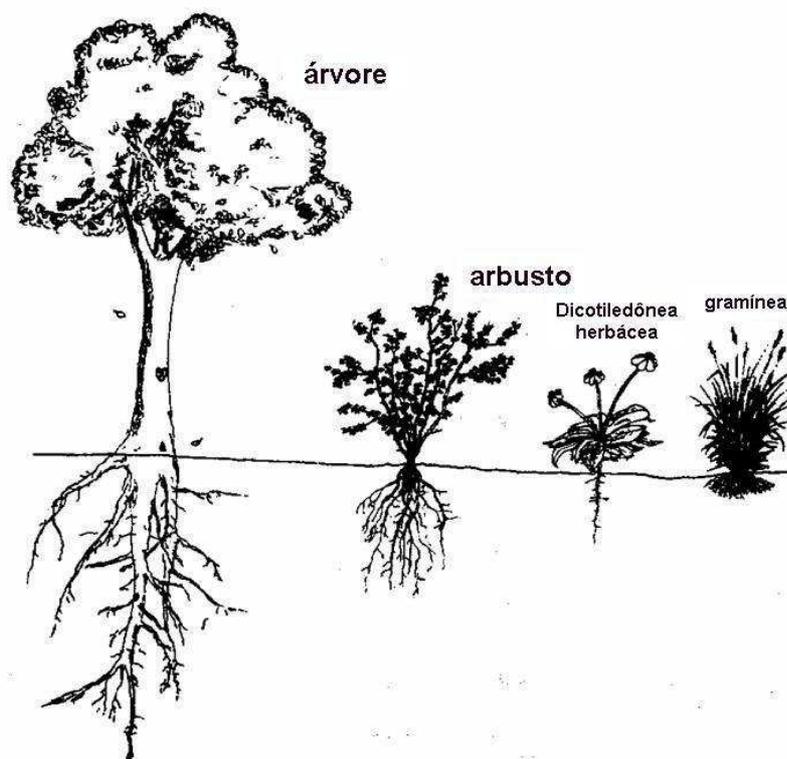


**Figura 2.3: Vegetação do Brasil [88]**

A vegetação do Bioma do Cerrado não possui uma fisionomia única em toda a sua extensão [12]. A vegetação é bastante diversificada, apresentando desde formas campestres bem abertas, como os campos limpos de cerrado, até formas relativamente densas, florestais, como os cerradões. Entre estes dois extremos fisionômicos, há uma gama de formas intermediárias, com fisionomia de savana [11, 12]. Ao se percorrer áreas de cerrado, já em poucos quilômetros encontram-se todas estas diferentes fisionomias. Este mosaico é determinado pelo mosaico de manchas de solo pouco mais pobres ou pouco menos pobres, pela irregularidade dos regimes e características das queimadas de cada local e pela ação humana [13]. Assim, embora o bioma do Cerrado distribua-se predominantemente em áreas de clima tropical sazonal, os fatores que aí limitam a vegetação são a fertilidade do solo e o fogo [12, 13]. O clímax climático do domínio do Cerrado é a Mata mesófila de interflúvio, sempre verde, que hoje só existe em pequenos relictos, sobre solos

férteis tipo terra roxa legítima [13]. As diferentes formas de Cerrado, dependem de ser o solo ou o fogo o seu fator limitante [11]. Formas abertas de cerrado devem esta sua fisionomia às derrubadas feitas pelo homem para a obtenção de madeira e/ou do carvão mineral.

De um modo geral, pode-se distinguir dois estratos na vegetação dos Cerrados, como ilustrada na Fig. 2.4: o estrato lenhoso, constituído por árvores e arbustos, e o estrato herbáceo, formado por ervas e subarbustos [13]. O adensamento da vegetação lenhosa acaba por eliminar em grande parte o estrato herbáceo, onde a vegetação herbácea/subarbustiva e a vegetação arbórea/arbustiva estão em intensa competição, procurando, cada qual, ocupar aquele espaço de forma independente. Aqueles dois estratos não comporiam comunidades harmoniosas e integradas, como nas florestas, mas representariam duas comunidades antagônicas [3, 9]. Tudo aquilo que beneficiar a uma delas, prejudicará, indiretamente, a outra e vice-versa. Elas diferem entre si não só pelo seu espectro biológico, mas também pelas suas floras, pela profundidade de suas raízes e forma de exploração do solo, pelo seu comportamento em relação à seca, ao fogo, etc. Toda a gama de formas fisionômicas intermediárias parece expressar exatamente o balanço atual da concorrência entre aqueles dois estratos [13].



**Figura 2.4: Morfologia da parte aérea e do sistema radicular de plantas lenhosas (árvores e arbustos) e herbáceas (dicotiledôneas e gramíneas) [83].**

Já a vegetação herbácea e subarborescente, formada também por espécies predominantemente perenes, possui órgãos subterrâneos de resistência, como bulbos e xilopódios, que lhes garantem sobreviver à seca e ao fogo [14]. Suas raízes são geralmente superficiais, indo até pouco mais de 30 cm [6]. Os ramos aéreos são anuais, secando e morrendo durante a estação seca. Formam-se, então 4 ou mais toneladas de palha por ha/ano, um combustível que facilmente se inflama, favorecendo assim a ocorrência e a propagação das queimadas nos Cerrados [6]. Os troncos tortos podem ser considerados como um efeito do fogo no crescimento dos caules, impedindo-os de se tornarem retilíneos pois pelas mortes de sucessivas gemas terminais e brotamento de gemas laterais, o caule acaba tomando uma aparência tortuosa [15], como mostrado em Fig. 2.4.

A causa do surgimento deste tipo de vegetação é dada por alguns autores [15], vão desde a pobreza do solo, normalmente muito ácido com deficiência nutricional e alto teor de alumínio, passando pela irregularidade das chuvas, com

longos períodos de seca, até a frequência de queimadas. No Cerrado as queimadas são comuns em determinada época do ano, e surgem até espontaneamente, devido principalmente a descargas atmosféricas, sem contar as eventualidades provocadas pelo homem [9, 15].

No entanto, a vegetação de um lugar determinado não só é importante do ponto de vista visual, mas também porque ela é extremamente importante quando se trata de qualidade de vida, pela produção de oxigênio, para a proteção dos solos e para o ciclo do carbono.

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO DE PLANTAS NAS PROXIMIDADES DE ÁRVORES

Em um determinado bioma de vegetação com árvores de maior porte observa-se uma aglomeração de plantas menores em volta, no cerrado onde não possui uma fisionomia única em toda a sua extensão, pode-se distinguir seus dois estratos na vegetação dos Cerrados. A vegetação do Cerrado é dividida em 3 grupos: o das plantas permanentes que apresentam raízes profundas, o das espécies efêmeras com raízes superficiais e o das gramíneas que podem ser efêmeras ou permanentes [14]. No estrato herbáceo/subarbusivo prevalece as plantas menores e gramíneas que situam-se ao redor de árvores de maior porte.

Como a precipitação de chuvas em áreas de Cerrado situa-se entre 800 mm e 2000 mm, as reservas de água no solo a 20 m de profundidade aproximadamente correspondentes às precipitações médias de 3 anos, a maioria das plantas permanentes do Cerrado possuem sistemas radiculares profundos [16], assim, a água não é o fator limitante dessa vegetação permanente do Cerrado [16].



**Figura 2.5: Vegetação típica de cerrado [89]**

As plantas próximas a árvores de grandes portes são caracterizados pelo antagonismo entre elas, que diferem entre si não só pelo seu espectro biológico, mas também pelas suas floras, pela profundidade de suas raízes e forma de exploração do solo, pelo seu comportamento em relação à seca, ao fogo, por toda a sua ecologia [16]. Toda a gama de formas fisionômicas intermediárias parece expressar exatamente o balanço atual da concorrência entre aqueles dois estratos. A vegetação arbustiva caracterizada por árvores de tronco mais duro e espesso onde tem um sistema subterrâneo, dotado de longas raízes pivotantes, permite a estas plantas atingir 10, 15 ou mais metros de profundidade, abastecendo-se de água em camadas permanentemente úmidas do solo, até mesmo na época seca [6]. Em sua volta observa-se a vegetação herbácea detentora das plantas de menor porte e possui órgãos subterrâneos de resistência, que lhes garantem sobreviver à seca e ao fogo [6, 14]. Suas raízes são geralmente superficiais, indo até pouco mais de 30 cm. Os ramos aéreos são anuais, secando e morrendo durante a estação seca [6]. E com o acúmulo de palha e resíduos inflamáveis, todo esse cenário é favorecido a ocorrência e a propagação das queimadas nos Cerrados.

Informações sobre o efeito do fogo na composição florística e na estrutura da vegetação em ecossistemas de Cerrado, apesar de restritas, mostraram que o fogo

exerce um efeito de poda na vegetação favorecendo as espécies menores e mais delgadas que têm dificuldades de crescer sobre a massa vegetal seca acumulada na camada herbácea sem fogo [13]. Estudos em áreas de campo sujo e de cerrado sentido restrito mostram que a ação das queimadas acelera a ciclagem de nutrientes, exerce efeito de poda, promovendo uma imensa capacidade regenerativa, uma profusa floração de muitas espécies que dependem deste evento para florescer, bem como a dispersão de sementes [12]. Os efeitos do empobrecimento da vegetação, do estrato rasteiro, em termos do número de espécies, têm sido observados em áreas de cerrado onde não há fogo por muito tempo [12, 13].

No Cerrado tem-se a presença principalmente de gramíneas e ciperáceas no estrado das árvores [11]. Outra importante característica dessas espécies ao redor de árvores de grande porte é de uso destas espécies como vegetação pioneira para recuperação de áreas degradadas por atividades mineradoras ou voçorocas em áreas de cerrado [17]. O mais usual até hoje tem sido a tentativa de recuperação destas áreas com espécies arbóreas, como eucaliptos, e gramíneas exóticas [18, 19]. Entretanto, as espécies nativas apresentam importantes vantagens em relação às espécies introduzidas, como a rapidez de desenvolvimento, manutenção da flora e fauna nativas e a grande adaptação às condições locais [20, 21]. Além disso, observa-se uma rápida devastação dos cerrados brasileiros para incorporação ao processo produtivo. O cerrado tem sido a principal fronteira agropecuária brasileira nos últimos anos, já respondendo com cerca de um terço da produção nacional. Isto também tem aumentado os riscos de extinção de espécies, inclusive de gramíneas, o que leva à maior necessidade de conservação desse germoplasma [22]. O fato de a maioria destas espécies apresentar sementes classificadas como ortodoxas facilita o seu armazenamento a longo prazo [23].

## 2.4 CONTRIBUIÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA NATUREZA

A cerca de três bilhões de anos atrás, a atmosfera da Terra era bem mais quente que atualmente e ainda continha uma grande quantidade de moléculas de

diversos gases, tais como amônia, metano e hidrogênio, como também era mais eletricamente carregado. Evidências indicam que as descargas atmosféricas tenham influência intrínseca no ciclo da vida no planeta, na deposição de átomos ionizados no solo e conseqüentemente da própria ação da descarga age no crescimento populacional de plantas de maior porte e sua vegetação em volta [24].

O nitrogênio, o oxigênio, pequenas quantidades de dióxido de carbono e elementos raros, consiste basicamente na formação da atmosfera da Terra. Devido a sua grande intensidade, quando ocorre a descarga atmosférica, ele quebra as moléculas de oxigênio e nitrogênio do ar dentro do canal. Os átomos provenientes reúnem-se as outras moléculas, modificando a química da atmosfera em torno da região do canal. A quebra de moléculas do gás nitrogênio torna possível que os átomos deste elemento unam-se a outros elementos. Os átomos de nitrogênio e o átomo de oxigênio fixam-se formando o óxido de nitrogênio (NO). O óxido é levado pelas nuvens ao solo, modificando a própria composição do solo, isto contribui para fertilização do solo, que dependendo da composição química do solo, observa-se um potencial hidrogeniônico mais ácido no solo. Cada descarga produz óxidos de nitrogênio, levados ao solo convertidos em ácidos nítricos [24, 25].

A tabela 2.1 apresenta os valores aproximados da composição de substâncias na atmosfera terrestre.

**Tabela 2.1: Composição da atmosfera**

Concentração do gás	Porcentagem %
Nitrogênio	78,03
Oxigênio	20,99
Argônio	0,94 ppm
Dióxido de carbono	340 ppm
Neônio	18 ppm
Hélio	5 ppm
Metano	1,5 ppm
Hidrogênio	0,5 ppm
Óxido de dinitrogênio	0,3 ppm
Dióxido de nitrogênio	0,3 ppm
Monóxido de carbono	0,1 ppm
Monóxido de nitrogênio	0,1 ppm

Já no solo, as raízes das plantas podem absorver essas moléculas, ajudando na formação de grãos e frutas. Não só o óxido de nitrogênio, mas também, outros elementos contendo nitrogênio são criados através do metabolismo de organismos no solo e na água e por processos de fertilização industriais. Mesmo não sendo a principal fonte, óxido de nitrogênio produzido por descargas atmosféricas é muito importante em termos globais, principalmente para a agricultura. Enquanto estes óxidos estão na atmosfera, através de reações químicas, podem alterar a concentração de ozônio.

As descargas atmosféricas modificam o equilíbrio da atmosfera em volta dos locais onde eles ocorrem, quebrando as moléculas do ar. Essas moléculas, por sua vez, se recombinaem dando origem a novos elementos que modificam o equilíbrio da atmosfera [25]. Assim como no Brasil e em outras regiões tropicais, as descargas atmosféricas agem de maneira significativa na composição do ozônio na atmosfera. Através de incêndios as descargas atmosféricas atuam de forma indireta na química da atmosfera e do solo [25]. Uma grande quantidade de gás carbônico e outros tipos de gases são levados do solo para superfície durante os incêndios, porém ainda não se sabe se este processo influencia na química da atmosfera. O que se tem como certo é que os incêndios produzidos por descargas atmosféricas podem produzir uma reciclagem de nutrientes do solo, o que favorece a perpetuação não só de espécies vegetais como também animais, mas também devida à dissociação do hidrogênio no composto da água [24].

## 3 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Quando temos entre duas polaridades um meio heterogêneo com determinado dielétrico, observamos que o fluxo de cargas que parte de uma das polaridades para a outra segue um caminho tortuoso buscando o meio mais fácil de fluir, descargas atmosféricas têm este aspecto.

### 3.1 DEFINIÇÃO

A ocorrência de uma descarga atmosférica pode ser definida como o rompimento da isolação em ar, devido ao campo elétrico, entre duas superfícies carregadas eletricamente com polaridades opostas ocasionando o surgimento de uma corrente elétrica muito intensa [24]. O relâmpago é consequência do rápido movimento de elétrons de um lugar para outro. Os elétrons movem-se tão rapidamente que fazem o ar ao seu redor iluminar-se, resultando em um clarão, e aquecer-se, resultando em um som, o trovão [24]. Apesar de estarem normalmente associados a tempestades com chuvas intensas e ventos intensos, também podem ocorrer em tempestades de neve, tempestades de areia, durante erupções vulcânicas, embora nesses casos costumem ter extensões e intensidade bem menores. Quando a descarga atmosférica conecta-se ao solo é chamada de raio, podendo ser denominado ascendente, quando inicia no solo e sobe em direção a nuvem, ou descendente, quando inicia na nuvem e desce em direção ao solo [24].

Como a ação da descarga atmosférica é acompanhada pela luminosidade e trovoadas, sua presença sempre foi respeitada e observada, tendo-se encontrado registros datados antes de Cristo, na Mesopotâmia [24]. A Fig. 3.1 ilustra uma descarga atmosférica nuvem-terra de intensa luminosidade e poder destrutivo.



**Figura 3.1: Árvore sendo atingida por uma descarga atmosférica [90]**

Do ponto de vista iônico e de condutividade, pode-se dividir a atmosfera em três partes: atmosfera inferior (troposfera), média atmosfera (estratosfera e mesosfera) e atmosfera superior, acima de 85 km do solo, termosfera, conforme ilustra a Fig. 3.2.

A atmosfera inferior e a média atmosfera são fracamente condutoras por ter pequena concentração de íons. Nessas regiões, os íons são criados pela ionização de moléculas neutras do ar, geralmente moléculas de nitrogênio e oxigênio, por raios cósmicos primários e partículas secundários e radiação produzida pelo decaimento radioativo de substâncias no solo, como urânio e tório, e no ar, como gás radônio. Pela ionização das moléculas, elétrons livres e íons positivos são criados. Os elétrons são rapidamente ligados a outras moléculas neutras produzindo íons negativos.

A produção de íons por raios cósmicos varia com a altitude e a latitude que se observa. Na atmosfera superior existem além dos íons negativos e positivos uma considerável quantidade de elétrons livres produzidos pela absorção da radiação solar por átomos e moléculas, sendo nessa parte a maior interação com os raios

cósmicos. Este processo é chamado de fotoionização. Os elétrons podem então se unir às moléculas neutras criando íons negativos. Os elétrons e íons criados por este processo tornam a atmosfera um razoável condutor, formando a ionosfera. Iniciando-se na parte superior da ionosfera e estendendo-se para cima, está localizada a magnetosfera, região onde a dinâmica das partículas é governada pelo campo magnético da Terra que interage com o fluxo de partículas carregadas proveniente do Sol, formando cinturões de radiação ao redor da Terra. Na atmosfera superior, a condutividade é anisotrópica devido ao fato da mobilidade de íons e elétrons depender da direção do campo magnético.

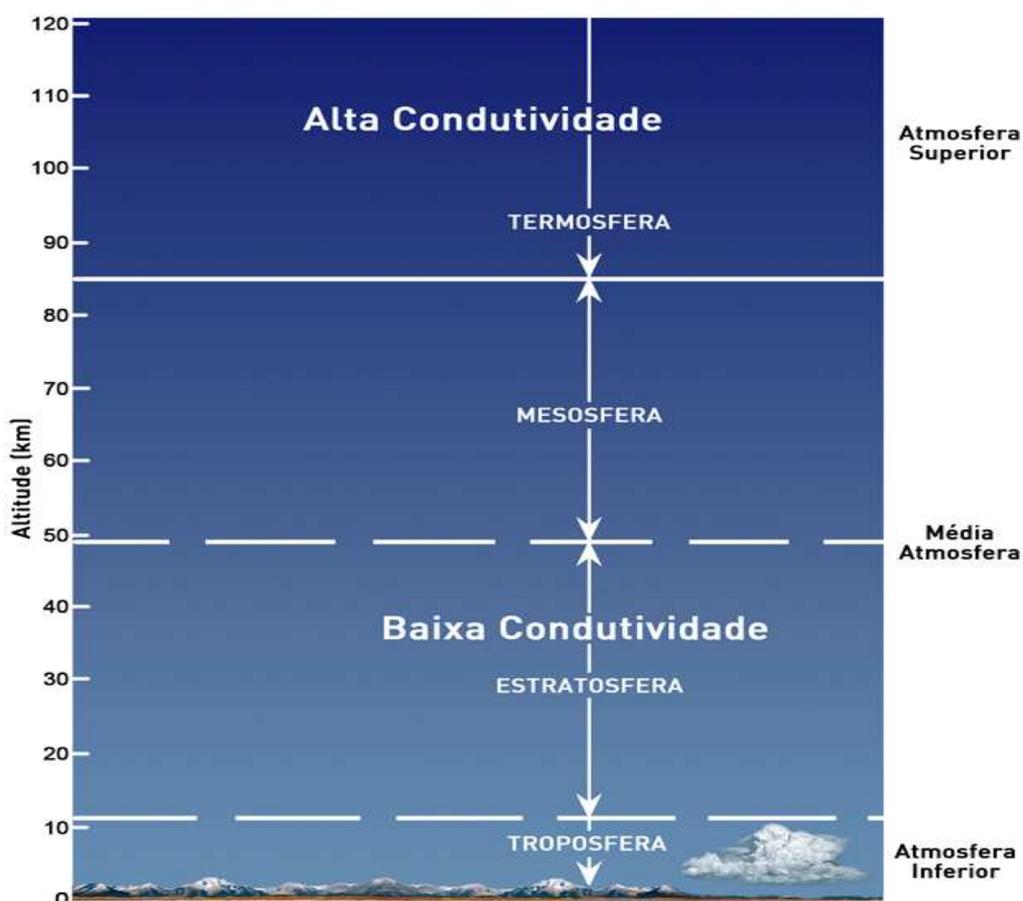


Figura 3.2: Estrutura elétrica da atmosfera [91]

Pesquisas sobre descargas atmosféricas no Brasil tiveram início em meados da década de 80 pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), em São Paulo, e pelas Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG). Em 1995 a Universidade Federal

do Pará (UFPA) e em 1996 o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) começaram também as pesquisas nesta área.

As descargas atmosféricas estão intimamente ligadas com as atividades de trovoadas que por sua vez, estão associadas com as nuvens cumulonimbus [26]. As nuvens cumulonimbus, por terem grande extensão vertical, geram fortes chuvas e descargas. As nuvens cumulonimbus têm sua base em 2 ou 3 km e o topo em até 20 km de altitude, e podem ter 10 ou mesmo 20 km de diâmetro [26]. Normalmente têm a sua base escura, pois a luz solar é absorvida e espalhada pelas partículas de água e gelo de que são formadas. O seu topo muitas vezes atinge a base da estratosfera, ao atingir a base da estratosfera, a nuvem não consegue mais subir, pois a temperatura nessa camada tende a aumentar devido à absorção do ultravioleta pela camada de ozônio [24, 26]. Assim ela se espalha horizontalmente na direção dos ventos nessa altitude, fazendo que a nuvem tenha o aspecto de uma bigorna.

As nuvens de tempestade geralmente estão associadas a chuvas torrenciais e enchentes, granizo, ventos intensos e eventualmente os temíveis tornados. A quantidade de energia envolvida em apenas uma tempestade modesta é muito alta [26, 27]. Ela é várias vezes superior à energia liberada por exemplo a primeira bomba atômica detonada em um deserto dos Estados Unidos em 1945. A diferença é que a bomba atômica libera toda sua energia em uma fração de segundo, enquanto uma tempestade o faz durante um período de muitos minutos ou várias horas.

A Fig. 3.3 ilustra como é a formação de uma nuvem cumulonimbus com o movimento de ar quente ascendente e frio descendente, de acordo com a direção da tempestade.

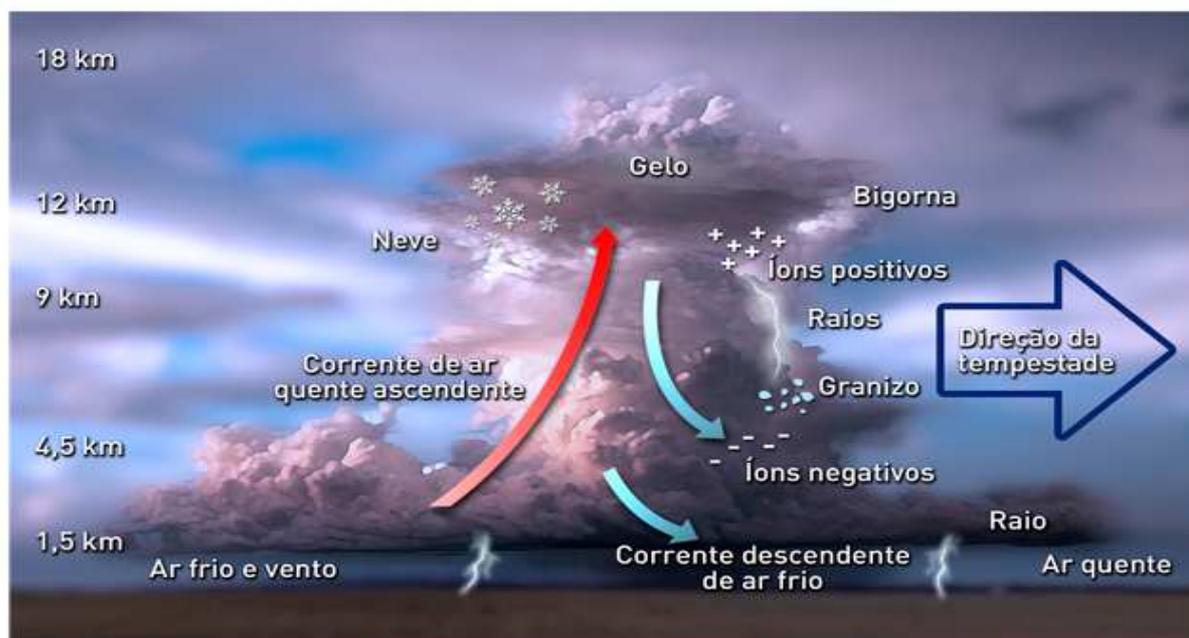


Figura 3.3: Típica nuvem cumulonimbus [92]

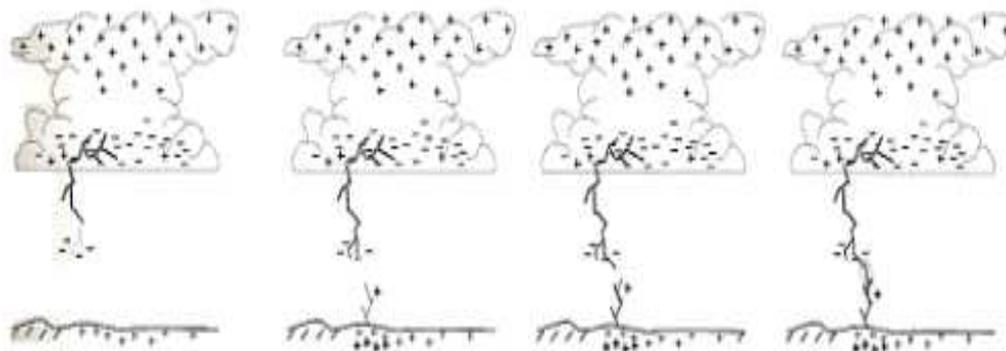
Existe uma estimativa de 2.000 trovoadas em progresso, a todo o momento. A maior proporção delas ocorre nos trópicos, onde há calor, muita umidade e instabilidade estão sempre presentes. Cerca de 45.000 trovoadas ocorrem todos os dias e mais de 16 milhões ocorrem anualmente no mundo inteiro [24].

A ação do raio é fulminante, ocorrendo em curtíssimo tempo, daí a grande dificuldade de observação. Além do mais, raio ocorre aleatoriamente na superfície da Terra, sendo muito dispendioso manter um laboratório específico de observação, registro e captação do raio. Outra teoria mais recente acerca do mecanismo de carregamento de cargas nas nuvens, está a ocorrência de choque de partículas provindas dos raios cósmicos de explosões de superestrelas massivas com atmosfera terrestre, que ao incidirem, colidem em altíssima velocidade com as partículas dentro das nuvens e produzem energia o suficiente para ionizar o canal do ar por onde passa a descarga [24, 28, 29].

## 3.2 FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS

A formação de cargas nas nuvens ainda é um fenômeno onde cabe algumas teorias como a ionização pelo ar de partículas por atrito na atmosfera e, a energização por influências dos raios cósmicos oriundos de explosões de estrelas massivas do espaço, não totalmente conhecido seu processo e mecanismo de funcionamento [30].

As principais teorias são as de G. C. Simpson, C. T. R Wilson, W. A. Mack, Lester e Geisel. Com a Terra com excesso de cargas negativas, as correntes de ar ascendentes carregam grande quantidade de umidade. Esta umidade, encontrada nas regiões mais altas uma temperatura baixa, se condensa formando várias gotículas de água, que ficam suspensas no ar. Estas gotículas aglomeram-se formando gotas maiores e, pela influência da gravidade, começam a cair, assim ao caírem encontram outras gotículas, aumentando seu tamanho. Assim, a gota já tendo um tamanho considerável e o solo da Terra sendo negativo, são induzidas na gota de água cargas positivas na parte inferior, e cargas negativas na parte superior. A gota aumenta de tamanho até ficar com um diâmetro de aproximadamente 5 mm, tornando-se instável e fragmentando-se em várias gotículas menores [24]. No momento da fragmentação há formação de íons positivos na parte inferior e negativos na superior. Os íons positivos encontram grande quantidade de gotículas arrastadas pelo ar ascendente. A gota ascendente (neutra), durante o choque, entrega elétrons aos íons positivos descendentes. Desta maneira, a gota ascendente se torna positiva e o íon fica neutralizado. Como estas gotas ascendentes positivas estão dotadas de grande energia cinética, conseguem subir até a parte superior da nuvem. Os íons negativos resultantes da fragmentação de uma grande gota descem até parar, subindo em seguida, também arrastados pelo ar ascendente. Como estes íons negativos tem menor energia cinética que as gotículas positivas, elas aglomeram-se na parte inferior da nuvem, ficando, esta, carregada positivamente na parte superior e negativamente na inferior [24].



**Figura 3.4: Representação da conexão do canal precursor ascendente e descendente [26].**

A nuvem carregada induz no solo cargas positivas, que ocupam uma área correspondente ao tamanho da nuvem. Como a nuvem é arrastada pelo vento, a região de cargas positivas no solo acompanha o deslocamento da mesma, formando praticamente uma sombra de cargas positivas que segue a nuvem. Entre a nuvem e a Terra forma-se diferenças de potenciais que variam de milhares a milhões de volts, sendo que a nuvem se encontra entre 300 e 5.000 metros de altura [24].

Para a descarga se efetuar não é necessário que o gradiente de tensão seja superior a rigidez dielétrica de toda a camada de ar entre a nuvem e o solo, portanto, basta um campo elétrico bem menor [26]. Isto é explicado pelo fato do ar entre a nuvem e a Terra não ser homogêneo, pois contém grande quantidade de resíduos no ar, umidade e ar ionizado, que estão em constante agitação. Com isto o ar entre a nuvem e a Terra fica mais maleável a interação das cargas ionizadas, como se tivesse “enfraquecido”, e um campo elétrico menor já é o suficiente para que a descarga atmosférica consiga perfurar o ar e descarregar na Terra [26, 31]. Primeiramente pequenos túneis de ar ionizados ficam, pelo poder das pontas com alta concentração de cargas que vão, aos poucos, furando a camada de ar a procura dos caminhos de menor resistência, isto é os túneis ionizados, tentando se aproximar das cargas positivas do solo [31].

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

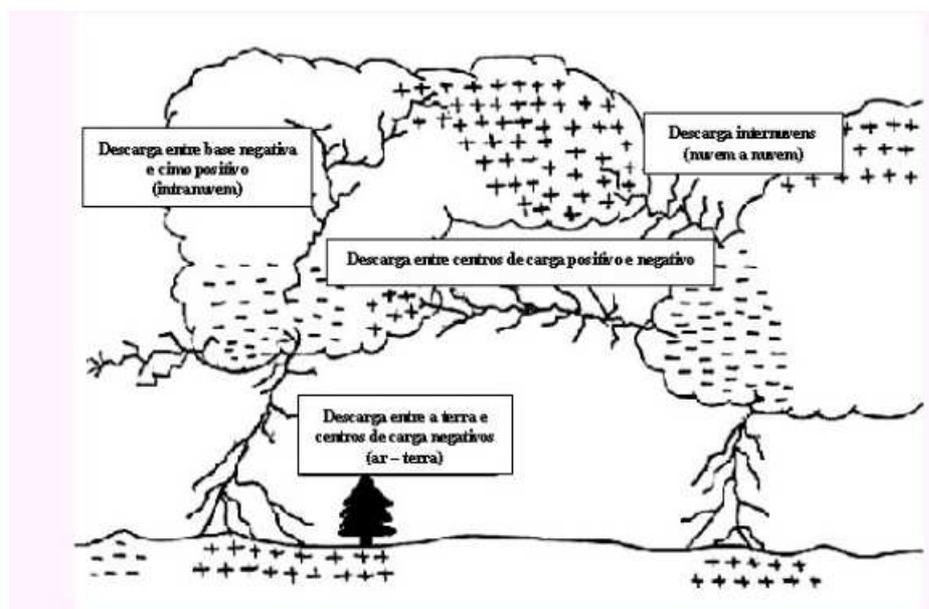
A maioria das descargas atmosféricas ocorrem entre nuvens, formando descargas paralelas à superfície do solo [24]. Isto se dá durante uma tempestade, onde nuvens se aproximam a uma distância tal que a rigidez do ar é quebrada pelo alto gradiente de tensão, com a conseqüente formação da descarga atmosférica, ocorrendo a neutralização das nuvens. Próximo do equador, da totalidade de raios de uma tempestade a maioria ocorrem entre nuvens do que entre nuvens e a Terra.

A maioria dos raios ocorre dentro da nuvem, enquanto que mais ou menos 20% ocorrem entre a nuvem e solo. Uma descarga pode aquecer o ar até 30.000°C, o que é cinco vezes mais quente do que a superfície solar. Esta temperatura extrema causa a expansão explosiva do ar. Isso inicia uma onda de choque que se torna trovão que sai em todas as direções de um relâmpago [24].

Cerca de 70% das descargas ocorrem dentro da própria nuvem ou entre nuvens. Embora sejam menos numerosas, detêm-se muito mais conhecimento sobre as descargas nuvem-solo, pois são estas que causam perturbações nos sistemas elétricos das concessionárias e representam riscos às pessoas [24].

Existem basicamente dois tipos de descargas atmosféricas, que são classificadas de acordo com o trajeto percorrido pela corrente elétrica [26]. As descargas em nuvem são aquelas que se iniciam dentro da nuvem. O destino final de tal descarga pode estar dentro da própria nuvem, sendo chamada neste caso de descarga intranuvem, pode estar em outras nuvens (descarga nuvem a nuvem) ou o destino final pode estar fora da nuvem, mas sem atingir o solo e sem atingir outra nuvem, ou seja, são descargas para o ar. A segunda classificação possível faz referência às descargas entre nuvem e solo, que pode ser do tipo nuvem-solo ou de solo-nuvem, conforme o sentido do movimento da carga que origina a descarga. Então o raio pode ter início na superfície da nuvem ou no chão. A maioria das descargas no solo são descargas nuvem-solo. Descargas como solo-nuvem são raras, ocorrem geralmente no topo de montanhas ou em estruturas mais altas. Grande parte das descargas do tipo nuvem-solo e solo-nuvem que ocorrem em

nosso planeta são negativos. Ilustrada na Fig. 3.5 as diversas formas de descargas, como as formações entre nuvens e diretas para o ar e solo.

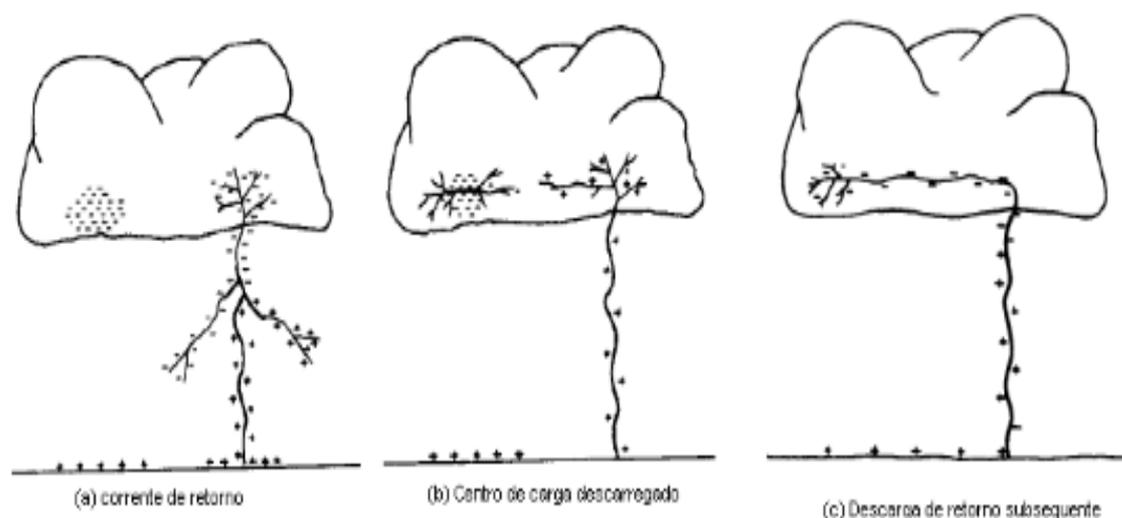


**Figura 3.5: Diversos tipos de descargas observadas. Descarga intranuvem, descarga nuvem a nuvem, descarga para o ar e a descarga para o solo. [93]**

Uma forma rara de relâmpagos, não incluída nas categorias acima, são os relâmpagos esféricos (*lightning balls*). Um relâmpago esférico é uma esfera luminosa que geralmente ocorre perto das tempestades, mas não necessariamente simultaneamente a um relâmpago normal. A luz emitida pode ser vermelha, amarela, azul, laranja ou branca e tem um diâmetro de 10 a 40 centímetros. Em geral, surgem próximos ao solo e mantêm um brilho constante até desaparecer. Os relâmpagos esféricos podem se mover ou ficar parados, podem ser silenciosos ou produzir estalos, durar poucos segundos ou alguns minutos e desaparecem lenta ou subitamente em silêncio ou produzindo um ruído. Embora eles tenham sido observados por mais de um século, não são bem conhecidos e ainda são considerados como um mistério [24].

### 3.4 FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A Fig. 3.6 ilustra o processo de formação da corrente de retorno gerada logo após a conexão da descarga da nuvem para o solo.



**Figura 3.6: Processo de formação da corrente de retorno e formação de descarga subsequente [26].**

Um piloto descendente, ou seja, o canal condutor ionizado, que caminha por saltos sucessivos em direção à terra origina-se a partir do rompimento do dielétrico formado pelo ar no momento em que o potencial de uma nuvem carregada relativamente à terra ultrapassa este valor [32].

Nota-se que os galhos das árvores formam pontas, que acumulam cargas elétricas, propiciando assim a ionização do ar. Quando os dois canais ionizados estão perto, a rigidez do ar é vencida, formando uma descarga piloto (líder), descarregando parte da carga da nuvem para o solo numa velocidade de 1500 km/s. Depois de formado a descarga piloto, existe entre a nuvem e a Terra um canal de ar ionizado, de baixa resistência elétrica, isto é, a nuvem está literalmente curto-circuitada à Terra. Deste modo ocorre a descarga principal, ou descarga de retorno, que vai da Terra para a nuvem através do túnel ionizado, com uma velocidade de 30.000 km/s. Na descarga de retorno, as correntes são elevadíssimas, da ordem de

2.000 a 200.000 A. Após estas duas descargas pode existir uma terceira, de curta duração, com correntes de 100 a 1000 A. Estas três descargas formam o chamado raio, que acontece em frações de microssegundos, dando a impressão da existência de apenas uma descarga [24].

A primeira etapa de um relâmpago nuvem-solo é chamada de líder escalonado. Sobre a influência do campo elétrico estabelecido entre a nuvem e o solo, as cargas negativas do líder escalonado se movem em etapas de dezenas de metros de comprimento. Cada etapa tem uma duração típica de um microssegundo, com uma pausa entre elas de 50 microssegundos. Após alguns milissegundos, o líder escalonado surge da base da nuvem, movendo-se em direção ao solo [24].

As descargas atmosféricas podem ser simples ou múltiplos, isto devido sua descarga de retorno poder ser constituída de uma ou várias descargas consecutivas. Cada descarga de retorno dura algumas centenas de microssegundos e, em relâmpagos múltiplos, o intervalo de tempo entre descargas de retorno consecutivas é tipicamente de 40 milissegundos. Quando o intervalo de separação entre as descargas de retorno é próximo de 100 milissegundos, a descarga é vista piscar no céu, porque o olho humano consegue identificá-las individualmente [24, 31].

Uma descarga pode ser formado por uma ou até dezenas de descargas de retorno. Em média ocorrem 5 descargas de retorno em um relâmpago nuvem-solo negativo, sendo que o número máximo já registrado é de 42 descargas. Frequentemente, uma corrente da ordem de 100 A percorre o canal por dezenas a centenas de milissegundos após a primeira descarga de retorno ou alguma descarga de retorno subsequente. Esta corrente é chamada de corrente contínua e tipicamente transporta 10 coulombs de carga para o solo [24].

Correntes contínuas produzem lentas e intensas variações de campo elétrico em medidas de campo elétrico próximas ao relâmpago e uma contínua não visível luminosidade do canal. Algumas vezes, durante a ocorrência de corrente contínua, a luminosidade do canal aumenta durante cerca de um milissegundo seguindo um momentâneo aumento de corrente, um processo denominado de componente M [24].

Descargas no solo podem também ser iniciados por líderes positivos descendentes, isto é, líderes positivamente carregados. Na realidade, líderes positivos descendentes correspondem a movimentos ascendentes de cargas negativas. A descarga de retorno resultante efetivamente transporta cargas positivas da nuvem para o solo. Neste caso, a descarga é chamado de descarga positiva. Em geral, não existem descargas de retorno subsequentes em descargas positivas, isto é, elas são descargas simples. O pico de corrente médio das descargas de retorno de descargas positivas, bem como a carga média depositada no solo, entretanto, são normalmente maiores do que os correspondentes valores para descargas de retorno de descargas negativas, de modo que eles geralmente causam maiores danos do que as descargas negativas [24, 31].

### 3.5 FORMA DE ONDA DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Com os dados requisitados nos inúmeros estudos e pesquisas, comprovou que a corrente de descarga de retorno possui apenas uma única polaridade, isto é, uma única direção. Também foi possível chegar à forma de onda típica de uma descarga atmosférica, como na Fig. 3.7:

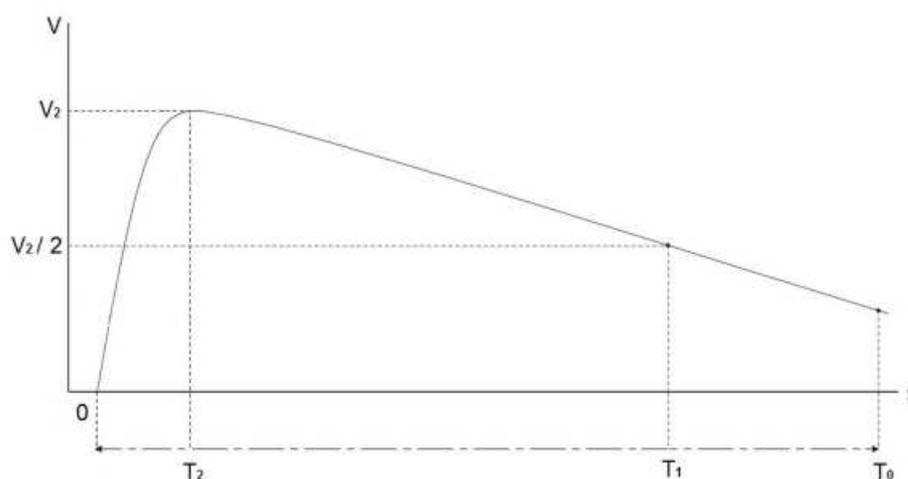


Figura 3.7: Forma de onda típica da tensão de uma descarga atmosférica [33].

Verifica-se que seu valor máximo de tensão  $V_2$ , ou Valor de Crista, é atingido

no instante T2, que pode variar entre 1 e 10  $\mu\text{s}$  e recebe o nome de Frente de Onda. Após o Valor de Crista, a tensão da descarga atmosférica começa a cair, atingindo uma intensidade de 50% de V2 em um intervalo de tempo T1, que varia de 20 a 50  $\mu\text{s}$  e recebe o nome de Tempo de Meia Cauda. A tensão então se torna praticamente zero ao final de T0, após um período que pode variar entre 100 e 200  $\mu\text{s}$  e recebe o nome de Tempo de Cauda. A onda de tensão característica da descarga atmosférica foi normalizada com 1,2  $\mu\text{s}$  para o valor de Frente de Onda e 50  $\mu\text{s}$  para o valor do Tempo de Meia Cauda. Essa onda de tensão também é conhecida como onda de 1,2 x 50  $\mu\text{s}$ . Já a onda de corrente da descarga atmosférica foi normalizada com 8  $\mu\text{s}$  para o valor de Frente de Onda e 20  $\mu\text{s}$  para o valor do Tempo de Meia Cauda. Conseqüentemente, a onda de corrente da descarga atmosférica é conhecida como onda 8 x 20  $\mu\text{s}$  [33].

A determinação dos valores típicos de tensão, corrente e tempo é de fundamental importância no dimensionamento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Além dos valores típicos que dizem respeito à forma de onda da tensão e corrente da descarga atmosférica, outras grandezas foram medidas e registradas e estão indicadas na tabela 3.1 [31].

**Tabela 3.1: Valores de uma descarga atmosférica**

Corrente	2 a 200 kA
Tensão	100 a 1000 kV
Duração	70 a 200 $\mu\text{s}$
Carga elétrica na nuvem	20 a 50 C
Potência liberada	1 a 8 bilhões de kW
Energia	4 a 10 kWh
Tempo de crista	1,2 $\mu\text{s}$
Tempo de meia cauda	50 $\mu\text{s}$
d(i)/dt	5,5 kA/ $\mu\text{s}$

Ainda de acordo com medições e estudos realizados por investigadores internacionais, ao analisar a curva de probabilidade da magnitude da corrente da

descarga atmosférica, pode-se dizer pela tabela 3.2 [31].

**Tabela 3.2: Valores da curva de probabilidade da magnitude da corrente**

70% das descargas atmosféricas excedem 10 kA
50% das descargas atmosféricas excedem 20 kA
20% das descargas atmosféricas excedem 40 kA
5% das descargas atmosféricas excedem 80 kA

## 4 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES

Quando tratamos de descargas atmosféricas em árvores, três situações podem ocorrer: A árvore permanecer intacta, sofrer um dano parcial e/ou sua completa destruição.

### 4.1 RELAÇÃO ENTRE ÁRVORES E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS



**Figura 4.1: Ilustração hipotética de uma descarga atmosférica em uma árvore. [94]**

Diariamente em nosso planeta, milhares de árvores são atingidas por raios. A árvore poderá ou não sobreviver à descarga, dependendo de suas características. Árvores são atingidas constantemente por raios por geralmente serem os objetos mais altos num determinado lugar [24]. Diferentes árvores podem ter maior ou menor facilidade de serem atingidas, depende de:

- Quantidade de seiva no seu interior, já que a seiva dentro das árvores possui

melhores características de condutividade do que o ar.

- Profundidade de suas raízes.
- Ambientação onde a árvore se localiza, no qual a umidade tem forte influência nas consequências da descarga atmosférica na árvore.

As suas raízes tem importante função quanto ao o que pode ocorrer depois de descarga sofrida. Quando a descarga deposita sua carga ao solo, gera um modelo de curto circuito entre nuvem e solo e, dependendo da profundidade da raiz o poder de aterramento influencia no dano na árvore:

- Pode dissipar a energia ao longo do solo.
- Dano parcial da raiz, que pode perder parte da sua estrutura e/ou sofrer danos que possa inviabilizar o certo funcionamento da raiz.
- Dano total da raiz que leva a morte da planta quando não se percebe o dano causado sob o solo.

Posteriormente a planta apresenta os sinais de perda de vida uma vez que se modifica a aparência das folhas e seu tronco se torna oco e mais propício a abrigo de parasitas e pragas.

Se o dano é notado a tempo, é possível salvar a planta com um tratamento à base de adubo nitrogenados, enriquecidos com minerais e a poda se necessário. Geralmente quando as raízes são totalmente danificadas a condenação da planta é dada como certa [34, 38].

Referente aos danos causados por descargas atmosféricas, pode ser feita uma análise em duas perspectivas, a macroescala e a microescala [34]. A macroescala essencialmente refere-se a aparência da árvore e sua estrutura, sem analisar as modificações químicas e de estrutura acontecidas na madeira. Os efeitos da microescala são nos parâmetros das mudanças químicas e físicas do material em si, sendo mais efetivo, a microescala está nos âmbitos que podem ser simulados em laboratório (com uma perda de acurácia), logo para estudos em parâmetros em condições reais a nossa análise é feita na perspectiva em macroescala [34].

Reynolds, Wadsworth e Lindh [35, 36, 37] declararam em um estudo feito nos Estados Unidos, que a descarga atmosférica é a maior responsável pela morte e perda de volume em certas áreas de florestas. A associação de árvores com descargas atmosféricas é uma análise feita em cima dos danos causados pela

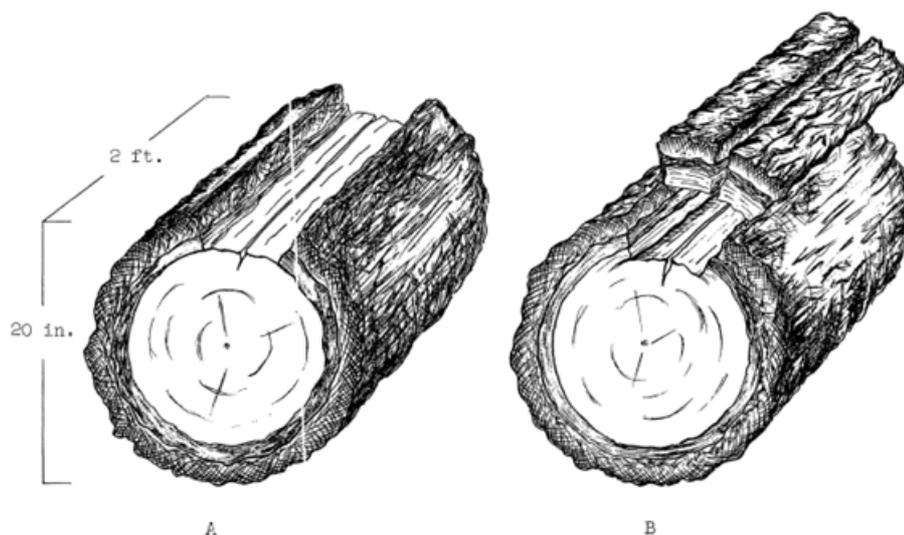
descarga. Quando uma descarga atinge uma árvore, três coisas podem ocorrer: ela permanece intacta, pode ter a casca do tronco parcialmente removida ou pode ser totalmente destruída [24], conforme detalhes a seguir.

## 4.2 CONSEQUÊNCIAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES

Os efeitos de uma descarga atmosférica em uma árvore pode variar desde um dano não perceptível até sua total destruição [38]. Em casos de dano mínimo, pode evidenciar pelo tronco da árvore através de cicatrizes ou marcas deixadas na casca, nas raízes fica mais difícil a localização do dano, quando há dano considerável, muitas vezes, o chão ao redor de uma árvore atingida por descarga atmosférica irá mostrar rachaduras que seguem as raízes daquela árvore. Plantas pequenas perto da base do tronco pode ser morta. As folhas podem murchar imediatamente após a ocorrência da descarga atmosférica, isto pelo efeito do calor da descarga, e sem contar que outras vezes ramos podem ser cortados e troncos podem ser partidos ao meio. Frequentemente, a descarga arranca uma estreita faixa de casca ao longo do tronco, deixando um sulco (Figura 4.2). Esta é a característica mais comum de dano à árvore [39, 40].

### 4.2.1 PERDA DE MADEIRA E PERDA DE CASCA

Quando se analisa uma perda de casca e/ou de madeira de uma árvore atingida por uma descarga atmosférica direta, observa-se que há uma maior incidência das árvores perderem sua casca do que a madeira ou parte dela. As características da árvore, determinam o quanto a árvore pode suportar ou não a descarga atmosférica [55]. Descargas atmosféricas somente removem uma tira da planta viva e a casca morta exterior da maioria das árvores, mas ao arrancar, as ranhuras mais profundos causam a perda de madeira. Dois tipos de danos está ilustrados na Fig. 4.2:



**Figura 4.2: A, típica ranhura na perda de casca; B, ranhura de perda de madeira, mostrando a madeira removida [55]. Note que cada pedaço de tronco tem uma rachadura ao longo do eixo da ranhura.**

As cicatrizes deixadas nas árvores pela descarga atmosférica tendem a seguir um determinado padrão de configuração, são classificados com o alinhamento da cicatriz com o eixo vertical do tronco da árvore [55]. A fim de ser classificado como espiral, a ranhura deve pelo menos dar uma revolução completa no tronco ao redor da árvore. Cicatrizes oblíquas tendem a ser espirais mas não chegam a fazer uma revolução completa.

Dentro do estudo de Taylor [55], a maioria das árvores apresentaram uma rachadura ao longo do tronco, isto geralmente percorreu todo o comprimento da cicatriz e quase sempre ocupou o centro de largura da cicatriz, tal como ilustrado na Fig. 4.3:



**Figura 4.3: Porção mais baixa de uma árvore seriamente danificada, mostrando a rachadura ao longo do eixo da cicatriz [55].**

Alguns fatores intrínsecos são determinantes para a análise da dimensão da gravidade ocorrida na árvore após a descarga atmosférica, e entre esses fatores, os fatores agravantes do dano. Este estudo lida com atributos que podem estender os danos em determinada árvore atingida.

#### **4.2.2 SEIVA CONTIDA NA ÁRVORE**

Descargas atmosféricas muitas vezes leva um curso em espiral, seguindo o grão da madeira, que por vezes é muito irregular [41]. Em alguns casos, a descarga segue a linha de menor resistência até a zona de câmbio, queimando um pequeno canal para baixo o tronco, o que muitas vezes resulta na formação de uma cicatriz na casca. Árvores com alta concentração de seiva torna-se melhores condutores de eletricidade do que aquelas com menor conteúdo de seiva [39]. Portanto estas árvores alta de resina ( pinho, abeto vermelho, abeto, etc) podem ser mais susceptíveis a um aquecimento interno e explosão.

A partir de observações em árvores danificadas na Bélgica [42] observa-se o limite superior da cicatriz mais frequentemente coincide com a base da coroa. Também observou que a cicatriz muitas vezes não chega ao nível do solo. Thompson, Esquivá e Murray relataram que sulcos formados pela seivas das árvores são de formas contínua ou descontínua [40, 43].

#### **4.2.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA**

A madeira morta é geralmente um mau condutor de eletricidade. O seu isolamento tem propriedades muito utilizado em sistemas de transmissão de energia. Mas madeira viva não pode ser considerado um bom isolante. Uma árvore viva é muito melhor condutor que o ar [44]. Assim, uma árvore é frequentemente o terminal de terra da descarga atmosférica inferida. Uma medida da capacidade de uma árvore para conduzir eletricidade é sua resistência de corrente contínua. Defandorf [44] mostrou que a resistência óhmica à terra de uma tulipeira (*Liriodendron tulipifera*) aumentou acentuadamente a partir do nível do solo para pontas das folhas, longitudinal mas, a resistência dos ramos variou inversamente com a temperatura [44].

Outros fatores que influenciam a resistividade de corrente contínua da madeira são teor de umidade [44, 45, 46], alinhamento das fibras, e tipo de madeira [47]. Três escritores concluíram que uma lâmina contínua de água de chuva no tronco da árvore tornou-se eletrolítico e forneceu um caminho de baixa resistência à terra sem danos à árvore [48, 49].

#### **4.2.4 CASCA E MADEIRA**

A espessura da casca irregular impede o movimento da corrente contínua ao longo do tronco, resultando em danos graves [42, 46]. Vanderlinden notou que a descarga remove a casca áspera em tiras uniformes, mas remove a casca lisa em placas de dimensões irregulares. Fisher, Covert e Thompson alegaram que a madeira doente tinha alta resistência elétrica e, portanto, susceptível a dano grave [43, 50, 51].

Por outro, Defandorf relatou valores de resistência baixos para madeira doente e declarou que iria ser difícil prever o efeito de descargas atmosféricas em árvores inadequadas [44].

#### **4.2.5 VAPORIZAÇÃO DA UMIDADE**

Uma alta condutividade e chão molhado significa que a árvore funciona como um bom condutor descendente para a descarga atmosférica, portanto, seria mais provável de ser atingido do que uma árvore equivalente. A umidade também pode ter o efeito de fazer a superfície da árvore do percurso de corrente preferido em vez do que o interior da árvore, resultando em diminuição danos para o material de madeira [44, 45, 46]. Assim, mesmo que a probabilidade da descarga tenda a aumentar, tal não é, a priori, o como a probabilidade de danos seria afetada. Agora quando temos a presença dessa umidade no interior da árvore, a corrente passa por dentro do tronco, conseqüente do efeito Joule da corrente, o calor intenso libertado converte a umidade presente em vapor de alta pressão e a expansão resultante desse processo rompe o tronco [46].

#### **4.2.6 PRESSÃO DO FLUXO DE CORRENTE**

A vaporização da umidade dentro da árvore contribui para o dano, assim como a pressão criada pela descarga. A passagem de uma descarga atmosférica faz com que uma pressão seja desenvolvida, que é dependente da quantidade de corrente na descarga. Ao gerar calor, que faz com que a pressão seja maior. Quanto maior for o efeito de calor, mais violenta é o rompimento da madeira. A violência em si é alguma medida da taxa que a corrente sobe [52].

#### **4.2.7 DISSOCIAÇÃO E DESTILAÇÃO**

Uma descarga atmosférica pode quebrar moléculas de água na árvore, formando hidrogênio livre e oxigênio [53]. A U. S. Bureau of Standards estimou que esta mudança de estado no hidrogênio faria produzir pressões muito maiores do que 1300 atm no interior da madeira [48]. A Bureau tomou conhecimento da possibilidade que o hidrogênio livre, o oxigênio e hidrocarbonetos podem ser

destilado a partir do material lenhoso da árvore, por uma descarga atmosférica.

#### **4.2.8 REPULSÃO DE ELÉTRONS**

A repulsão eletrostática mútua entre elétrons causa danos às árvores. Um movimento rápido de elétrons colide na secção média da árvore, espalhando os danos para cima e para baixo do tronco da árvore [54].

#### **4.2.9 RAÍZES**

As raízes participam no processo final da descarga atmosférica, quando esta atinge o canal, passando por dentro do tronco da árvore. Visualmente é bem difícil observar o dano causado na raiz, já que a raiz está sob o solo. Um diagnóstico é baseado em uma possível rachadura no solo, indicando que na região houve alguma alteração advinda de dentro do solo para a superfície. As possibilidades de identificar os danos nas raízes pode ser por meio das rachaduras no solo causados pela explosão das próprias raízes ou do tronco. A pressão por passagem de corrente e vaporização da umidade interna podem causar a explosão do tronco. A saúde da árvore ao longo do tempo, deve ser avaliada, pois a raiz pode sofrer uma desnaturação, prejudicando sua função de absorver nutrientes, levando a planta à morte e tornando-a uma estrutura propensa a proliferação de pragas e fungos oportunistas [38]. Se for observada a deficiência com antecipação, ainda há métodos para a tentativa de recuperação da árvore como aplicação de remédios para evitar a proliferação de pragas e a utilização de adubo enriquecido de nitrogenados e minerais.

Uma vez que os danos ao sistema radicular pode ser muito mais extensa do que a visível danos ao tronco e ramos, em torno de um ano deve-se observar a resposta da árvore para a descarga antes de gastar dispendiosos tratamentos. As raízes das árvores atingidas por descargas atmosféricas devem ser examinados para extensão da lesão. E se mais de 50 % do sistema radicular aparece em seguida, procedimentos de manutenção da árvore adequada deve ajudar a recuperar à árvore e manter seu vigor [55].

### 4.3 EXPLOSÃO E QUEIMADURAS DE ÁRVORES POR DESCARGA ATMOSFÉRICA

Não existe uma métrica correta para se medir o dano de uma descarga atmosférica em uma determinada árvore. Entretanto, a divisão em perda de casca, perda de madeira e danos por explosão, é muito útil. A classificação foi originalmente feita para árvores verdes. No entanto, alargaram a definição para espécies de árvore de folhas secas. Em um caso de perda de casca, uma tira de casca é arrancada da árvore, mas nenhuma madeira do interior é retirado. Com efeito, o dano é causado por uma rápida expansão do material úmido, e a corrente mais provável não ter penetrado na madeira no interior [55].

Seguindo a classificação, observa-se nas figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, alguns exemplos dos tipos de danos que podem ocorrer quando uma árvore sofre uma descarga atmosférica.



Figura 4.4: Perda da casca do abeto por descarga atmosférica. [95]

A Fig. 4.4 mostra um abeto que perdeu uma parte de sua casca devido a ação da descarga atmosférica, observa-se na figura que a descarga incide em um ponto mais alto da árvore e percorre até próximo de sua base.



**Figura 4.5: Perda de casca com uma perda menor de madeira de um vidoeiro por descarga atmosférica. [95]**

A Fig. 4.5 mostra um vidoeiro que teve uma perda de casca e uma perda significativa de madeira próximo a sua base acompanhada de uma cicatriz em seu tronco causado pela descarga atmosférica.



**Figura 4.6: Perda de casca não usual, a árvore também apresenta rachaduras ao longo do tronco. [95]**

A Fig. 4.6 apresenta um abeto que sofreu uma perda considerável da casca tendo também uma fissura mais profunda na madeira, essas fissuras dependendo de sua profundidade pode comprometer a sustentabilidade mecânica da árvore.



**Figura 4.7: Perda de madeira do abeto. [95]**



**Figura 4.8: Abeto sofreu um dano por explosão de uma descarga atmosférica. [95]**

A Fig. 4.8 ilustra um dano na escala entre os mais graves que podem ocorrer em uma árvore, a explosão que pode partir a planta em dois ou mais pedaços, pode inclusive partir até a sua raiz levando a planta a sua destruição.



**Figura 4.9: Árvore após sofrer uma descarga atmosférica [85]**

A Fig. 4.9 foi feita para um trabalho realizado na Universidade de Brasília [85], dez dias após a árvore sofrer uma descarga atmosférica, a árvore não apresentou um dano grave, perdendo apenas uma parte de sua casca.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ÁRVORES

A maioria das inferências sobre os efeitos das descargas atmosféricas em árvores têm sido com base em danos observados. A extensão dos danos raramente foi medido. Mais frequentemente, trabalhadores criaram figuras de linguagem para descrever o danificado. A ação da descarga atmosférica em si tem uma direta influência sobre o dano resultante para árvores [55]. A intensidade de corrente ou tensão irá afetar o tamanho do dano à árvore. Obviamente, quanto maior a tensão maior o potencial destrutivo. A descarga pode dispersar a ponto de não causar visível lesão mecânica à árvore, mas uma área próxima pode ser morta pelo seus efeitos.

Os pontos circundantes perto da árvore pode influenciar a ação direta da descarga. A árvore pode sofrer danos mínimos porque está "sob a influência" da descarga, mas não diretamente atingido. "Sob a influência" significa dentro do campo de força elétrica da descarga, mas não em contato direto com a própria descarga[56].

Este mesmo fenômeno ocorre quando as pessoas estão sob árvores para abrigo durante as tempestades. Se a árvore é atingida por uma descarga, a pessoa que estiver por baixo da árvore pode sofrer danos severos, isso ocorre porque o indivíduo está dentro do campo de força elétrica dessa descarga, e os seres humanos são corpos bons condutores de eletricidade. A ação imediata de socorro afasta o risco de morte. No entanto, uma pessoa atingida diretamente por uma descarga atmosférica certamente não sobrevive [56].

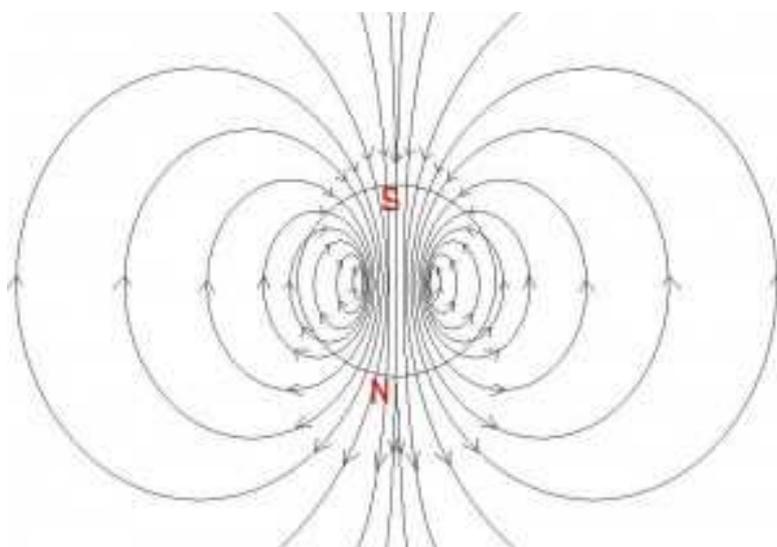
## 5 EFEITOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Quando temos uma descarga atmosférica em uma árvore vale também seus aspectos quanto suas propriedades eletromagnéticas regidas pelas equações de Maxwell e seus efeitos de campo.

### 5.1 CONCEITOS BÁSICOS

Praticamente toda a troca de energia entre a Terra e o resto do Universo ocorre por radiação, que é a única que pode atravessar o relativo vazio do espaço. O sistema Terra e atmosfera estão constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria radiação para o espaço. Numa média de longo prazo, as taxas de absorção e emissão são aproximadamente iguais, de modo que o sistema está muito próximo ao equilíbrio radiativo. A radiação também tem papel importante na transferência de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera e entre diferentes camadas da atmosfera.

A radiação eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero absoluto. Assim, todo corpo com temperatura absoluta acima de zero pode ser considerado como uma fonte de energia eletromagnética. O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre [57].



**Figura 5.1: Estrutura do campo magnético [96]**

Radiação é o processo de transferência de energia por ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são constituídas de um campo elétrico e um campo magnético que variam harmonicamente, um perpendicular ao outro e ambos, perpendiculares à direção de propagação. A radiação eletromagnética, pode ser observada sob diferentes formas, em diferentes faixas espectrais: visível, infravermelho, ultravioleta, ondas rádio, etc. A radiação é um fenômeno natural que pode acontecer de variadas formas. Existem dois tipos: a não ionizante, que emite um baixo índice de energia e a ionizante, na qual o teor energético tem a capacidade de arrancar elétrons do átomo [57, 58].

A irradiação pode ser classificada como a propagação de energia que não necessita de um meio material. O corpo que emite é chamado de emissor e o que recebe é denominado receptor. A irradiação tem um significado parecido ao da palavra radiação, mas ambas têm sentidos diferentes. A irradiação é a exposição à radiação, o corpo que recebe radiação, é um corpo irradiado [59].

Do total da radiação solar incidente nos limites da atmosfera, chega ao solo cerca de 4%, aproximadamente a metade como radiação direta e a outra metade como radiação espalhada pela atmosfera e pelas nuvens. Naturalmente, não se deve entender que toda esta energia esteja disponível para o homem. Em linhas gerais, pode-se estimar que pelo menos 30% da energia solar que atinge a Terra

seja utilizada para a evaporação das águas, ao passo que uma modesta porcentagem (entre 0,3 e 1,5%) é utilizada para síntese clorofiliana. Cerca de 0,3% é utilizada para a produção de ventos e das correntes marítimas.

## 5.2 PROPAGAÇÃO DE ONDA E EQUAÇÕES DE MAXWELL

### 5.2.1 Equações de Maxwell

A teoria do eletromagnetismo descreve as interações elétricas e magnéticas entre partículas, intermediadas por campos. O objetivo desta teoria é interpretar como os campos são criados, como se comportam no espaço e no tempo, quais são seus efeitos [60]. Parte da importância do eletromagnetismo deriva do fato de que com esta teoria é possível compreender, ao menos em princípio, um número muito grande de fenômenos que ocorrem no universo.

As leis do eletromagnetismo são expressas matematicamente pelas quatro equações de Maxwell. Na forma diferencial, tem-se:

$$\text{Lei de Faraday} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5.1)$$

$$\text{Lei de Ampère} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5.2)$$

$$\text{Lei de Gauss-campo elétrico} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (5.3)$$

$$\text{Lei de Gauss-campo magnético} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5.4)$$

As equações de Maxwell pretendem abranger todos os tipos de fonte de campo elétrico e campo magnético. Assim, de acordo com elas, qualquer campo elétrico que exista na natureza só pode ter sido produzido por cargas elétricas ou variação temporal do campo magnético. Analogamente, apenas correntes elétricas e campos elétricos variáveis com o tempo são capazes de gerar campos magnéticos [60].

Conceitualmente, as equações de Maxwell descrevem como as cargas elétricas

e correntes elétricas agem como fonte dos campos elétrico e magnético. Além disso, as equações também descrevem como um campo elétrico que varia no tempo gera um campo magnético que também varia no tempo, e vice-versa [60, 61].

### 5.2.2 Propagação de ondas

A lei de Faraday combinada com a lei de Ampère prediz a existência de ondas eletromagnéticas [60]. Considere-se que exista campo eletromagnético no vácuo e esse campo tenha sido criado por uma flutuação de carga em algum ponto exterior à região de interesse, que está limitada pela superfície  $\Sigma$ , conforme ilustrado na Fig. 5.2 flutuações de carga podem ser produzidas de várias formas, pode haver, a geração de ondas de radiofrequência. Alternativamente, os elétrons em um átomo ou molécula, que é parte de um gás em um recipiente, podem estar realizando transições entre níveis de energia sob alguma influência externa, como em uma lâmpada ou em um laser [62]. Nesse caso, a perturbação eletromagnética pode se manifestar na forma de luz. Todos esses campos, oriundos de uma larga gama de alternativas de flutuações de carga, são governados pelas equações de Maxwell [61, 62].

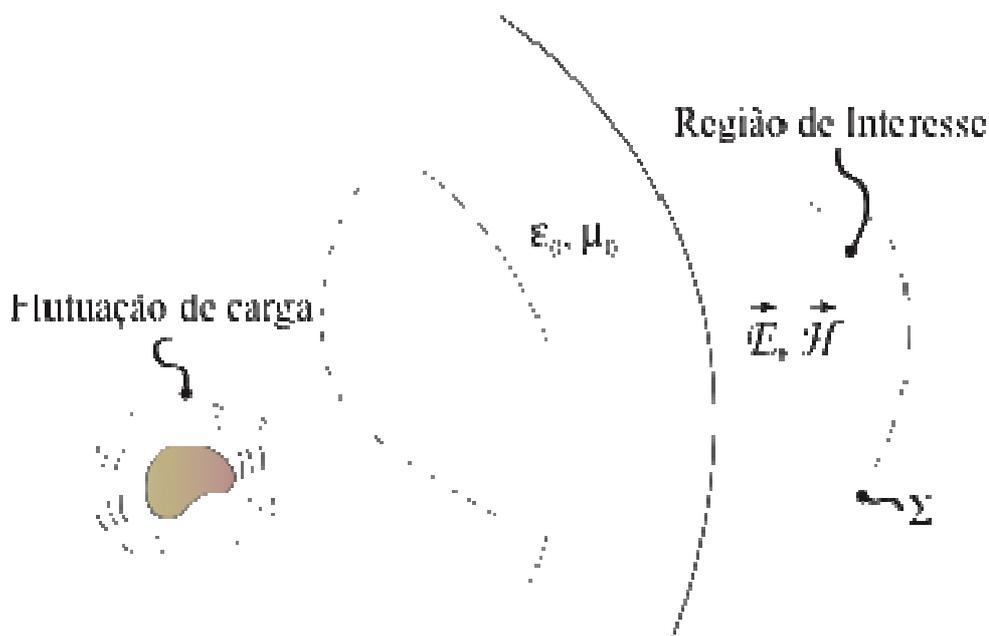
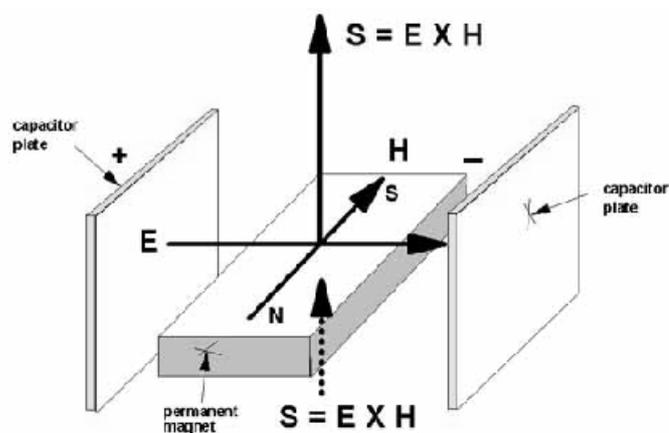


Figura 5.2: Ilustração do efeito eletromagnético de uma flutuação de carga [97]

### 5.3 ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E VETOR POYNTING

Na perspectiva do conceito de potência ou energia no campo eletromagnético, considera-se o vetor de Poynting para análise da existência dessa energia. Diferente dos circuitos elétricos a parâmetros concentrados, onde a energia e potência estão localizadas nos elementos, é notável em relação aos campos eletromagnéticos que a energia armazenada está distribuída através do campo, não estando concentrada em um ou mais pontos [60].



**Figura 5.3: Densidade de fluxo de energia (Vetor Poynting) [99]**

A potência também deve ser transmitida em um campo. Observemos que a unidade do vetor intensidade de campo elétrico é V/m, enquanto a unidade vetor intensidade de campo magnético é A/m. Assim, o produto de suas magnitudes tem unidade de W/m<sup>2</sup>, a qual é uma densidade de potência. Claramente, o fluxo de potência deve ter uma direção, e o produto escalar não possui nenhuma direção. Portanto, optando pelo produto vetorial, define-se o vetor densidade de potência como:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad [W/m^2] \quad 5.5)$$

Durante sua propagação, a onda eletromagnética transporta energia e momento linear [60]. A quantidade física que descreve esse transporte é o vetor de Poynting que fornece a direção e sentido da propagação da onda e cujo módulo é a magnitude do fluxo de energia por unidade de tempo e da área perpendicular à direção de propagação [60, 61].

A diferença entre os campos magnéticos e circuitos elétricos a parâmetros concentrados é que a potência e a energia armazenada estão distribuídas por todo o campo eletromagnético.

### 5.3.1 Espectro eletromagnético

De forma geral, os vários tipos de ondas eletromagnéticas diferem quanto ao comprimento de onda, fato esse que modifica o valor da frequência, e também da forma com que elas são produzidas e captadas. No entanto, todas elas possuem a mesma velocidade próxima a velocidade da luz, e podem ser originadas a partir da aceleração de cargas elétricas [57, 63].

## 5.4 EFEITOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA VEGETAÇÃO

Os objetos da superfície terrestre como a vegetação, a água e o solo refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características bio-físico-químicas. O estudo da interação seres vivos e campos eletromagnéticos envolve fenômenos bioelétricos, com atuação da magnetobiologia e do bioeletromagnetismo [64]. Como o objetivo dessa monografia é a análise do efeito da radiação sobre árvores e sua vegetação próxima, cabe ao nosso interesse o estudo em cima da magnetobiologia. A magnetobiologia analisa os efeitos que os campos magnéticos podem produzir sobre os seres vivos. Esta área comporta uma vasta gama de frequências e intensidades de campos magnéticos representada por todo o espectro eletromagnético. É uma resposta aos campos externos [64].

Há de se considerar que um dossel é constituído por muitos elementos da própria vegetação, como folhas, galhos, frutos e flores. Um fluxo de radiação incidente sobre qualquer um destes elementos estará sujeito a dois processos: espalhamento e absorção. O processo de espalhamento pode ser dividido em dois sub-processos: reflexão e transmissão através do elemento. O destino do fluxo radiante incidente sobre um destes elementos é então dependente das características do fluxo (comprimentos de onda, ângulo de incidência e polarização) e das suas características físico-químicas [65].

A radiação eletromagnética resultante da passagem da alta corrente elétrica da descarga atmosférica na árvore pode influenciar a aparência da vegetação incidida. De todos os elementos constituintes da vegetação, a folha constitui o principal processo de interação com a radiação eletromagnética [65]. Para uma melhor compreensão das características de refletância da radiação eletromagnética incidente sobre uma folha é necessário o conhecimento de sua composição química, principalmente tipo e quantidade de pigmentos fotossintetizantes, e de sua

morfologia interna.

Uma folha típica é constituída de três tecidos básicos que são: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular. A folha é então coberta por uma camada de células protetoras epidérmicas, na qual muitas vezes desenvolve-se uma fina e relativamente impermeável superfície externa. Abaixo da epiderme encontra-se o mesófilo fotossintético, o qual por sua vez é frequentemente subdividido numa camada, arranjadas perpendicularmente à superfície da folha, que formam o parênquima. As células do parênquima são ocupadas por seiva e protoplasma [57, 65].

A terceira característica estrutural da folha é o tecido vascular. No tecido vascular a rede de tecidos do sistema vascular não serve somente para suprir a folha com água e nutrientes do solo, mas também constitui a passagem pela qual fluem os produtos da fotossíntese que são produzidos na folha, para as demais partes da planta. As estruturas das células que compõem os três tecidos das folhas são muito variáveis, dependendo da espécie e das condições ambientais.

O comportamento espectral de uma folha é função de sua composição, morfologia e estrutura interna. Desde que as características da folha são geneticamente controladas, existirão portanto diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente distintos. Levando em consideração o conceito da refletância interna numa folha e os conhecimentos do espectro de absorção da clorofila [66], desenvolveram uma teoria sobre a trajetória da radiação eletromagnética dentro de uma folha, a qual é válida até hoje. Os autores basearam sua teoria na estrutura interna das folhas e na refletância potencial das superfícies. Segundo eles, a trajetória da radiação eletromagnética se daria ao longo de vários meios, sendo estes compostos pela água, ar, membranas celulares [66].

Uma vez que a folha é o principal elemento da vegetação sob o ponto de vista do processo de interação com a radiação eletromagnética, espera-se que muito do que foi exposto referente às características de refletância das folhas, também seja válido para os dosséis. De fato, quando comparadas as curvas de refletância de uma folha verde sadia com as medições espectrais de dosséis, estas apresentam formas muito semelhantes [58]. Assume-se que a densidade dos elementos da vegetação é

uniforme, o que é caracterizado pelo Índice de Área Foliar (IAF), que representa a razão entre a área do elemento e a área no terreno. Este índice é um dos principais parâmetros da vegetação e é requerido em modelos de crescimento vegetal e de evapotranspiração, é ainda relacionado à biomassa, logo o IAF é uma variável biofísica computado ao se considerar a superfície de apenas uma das faces das folhas [58].

## 6 A DESCARGA ATMOSFÉRICA E O SOLO

Uma vez que a descarga atmosférica chega ao solo. Isto significa que seu percurso alcança a parte que ela se dissipa, depositando a carga nela contida, modificando o solo pela sua corrente impulsiva.

### 6.1 EFEITOS NO SOLO

As descargas atmosféricas constituem uma frequente fonte de distúrbios nos sistemas de energia elétrica. Sua influência é particularmente importante no caso de incidência direta em árvores, onde a injeção de correntes, com elevadas amplitudes, determina o estabelecimento de sobretensões que podem levar a morte da planta e seres vivos que estiverem no local da descarga, assim como causar danos em componentes de sistemas.

Com isso, ganham importância ações de engenharia que possam minimizar os efeitos danosos das descargas atmosféricas. Dentre os diversos componentes de um sistema elétrico, os aterramentos elétricos se destacam como um elemento capaz de contribuir significativamente para a limitação dos valores das sobretensões geradas quando da incidência de uma descarga. Para realizar esta contribuição, o aterramento deve apresentar baixo valor de impedância. Tal fato justifica a pesquisa de técnicas para melhoria do aterramento, de forma a maximizar seus efeitos positivos.

Dentre os aspectos de interesse na análise do comportamento de árvores frente a descargas atmosféricas, destaca-se a influência da intensidade da corrente de descarga. Quando tal corrente é muito elevada, é comum a ocorrência do fenômeno de ionização do solo, que tendo a planta como um eletrodo de aterramento, cujo efeito pode resultar na explosão da árvore. O efeito de ionização no solo tem sido investigado há anos [67, 68, 69]. No que diz respeito às correntes de descargas atmosféricas, este efeito pode ser relevante para diminuir a impedância de aterramento, quando correntes muito elevadas são injetadas em eletrodos concentrados [70].

Um dos parâmetros fundamentais para a avaliação da intensidade deste efeito é o chamado Campo Elétrico Crítico ( $E_c$ ). Este corresponde ao campo limiar, quando o efeito se torna presente no solo. Há muita controvérsia sobre o valor adequado a ser adotado para este parâmetro nas avaliações numéricas e analíticas da ionização do solo. O problema é que a intensidade deste efeito é extremamente dependente deste valor [67, 68, 69, 70]. Basicamente duas diferentes propostas foram apresentadas por pesquisadores que haviam investigado tal efeito [69, 70]. O primeiro deles sugere um valor da ordem de 0,9 MV/m para  $E_c$  [69]. É com base nos resultados [69] que avaliou este campo por meio da aplicação de correntes impulsivas em amostras de solo preenchendo a lacuna entre os discos condutivos em paralelo. A outra escola sugere que esse valor é muito inferior (cerca de 0,3 MV/m). Ele é baseado nos resultados das medições feitas por diversos autores, em duas diferentes condições: (i) ensaios no terreno, que consiste em injetar corrente impulsiva em barras verticais colocadas em solos naturais e (ii) em ensaios laboratoriais que consistem em injetar corrente impulsiva em amostras preenchendo o espaço entre condutores cilindros coaxiais. Este último valor é mais comumente usada em avaliações de proteção contra raios.

Além disso, vários modelos foram propostos para explicar o processo de ionização ou para calcular o seu efeito sobre a resposta dos eletrodos de aterramento, com o tradicional trabalho realizado [68], ou algumas outras abordagens, tais como as que supõem um aumento equivalente do raio do eletrodo para calcular a redução da impedância devido à ionização [71]. Algumas propostas recentes atribuem um valor de resistência para a zona ionizada em torno do eletrodo [72]. Definitivamente, o mais importante é estabelecer referências confiáveis para o campo elétrico crítico.

## 6.2 A FÍSICA DA IONIZAÇÃO DO SOLO

É bem conhecido que os fenômenos de ionização do solo pode ocorrer quando em determinado eletrodo é injetado por uma corrente de alta intensidade. O processo de ionização começa logo depois que a corrente flui para dentro do solo, o

que é elevado o suficiente para deixar o campo elétrico sobre os eletrodos superar a resistência elétrica, assim modificando o comportamento do eletrodo diante à ausência de ionização do solo. Uma vez que a ionização do solo é um processo não linear e complicado, algumas aproximações são adotadas. O solo muitas vezes é considerado como homogêneo e isotrópico.

O fenômeno de ionização é um processo local que começa nessas áreas em que a densidade da corrente vaza no solo alcançando maiores valores. A maioria dos solos consiste de uma mistura pequena de grãos, água e ar [73]. A água e o ar preenchem o vazio entre os pedaços sólidos, formando uma grande e fechada rede. A interligação de camada de água gera canais condutores, que são a causa do alto valor de condutividade do solo. Com efeito, a condutividade elétrica do solo é um parâmetro muito variável, dependendo do tamanho e da distribuição das partículas não condutoras, na quantidade de água e da quantidade de sal dissolvido na água. Os grãos têm dimensões muito diferentes e geralmente têm formas irregulares. Portanto, as lacunas de ar do solo tem forma altamente irregular, especialmente se as peças vizinhas têm bordas afiadas. Isto faz o campo elétrico máximo dentro das bolhas de ar dentro do solo significativamente maior do que o campo elétrico máximo dentro dos espaços vazios de um intervalo de ar tendo o mesmo tamanho médio [73].

Assim, o aumento na área de vazios dentro do solo podem ser razoavelmente consideradas como a causa para o início do processo de ionização no solo.

De acordo com essas considerações, o processo inicia-se quando o campo elétrico pressiona o ar em espaços entre os grãos do solo, o que se torna grande o suficiente para ionizar o ar no vazio. Em seguida, o mecanismo de desagregação do solo pode ser atribuído às descargas elétricas nos entreferros aprisionado no solo.

Essas descargas espalhadas a partir da superfície do eletrodo pode ser mais ramificadas [74, 75]. O processo de desagregação pode ser separado em duas fases. O primeiro, a fase de preionização, que consiste na propagação de filamentos através das lacunas de ar, o rearranjo subsequente da carga nos filamentos, e dado o aquecimento e a expansão destes canais. Durante esta fase, a temperatura do canal pode chegar a alguns milhares de graus Celsius. Na segunda fase, a corrente

e a temperatura do canal aumenta, e a ionização térmica considerável faz a faísca de partida.

O modelo proposto em [76], parece ser muito perto do mecanismo físico do fenômeno de ionização do solo. No entanto, em [76], algumas hipóteses sobre a forma da região ionizada em torno dos eletrodos são introduzidos, e apenas a impedância de sobretensão global é levada em consideração, com referência a um aterramento concentrado.

Por causa do equilíbrio entre a geração de calor e a dissipação de calor dos canais, o ar aprisionado no solo pode atingir valores muito alto de temperatura [69]. Vários estudos estão disponíveis na literatura científica sobre propriedades termodinâmicas e coeficientes de transporte de ar em uma ampla gama de valores de temperatura e pressão, a que se refere a modelos calculados ou investigações experimentais. A partir destes dados, é possível obter a condutividade do ar no interior destes canais com uma função de temperatura [77, 78, 79].

### 6.3 DISRUPÇÃO DO SOLO

O fenômeno de ionização do solo devido à passagem de correntes impulsivas oriundas de descargas atmosféricas. Traz certa semelhança com o efeito corona que ocorre no entorno de condutores de linhas de transmissão aéreas. Entretanto, no caso do fenômeno de ionização do solo, a ocorrência dos canais disruptivos tem distribuição muito menos uniforme. Isso ocorre porque na prática, o solo não é um meio homogêneo e é composto por várias partículas de tamanhos e materiais (orgânicos e inorgânicos) diferentes. Tal fato acaba por gerar um campo elétrico não uniforme na região vizinha. Essas características heterogêneas do solo podem causar uma alteração na distribuição do campo elétrico, fazendo com que pontos juntos à superfície fiquem submetidos a diferentes valores de intensidade de campo. Assim, o campo elétrico crítico pode ser atingido primeiramente em determinados pontos do solo dando início ao processo de ionização, enquanto em outros pontos próximos, esse processo não é verificado. Duas diferentes hipóteses que tentam explicar o processo de disrupção no solo.

Na primeira supõe-se que o processo de ionização se inicia nos espaços de ar entre os grãos do solo. Neste caso, a constante dielétrica do solo deve ser relativamente alta para provocar uma elevação do campo elétrico nesses espaços de ar e iniciar a disrupção. Isso ocorre porque a condição de fronteira para campo elétrico normal à interface impõe que a densidade de fluxo elétrico na fronteira seja contínua. Sendo assim, os níveis de campo para provocar disrupção no solo devem ser semelhantes aos níveis de campo para provocar este fenômeno no ar.

Segundo o outro mecanismo, o processo de disrupção no solo ocorreria por efeito térmico. Quando o impulso de corrente é aplicado, a corrente que flui no solo é conduzida principalmente pela água nele dissolvida. Quando a temperatura da água aumenta, por dissipação da energia associada à circulação da corrente, a resistividade da água diminui. Segundo alguns autores [69], a corrente fluindo por estes estreitos canais de baixa resistividade cria uma instabilidade que leva à evaporação e, conseqüentemente, à disrupção nas regiões de campo elevado.

Segundo certos autores, dentre os mecanismos acima, a teoria da vaporização da água tem validade questionável, pois envolve muitas simplificações [73]. Por outro lado, a hipótese de ionização dos espaços de ar aparenta ser consistente.

Experimentos realizados por Bellaschi [67] ondas de tensão senoidais (60Hz) e impulsivas em diferentes hastes de aterramento com tamanhos e raios distintos enterradas verticalmente no solo. O fenômeno de ionização do solo foi desenvolvido a partir da variação da impedância de aterramento em função do valor máximo da onda de corrente impulsiva injetada. Valores de campo elétrico crítico de ionização do solo foram obtidos na faixa de 1.2 a 4.2 kV/cm [67].

Modelaram o fenômeno de ionização do solo por meio de uma redução da resistividade do solo em torno de 15% [68]. Foram utilizados três tipos de solo com resistividades variadas e duas configurações de aterramento. O campo elétrico crítico de ionização do solo foi tratado como uma variável ajustável que foi fixada assim que o modelo proposto se mostrou capaz de reproduzir os resultados experimentais. O valor obtido foi de 3 kV/cm.

Em 1988, Oettlé [69] publicou um trabalho descrevendo o resultado da operação de tensões impulsivas em eletrodos concentrados, visando à investigação

dos processos de ruptura total e ionização do solo. Para tal, foram utilizados diferentes tipos de solos, empregados em duas configurações distintas. Na primeira condição, o campo elétrico é considerado uniforme. Com intuito de comparar o processo de ruptura total em solos com características distintas, aplicou impulsos de tensão com tempo de frente de 3  $\mu$ s e diferentes amplitudes. O campo elétrico que pode levar a disrupção no solo está compreendido entre os valores de 6 a 18 kV/cm. O segundo arranjo experimental consistia em dois eletrodos hemisféricos concêntricos preenchidos com solo. As análises realizadas por Oettlé indicaram um campo elétrico crítico de aproximadamente 8,0 kV/cm.

Em 1994, Visacro e Soares [71] avaliaram o efeito de ionização do solo em termos da redução da impedância de aterramento de condutores horizontais longos, a partir de resultados experimentais que desenvolveram para a aplicação de ondas impulsivas em amostras de solo colocadas em cubas coaxiais. A avaliação não se baseou no valor do campo crítico, mas sim em curvas  $V_{xl}$  construídas a partir de valores instantâneos das ondas de corrente e tensão aplicadas na amostra. À medida que o processo de ionização se ampliava no entorno do condutor cilíndrico interior com o crescimento da corrente submetida à amostra de solo, a inclinação da curva  $V_{xl}$  era reduzida [69, 71].

Em 2000, Nor e outros publicaram um trabalho com o intuito de avaliar o fenômeno de ionização do solo sob a aplicação de ondas de correntes impulsivas, em duas quantidades de solo arenoso com tamanhos de grãos diferentes [80]. A fim de verificar a influência da umidade, diferentes volumes de água (1,3,5,7 e 10%) foram adicionados em cada amostra. Por meio dos registros de tensão e corrente obtidos, o campo elétrico crítico foi determinado e a tensão de ruptura total foi estimada via ensaios estatísticos (método Up and Down – U50%). Para o campo elétrico crítico de ionização do solo foi obtido um valor de 5.6 kV/cm, valor este independente do conteúdo de água acrescido em cada amostra.

Em 2003, Yaqing Liu [72] e outros publicaram um trabalho que investiga a existência de uma resistividade residual do solo, na região de ionização, quando ocorre o fenômeno de ionização do solo.

Em 2004, Gonos e Stathopulos [81] apresentaram um trabalho que, constituído de uma parte experimental e uma parte analítica mostrou por meio de curvas, a variação do campo elétrico crítico em função da resistividade do solo e a influência da adição de água em solos secos.

Recentemente, Nor e outros apresentaram um trabalho contribuindo para o entendimento da ocorrência do fenômeno de ionização em solos de alta resistividade [82]. Por meio de um gerador de impulsos, foram aplicadas ondas de tensão e corrente de ambas polaridades (positiva e negativa) em amostras de solo seco. Foram feitas acerca da diferenciação entre os processos de disrupção no solo (térmico e ionização). O campo elétrico crítico foi estimado em 5.6 kV/cm [82]. Nesses trabalhos, procura-se focar no efeito das polaridades dos impulsos; estes que podem ser gerados pelos diferentes tipos de descargas atmosféricas oriundas da natureza.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EFEITOS NO SOLO

Quando se trata de descargas atmosféricas no solo, costuma-se fazer analogias e experimentos da maneira mais aproximada possível, isto porque se tem na natureza a heterogeneidade do solo, a não uniformização do campo elétrico crítico na superfície, prejudicando a acurácia da medição e da análise. Mas já se observa algumas alterações como a variação de temperatura pela disrupção do solo, o aumento da acidez da terra em função da ionização do solo. Também se tem conhecimento da importância da descarga atmosférica para a deposição de nitrogênio no solo, apesar de não ser a maneira mais eficiente, possui significativa participação para a fertilização do solo no planeta.

## 7 PROTEÇÃO DE ÁRVORES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Equipamentos de proteção para descargas atmosféricas é aceito para ajudar a preservar árvores de seu valor sentimental e histórico, e protegê-las de eventuais descargas que possam prejudicar, danificar ou até mesmo matar a árvore.

Sistemas de proteção para árvores é bastante semelhante com sistemas usados em prédios e grandes construções. O cabo de cobre é colocado o mais alto possível na árvore, fixadores de cobre especialmente concebidos são usados para prender o cabo por todo o caminho, do tronco até o chão. Estes elementos de fixação permitem a folga e continuação do crescimento da árvore. A extremidade do cabo está ligada a uma barra cravada no solo de uma maneira que não interfira na área da raiz principal, e conseqüentemente para fora da raiz. Árvores com copas largas podem exigir condutores adicionais que se estendem até as partes mais altas dos ramos laterais a fim de cobrir a propagação da coroa. Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas deve ser verificado periodicamente e ajustado para permitir o crescimento e expansão da árvore [38].

Se a árvore estiver até 3m de uma estrutura, ou com ramificações que se estendam acima dela, devem possuir proteção contra descarga atmosféricas em função dos riscos relacionados a descargas laterais, incêndios ou outros danos como estilhaços. No caso de uma descarga, a corrente com alto valor de amplitude pode evaporizar a seiva interna da árvore por efeito Joule e conseqüente fragmentação por explosão, conforme visto ao longo desse trabalho, também pode ser desejável equipar outras árvores com SPDA em função de seu valor para proprietário. A Fig. 7.1 ilustra essa proteção.

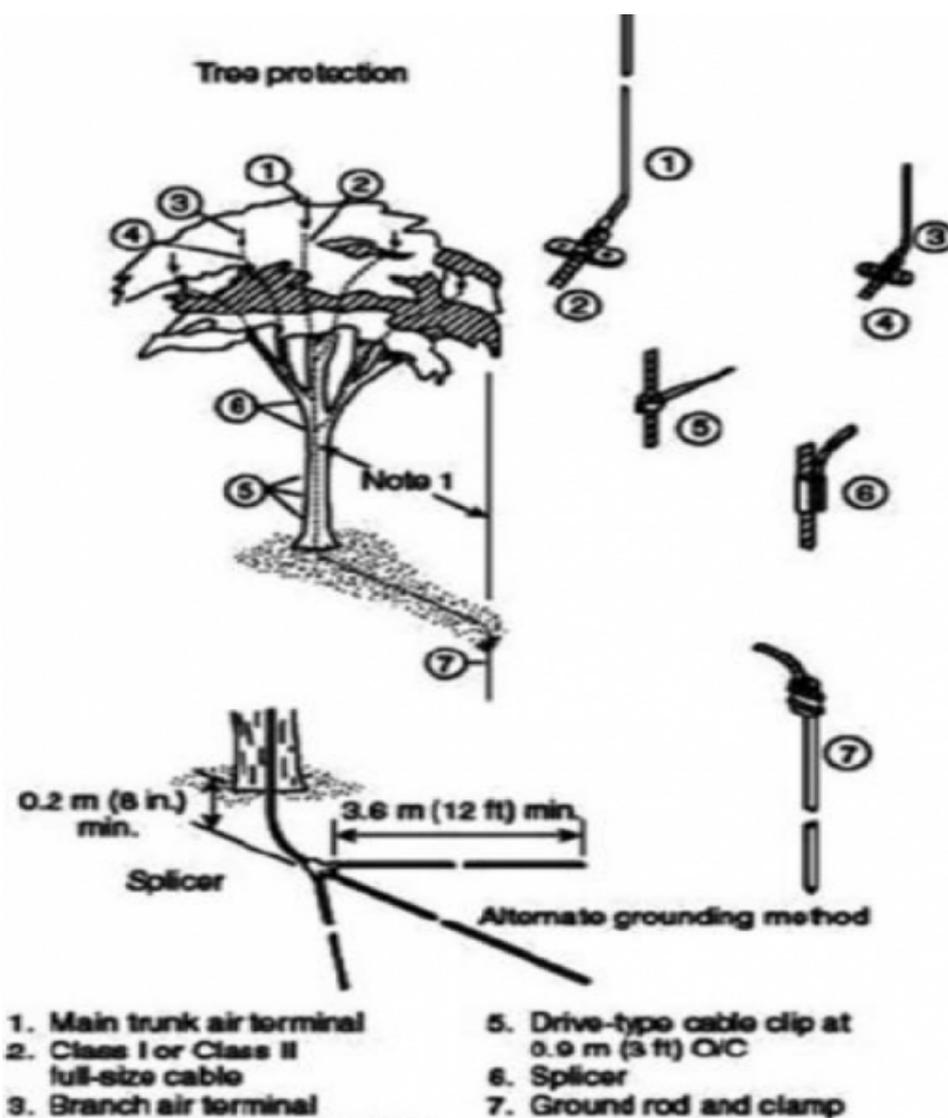


Figura 7.1: SPDA para árvores maiores de 3 metros [101]

A Fig. 7.1 mostra os equipamentos em etapas para a instalação do SPDA em uma árvore, sendo a numeração:

1. Terminal aéreo do tronco.
2. Cabos de tamanho grande de Classe I e Classe II.
3. Terminal aéreo do ramo.
4. Condutor do cabo do ramo.
5. Cabo de unidade.
6. Splicer.
7. Haste de aterramento e braçadeira.

A partir desses equipamentos e a montagem realizada por um profissional capacitado, tem-se um sistema de proteção específico para árvores, o que assegura a planta ter uma expectativa de vida maior.

## 8 CONCLUSÃO

A interação do meio ambiente com o homem sempre foi um desafio, principalmente quando se trata de um assunto que não se tem um total domínio de suas ações e o que esperar se essa ação vier a ocorrer. Assim são as descargas atmosféricas, altamente dependentes do clima, que agem de maneira diferente e intensidades variáveis em determinados tipos de biomas, que podem oferecer condições mais propícias para a atividade. Em um bioma de vegetação como a caracterizada no Cerrado observa-se que as descargas atmosféricas têm papel de agentes diretos no processo de queimadas da vegetação, em um processo de renovação no ciclo de vida do bioma. No meio urbano a utilização de um sistema de proteção para descargas atmosféricas torna-se essencial para proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos, e para a própria segurança.

Para ocorrer uma descarga atmosférica, imprescindível se faz que os dois portadores de carga se atraiam até romper o dielétrico que os separa. No caso as cargas acumuladas no solo com as cargas excitadas nas nuvens, excitadas pelas enorme quantidade de gotículas de água em contato com outras moléculas na atmosfera. Outro mecanismo estudado é a excitação por raios cósmicos oriundos de explosões de estrelas massivas no espaço sideral, no qual liberam dessas explosões partículas bastante energizadas que percorrem por todo o espaço. Ao incidirem com a atmosfera terrestre, uma parte secundária entraria com uma altíssima velocidade se chocando com as partículas na atmosfera excitando as cargas nas nuvens até que se rompa a rigidez dielétrica do ar, formando o canal ionizante.

Uma vez que se forma o canal ionizante tem-se um líder escalonado que fecha o curto circuito quando desce das nuvens e toca o solo. Logo após esse contato, observa-se uma descarga de retorno, que consiste exatamente na subida de carga do solo para as nuvens pelo canal ionizante aberto. Processo que pode ocorrer múltiplas vezes em um curto intervalo de tempo. A descarga atmosférica, pode ser classificada em 3 principais tipos: descarga nuvem a nuvem (internuvem), também ocorre descargas dentro da própria nuvem (intranuvem), descargas nuvem-

solo e solo-nuvem, os mais perigosos em relação ao homem causando danos em estruturas, equipamentos e tornando um risco para vida, é comum ocorrência de descargas para o ar, que ocorre quando o canal ionizante se torna tortuoso pela heterogeneidade do ar que por onde passa.

E os relâmpagos-bolas, que ainda são alvos de muito estudos e despertam curiosidade pelo seu mistério e anormalidade.

Em relação as árvores, não é incomum uma descarga atingi-las, isto devido à sua altura e galhos pontudos que atraem as cargas, sem contar que a seiva distribuída dentro do vegetal é melhor condutor do que o ar, sendo assim um excelente candidato a sofrer uma descarga. Pode ocorrer 3 situações quando uma árvore sofre a descarga, ele pode receber a alta corrente por dentro do seu tronco, em volta pela casca ou dissipar no solo por perda de energia ou canalizada pela raiz, esta pode por sinal sofrer danos ou não. O tamanho da gravidade de uma descarga atmosférica em uma árvore depende também de outros fatores, como a umidade da planta que pode ser crucial para a sua explosão e morte.

Não só da descarga a árvore sofre dano; também se observam as consequências da passagem de corrente, seja pela geração de calor que leva a incêndios, seja pela energia eletromagnética gerada no momento que reage principalmente com as folhas e gramíneas nas proximidades de onde ocorreu a descarga, já que radiação interage com a própria estrutura da folha. Alterações no solo também são observadas, dado que uma corrente impulsiva pode simular a corrente de uma descarga. O solo sofre um processo de ionização e uma disruptura, já que no solo temos grãos e lacunas de ar que ao entrarem em contato com a corrente elétrica e a umidade do solo, sofrem uma expansão com o calor gerado, o que torna o solo mais ácido.

Sistemas de proteção semelhantes com as SPDA's usadas em construções e edifícios residenciais e comerciais podem ser utilizados como sistema de proteção para árvores, assegurando que os cabos que ali envolvem, aproveitando inclusive a estrutura da árvore, fiquem levemente folgados para não impedir o crescimento natural da planta.

As descargas atmosféricas trazem benefícios e malefícios para a vida no planeta, sendo uma atividade brutal de muita intensidade, como sendo fundamental para o equilíbrio do planeta e condições de sobrevivência, ainda há muitas perguntas e dúvidas sobre o fenômeno, que intrigam e amedrontam aqueles que o procura entender, mas sempre trazendo o fascínio pela sua grandeza associada ao longo do tempo como um poder tão grande quanto os deuses.

## 8.1 PERSPECTIVAS

Com a imprevisibilidade das descargas atmosféricas em árvores leva a preocupação dos danos e riscos causados, assim como a necessidade de proteção para o caso, como perspectivas e trabalhos futuro, apontamos:

1. Melhorar processos de divulgação e orientação quanto ao perigo de se proteger de tempestades embaixo de árvores.
2. Projetos de proteção das próprias árvores, visando minimizar o sofrimento da vegetação e garantir sua conservação.
3. Aproveitamento racional dos benefícios físico-químico das descargas atmosféricas no solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AB'SABER, A.N. Os domínios morfoclimáticos na América do Sul. Boletim do Instituto de Geografia, USP 52: 1-21,1977.

[2] AB'SABER, A. N. A organização natural das paisagens inter e subtropicais brasileiras. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher/EDUSP, 1971.

[3] RIZZINI, C.T. Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos. Rio de Janeiro: Âmbito Cultural Edições Ltda., 1997.747p.

[4] ALVIN, P.T.; ARAÚJO, W. El suelo como factor ecológico en el desarrollo de la vegetación en Centro-Oeste del Brasil. Turrialba: 153 – 160. 1952.

[5] WALTER, H. 1986. Vegetação e Zonas Climáticas. São Paulo, E.P.U. Ltda.

[6] EMBRAPA – Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/> Acesso em Abril de 2016.

[7] VELOSO, H.P.; GÓES-FILHO, L. 1982. Classificação fisionômico-ecológica da vegetação neotropical. Bol. Téc. Proj. Radambrasil v.7.

[8] IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/> Acesso em Abril de 2016.

[9] EITEN, G.A. Classificação da vegetação do Brasil. Brasília: CNPq/Coordenação Editorial, 1983. 305p.

[10] PEREIRA, A.B. A vegetação como meio físico. Revista Nucleus, v.3, n.1, out./abr. 2004/2005.

[11] Disponível em:

[http://www.portalbrasil.net/cerrado\\_vegetacao.htm/](http://www.portalbrasil.net/cerrado_vegetacao.htm/) Acesso em 03/06/2016.

[12] COUTINHO, L.M. O conceito de Cerrado. Revista brasileira de Botânica, 1:17-23, 1978a.

[13] KLINK A.C.; MIRANDA H. S.; GONZALVES M.I.; VICENTINI R.F. O Bioma Cerrado – Site 3. Brasília DF 2003

[14] FERRI, M.G. Ecologia dos cerrados. In: FERRI, M.G. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 4. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1977. p.15-33.

[15] GOODLAND, R. 1971a. Oligotrofismo e alumínio no cerrado. p. 44-60 in III SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO. Ed. da Universidade de São Paulo e Ed. Edgard Blücher. 239p. SP.

[16] RAWITSCHER, F.K.; FERRI, M.G.; RACHID, M. 1943. Profundidade dos solos e vegetação em campos cerrados do Brasil meridional. Na. Acad. Brasil. Ciênc. XV(4): 267-294.

[17] MARTINS, C.R. Revegetação com gramíneas de uma área degradada no Parque Nacional de Brasília, DF, Brasil. Brasília: UnB, Departamento de Ecologia, 1996. 70p. Dissertação de Mestrado.

[18] TEIXEIRA, M.L.; FONSECA, C.G. Recuperação ambiental de dunas litorâneas para obtenção de ilmenita. In: SIMPÓSIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS

DEGRADADAS, 1, 1992, Curitiba. Anais... Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1992. p.373-379.

[19] MORAES, A. Pastagens como fator de recuperação de áreas degradadas. In: FAVORETTO, V.; RODRIGUES, L.R.A.; REIS, R.A. (eds.). SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMA DE PASTAGENS, 2, 1993, Jaboticabal. Anais... Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, FUNEP/UNESP, 1993. p.191-215.

[20] BELL, T.J.; UNGAR, I.A. Factors affecting the establishment of natural vegetation on a coal strip mine spoil bank in Southeast Ohio. *The American Midland Naturalist*, Ohio, v.105, n.1, p.19-31, 1981.

[21] MCGINNIES, W.J.; WILSON, A.M. Using blue grama sod for range revegetation. *Journal of Range Management*, New York, v.35, n.2, p.24-29, 1982.

[22] FILGUEIRAS, T.S. Gramíneas forrageiras nativas do Distrito Federal, Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.27, n.8, p.1103-1111, 1992.

[23] ROBERTS, E.H. Genetic conservation in seed banks. *Biological Journal of the Linnean Society*, London, v.43, p.23-29, 1991.

[24] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE, *ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica*. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/> Acesso em Outubro de 2015.

[25] MENDES JR., O; DOMINGUES, M. O. Introdução à Eletrodinâmica Atmosférica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, volume 24, nº1, março.2002.

[26] VISACRO, S. F., “Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia”. São Paulo, Artliber Editora, 2005.

- [27] PINTO JR., O; PINTO, I.R. C. A. Relâmpagos. Ed. Brasiliense, 1996.
- [28] SIMEPAR - Instituto Tecnológico SIMEPAR. Disponível em:  
<http://www.simepar.br/> Acesso em Junho de 2016.
- [29] Monitoramento de descargas atmosféricas. Disponível em:  
<http://nucleo.tempestades.org.br/> Acesso em Junho de 2016.
- [30] SVENSMARK, H; BONDO, T; SVENSMARK, J. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds. Geophysical Research Letters Vol.: 36
- [31] KINDERMAN, G. Descargas Atmosféricas. 1ª Edição.
- [32] COUTINHO F.; ALTOÉ C. A, “Levantamento de Estruturas que Necessitam de SPDA na UnB e Análise de seus Efetivos Sistemas de Proteção”, Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2003
- [33] MAMEDE, João F. Instalações elétricas industriais. Rio de Janeiro: Editora LTC.
- [34] TAYLOR, A.R. Lightning and Trees. In: Golde RH, Ed. Lightning, Lightning Prot 1977; vol. 2.
- [35] LINDH, C. Otto. 1949. Ponderosa pine in the southwest. Pp. 347-48, in: Trees, Yearbook of Agr., V.S.D.A. Forest Serv.
- [36] REYNOLDS, R. R. 1940. Lightning as a cause of timber mortality. V.S.D.A. Forest Serv., Southern Forest Exp. Sta. Notes 31, 4 pp.

[37] WADSWORTH, F. H. 1943. Growth and mortality in a virgin stand of ponderosa pine compared with a cutover stand. U.S.D.A. Forest Servo Southwestern Forest and Range Exp. Sta. Res. Rep. 5, 16 pp.

[38] DeROSA, Ernest W. Lightning and trees. Journal of arboriculture 9(2): February 1983.

[39] MOORHOUSE, S. 1939. Trees and lightning. Wood 4: 299-300.

[40] MURRAY, J. S. 1958. Lightning damage to trees. Scottish Forestry 12: 70-71.

[41] STONE, George E. 1916. Shade Trees, Characteristics, Adaptation, Diseases and Care. Massachusetts Agricultural Experiment Station, Bui. No. 170. pp. 241-245.

[42] VANDERLINDER, E. 1907 Etude sur les foudroiements d'arbres constatés en Belgique pendant les années 1884-1906. 79 pp. Bruxelles: Observatoire Royal de Belgique.

[43] THOMPSON, A. Roberto 1936. Lightning protection and treatment of lightning struck trees. U. S. Dept. of Interior, N.P.S, Branch of Forestry, Bul. 5, p. 15; illus.

[44] DEFANDORF, F. M.1955. A tree from the viewpoint of lightning. Jour. Wash. Acad. Sci. 45: 333-339, illus.

[45] EARLE, R. H. 1938. Lightning strength of wood in power transmission structures.

Discussion by P, Sporn and J. To Lusignan, A.I.E.E. Transc 57:91-101, illus.

[46] SZPOR, S. 1945. Electrical resistance of trees and lightning danger. Schweiz. Z. Forstv.96: 209-219.

[47] BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J.; FORSAITH, C. C 1952. Textbook of wood technology, Vol. II, p. 158. New York: McGraw-Hill.

[48] Bureau of standards. 1929. Code for protection against lightning. Misc. Pub. 92 pp. 97-99.

[49] BOTLEY, C. M. 1951. The lightning discharge in myth and legend. Weather 6: 277-279.

[50] COVERT, Roy N. 1924. Why an Oak is often struck by lightning. Mo. Wea. Rev. 52: 492-493.

[51] FISHER, W. R. 1907. Forest protection. Vol. IV: Dr. Schlich's Manual of Forestry. pp. **658-668**. London: Bradbury, Agnew and CO.

[52] MCEACHRON, Karl Bolyer. 1940. Playing with lightning. 231 pp. illus. New York:Random House.

[53] ORR, Clyde Jr. 1959. Tremendous power of lightning. Sci. Digest 45: 27-32.

[54] DORSEY, N. E. 1925. The effect of a lightning stroke. Mo. Wea. Rev. 53: 479-483, Illus.

[55] TAYLOR, Alan R. Lightning damage to Douglas-fir trees in southwestern Montana. 1962. *Theses, Dissertations, Professional Papers*. Paper 2846.

[56] MAKELA, J.; MAKELA, A.; HAAPALAINEN, J. "Lightning location system accuracy determined from strikes to trees". Cagliari, Italy, September 2010.

[57] NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. São Paulo. ed. : Edgard Blücher, 1989, 308p.

[58] PONZINI, F.J. 2002. Sensoriamento remoto na vegetação: Diagnosticando a mata atlântica. Instituto de pesquisa espacial - INPE

[59] MUNDO EDUCAÇÃO. Disponível em:  
<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/a-diferenca-entre-radiacao-irradiacao.html/> Acesso em Junho 2016.

[60] PAUL, Clayton R. Eletromagnetismo para engenheiros: com aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

[61] HAYT, William H. Eletromagnetismo 4<sup>o</sup> edição. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

[62] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PERNAMBUCO. Disponível em:  
<http://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/> Acesso em Junho de 2016.

[63] FIGUEIREDO, Divino. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília - DF, 2005.

[64] MALMIVUO, J.; PLONSEY, R. Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields. [S.l.]: New York: Oxford University Press, 1995.

[65] GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4(1): 11-20, 1965.

[66] WILLSTATTER, R.; STOLL, Arthur. 1918 - Untersuchungen uber die Assimilation der Kohlensature, Julius Springer. Berlin.

[67] BELLASCHI, P. L.; ARMINGTON, R. E. "Impulse and 60-Cyle Characteristics of Driven Grounds - III", AIEE Transactions, Vol.62, p.334-345, 1943.

- [68] LIEW, A. C.; DARVENIZA, B. E. "Dynamic Model of Impulse Characteristic of Concentrated Earths", Proc IEEE, Vol 121, No2, fevereiro, 1974.
- [69] OETTLÉ, E. E. "The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil", The Transactions of the SA Institute of Electrical Engineers, p. 63-70, dezembro, 1988.
- [70] VISACRO, S. "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Transactions on Power Delivery. , v.22, p.381 - 386, 2007
- [71] VISACRO, S.F.; SOARES, A.J. "Sensitivity Analysis for the Effect of Lightning Current Intensity on the Behavior of Earthing Systems", XXII-ICLP Proceedings (International Conference on Lightning Protection), Budapest, Hungary, September 1994.
- [72] LIU, Y.; THEETHAYI, N.; GONZALEZ, R. M.; THOTTAPPILLIL, R. "The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results". IEEE, 2003.
- [73] MOUSA, A. M., "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes," IEEE Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 14, 2009 Trans. on Power Delivery, Vol. 9, 1669–1677, Jul. 1994.
- [74] MOHAMAD, N. N.; HADDAD, A.; GRIFFITHS, H. "Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses," IEEE. Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, 353–361, Jan. 2006.
- [75] LEADON, R. E.; FLANAGEN, T. M.; MALLON, C. E. and Denson, R. "Effect of ambient gas on ARC initiation characteristics in soil," IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 30, No. 6, 4572–4576, Nov. 1983.

[76] COORAY, V.; ZITNIK, M.; MANYAHI, M.; MONTANO, R.; RAHMAN, M.; LIU, Y. "Physical model of surge current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization," *Journal of Electrostatics*, Vol. 60, No. 2–4, 193–202, Mar. 2004

[77] D'ANGOLA, A.; CAPITELLI, M.; COLONNA, G.; GORSE, G. "Transport properties of high temperature air in local thermodynamic equilibrium," *The European Physical Journal D, Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, Vol. 11, No. 2, 279–289, Jul. 2000.

[78] CAPITELLI, M.; COLONNA, G.; D'ANGOLA, A. "Thermodynamic properties and transport coefficients of high temperature air," *Pulsed Power Plasma Science. PPPS-2001. Digest of Technical Papers*, Vol. 1, No. 17–22, 694–697, Jun. 2001.

[79] PRAGER, J.; BALDEA, G.; RIEDEL, U.; WARNATZ, J. "Equilibrium composition and electrical conductivity of high-temperature air," *21st ICDERS*, 23–27, Poitiers, France, Jul. 2007.

[80] NOR, M. N.; SRISAKOT, S.; GRIFFITHS, H.; HADDAD, A.; "Characterisation of Soil Ionisation under Fast Impulse", *25th International Conference on Lightning Protection*, p. 417-422, setembro, 2000.

[81] GONOS, I. F.; STATHOPOULOS, I. A. "Soil Ionisation Under Lightning Impulse Voltages" *IEE Proc.-Sci Meas. Technol.*, Vol 151, No. 5, setembro, 2004.

[82] NOR, M. N.; IDRIS, N. A.; AHMAD H. "Electrical Properties of Dry Soil Under High Impulse Currents", *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, p. 500-5005, julho, 2007.

[83] CÂNDIDO, MAGNO J.D. *Introdução às pastagens naturais. Núcleo de Ensino e Estudos em Forragicultura- NEEF/DZ/CCA/UFC* ([www.neef.ufc.br](http://www.neef.ufc.br)). Universidade

Federal do Ceará. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Zootecnia. Fortaleza – CE, 2012.

[84] SILVA, Alcides L. Influência de ondas eletromagnéticas oriundas de descargas atmosféricas em pessoas portadoras de prótese. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM - 084/2014, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2014.

[85] SILVA, Alcides L.; ENJIU, Rodrigo K. Lightning on tree: Modeling a case study in Brasília, Brazil. Professional paper. 2015.

[86] Disponível em:

[http://app.nedir.com/content\\_imgs/iklim.png/](http://app.nedir.com/content_imgs/iklim.png/) Acesso em Junho de 2016.

[87] Disponível em:

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfmoAL/biomas-brasileiros/> Acesso em Junho de 2016.

[88] Disponível em:

<http://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/classificacoes-e-o-mapa-da-vegetacao-do-brasil/#> Acesso em Junho de 2016.

[89] Disponível em:

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/9079371.jpg/> Acesso em Junho de 2016

[90] Disponível em:

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Raio\\_\(meteorologia\)#/media/File:Lightning\\_hits\\_tree.jpg/](https://pt.wikipedia.org/wiki/Raio_(meteorologia)#/media/File:Lightning_hits_tree.jpg/) Acesso em Junho de 2016.

[91] Disponível em:

<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/eletricidade.atmosferica/estrutura.eletrica.da.atmosfera.php/> Acesso em Junho de 2016.

[92] Disponível em:

<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php/> Acesso em Junho de 2016.

[93] Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-1172002000400007/](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-1172002000400007/) Acesso em Junho de 2016.

[94] Disponível em:

[http://www.comentariojovem.com.br/wp-content/uploads/2013/09/CJ02\\_Raio\\_Arvore.jpg/](http://www.comentariojovem.com.br/wp-content/uploads/2013/09/CJ02_Raio_Arvore.jpg/) Acesso em Junho de 2016.

[95] MÄKELÄ, Jakke.; KARVINEN, Eero.; PORJO, Niko.; MÄKELÄ, Antti.; TUOMI, Tapio. Attachment of Natural Lightning Flashes to Trees: Preliminary Statistical Characteristics. *Journal of Lightning Research*, 1, 9-21. Finland, 2009.

[96] Disponível em:

<http://www.comunitexto.com.br/campo-magnetico-terrestre-e-suas-anomalias/#.V2JFXrsrJD8/> Acesso em Junho de 2016.

[97] Disponível em:

<https://www.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2/EletromagnetismoWebParte02/mag2cap7.htm#mozToclid479814/> Acesso em Junho de 2016.

[98] Disponível em:

[http://www.arquivos.ufs.br/mlalic/UAB\\_livro/Fisica\\_C\\_Aula\\_06.pdf/](http://www.arquivos.ufs.br/mlalic/UAB_livro/Fisica_C_Aula_06.pdf/) Acesso em Junho de 2016.

[99] Disponível em:

[http://u2.lege.net/newwebmasters.com\\_\\_freeenergy/external\\_links\\_from\\_phact.org/z/beardeen/](http://u2.lege.net/newwebmasters.com__freeenergy/external_links_from_phact.org/z/beardeen/) Acesso em Junho de 2016.

[100] Disponível em:

<https://fperrotti.wikispaces.com/Cores+e+vis%C3%A3o/> Acesso em Junho de 2016.

[101] Disponível em:

[http://montal.com.br/media/k2/items/cache/00d9b1e39f02d57be65ad2a9a6eaa3b8\\_XL.jpg/](http://montal.com.br/media/k2/items/cache/00d9b1e39f02d57be65ad2a9a6eaa3b8_XL.jpg/) Acesso em Junho de 2016.