



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SISTEMA ELETROELETRÔNICO NO TRÁFEGO
AÉREO BRASILEIRO**

Pablo Ferreira Cunha de Almeida

Brasília, dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Pablo Ferreira Cunha de Almeida

Sistema Eletroeletrônico no Tráfego Aéreo Brasileiro

Trabalho de Conclusão de Curso de
graduação submetido ao
Departamento de Engenharia
Elétrica da Universidade de Brasília
como requisito parcial para
obtenção do Título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Professor Alcides Leandro da Silva, Dr.

Brasília, dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Sistema Eletroeletrônico no Tráfego Aéreo Brasileiro

Pablo Ferreira Cunha de Almeida

Banca examinadora

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

Prof. Dr. Franklin da Costa Silva, UnB/ENE
Examinador interno

Prof. Dr. Plínio Ricardo Ganime Alves, UnB/ENE
Examinador interno

FICHA CATALOGRÁFICA

de Almeida, Pablo Ferreira Cunha

Sistema Eletroeletrônico no Tráfego Aéreo Brasileiro. [Distrito Federal] 2018.

XIX, 117p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2018).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Controle de Tráfego Aéreo

2. Descargas Atmosféricas

3. Aeronaves

4. Aeroportos

I. ENE/FT/UnB

II. Sistema Eletroeletrônico no Tráfego Aéreo

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

de Almeida, Pablo Ferreira Cunha de Almeida (2018). Sistema Eletroeletrônico no Tráfego Aéreo Brasileiro

Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 páginas.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Pablo Ferreira Cunha de Almeida

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Sistema Eletroeletrônico no Tráfego Aéreo Brasileiro

GRAU/ANO: Graduação em Engenharia Elétrica/2018.

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

Pablo Ferreira Cunha de Almeida
SQS 214 Bloco J Apto 501, Asa Sul, Brasília, DF - Brasil
pablo.fc.almeida@gmail.com

Primeiramente, agradeço a Deus por mais esse objetivo cumprido e por ter me ajudado a superar todas as dificuldades durante esta jornada.

Dedico este trabalho a minha querida esposa Nathalia que teve paciência e me apoiou durante todo o curso, pois muitas vezes foi necessário abrir mão do lazer para cumprir este objetivo.

Aos meus pais, Ana Claudia e Josué, que sempre acreditaram em mim, investindo nos meus estudos e dando todo o suporte para que eu tivesse um bom futuro.

RESUMO

O Brasil está entre os países com maior volume de tráfego aéreo do mundo. Sua extensão de 22 milhões de km² contribui para essa quantidade. Todo esse tráfego precisa não apenas de pessoal qualificadas para o serviço, mas também de uma estrutura complexa para fornecer espaço aéreo seguro.

O trabalho consiste em entender como funciona o controle de tráfego aéreo e conhecer sua estrutura e as engenharia envolvidas. A composição da Atmosfera, o processo de formação e classificação de nuvens formam parte do estudo, como também, o surgimento de descargas atmosféricas.

As descargas atmosféricas têm grande influência no dia a dia de pilotos e controladores de tráfego aéreo. A análise dos problemas causados pelas descargas atmosféricas para aeronaves que estão voando, aeronaves no solo e para o controlador de tráfego aéreo é essencial para as propostas desenvolvidas.

Soluções de engenharia para aumentar a segurança em aeroportos e instalações responsáveis pelo efetivo controle de tráfego aéreo foram propostas.

Palavras-chave: Controle de Tráfego Aéreo, Aeronaves, Aeroportos, Descargas Atmosféricas

ABSTRACT

Brazil is among the countries with the highest volume of air traffic in the world. Its extension of 22 million square kilometers contributes to this amount. All this traffic needs not only qualified personnel for the service, but also a complex structure to provide safe airspace.

The job is to understand how air traffic control works, to know its structure and the engineering behind it. We will study the composition of the Atmosphere, the process of formation and classification of clouds, besides understanding how the atmospheric discharges arise.

The atmospheric discharges have great influence on the routine of pilots and controllers of air traffic. We will analyze the problems caused by atmospheric discharges to aircraft that are flying, aircraft on the ground, to the air traffic controller and people involved in some way with aviation in general, such as airport employees and airlines.

Finally, to propose engineering solutions to increase the security in airports and facilities responsible for the effective control of air traffic.

Keywords: Air Traffic Control, Aircraft, Airports, Atmospheric Discharges

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura do Espaço Aéreo [3]	24
Figura 2.2 - Conexão entre TMA [2].....	24
Figura 2.3 - Divisão por FIR [4].....	26
Figura 2.4 - Esquemático da Comunicação durante o voo [2]	26
Figura 2.5 - Cobertura Estação Rádio [2].....	27
Figura 2.6 - Cobertura Radar [2]	27
Figura 2.7 - Transmissão de dados do Sistema de Vigilância [5]	31
Figura 3.1 - Perfil vertical da Atmosfera em camadas [7].....	34
Figura 3.2 - Atmosfera em camadas com inclusão da Ionosfera [9]	36
Figura 4.1 - Processo de formação de uma nuvem [10]	37
Figura 4.2 - Movimentos Ascencionais [11]	37
Figura 4.3 - Cirrus [11].....	38
Figura 4.4 - Cirrostratus [11].....	39
Figura 4.5 - Cirrocumulus [11].....	39
Figura 4.6 - Altostratus [11]	40
Figura 4.7 - Altocumulus [11]	40
Figura 4.8 - Stratocumulus [11].....	41
Figura 4.9 - Nimbostratus [11]	42
Figura 4.10 – Cumulus [11].....	42
Figura 4.11 – Cumulonimbus [11]	43
Figura 4.12 - Tipos de Nuvens [11].....	43
Figura 5.1 – Geração de Cargas [6].....	44
Figura 5.2 – Partícula de Granizo [11]	45
Figura 5.3 – Formação de descargas atmosféricas nuvem-solo [11].....	46
Figura 5.4 – 90% dos casos são de cargas negativas para o solo [12].....	47
Figura 5.5 – Os outro 10% dos casos são de cargas positivas para o solo [12].....	47
Figura 5.6 – Relâmpagos na nuvem [12].....	48
Figura 5.7 - Raios em Vulcões [13].....	49
Figura 5.8 - Raios em Tempestade de Areia [14].....	50
Figura 5.9 – Radiações eletromagnéticas dos raios [16]	52
Figura 5.10 - Concentração de energia por faixa de frequência nos raios [16].....	52

Figura 6.1 – Modos de propagação de ondas [17].....	54
Figura 6.2 – Tipos de Ondas [17].....	54
Figura 6.3 – Alcance de ondas [17].....	55
Figura 6.4 - Propagação de ondas eletromagnéticas além do horizonte óptico [18].....	56
Figura 6.5 - Encurvamento da onda eletromagnética [18]	57
Figura 6.6 – Camadas da Ionosfera [11].....	58
Figura 6.7 – Saltos [17]	59
Figura 7.1 - Volume proteção provido por um mastro [22]	63
Figura 7.2 - Ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA [22]	63
Figura 7.3 - Exemplo de Gaiola de Faraday [43]	64
Figura 7.4 - Exemplo de estruturas menores que 60 m [22].....	66
Figura 7.5 - Exemplo de estrutura com mais de 60 m [22]	66
Figura 7.6 - Método das Esferas rolantes utilizando mastros para proteção de residências [55]	67
Figura 7.7 - Cálculo do ângulo α do Método da Esfera Rolante [24]	67
Figura 7.8 - Conexões entre as partes da ABNT NBR 5419:2015 [22]	68
Figura 8.1 - KF Tipo 0 [26]	74
Figura 8.2 - KF Tipo III [26]	75
Figura 8.3 - Sistema de Luzes nos Aeroportos [28]	76
Figura 9.1 – Cumulonimbus [29]	77
Figura 9.2 – Radar Meteorológico no nariz de um B767 [30]	78
Figura 9.3 - Display do radar meteorológico na aeronave [31].....	79
Figura 9.4 - Sistema de Tempo Severo Convectivo (STVC) – Células atuais [32]	79
Figura 9.5 - Sistema de Tempo Severo Convectivo (STVC) – Células atuais e previsão [32]	80
Figura 9.6 - Tela do SAGITARIO.....	82
Figura 9.7 - Sistema de Alerta de Descargas Atmosféricas [46].....	83
Figura 9.8 – Aeronave sendo atingida por um raio no aeroporto [39]	84
Figura 9.9 - Raios do Sistema de Alerta.....	86
Figura 10.1 – Pátio do Aeroporto de Brasília [44]	88
Figura 10.2 - Método das Esferas Rolantes [45]	89
Figura 10.3 – Utilizando um mastro [45]	89
Figura 10.4 – Método da Esfera Rolante com 1 Mastro.....	90
Figura 10.5 – Marcação do Trem de Pouso [46]	91

Figura 10.6 – Marcação do Nariz	92
Figura 10.7 - SPDA portátil no campo militar [47].....	95
Figura 10.8 – Imagem da patente do SPDA móvel [48]	96
Figura 10.9 - Mastro Telescópico Pneumático [49]	97
Figura 10.10 – Mastro Telescópico Motorizado [49].....	98
Figura 10.11 - Mastro com cabo opcional [49]	98
Figura 10.12 – Utilizando dois mastros [45]	99
Figura 10.13 – Método das Esferas Rolantes com 2 mastros	100
Figura 10.14 – Caso 1	102
Figura 10.15 – Caso 2.....	103
Figura 10.16 - Comparação entre AN225 com outros tipos de aeronaves [50]	104
Figura 10.17 – Caso 3.....	105
Figura 10.18 – Área de cobertura com 4 mastros [51]	105
Figura 10.19 - Aeronave dentro da zona de proteção.....	106
Figura 10.20 - Veículo com Mastro Telescópico instalado.....	107
Figura 10.21 - Carro com Mastro da “Clark Masts” instalado [53]	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição Atmosférica	33
Tabela 6.1 – Efeitos sobre a propagação de ondas [19]	60
Tabela 7.1 – Posicionamento de captores conforme nível de proteção [22]	63
Tabela 7.2 - Tabela da Gaiola de Faraday [22]	64
Tabela 9.1 - Frequência de Radares [37]	81
Tabela 9.2 – Tabela de Sinalização de Descargas Atmosféricas.....	85
Tabela 10.1 – Tabela de Aeronaves 1	92
Tabela 10.2 - Tabela de Mastros de Alumínio para instalação no solo [49]	97
Tabela 10.3 – Tabela de Aeronaves 2	103
Tabela 10.4 - Tabela de Mastros para veículos [52].....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACC	Centro de Controle de Área
ALS	Approach Light System
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
APP	Controle de Aproximação
ASR	Airway Surveillance Radar
AWY	Aerovia
CGNA	Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea
CPDLC	Controller Pilot Data-Link Communication
CTR	Zona de Controle
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DME	Distance Measuring Equipment
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
FAB	Força Aérea Brasileira
FIR	Região de Informação de Voo
Ft	pés
GCA	Ground Controlled Approach
GNSS	Global Navigation Satellite System
GS	Glide Slope
HF	High Frequency
IATA	Associação Internacional de Transporte Aéreo
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
IEC	International Electrotechnical Commission
IGOM	IATA Ground Operations Manual
ILS	Instrument Landing System
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KF	Casa de Força
LOC	Localizer
NDB	Non-Directional Beacon
NM	Milhas Náuticas
NSCA	Norma do Sistema do Comando da Aeronáutica
PAPIS	Precision Approach Path Indicator System
PAR	Precision Approach Radar
ppmv	Partes por milhão por volume
QDLF	Quadro de Distribuição de Luz e Força
RBAC	Regulamento Brasileiro da Aviação Civil
REDEMET	Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
SAGITARIO	Sistema Avançado de Gerenciamento de Informações de Tráfego Aéreo e Relatório de Interesse Operacional
SFA	Serviço Fixo Aeronáutico
SIGMET	Significant Meteorological Information
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
SMA	Serviço Móvel Aeronáutico
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
SPECI	Boletim Meteorológico Especial Selecionado

STSC	Sistema de Tempo Severo Convectivo
STVD	Sistema de Tratamento e Visualização de Dados
TMA	Área De Controle Terminal
TWR	Torre De Controle De Aeródromo
UHF	Ultra-High Frequency
VHF	Very High Frequency
VOR	VHF Omnidirectional Range

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 MOTIVAÇÃO	21
1.2 OBJETIVO	21
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	21
2. SISTEMA DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO.....	23
2.1 INTRODUÇÃO.....	23
2.2 TIPOS DE ESPAÇO AÉREO	23
2.2.1 Espaço Aéreo Controlado	23
2.2.2 Espaço Aéreo Não-Controlado	24
2.2.3 Espaço Aéreo Condicionado	24
2.3 ÓRGÃOS OPERACIONAIS.....	24
2.3.1 Estação de Telecomunicações Aeronáuticas (Rádio)	25
2.3.2 Torre de Controle de Aeródromo (TWR)	25
2.3.3 Controle de Aproximação (APP).....	25
2.3.4 Centro de Controle de Área (ACC).....	25
2.4 ÓRGÃOS AUXILIARES	26
2.5 TELECOMUNICAÇÕES AERONÁUTICAS	26
2.5.1 SMA – Serviço Móvel Aeronáutico	27
2.5.2 SFA – Serviço Fixo Aeronáutico	28
2.6 AUXÍLIOS À NAVEGAÇÃO	28
2.6.1 NDB.....	28
2.6.2 VOR	29
2.6.3 DME	29
2.6.4 ILS	29
2.6.4.1 LOC	30
2.6.4.2 GS	30
2.6.4.3 Marcadores	30
2.6.5 Auxílios Visuais	30
2.6.5.1 ALS.....	30

2.6.5.2 PAPIS	30
2.6.6 GNSS	30
2.7 VIGILÂNCIA AÉREA.....	30
2.7.1 <i>Radares de Rota</i>	31
2.7.1.1 ASR.....	31
2.7.2 <i>Radares de Aproximação</i>	32
2.7.2.1 Radar de Vigilância em Áreas Terminais.....	32
2.7.2.2 GCA.....	32
2.7.3 <i>Radar de Vigilância de Movimentos de Superfície em Aeroportos</i>	32
2.7.4 <i>Estação Radiogoniométrica em VHF (VHF-DF)</i>	32
3. ATMOSFERA	33
3.1 INTRODUÇÃO.....	33
3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	33
3.3 ESTRUTURA VERTICAL.....	34
3.3.1 <i>Troposfera</i>	35
3.3.2 <i>Estratosfera</i>	35
3.3.3 <i>Mesosfera</i>	35
3.3.4 <i>Termosfera</i>	36
3.3.5 <i>Exosfera</i>	36
3.3.6 <i>Ionosfera</i>	36
4. FORMAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE NUVENS.....	37
4.1 INTRODUÇÃO.....	37
4.2 NUVENS ALTAS.....	38
4.2.1 <i>Cirrus (Ci)</i>	38
4.2.2 <i>Cirrostratus (Cs)</i>	38
4.2.3 <i>Cirrocumulus (Cc)</i>	39
4.3 NUVENS MÉDIAS.....	39
4.3.1 <i>Altostratus (As)</i>	40
4.3.2 <i>Alto cumulus (Ac)</i>	40
4.4 NUVENS BAIXAS	41
4.4.1 <i>Stratus (St)</i>	41
4.4.2 <i>Stratocumulus (Sc)</i>	41

4.4.3 <i>Nimbostratus (Ns)</i>	41
4.5 NUVENS COM DESENVOLVIMENTO VERTICAL.....	42
4.5.1 <i>Cumulus (Cu)</i>	42
4.5.2 <i>Cumulonimbus (Cb)</i>	43
5. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	44
5.1 GERAÇÃO DE CARGAS	44
5.2 RELÂMPAGO.....	45
5.2.1 <i>Relâmpagos no solo</i>	45
5.2.2 <i>Relâmpagos na nuvem</i>	47
5.2.3 <i>Outros tipos de Relâmpagos</i>	48
5.2.3.1 Relâmpago Esférico	48
5.2.3.2 Relâmpagos Bipolares	48
5.2.3.3 Relâmpagos em Vulcões.....	48
5.2.3.4 Relâmpagos em Tempestades de Areia	49
5.3 TROVÃO	51
5.4 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO DOS RAIOS	51
6. PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....	53
6.1 INTRODUÇÃO.....	53
6.2 ONDAS TERRESTRES.....	53
6.2.1 <i>Onda de Superfície</i>	53
6.2.2 <i>Onda Espacial</i>	53
6.2.2.1 Onda Direta.....	53
6.2.2.2 Onda Refletida	53
6.2.2.2.1 Ondas Ionosféricas ou Celestes.....	53
6.2.2.2.2 Ondas Troposféricas	53
6.3 EFEITOS DE PROPAGAÇÃO	54
6.3.1 <i>Efeitos na Troposfera</i>	55
6.3.1.1 Refração	55
6.3.1.2 Reflexão	55
6.3.1.3 Difração	55
6.3.1.4 Absorção	55
6.3.2 <i>Efeitos na Estratosfera</i>	57

6.3.3 Efeitos na Ionosfera.....	57
6.3.3.1 Camada D	57
6.3.3.2 Camada E.....	57
6.3.3.3 Camada F1	58
6.3.3.4 Camada F2	58
6.3.4 Ângulo de Irradiação	58
6.3.5 Salto.....	58
6.4 FREQUÊNCIAS DE ESTUDO	59
6.4.1 HF.....	59
6.4.2 VHF	59
7. SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	61
7.1 INTRODUÇÃO.....	61
7.2 SISTEMA EXTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	61
7.2.1 Sistemas de Captação.....	61
7.2.2 Sistemas de Descida	61
7.2.3 Sistema de Aterramento.....	62
7.3 SISTEMA INTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	62
7.4 MÉTODOS DE CAPTAÇÃO	62
7.4.1 Método de Franklin	62
7.4.2 Método da Gaiola de Faraday	64
7.4.3 Método da Esfera Rolante ou Eletrogeométrico.....	65
7.4 NBR 5419	68
7.4.1 NBR 5419-1	68
7.4.2 NBR 5419-2	68
7.4.3 NBR 5419-3	69
7.4.4 NBR 5419-4	69
8. ANÁLISE DE NORMAS.....	70
8.1 INTRODUÇÃO.....	70
8.2 ICA 66-30: REQUISITOS BÁSICOS PARA OS SISTEMAS DE ATERRAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA SURTOS EM INSTALAÇÕES DO SISCEAB	70
8.2.1 NBR 5419:2015 x NBR 5419:2005	70
8.2.2 Sugestões de Modificação	72

8.2.2.1	Análise de Risco	72
8.2.2.2	Subsistema de Captação	72
8.2.2.3	Subsistema de Descida	73
8.2.2.4	Subsistema de Aterramento	73
8.2.2.5	Proteção de equipamentos eletrônicos	73
8.3	NSCA 66-2: IMPLANTAÇÃO/SUBSTITUIÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA DO SISCEAB 73	
8.3.1	<i>Certificação TIER</i>	74
8.3.1.1	TIER I	74
8.3.1.1	TIER II.....	74
8.3.1.1	TIER III	74
8.3.1.1	TIER IV	74
8.4	RBAC 154: PROJETO DE AERÓDROMOS	75
8.4.1	Sistemas Elétricos	76
8.5	NBR-12971: EMPREGO DE SISTEMA DE ATERRAMENTO PARA PROTEÇÃO DE AUXÍLIOS LUMINOSOS EM AEROPORTOS	76
9.	INFLUÊNCIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO TRÁFEGO AÉREO 77	
9.1	INTRODUÇÃO.....	77
9.2	ROTAS DA AVIAÇÃO.....	77
9.3	COMUNICAÇÃO	80
9.4	RADAR.....	81
9.5	INSTALAÇÕES	83
9.5.1	<i>Estudos em Aeroportos Brasileiros</i>	85
9.5.1.1	<i>IGOM-174</i>	85
9.5.1.2	<i>RBAC 153: Aeródromos – Operação, manutenção e resposta à emergência</i>	86
9.5.1.3	Conclusões do estudo da ANAC	87
9.5.2	<i>Casos de Acidentes devido descargas atmosféricas em aeroportos</i>	87
9.5.2.1	Aeroporto Salgado Filho (Jan/2018)	87
9.5.2.2	Aeroporto Salgado Filho (Set/2016).....	87
9.5.2.2	Southwest Florida International Airport (Jul/2017)	87

10. SISTEMAS MÓVEIS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: PROPOSTAS TÉCNICAS	88
10.1 SPDA.....	88
10.1.1 <i>Situação Atual</i>	88
10.1.2 <i>SMPDA: Sistemas Móveis de Proteção contra Descargas Atmosféricas</i> ..	94
10.1.2.1 SPPDA: Sistema Portátil de Proteção contra Descargas Atmosféricas	94
10.1.2.1 SRPDA: Sistema Retrátil de Proteção contra Descargas Atmosféricas	96
10.1.3 <i>Proteção Adicional</i>	98
10.1.3.1 Vagas nos Gates.....	98
10.1.3.2 Vagas isoladas no pátio	103
10.1.3.3 VPDA: Veículos de Proteção contra Descargas Atmosféricas.....	106
11. CONCLUSÃO.....	109
11.1 TRABALHOS FUTUROS.....	110
BIBLIOGRAFIA	111

1. INTRODUÇÃO

O espaço aéreo brasileiro é um dos maiores do mundo, com cerca de 22 milhões de km², é também um dos mais movimentados e está entre os mais importantes do mundo. Em 2017, os dados fornecidos pelo CGNA (Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea) indicam um total de 1.650.714 voos conhecidos no país [1]. Com essa densidade de voos, percebe-se o papel da engenharia em diversas etapas do processo, contemplando desde estruturas físicas até a tecnologia na detecção e comunicação com as aeronaves.

Estudaremos a atmosfera, tipos de nuvens e para entender como as descargas atmosféricas acontecem e analisar suas influências no tráfego aéreo.

O trabalho passa pela análise de normas nacionais e internacionais, principalmente normas internas utilizadas pela FAB, como a ICA 66-30 e a NSCA 66-2, e pela ANAC, como a RBAC 153 e RBAC 154, que relacionam de alguma forma a engenharia elétrica e o tráfego aéreo. Isso passa por medidas relacionadas ao fornecimento de energia e aterramento das estruturas relacionadas ao tráfego aéreo ou medidas de segurança em épocas de tempestades elétricas. Algumas sugestões são realizadas para de alguma forma prover maior segurança aos envolvidos.

Para cumprir nosso objetivo foi necessária uma pesquisa profunda em livros especializados como, *“The Physics of Lightning”* e *“Atmospheric Science”*, dos autores Rakov e Wallace respectivamente, além de documentos internos militares (não sigilosos), como a ICA 66-30 e a NSCA 66-2, que foram analisados, além disso, visitas e pesquisas foram realizadas nos locais com o propósito de verificar estruturas e conhecer os equipamentos utilizados no dia-a-dia do tráfego aéreo.

As descargas atmosféricas causam muitos problemas financeiros às empresas aéreas, tanto pelo maior gasto de combustível, quanto pelo tempo perdido nos aeroportos por paralização dos serviços. Algumas soluções de engenharia relativamente simples são propostas com objetivo de aumentar a segurança e diminuir os prejuízos.

1.1 Motivação

Por ser um controlador de tráfego aéreo e estudante de engenharia elétrica, busquei entender mais sobre a parte técnica que traz o suporte necessário para execução do meu trabalho e encontrar uma forma de divulgar e contribuir para esse serviço que é de extrema importância.

As análises de normas internas como a NSCA 66-2 (Implantação/Substituição de Sistemas de Energia do SISCEAB) e a ICA 66-30 (Requisitos Básicos para os Sistemas de Aterramento e Proteção contra surtos em Instalações do SISCEAB) foram importantes para entender toda a parte de sistemas de potência que envolve o edifício em que exerço a função de controlador. Verificar a compatibilidade com as normas gerais atuais, visando o aperfeiçoamento da segurança de pessoas e estruturas envolvidas no tráfego aéreo foi uma das primeiras tarefas do trabalho.

Os casos de acidentes/incidentes com descargas atmosféricas chamaram atenção do autor e motivaram a encontrar uma solução possível para aumentar a segurança dos aeroportos e evitar tais casualidades.

1.2 Objetivo

O objetivo do trabalho é mostrar como o tráfego aéreo funciona e a contribuição da engenharia para execução desse serviço. Isso passa também por analisar as normas internas utilizadas pela FAB e ANAC no sistema eletroeletrônico envolvido no sistema de tráfego aéreo e traçar sugestões para melhorar a segurança.

Além disso, propor soluções de engenharia para diminuir os riscos de acidentes/incidentes nos aeroportos devido descargas atmosféricas.

1.3 Estruturação do Trabalho

O trabalho está dividido em 11 capítulos, onde o capítulo 2 traz uma breve explicação de como o espaço aéreo é dividido e os equipamentos básicos utilizados na vigilância radar e navegação aérea. No capítulo 3, a estrutura da Atmosfera em camadas e sua composição química são detalhados. O processo de formação de nuvens e sua classificação está localizado no capítulo 4. O capítulo 5 engloba o estudo de descargas atmosféricas, seu processo de formação e os tipos de descargas.

O capítulo 6 versa sobre propagação de ondas e seu comportamento nas diferentes camadas atmosféricas. O capítulo 7 corresponde ao estudo de SPDA pelas normas vigentes. No capítulo 8, as análises das normas nacionais e internacionais que envolvem engenharia elétrica e tráfego aéreo são apresentadas.

O capítulo 9 trata de uma análise de como as descargas atmosféricas afetam o dia-a-dia dos pilotos, controladores de voo e funcionários de aeroportos. No capítulo 10, são realizadas propostas para aumento da proteção das aeronaves estacionadas, garantindo segurança de funcionários do aeroporto e de empresas aéreas durante as tempestades elétricas. Por fim, no capítulo 11 encontra-se a conclusão e projetos futuros.

2. SISTEMA DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

2.1 Introdução

O sistema de controle do espaço aéreo tem por objetivo ordenar, dar fluidez e manter seguro o tráfego aéreo em nossa jurisdição. Além disso tem a responsabilidade de defesa aérea do nosso país.

O Brasil tem a responsabilidade de administrar o espaço aéreo territorial (8.511.965 km²) e o espaço aéreo sobrejacente a área oceânica, que se estende até o meridiano 10° W, perfazendo um total de 22 milhões de km².

Nesse espaço, há uma série de eventos ocorrendo ao mesmo tempo: voos comerciais, voos militares, ensaios em voo, lançamentos de sondas e foguetes, voos de asa-delta, salto de paraquedas, treinamentos militares com tiros reais, entre outros.

Para alcançar essa capacidade, foi necessário o aperfeiçoamento de atividades de gerenciamento, além da implementação de uma extensa e sofisticada infraestrutura aeronáutica, que garante a segurança da navegação aérea, com a participação efetiva dos profissionais pertencentes ao DECEA. Toda essa gestão do tráfego aéreo envolve cerca de 11.000 profissionais espalhados pelo país.

2.2 Tipos de Espaço Aéreo

Para organizar o espaço aéreo, existem três conceitos específicos: Espaço Aéreo Controlado, Espaço Aéreo Não-Controlado e Espaço Aéreo Condicionado.

2.2.1 Espaço Aéreo Controlado

Todos os movimentos aéreos são controlados por um órgão de tráfego aéreo, no qual os pilotos são orientados a cumprir manobras pré-estabelecidas, com o objetivo de garantir a segurança aos voos das aeronaves. O serviço de controle provê a separação entre as aeronaves e os procedimentos garantem a separação dos obstáculos. Esses espaços são estabelecidos como: Aerovias (AWY), Áreas de Controle (TMA) e Zonas de Controle (CTR) [2].

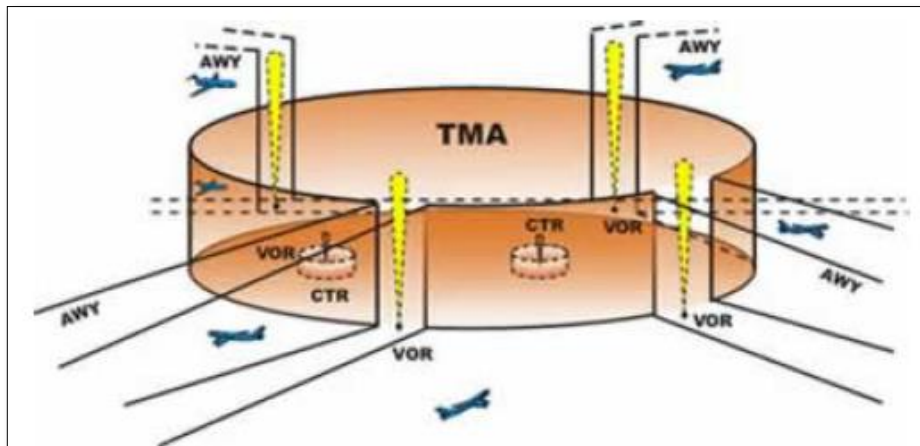


Figura 2.1 – Estrutura do Espaço Aéreo [3]

2.2.2 Espaço Aéreo Não-Controlado

Região onde são fornecidos, somente, os serviços de informação de voo e de alerta. As aeronaves voam, sujeitas às regras do ar, em ambiente onde o tráfego não é completamente conhecido. O serviço limita-se a informar os tráfegos conhecidos e as informações [2].

2.2.3 Espaço Aéreo Condicionado

Termo que define ambientes onde são realizadas atividades específicas que limitam ou impedem a aplicação dos serviços de tráfego aéreo (execução de tiro real, acrobacias, paraquedismos, etc.). Tais áreas podem ser classificadas como restritas, perigosas ou proibidas.

2.3 Órgãos Operacionais

Todos os órgãos operacionais de controle de tráfego aéreo proveem o serviço de alerta, que consiste no acompanhamento dos voos de forma a detectar qualquer acidente da forma mais rápida possível, acionando o serviço de busca e salvamento, caso necessário.

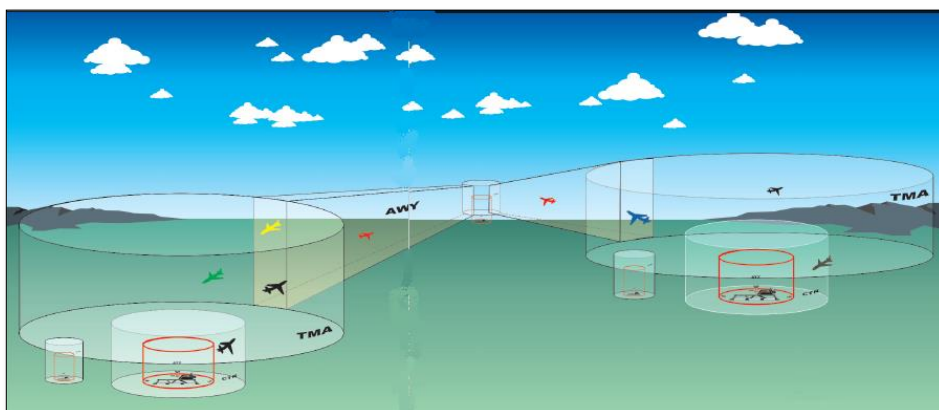


Figura 2.2 - Conexão entre TMA [2]

2.3.1 Estação de Telecomunicações Aeronáuticas (Rádio)

Órgão de tráfego aéreo que proporciona o Serviço de Informação de Voo. Sua competência principal é prestar informações às aeronaves sobre a existência de outras aeronaves próximas, obstáculos, condições meteorológicas e outras informações relevantes. Existem mais de 90 estações instaladas nos aeródromos brasileiros.

2.3.2 Torre de Controle de Aeródromo (TWR)

Fornece o Serviço de Controle de Aeródromo às aeronaves nas fases de manobra, decolagem, pouso ou sobrevoos de aeródromos. Visa principalmente evitar colisões com outras aeronaves, obstáculos e veículos movimentando-se no solo. A área de jurisdição da TWR abrange o circuito de tráfego e a área de manobras do aeródromo.

2.3.3 Controle de Aproximação (APP)

Provê o Serviço de Controle de Aproximação às aeronaves que estejam executando procedimentos para chegar ou partir de aeródromo. Visa, sobretudo, a separação de outras aeronaves e obstáculos. A área de jurisdição do APP é o espaço aéreo denominado Área de Controle de Terminal (TMA) ou Zona de Controle (CTR). Atualmente há 47 APP instalados no Brasil.

2.3.4 Centro de Controle de Área (ACC)

Fornece o Serviço de Controle de Área às aeronaves quando elas já estão no voo em rota, a fim de garantir a separação entre as mesmas com segurança. A área de jurisdição do ACC é o espaço denominado Região de Informação de Voo (FIR). Essas regiões são estabelecidas abrangendo diversas TMA e rotas de voo, denominadas aerovias. Atualmente há cinco ACC instalados no país.



Figura 2.3 - Divisão por FIR [4]

2.4 Órgãos Auxiliares

Existem outros serviços ligados diretamente ao controle de tráfego aéreo, como Meteorologia Aeronáutica, Cartografia Aeronáutica e Informações Aeronáuticas, mas não iremos abrangê-los aqui.

2.5 Telecomunicações Aeronáuticas

A prestação dos serviços de tráfego aéreo é fortemente apoiada no uso de telecomunicações. As comunicações são divididas em duas: a primeira entre os controladores de tráfego aéreo e os pilotos, chamada de SMA (Serviço Móvel Aeronáutico), e a segunda entre os órgãos de controle, chamada de SFA (Serviço Fixo Aeronáutico) [2].

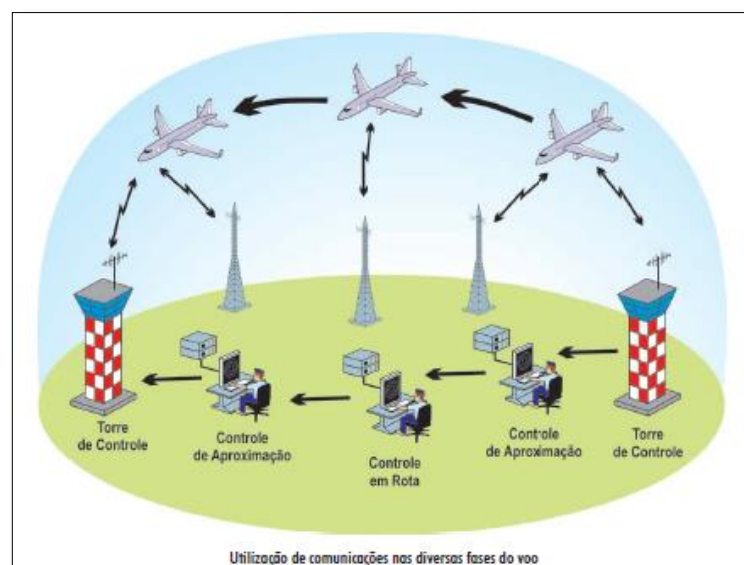


Figura 2.4 - Esquemático da Comunicação durante o voo [2]

2.5.1 SMA – Serviço Móvel Aeronáutico

Destinado às comunicações entre os órgãos de controle e as aeronaves. É formado por estações de comunicação-rádio espalhadas por todo território nacional. Considerando o elevado nível de confiabilidade requerido, esse serviço apoia-se em diversas estações e em diferentes faixas de frequência, chegando a mais de 380 estações pelo Brasil [2].

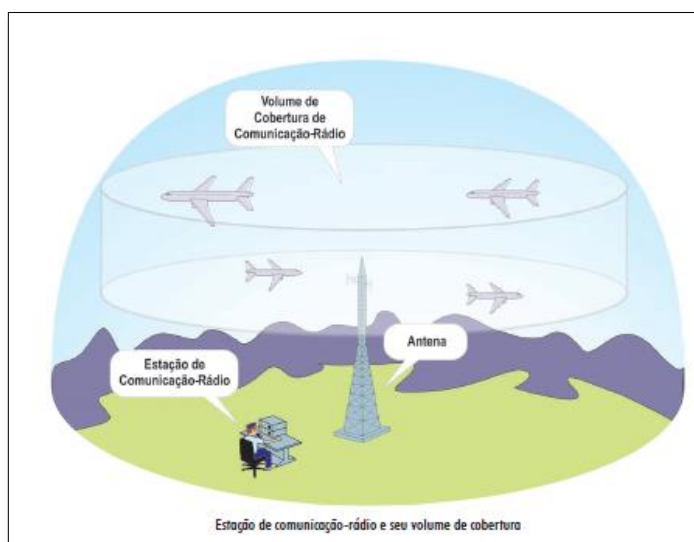


Figura 2.5 - Cobertura Estação Rádio [2]

Há também em operação um sistema de comunicações data link ar-terra. No ACC Atlântico, que é responsável pelo controle de tráfego aéreo na travessia para Europa e África, podem ser realizadas trocas de mensagens digitais através do sistema data link ar-terra chamado CPDLC.

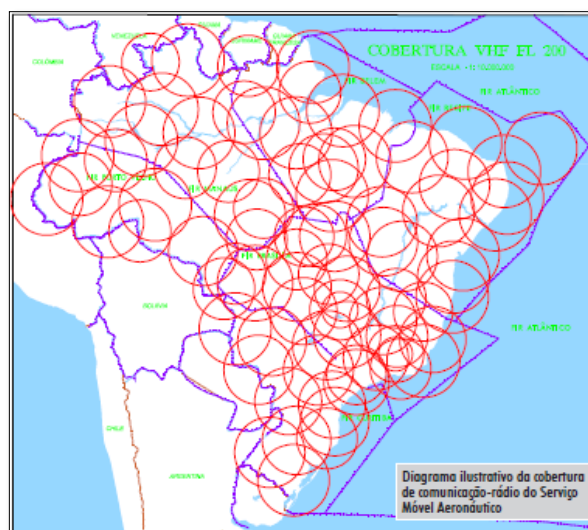


Figura 2.6 - Cobertura Radar [2]

2.5.2 SFA – Serviço Fixo Aeronáutico

As comunicações entre os órgãos de controle de tráfego aéreo são executadas, basicamente, por meio de redes de comunicação de telefonia. Os órgãos possuem ramais telefônicos chamados “hotline” que permitem comunicações operacionais imediatas [2].

2.6 Auxílios à Navegação

A utilização de referências visuais para orientação do voo foi se mostrando ineficiente ao longo do tempo, pois impedia o deslocamento a noite e/ou também sob condições meteorológicas adversas.

O desenvolvimento de sistemas de navegação eletrônicos foi a solução encontrada para disponibilizar referências de navegação por instrumentos.

Os sinais eletrônicos produzidos têm duas características de propagação: a primeira é semelhante às estações de rádio de grande alcance (ondas curtas e médias), com baixa qualidade, e a segunda é que também existem na faixa de frequências das rádios FM, com melhor qualidade.

Esses instrumentos foram importantes para a expansão de rotas através de balizamento de aerovias e para procedimentos de pousos e decolagens.

Todos esses equipamentos utilizados para navegação devem possuir sistemas de transmissão duplicados ou redundantes, sistemas de energia estáveis e redundantes (utilizando além da energia comercial, um grupo de geradores específicos) e outros equipamentos que permitam a confiabilidade e a precisão requeridas.

2.6.1 NDB

Equipamento de radionavegação que emite um sinal para ser detectado em receptores ADF de aeronaves, permitindo, assim, indicar o sentido da estação em que o equipamento está instalado e seu prefixo de identificação. Os NDB operam na faixa de frequência de 190 a 1.750 kHz.

Embora seja um equipamento de pouca precisão, é usado no Brasil para o balizamento de rotas e para apoio a procedimentos de não precisão por instrumentos, devido ao seu baixo custo e bom alcance.

Existem no país quase 200 equipamentos desse tipo [2].

2.6.2 VOR

Equipamento de radionavegação que transmite informações de azimute em voo, que são utilizadas pelo piloto na determinação da rota da aeronave com relação à estação em terra, tendo como referência o Norte magnético. Ele transmite, ainda, um sinal de identificação codificado, por intermédio do qual o piloto é informado em qual estação VOR seu receptor de bordo está sintonizado. Os VOR operam na faixa de frequência VHF de 112 a 118 MHz, onde o sinal irradiado é composto por um sinal de referência, omnidirecional, e um sinal variável, cuja fase está diretamente relacionada com o azimute. A informação de azimute é obtida pela medida da diferença de fase dos dois sinais.

Utilizado para balizamento de rota e nos procedimentos de aproximação por instrumentos de não precisão.

Este equipamento é muito sensível às irregularidades do terreno e a interferências eletromagnéticas.

Existem no país quase 90 equipamentos desse tipo [2].

2.6.3 DME

É um auxílio-rádio com dois componentes: um terrestre (estação DME) e um a bordo da aeronave. O DME fornece à aeronave uma indicação precisa e contínua de distância oblíqua, em NM, em todas as direções, relativa ao ponto no solo onde se encontra a estação DME.

O equipamento de bordo, interrogador, envia um sinal de interrogação composto por uma sequência de pares de pulsos à estação. Esta processa o sinal e transmite uma resposta para a aeronave com a mesma sequência de pares de pulsos da interrogação.

O sistema DME pode ser sintonizado em qualquer dos 252 canais na faixa de frequência de 962 a 1.213 MHz.

Existem cerca de 100 equipamentos desse tipo [2].

2.6.4 ILS

É um auxílio-rádio composto pelos subsistemas LOC, GS e Marcadores. Fornecem a indicação de rampa e o curso de aproximação para a aeronave, apoiando procedimentos de aproximação de precisão sob condições meteorológicas adversas.

2.6.4.1 LOC

Indica o curso a ser seguido pela aeronave, isto é, a posição da aeronave (esquerda/direita) em relação ao eixo da pista.

Ele envia um sinal codificado em Código Morse, que permite ao piloto identificar em qual Estação o seu receptor de bordo está sintonizado.

2.6.4.2 GS

Indica a rampa de planeio para a aeronave até o ponto de toque, de acordo com o ângulo estabelecido para a aproximação.

2.6.4.3 Marcadores

Fornecem a indicação precisa da distância da aeronave em relação à cabeceira de aproximação.

2.6.5 Auxílios Visuais

Equipamentos e sistemas destinados a melhorar a capacidade operacional e a segurança das aeronaves durante as operações de aproximação e pouso, particularmente durante os períodos noturnos e/ou visibilidade reduzida.

2.6.5.1 ALS

Auxílio luminoso, que fornece a informação visual de alinhamento de pista, percepção de altura, orientação para nivelamento de asas e referências horizontais.

2.6.5.2 PAPIS

Auxiliam visualmente o correto ângulo de descida das aeronaves.

2.6.6 GNSS

Todos esses sistemas de navegação serão substituídos, gradativamente, pelo Sistema de Navegação por Satélite. Hoje temos três sistemas GPS, GLONASS e GALILEO.

2.7 Vigilância Aérea

Os radares e os sistemas de visualização são empregados no controle de tráfego aéreo e na defesa aeroespacial, provendo a vigilância do espaço aéreo por meio de fornecimento de

dados de azimute, distância, altitude e velocidade, e permitindo a visualização das aeronaves em circulação no espaço aéreo nacional [2].

Os radares são divididos em dois tipos básicos: primários e secundários.

Os radares primários utilizam a reflexão das ondas eletromagnéticas emitidas por uma antena instalada no solo.

Os radares secundários dependem de equipamentos instalados a bordo das aeronaves para poder responder às interrogações (identificação e altitude) emitidas pelo equipamento de terra.

Os sinais provenientes de Sistemas Radar são transmitidos simultaneamente, por dois enlaces redundantes, aos respectivos Centros de Controle, onde serão enviados a tela do controlador após passar pelo STVD.

O SAGITARIO é o software responsável por processar os dados de diversas fontes como radares e satélites e consolidá-los em uma única apresentação visual para o controlador de voo [4].

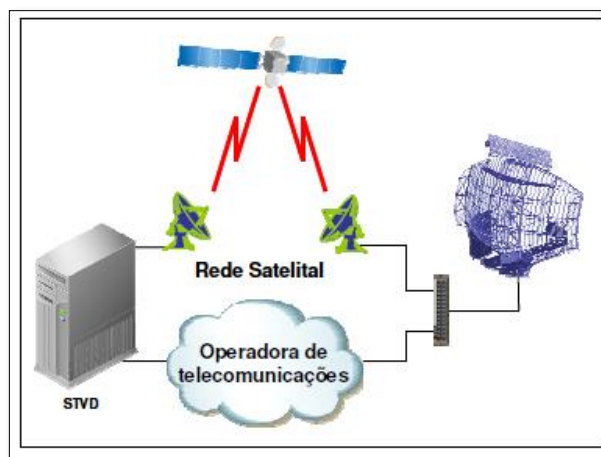


Figura 2.7 - Transmissão de dados do Sistema de Vigilância [5]

2.7.1 Radares de Rota

Apoiam o controlador de tráfego aéreo na orientação das aeronaves que estão evoluindo na fase de voo de rota.

2.7.1.1 ASR

Deteção radar das aeronaves que evoluem acima do FL200. Atualmente são usados aproximadamente 40 radares entre os modelos primários TRS 2230, TPS B34, LP 23M e

ASR23SS, apoiado de secundários RSM-970S. Esses equipamentos possuem alcance nominal da ordem de 200 NM (aproximadamente 370 km) e 20.000 ft (aproximadamente 6100 m) [2].

2.7.2 Radares de Aproximação

Utilizados em regiões próximas aos aeroportos, que fornecem dados para otimizar o fluxo dos tráfegos dentro de sua TMA e proporcionam maior segurança e rapidez nos processos de pouco e decolagem.

2.7.2.1 Radar de Vigilância em Áreas Terminais

Atualmente com aproximadamente 30 unidades, compostos por modelos primários TA10-M, TA10-M1, STAR 200, ASR-7 e ARCR-33 apoiados por secundários RSM-970S, TPX-2 e SIR7. Esses radares têm mais precisão que os de rota, porém menor alcance [2].

2.7.2.2 GCA

Constitui um conjunto de equipamentos do qual fazem parte tanto radares de vigilância quanto o PAR, sendo aplicado, normalmente, para apoio à aviação militar.

2.7.3 Radar de Vigilância de Movimentos de Superfície em Aeroportos

Radares utilizados em aeroportos para auxiliar a torre no movimento de superfície.

2.7.4 Estação Radiogoniométrica em VHF (VHF-DF)

Equipamento, que em caso de emergência pode ser utilizado para auxiliar uma aeronave perdida a localizar-se através de comunicação VHF [2].

3. ATMOSFERA

3.1 Introdução

O estudo da atmosfera é essencial para entender o comportamento das descargas atmosféricas e da propagação de ondas. A atmosfera não é uniforme, varia com altura, localização geográfica, clima ou tempo, e todas essas variáveis influenciam na passagem de ondas eletromagnéticas através dela.

3.2 Composição Química

A atmosfera é composta por uma mistura de gases, divididas nas seguintes proporções:

Composição	Peso Molecular	Concentração Volumétrica (%)
Nitrogênio (N_2)	28,01	78.08%
Oxigênio (O_2)	32,00	20.95%
Argônio (Ar)	39,95	0.93%
Dióxido de Carbono (CO_2)	18,02	0.03%
Vapor d'água (H_2O)	44,01	0 – 5%
Neônio (Ne)	20,18	18 ppm
Hélio (He)	4,00	5 ppm
Metano (CH_4)	16,04	1.75 ppm
Criptônio (Kr)	83,80	1 ppm
Hidrogênio (H_2)	2,02	0,5 ppm
Óxido Nitroso (N_2O)	56,03	0,3 ppm
Ozônio (O_3)	48,00	0,1 ppm

Tabela 3.1 - Composição Atmosférica

O Nitrogênio (N_2) e o Oxigênio (O_2) são os gases dominantes em nossa atmosfera, e entre os gases nobres, o Argônio (Ar) se destaca.

O vapor d'água é variável, a depender da região em que se encontra, nas regiões mais frias por exemplo, pode ter cerca de 10 ppmv, enquanto em regiões de ar quente e úmido, alcancem até 5% em volume atmosférico. Devido a variabilidade das concentrações de vapor d'água, as porcentagens dos gases geralmente são ligadas ao “ar seco”.

O ozônio também é altamente variável, é importante frisar que concentrações acima de 0.1 ppmv são consideradas perigosas à saúde humana.

Embora aerossóis e as gotículas de nuvem representem apenas uma fração mínima da massa da atmosfera, estes elementos estão envolvidos no ciclo hidrológico e de outras reações químicas importantes, além de participar da separação de carga elétrica e efeitos ópticos atmosféricos diversos [6].

3.3 Estrutura Vertical

Uma clássica divisão da atmosfera é a baseada na temperatura, que divide a atmosfera em quatro camadas: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera. Além dessas camadas, temos também as chamadas camadas de separação: Tropopausa, Estratopausa e Mesopausa. Essas camadas de separação são os limites superiores de cada camada atmosférica, conforme podemos ver na Figura 3.1.

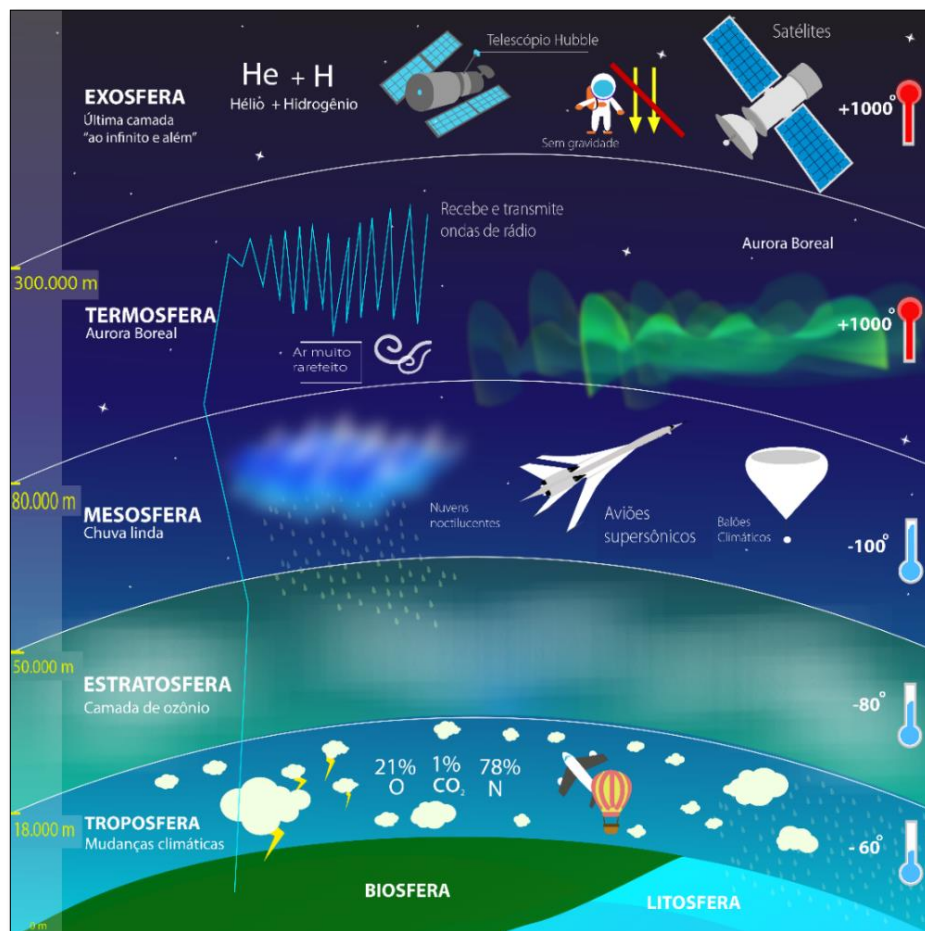


Figura 3.1 - Perfil vertical da Atmosfera em camadas [7]

3.3.1 Troposfera

Sua característica é a queda de temperatura de acordo com a altura, que é de aproximadamente $6,5^{\circ}\text{C}$ a cada km de altura, isto acontece porque o vapor d'água existente absorve radiação e energia solar, e sua concentração decresce com a altitude, além do que boa parte do calor é absorvido pelo solo, o que resulta em maiores temperaturas na superfície [6].

A troposfera estende-se desde a superfície até uma altitude que pode variar entre 8 a 18 km, sendo mais baixa nos polos (zonas frias) e mais elevadas acima da linha do Equador (zonas quentes).

O ar da troposfera representa quase 80% da massa da atmosfera, é relativamente bem misturado e continuamente limpo ou eliminado de aerossóis por gotas de nuvens e partículas de gelo, que caem no chão como chuva ou neve.

Seu limite é definido pela tropopausa, onde a temperatura é a mínima, podendo variar entre -60°C e -80°C [8].

3.3.2 Estratosfera

Nesta camada, a mistura é inibida devido ao aumento de temperatura com a altura. A característica da forma de bigorna criada pela disseminação no topo de nuvens geradas por tempestades intensas e erupções vulcânicas quando atingem a tropopausa, é devido à forte estratificação.

O ar da estratosfera é extremamente seco e rico em ozônio. A absorção da radiação solar na região ultravioleta do espectro por esta camada de ozônio estratosférico é crítica para o planeta. O ponto em que a temperatura é máxima nessa parte da atmosfera (aproximadamente a 50 km) define a estratopausa, ou seja, o fim da estratosfera [6].

3.3.3 Mesosfera

Encontra-se acima da estratopausa, nesta camada a temperatura volta a cair de acordo com a altura, chegando a aproximadamente -93°C , quando a temperatura mínima é alcançada, delimitada pela mesopausa [8].

3.3.4 Termosfera

Nesta camada, a temperatura volta a aumentar com a altura, podendo alcançar 1700°C devido à absorção da radiação solar em associação com a dissociação de Nitrogênio (N_2), moléculas de Oxigênio (O_2) e remoção de elétrons dos átomos [8]. Esses processos são chamados de fotodissociação e fotoionização. As temperaturas fora da termosfera respondem às variações na emissão de radiação ultravioleta e de raios-x do sol.

Além dessas camadas tradicionais discutidas, podemos adicionar mais duas: Exosfera e Ionosfera.

3.3.5 Exosfera

Esta camada varia entre 250 e 500 km, dependendo da temperatura, demarcando a transição entre a atmosfera terrestre e o espaço [8].

3.3.6 Ionosfera

Não é exatamente uma camada, mas sim uma região eletrificada dentro da atmosfera, onde existem concentrações razoavelmente grandes de íons e elétrons livres. Tem início a aproximadamente 75 km de altura, estendendo-se até a exosfera, abrangendo parte da mesosfera e toda termosfera, conforme Figura 3.2. Essa camada é altamente ionizada devido à elevada energia transportada pelos raios solares e cósmicos, ela desempenha papel fundamental já que influencia a propagação de ondas de rádio [8].

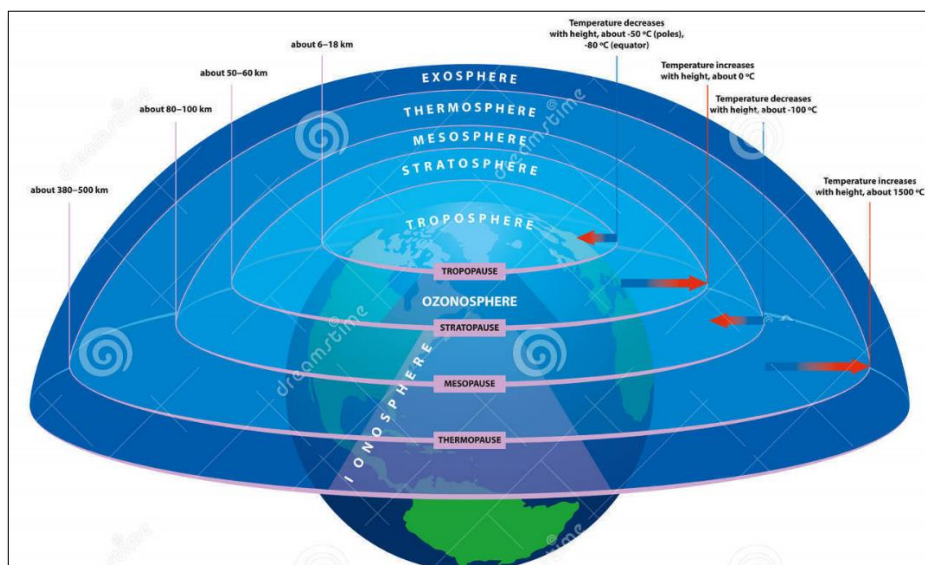


Figura 3.2 - Atmosfera em camadas com inclusão da Ionosfera [9]

4. FORMAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE NUVENS

4.1 Introdução

As nuvens resultam dos movimentos ascensionais do ar úmido, que permitem que ele, resfriando-se adiabaticamente, alcance seu ponto de saturação e atinja a temperatura do ponto de orvalho, iniciando-se, assim, a condensação do conteúdo de vapor existente no ar [10].

As nuvens são formadas por gotículas d'água em suspensão no ar, com diâmetros variando de 10 a 100 μm , e por cristais de gelo, que tendem a ser um pouco maiores que as gotículas d'água. A proporção de água e gelo com que são constituídas depende do tipo da nuvem [10].



Figura 4.1 - Processo de formação de uma nuvem [10]

Os movimentos ascensionais podem se dividir em quatro: *Aquecimento da superfície e convecção livre*, *Ascensão devido topografia*, *Ascensão devido convergência do ar na superfície* e *Ascensão devido frentes meteorológicas*.

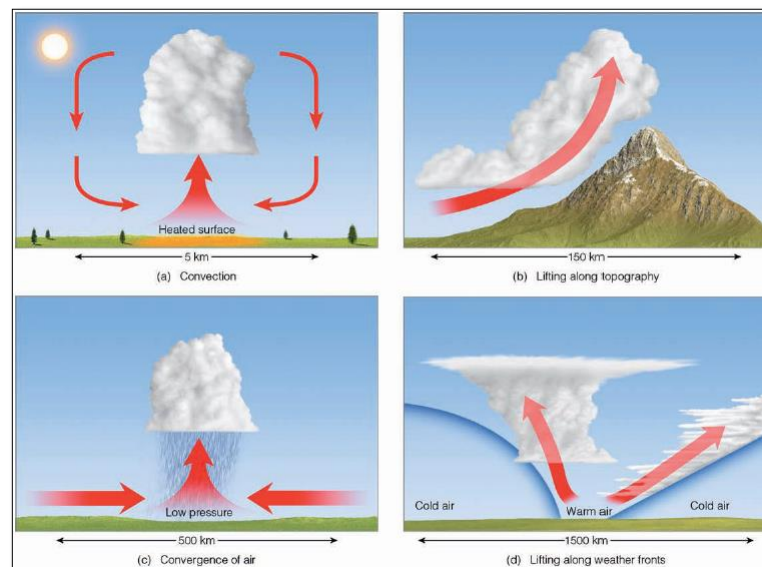


Figura 4.2 - Movimentos Ascensionais [11]

O sistema de classificação atual das nuvens foi desenvolvido por um naturalista inglês chamado Luke Howard. Ele empregou palavras em latim para descrever as nuvens na forma em que apareciam para um observador no solo. Palavras como *stratus* (“camada”), *cumulus* (“grande quantidade”), *cirrus* (“cachos de cabelo”) e *nimbus* (“chuva violenta”) [11].

As nuvens podem ser divididas em 4 grandes grupos: Nuvens Altas, Nuvens Médias, Nuvens Baixas e Nuvens com desenvolvimento vertical.

4.2 Nuvens Altas

Geralmente acima de 7000m. Nessa altura o ar é frio e seco, fazendo com que as nuvens sejam basicamente de cristais de gelo e bem finas.

4.2.1 Cirrus (Ci)

São nuvens isoladas em forma de filamentos brancos e delicados, ou de bancos espessos, ou de faixas estreitas brancas ou quase brancas. Apresentam aspecto fibroso e/ou brilho sedoso. Em geral são constituídas de cristais de gelo.



Figura 4.3 - Cirrus [11]

4.2.2 Cirrostratus (Cs)

São altas e muito finas, cobrem todo o céu. Tem aspecto liso ou fibroso. Sua espessura permite a ver a lua e o sol através delas. Os cristais de gelo nestas nuvens dobram a luz que passa através deles e muitas vezes produzem um halo (anel de luz que circunda o sol ou a lua). Normalmente se formam à frente de uma tempestade que avança. Sendo úteis para prever chuva.



Figura 4.4 - Cirrostratus [11]

4.2.3 Cirrocumulus (Cc)

Lençol, banco ou camada delgada de nuvens brancas, sem sombra própria, formado de elementos muito pequenos, semelhantes a grãos, rugas, flocos, ligados ou não. É composta em geral por cristais de gelo, podendo conter gotículas d'água sobrefundidas que congelam rapidamente.



Figura 4.5 - Cirrocumulus [11]

4.3 Nuvens Médias

Ficam geralmente entre 2000 e 7000m. Compostas de gotículas d'água, podendo ter alguns cristais de gelo se a temperatura estiver baixa o suficiente.

4.3.1 Altostratus (As)

Lençol ou camada, de cor acinzentada ou azulada de aspecto estriado, fibroso ou uniforme, cobrindo o céu parcialmente ou totalmente. Constituídas de gotículas d'água e cristais de gelo, podendo conter gotas de chuva ou flocos de neve.



Figura 4.6 - Altostratus [11]

4.3.2 Altocumulus (Ac)

Banco, lençol ou camada branca e/ou cinzenta. É formada por elementos com aspecto de glóbulos, lâminas ou rolos. Às vezes são parcialmente fibrosas e com sombra própria. São compostas por gotas d'água e raramente possuem cristais de gelo.



Figura 4.7 - Altocumulus [11]

4.4 Nuvens Baixas

Abaixo de 2000m, são quase sempre compostas de gotículas d'água; no entanto podem conter partículas de gelo e neve.

4.4.1 Stratus (St)

Cinzenta de base uniforme, bem espessa, às vezes com aspecto sombrio. Formada por gotículas de água, podendo conter partículas de gelo em temperaturas muito baixas. Quando produz precipitação, é dada na forma de chuvisco.

4.4.2 Stratocumulus (Sc)

Camada ou lençol de cor cinzenta e/ou esbranquiçada, possuindo partes escuras não fibrosas, onduladas ou enrugadas. Compostas por gotículas d'água, acompanhadas ou não de gotas de chuva, produzindo precipitação fraca.



Figura 4.8 - Stratocumulus [11]

4.4.3 Nimbostratus (Ns)

Camada baixa, extensa e cinzenta, de aspecto sombrio. Sua porção inferior é difusa devido à chuva que cai continuamente. É formada por gotículas d'água e por gotas de chuva. Em regiões mais frias gotas sobrefundidas e cristais de gelo, ou flocos de neve.



Figura 4.9 - Nimbostratus [11]

4.5 Nuvens com desenvolvimento vertical

São também classificadas como nuvens baixas, geradas pelos movimentos convectivos que formam nuvens do tipo Cumulus, podendo ultrapassar os 18 km de extensão. Podem trazer chuvas pesadas, granizo, neve e relâmpagos.

4.5.1 Cumulus (Cu)

Nuvens isoladas, densas e de contornos bem definidos, que lembram montes, torres ou cúpulas, cuja porção superior assemelhasse com uma couve-flor. As partes iluminadas pelo sol são brancas e brilhantes, a base é cinzenta ou escura, devido à sombra projetada pelas regiões superiores. Formadas por gotículas de água, as mais espessas podem conter gelo na porção superior.



Figura 4.10 – Cumulus [11]

4.5.2 Cumulonimbus (Cb)

Nuvem volumosa, muito densa, de grande desenvolvimento vertical, com forma de montanha, encimada por uma imensa “bigorna”. Sua base está próxima a superfície terrestre, mas seu topo pode alcançar níveis muito elevados. Produzem aguaceiros violentos, acompanhados de relâmpagos e trovões. Podem produzir granizo ou saraiva. Na parte inferior é formada por gotículas de água e gotas de chuva, e na parte superior por cristais de gelo, neve e pelotas de gelo.



Figura 4.11 – Cumulonimbus [11]

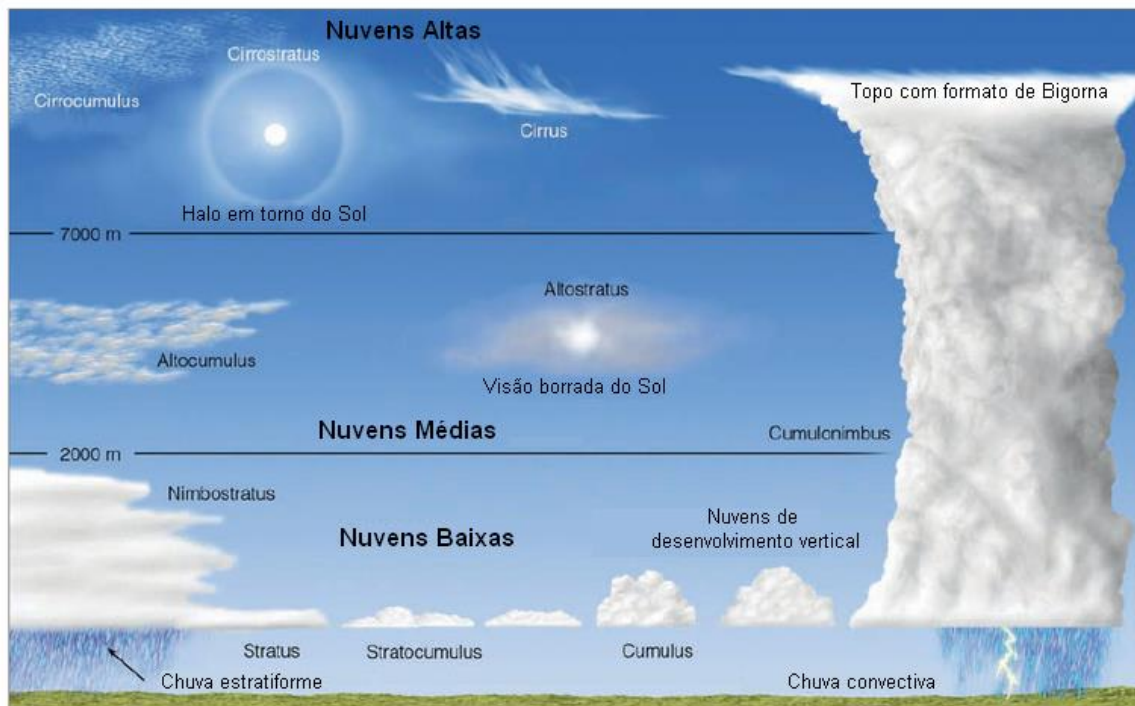


Figura 4.12 - Tipos de Nuvens [11]

5. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

5.1 Geração de cargas

Todas as nuvens são eletrificadas até certo ponto, porém em grandes nuvens convectivas, as cargas são separadas para produzir campos elétricos que excedem a degradação dielétrica do ar nublado ($\sim 1 \text{ MV/m}$) resultando numa descarga de relâmpagos intranuvem (entre dois pontos na mesma nuvem) [6].

Existem alguns métodos para observar o comportamento das cargas e sua distribuição nas nuvens de tempestade, isso pode ser feito através da medição de campos elétricos, por meio de radiossondas especiais e aviões com instrumentos para esse tipo de procedimento.

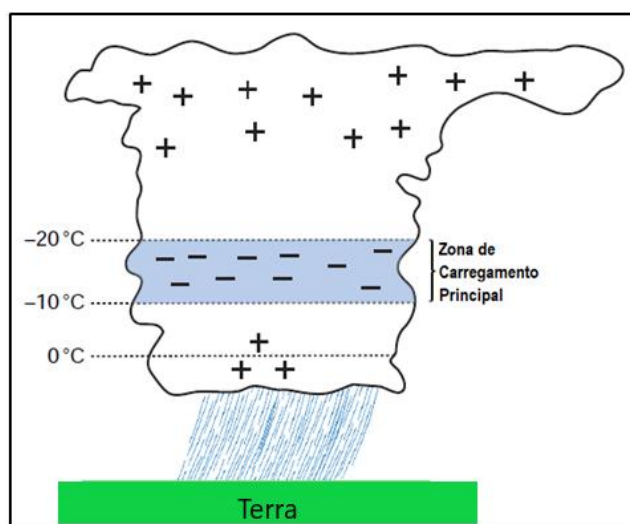


Figura 5.1 – Geração de Cargas [6]

Podemos visualizar na figura 5.1 um modelo clássico e mais aceito no meio científico da distribuição de cargas em nuvens de tempestade. A localização da carga negativa é chamada de “zona de carregamento principal” ou “zona de carga principal”, e é bem definida entre os níveis de temperatura de -10°C e -20°C . A carga positiva é distribuída entre uma região mais difusa acima da carga negativa. Embora haja relatos de raios em nuvens quentes, a grande maioria ocorre em nuvens frias [6].

A principal teoria para a eletrificação de uma nuvem de tempestade surge da ocorrência de precipitação pesada de partículas de neve e/ou granizo dentro da própria nuvem. Onde partículas de neve/granizo vão caindo através da nuvem, sendo carregados negativamente

devido a colisões com outras pequenas partículas de nuvem, que podem ser gotículas ou gelo, dando origem à carga negativa da zona de carga principal [6].

A carga positiva correspondente é transmitida às partículas da nuvem e são levadas por correntes ascendentes para as regiões superiores da nuvem.

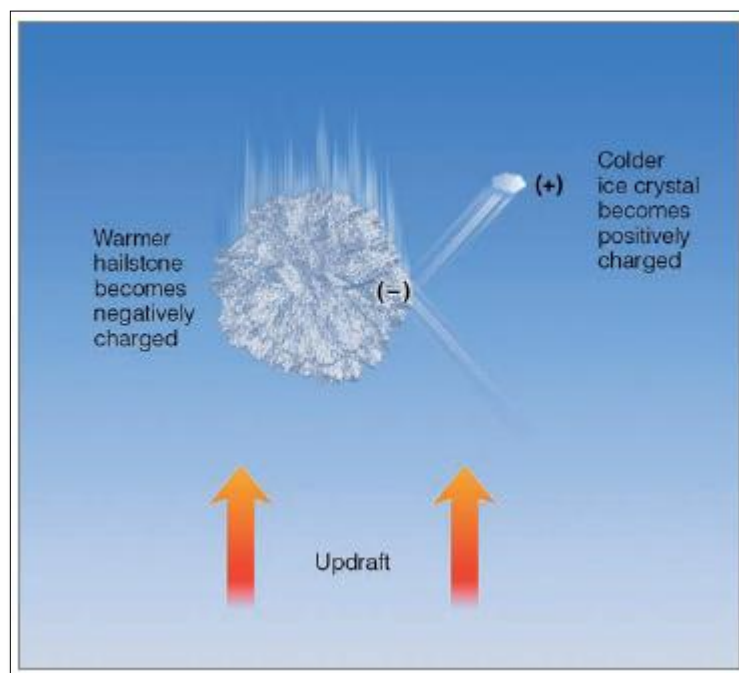


Figura 5.2 – Partícula de Granizo [11]

Em algumas tempestades, uma carga positiva fraca é observada logo abaixo da zona de carregamento principal. Isso pode ser associado ao carregamento de precipitação sólida durante os processos de fusão ou de fase mista [6].

5.2 Relâmpago

À medida que as cargas elétricas são separadas em uma nuvem, a intensidade do campo elétrico aumenta e eventualmente excede aquilo que o ar pode sustentar. Ocorre então a ruptura dielétrica, resultando na forma de um relâmpago. Que podem ser divididos em relâmpagos na nuvem (dentro da nuvem, entre nuvens ou da nuvem para o ar) e relâmpagos no solo (entre a nuvem e o chão) [6].

5.2.1 Relâmpagos no solo

Os relâmpagos no solo se originam negativamente do centro de carga negativa principal na forma de uma descarga, chamada de “stepped leader”, tendo várias definições em português como descarga líder, raio líder ou piloto descendente. A descarga líder move-se para baixo em

direção ao solo em etapas discretas. Cada etapa dura cerca de $1 \mu\text{s}$, onde a descarga líder avança cerca de 50m [6].

O intervalo entre cada etapa é de $50 \mu\text{s}$. Acredita-se que a descarga líder é iniciada por uma descarga local entre a região carregada negativamente e a pequena porção de carga positiva na base da nuvem. Essa descarga libera elétrons que estavam anexados a partículas de precipitação na região negativa. Esses elétrons livres neutralizam a pequena porção de carga positiva na base da nuvem e depois se movem para o solo [6].

A medida que a descarga líder se aproxima do solo, induz cargas positivas no solo, especialmente em objetos salientes, e a aproximadamente entre 10 a 100 m, uma descarga move-se do solo para encontra-lo. Após o contato entre a descarga líder e a descarga proveniente do solo, um número elevado de elétrons flui para o solo gerando raios visíveis altamente luminosos entre a nuvem e o solo. Este fluxo de elétrons é chamado “return stroke”, ou seja, descarga de retorno ou simplesmente retorno, e é responsável pelo canal de luz brilhante, chamado de raio [6].

O processo é tão rápido que tudo parece ocorrer simultaneamente. Após o fluxo descendente de elétrons, tanto o retorno quanto o solo ficam carregados positivamente. Todo processo pode ser visualizado na figura 5.3.



Figura 5.3 – Formação de descargas atmosféricas nuvem-solo [11]

Em montanhas e edifícios, o processo é semelhante, porém o início ocorre na direção contrária, a descarga líder parte da montanha ou estrutura saliente na direção da nuvem.

A maior parte dos relâmpagos no solo carregam carga negativa para o solo, em média apenas 10% carregam cargas positivas para o chão, como vemos nas figuras 5.4, 5.5 [6].



Figura 5.4 – 90% dos casos são de cargas negativas para o solo [12]

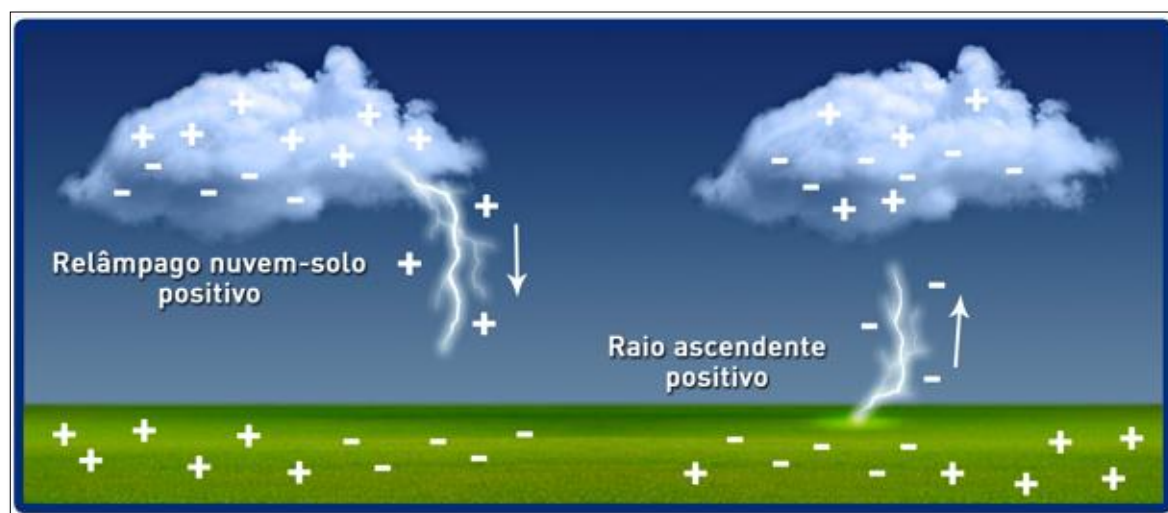


Figura 5.5 – Os outro 10% dos casos são de cargas positivas para o solo [12]

5.2.2 Relâmpagos na nuvem

Os relâmpagos na nuvem originam-se dentro das nuvens Cumulonimbus e propagam-se dentro da nuvem (intranuvem), fora da nuvem rumo à outra nuvem (nuvem-nuvem) ou numa direção qualquer (nuvem-ar). Dentro dessa classificação, 70% são do tipo intranuvem [12].



Figura 5.6 – Relâmpagos na nuvem [12]

Descargas de raios dentro de uma nuvem que geralmente neutralizam os principais centros de cargas positivas e negativas. Essa descarga é discreta, agindo como uma faísca ou líder que se ramifica e se desloca entre as regiões carregadas positivamente e negativamente em poucos décimos de segundo. Essa corrente produz uma luminosidade baixa e contínua na nuvem, onde vários pulsos mais brilhantes se sobrepõem a cerca de 1 ms, esses pulsos brilhantes são o que conhecemos como “clarões”. Tempestades tropicais geralmente produzem dez descargas entre nuvens para cada descarga no solo [6].

5.2.3 Outros tipos de Relâmpagos

5.2.3.1 Relâmpago Esférico

É uma esfera luminosa que geralmente ocorre perto das tempestades, mas não necessariamente simultaneamente a um relâmpago normal. A luz desse relâmpago pode ser emitida em cor vermelha, amarela, azul, laranja ou branca. Seu formato é pequeno, com cerca de 10 a 40 cm de diâmetro. Surgem próximos ao solo e mantêm brilho constante até sumir.

5.2.3.2 Relâmpagos Bipolares

São chamados assim porque apresentam correntes de ambas as polaridades. Possivelmente se iniciam com uma descarga de retorno negativa [12].

5.2.3.3 Relâmpagos em Vulcões

Para que um raio se forme, há uma componente chave: uma grande separação de cargas entre duas massas. Se a separação de carga se tornar grande o suficiente, ela será capaz de dominar a resistência do ar, criar um caminho de ar ionizado e conduzir eletricidade na forma

de um raio. As cinzas que são expelidas pelo vulcão começam como rocha eletrostaticamente neutra ou fragmentos de rocha. Acredita-se que o calor e o movimento dentro do vulcão sejam a primeira fonte de carga de partículas, embora o principal processo pelo qual as partículas de cinzas adquiram uma carga seja o atrito. Quando a cinza com uma carga neutra entra em contato com outro objeto com qualidades eletrostáticas diferentes, os elétrons podem fluir potencialmente e um dos objetos pode ficar carregado em relação ao outro. Pense em derrapar os pés com meias rapidamente no tapete ou esfregar um balão rapidamente contra a cabeça. O mesmo tipo de carga está se acumulando dentro da nuvem de cinzas, apenas em uma escala muito maior [13].



Figura 5.7 - Raios em Vulcões [13]

5.2.3.4 Relâmpagos em Tempestades de Areia

Tempestades de areia podem gerar espetaculares relâmpagos, mas como isso acontece exatamente ainda é um mistério.



Figura 5.8 - Raios em Tempestade de Areia [14]

Existem duas partes para o problema. Em primeiro lugar, partículas de areia são mais ou menos idênticas, em tamanho e química. Como então eles transferem a carga entre eles? Em segundo lugar, as partículas de areia são isolantes, não condutores, o que torna duplamente estranho que possam estar envolvidos na transferência de tais quantidades massivas de carga [15].

Segundo, Thomas Pähtz, do Instituto Federal de Tecnologia da Suíça, em Zurique, as partículas de areia são como esferas dielétricas idênticas. Em um campo elétrico, partículas dielétricas se tornam polarizadas, fazendo com que a carga se acumule em cada lado das esferas de areia. Quando duas esferas se tocam, a carga redistribui através do limite entre elas, criando uma partícula maior e duplamente polarizada. A ideia-chave é o que acontece quando isso se divide em dois novamente: cada partícula acaba com uma carga líquida. O processo de polarização começa novamente permitindo que as partículas aumentem sua carga ainda mais com cada colisão. Não é difícil ver como um número relativamente pequeno de colisões pode acabar transferindo enormes quantias de carga dessa maneira, apesar da ausência de qualquer tipo de meio condutor [15].

Este modelo faz algumas previsões interessantes sobre a taxa em que uma nuvem de areia deve ser bombeada. Por exemplo, prevê que nuvens rasas de poeira acabariam sendo carregadas apenas fracamente. Isto é o que você poderia esperar de ventos fracos ou grãos

pesados. Da mesma forma, nuvens muito espessas devem resultar apenas em carga fraca. No entanto, Pahtz afirma que em nuvens intermediárias, deve haver cobrança dramática. E com certeza, é exatamente isso que eles encontram, tanto em simulações numéricas de nuvens de poeira quanto em experiências reais que eles realizaram com areia real [15].

5.3 Trovão

A descarga de retorno de um raio eleva a temperatura do canal de ar em curto espaço de tempo, chegando acima de 30.000 ° C, não dando tempo do ar se expandir. Portanto a pressão nesse mesmo canal cresce quase que instantaneamente para 10 a 100 atm. O canal de alta pressão se expande tão rapidamente para o ar em volta que cria uma onda de choque poderosa (que viaja mais rápido que a velocidade do som, e mais distante, uma onda de som que é ouvida como trovão).

Trovões podem ser produzidos pela descarga líder, mas são bem mais fracos do que os causados pelas descargas de retorno [6].

5.4 Espectro Eletromagnético dos Raios

Durante a descarga atmosférica, o canal ionizado criado gera um impulso de onda eletromagnética que emite radiações dentro das várias faixas do espectro eletromagnético. Em 1987, foi feita uma revisão sobre o espectro efetivo de emissão eletromagnética das descargas atmosféricas, por Le Vine em “*Review of Measurements of the RF Spectrum of Radiation from Lightning*” [16].

A partir daí outros pesquisadores, como Uman em “*Magnetic field of lightning return stroke*”, demonstraram que as descargas de retorno dos raios nuvem-solo emitiam radiação eletromagnética em LF variando entre 10 kHz a 300 kHz. Já os raios intranuvem emitem radiação eletromagnética em VHF que variam entre 100 MHz e 800 MHz [16].

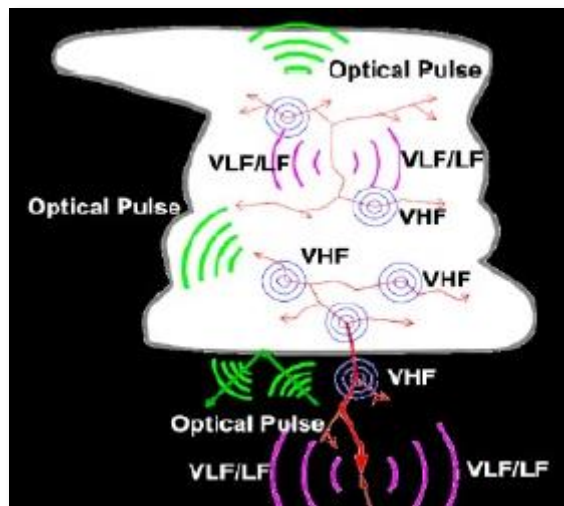


Figura 5.9 – Radiações eletromagnéticas dos raios [16]

O nível de energia no sinal gerado não é uniformemente distribuído dentro deste espectro, com as componentes de frequência de maior amplitude compreendidas na faixa de 0,5 kHz a 20 kHz e máximo no entorno de 10 kHz, conforme ilustra a Figura 5.8. Portanto, fortemente concentrado na faixa VLF e vizinhanças da LF [16].

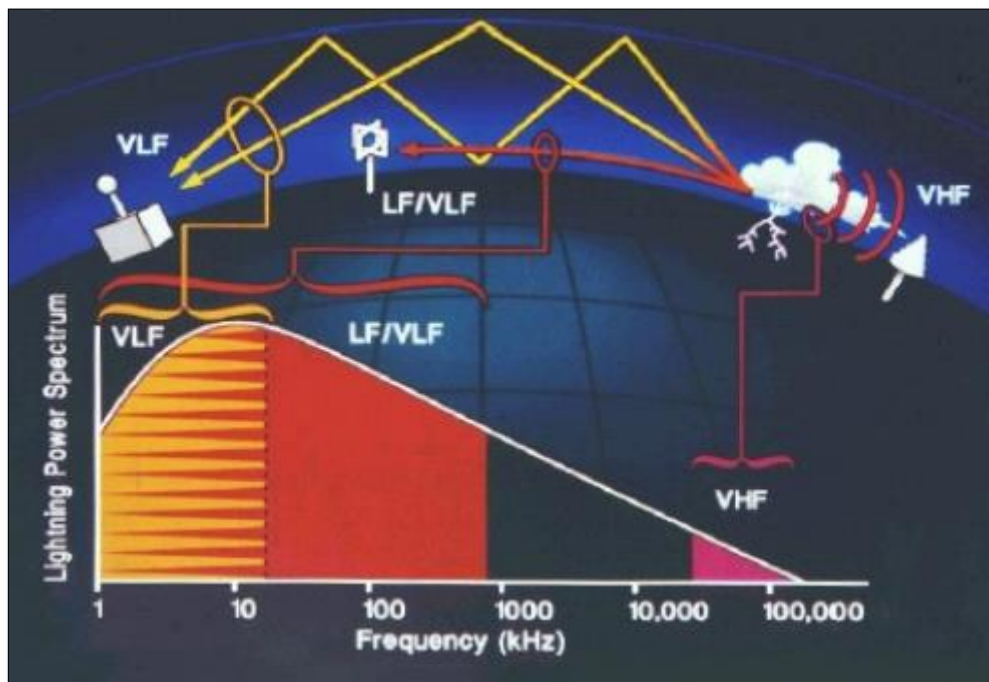


Figura 5.10 - Concentração de energia por faixa de frequência nos raios [16]

6. PROPAGAÇÃO DE ONDAS

6.1 Introdução

A onda eletromagnética radiada por uma antena geralmente se propaga para todas as direções. A energia radiada por uma antena de transmissão pode alcançar a antena receptora por infinitos caminhos diferentes, podendo deslocar-se nas proximidades da superfície terrestre. Nesse caso, ela é afetada por absorção de qualquer objeto no caminho de propagação (edifícios, árvores, etc.) e pela densidade de gases da atmosfera. Elas também podem ser espalhadas por objetos refletores de radiofrequência. Esse tipo de sinal é denominado de *onda terrestre* e é a principal fonte de energia na área de cobertura primária de uma estação.

6.2 Ondas Terrestres

Podem ser divididas na seguinte forma:

6.2.1 Onda de Superfície

Se propaga em contato com a superfície da Terra.

6.2.2 Onda Espacial

A energia é irradiada com uma inclinação positiva, ou seja, propaga-se para o espaço.

6.2.2.1 Onda Direta

Ondas que partem do emissor e vai diretamente para o receptor sem qualquer reflexão.

6.2.2.2 Onda Refletida

Ondas que chegam no receptor após reflexão no caminho.

6.2.2.2.1 Ondas Ionosféricas ou Celestes

São ondas que chegam no receptor, depois de reflexão ou espalhamento na ionosfera.

6.2.2.2.2 Ondas Troposféricas

São ondas que são refletidas ou espalhadas na troposfera



Figura 6.1 – Modos de propagação de ondas [17]

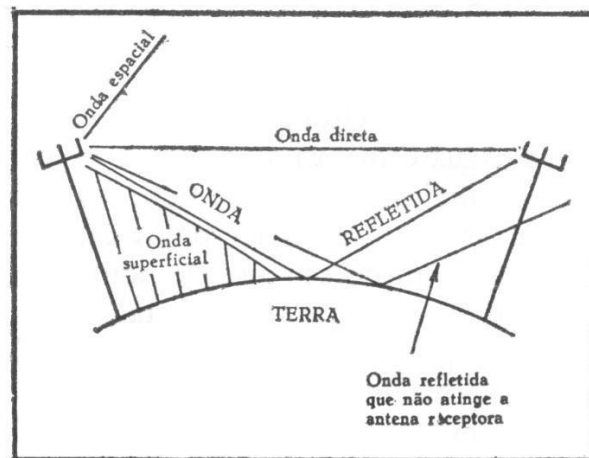


Figura 6.2 – Tipos de Ondas [17]

6.3 Efeitos de Propagação

O caso mais simples de propagação, no qual transmissor e receptor estão imersos em um espaço livre de obstruções em qualquer direção e o campo elétrico é calculado em um ponto qualquer de observação. O mecanismo de propagação determinante é o de propagação em visibilidade.

A perda (atenuação) de propagação é determinada pela relação entre a potência recebida e a potência transmitida.

A distância entre a antena transmissora e o ponto de retorno à superfície depende do ângulo de irradiação, que por sua vez é limitado pela frequência, pois quanto maior a frequência utilizada, mais difícil é a refração, apesar do maior alcance, como podemos ver na figura 6.3 [17].

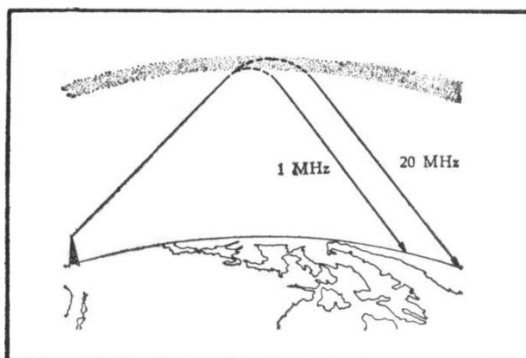


Figura 6.3 – Alcance de ondas [17]

6.3.1 Efeitos na Troposfera

O estudo do comportamento físico dessa camada é feito por meio de três parâmetros: pressão atmosférica, temperatura e pressão do vapor d'água. Os principais fenômenos, no que diz respeito à propagação das ondas eletromagnéticas na troposfera, são:

6.3.1.1 Refração

Fenômeno causado pela variação do índice de refração da camada em função da variação da altitude.

6.3.1.2 Reflexão

A onda eletromagnética sofre reflexão em superfícies como lagos, rios, mares, planícies, obstáculos planos etc.

6.3.1.3 Difração

Fenômeno causado por obstáculos pontiagudos no caminho da propagação, provocando dispersão (difração) da onda no ponto.

6.3.1.4 Absorção

A energia da onda é absorvida, principalmente pelo oxigênio e vapor d'água, além de outros tipos de absorção.

Na troposfera as nuvens são formadas e em frequências acima de 30 MHz ocorrem três fenômenos com as ondas que se propagam em linha de visada na troposfera. Em primeiro lugar, flutuações localizadas do índice de refração podem causar espalhamento. Em segundo lugar, qualquer variação abrupta do índice de refração com a altura pode causar reflexão. Finalmente, um fenômeno mais complicado, conhecido como ducto, pode também ocorrer.

Variações nas condições climáticas dentro da troposfera, como mudança de temperatura, pressão e umidade causam variação no índice de refração do ar. Grandes variações no índice de refração com a altura produzem refração da onda de rádio e o efeito pode ser muito significativo em todas as frequências, para baixos ângulos de elevação, especialmente no aumento de alcance das ondas de rádio para distâncias muito além do horizonte óptico, como na figura 6.4 [18].

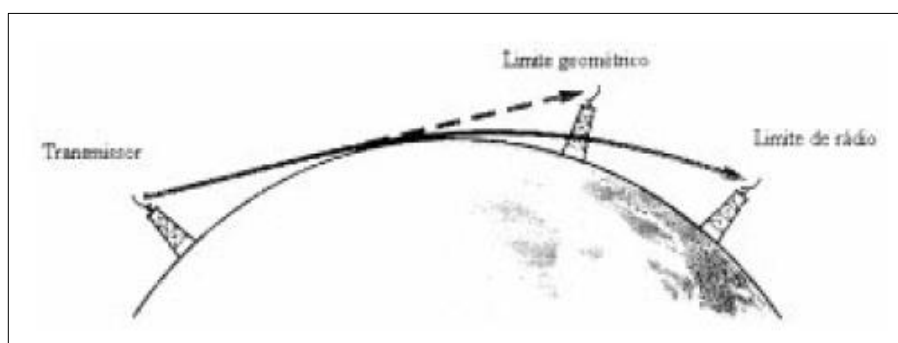


Figura 6.4 - Propagação de ondas eletromagnéticas além do horizonte óptico [18]

De todas as influências que a atmosfera pode exercer nos sinais de rádio, a refração é um dos que tem maiores efeitos em sistemas ponto a ponto em VHF e UHF.

Uma atmosfera ideal é aquela na qual a constante dielétrica é unitária e a absorção é zero. Na prática, a constante dielétrica do ar é maior do que a unidade e depende da pressão total, da pressão de vapor d'água e da temperatura do ar. A constante dielétrica varia, então, com as condições do tempo e com a altura acima da terra. Normalmente, mas nem sempre, ela diminui com o aumento da altura. A consequência de variações na constante dielétrica com a altura é que as ondas eletromagnéticas são encurvadas enquanto se propagam, em uma curva que as mantém mais próximas da terra do que se elas fizessem um percurso retilíneo [18].

A figura 6.5 mostra o encurvamento do feixe no plano vertical, devido ao fenômeno da refração da onda eletromagnética [18].

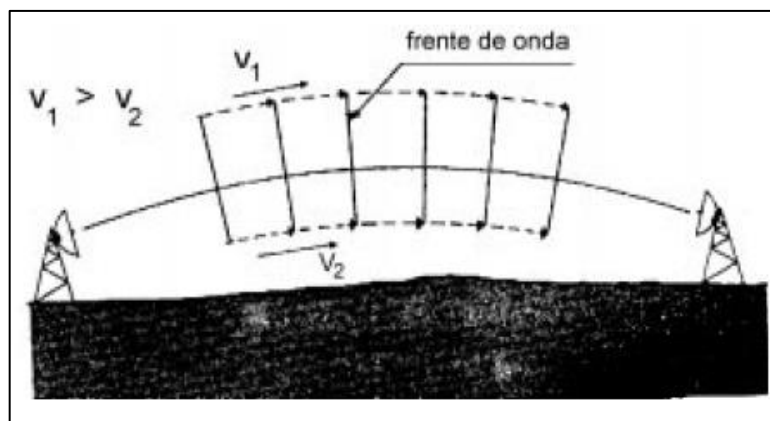


Figura 6.5 - Encurvamento da onda eletromagnética [18]

6.3.2 Efeitos na Estratosfera

A propagação de onda eletromagnética não sofre nenhuma alteração significativa nessa camada.

6.3.3 Efeitos na Ionosfera

O grau de ionização desta camada pode sofrer alterações por vários motivos como: variações ao longo do dia devido a radiação solar, variações sazonais devido às estações do ano, variações causadas pelo ciclo solar devido a manchas solares e variações em função da latitude. Todas essas variáveis fazem com que haja diversos efeitos sobre as ondas eletromagnéticas. A ionosfera é subdividida em subcamadas, ou regiões, de acordo com o grau de ionização, onde as camadas mais altas têm um grau mais elevado de ionização. Suas principais camadas são D, E e F (podendo dividir em F1 e F2), conforme figura 6.6 [18].

6.3.3.1 Camada D

Mais próxima do solo, possui ionização reduzida. Nesta camada há perda por absorção. Após o pôr do sol essa camada desaparece devido à rápida recombinação iônica. Estende-se de 50 km a 70 km [17].

6.3.3.2 Camada E

Baixa densidade de ionização, possibilita transmissões em HF acima de 2.000 km. Consegue refratar ondas com frequência maiores que na camada D. Diminui após o período diurno, podendo até desaparecer. Estende-se de 70 km a 100 km.

6.3.3.3 Camada F1

Baixa densidade de ionização e possui função refletora de algumas frequências radiofônicas. Estende-se de 100 km a 200 km.

6.3.3.4 Camada F2

É a principal camada de reflexão das frequências de comunicação, possibilita transmissões em HF acima de 4.000 km. Estende-se de 200 km a 400 km.

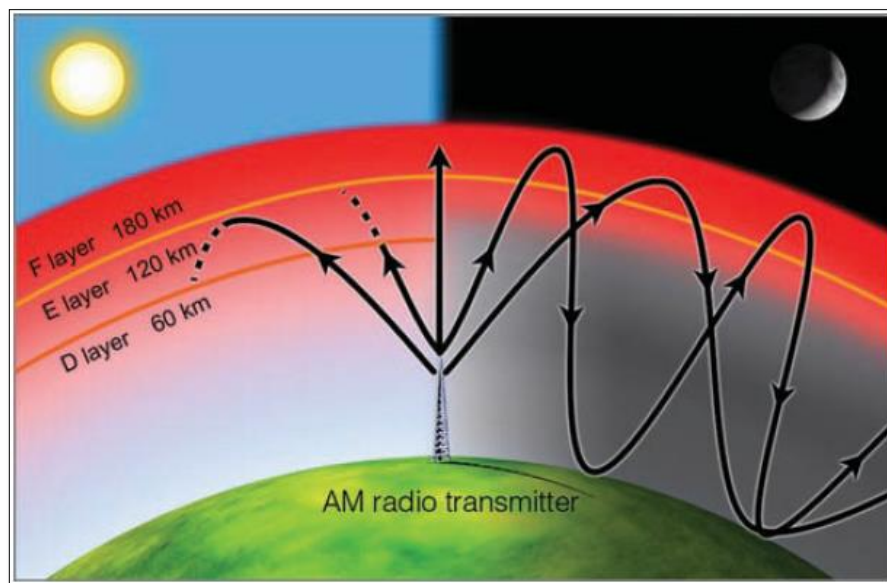


Figura 6.6 – Camadas da Ionosfera [11]

6.3.4 Ângulo de Irradiação

Sabe-se que acima de uma determinada frequência as ondas transmitidas não são refratadas, continuando pelo espaço. Contudo, se o ângulo de irradiação for reduzido, parte das ondas de alta frequência retornam à superfície. O maior ângulo no qual uma onda é propagada e retornada à Terra após ser refratada na ionosfera é chamado de ângulo crítico para aquela frequência em particular [17].

6.3.5 Salto

O caminho desde o transmissor até o retorno à superfície é denominado “salto”. Dependendo da distância até o receptor, uma onda pode efetuar mais de um salto (a onda reflete na terra e volta à ionosfera onde é refratada, e assim por diante). Denomina-se “distância de

salto” à distância entre o transmissor e o retorno à superfície, ou a distância entre cada salto efetuado. Uma parte da onda irradiada pode propagar-se por onda superficial, contudo com um alcance limitado a curtas distâncias com respeito ao transmissor. A região na superfície terrestre que se estende desde o limite do alcance da onda superficial até o ponto de retorno após o primeiro salto não recebe nenhuma onda transmitida, sendo chamada “zona de silêncio” [17].

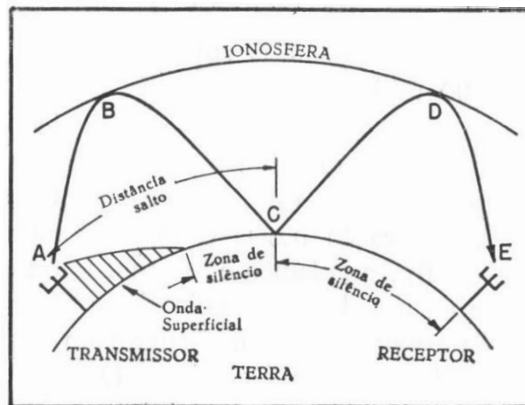


Figura 6.7 – Saltos [17]

6.4 Frequências de estudo

As frequências mais interessantes para o nosso estudo são apenas HF e VHF, pois são as utilizadas no controle de tráfego aéreo.

6.4.1 HF

Podemos ter ondas terrestres em HF, mas em geral as ionosféricas dominam essa faixa de frequência. As comunicações em grande distância podem ocorrer por meio de vários saltos devido a variabilidade das camadas ionosféricas [18].

6.4.2 VHF

Frequências em VHF são normalmente muito altas para ocorrer a propagação da onda pela ionosfera. As comunicações ocorrem por meio das componentes direta e refletida da onda terrestre. Nessa banda, as antenas têm tamanhos relativamente pequenos e podem ser posicionadas com vários comprimentos de onda distante da terra. Nessas condições a onda espacial é predominante. A propagação é normalmente restrita para pontos dentro do horizonte e a cobertura é essencialmente local. A análise da propagação da onda espacial em VHF necessita levar em conta os problemas da reflexão da terra e de obstáculos naturais ou artificiais.

Difração em árvores e prédios e refração na camada mais baixa da atmosfera são também importantes [18].

Frequências	Mecanismos de propagação	Efeitos da atmosfera e do terreno
ELF 30 – 300 Hz	Onda “guiada” entre a ionosfera e a superfície da Terra e refratada até grandes profundidades no solo e no mar	Atenuação em 100Hz entre 0.003 e 0.03 dB/km sobre a água do mar
VLF 3 – 30 kHz	Onda “guiada” entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra e refratada no solo e no mar	Baixas atenuações sobre o solo e no mar
LF 30 – 300 kHz	Onda “guiada” entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra até 100 kHz, onda ionosférica tornando-se distinta acima desta frequência	Desvanecimento em distâncias curtas devido à interferência entre a onda ionosférica e a de superfície
MF 300 – 3000 kHz	Onda de superfície a curta distância e em frequências mais baixas e onda ionosférica a longa distância	Atenuação da onda de superfície reduz sua cobertura a 100 km; onda ionosférica forte à noite
HF 3 – 30 MHz	Onda ionosférica acima da distância mínima; onda de superfície a distâncias curtas	Comunicação muito dependente do comportamento da ionosfera; onda de superfície bastante atenuada
VHF 30 – 300 MHz	Propagação em visibilidade; difração; tropodifusão	Efeitos de refração; difração pelo relevo; espalhamento troposférico
UHF 300 – 3000 MHz	Propagação em visibilidade; difração; reflexão e tropodifusão	Efeitos de refração; multipercursos e dutos (faixa alta); difração e obstrução pelo relevo e vegetação
SHF 3 – 30 GHz	Propagação em visibilidade	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas (acima de 10 GHz); obstrução por terreno
EHF 30 – 300 GHz	Propagação em visibilidade	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas; absorção por gases; obstrução por edificações

Tabela 6.1 – Efeitos sobre a propagação de ondas [19]

7. SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

7.1 Introdução

As descargas atmosféricas geram grandes riscos às pessoas e estruturas, por isso o uso de medidas de proteção é importante. Não existem métodos para impedir a descarga atmosférica, mas existem medidas que minimizam os efeitos destrutivos. Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas consistem em sistema interno e externo contra descargas atmosféricas. Nesse capítulo, vamos discutir um pouco sobre essas divisões do SPDA e entender como funcionam.

7.2 Sistema Externo de Proteção contra Descargas Atmosféricas

O sistema externo é dividido em três partes: Captação, Descida e Aterramento. A rede de interligação dos aterramentos e das massas metálicas da instalação é considerada por muitos autores como uma quarta parte dos SPDA.

Basicamente o que o sistema externo de proteção faz é oferecer um caminho preferencial à descarga elétrica e ao interceptar a descarga atmosférica, conduzir a corrente da descarga para a terra, dispersando-a.

7.2.1 Sistemas de Captação

Tem como função receber os raios, reduzindo ao mínimo a probabilidade da estrutura receber diretamente o raio, deve ter a capacidade térmica e mecânica suficiente para suportar o calor gerado no ponto de impacto, bem como os esforços eletromecânicos resultantes, além disto o ataque por poluentes deve ser levado em conta na hora de seu dimensionamento [20].

7.2.2 Sistemas de Descida

Tem como função conduzir a corrente de descarga do raio recebido pelo captor até o sistema de aterramento, reduzindo ao máximo a incidência de descargas laterais e de campos eletromagnéticos no interior do volume protegido, deve ainda ter a capacidade térmica e

mecânica suficiente para suportar o calor gerado pela passagem da corrente, e boa suportabilidade à corrosão [20].

7.2.3 Sistema de Aterramento

Tem como função dispersar no solo a corrente recebida pelos captosres e conduzidas pelos condutores até o solo, reduzindo ao mínimo o risco de ocorrência de tensões de passo e de toque, deve resistir ao calor gerado e deve resistir ao ataque corrosivo dos diversos tipos de solos [20].

7.3 Sistema Interno de Proteção contra Descargas Atmosféricas

O sistema interno tem a responsabilidade de evitar centelhamento perigoso na estrutura, entre os componentes do SPDA e outros condutores internos à estrutura. Para isso, utiliza-se a ligação equipotencial ou uma distância de segurança.

7.4 Métodos de Captação

7.4.1 Método de Franklin

É um método clássico de dimensionamento de rede de captosres de raios, atualmente considerado como um caso particular do modelo eletrogeométrico, onde os ângulos de proteção variam com altura do elemento captor [21].

A NBR 5419/2015 chama esse método de “Método do Ângulo de Proteção” e diz que o volume de proteção provido por um mastro é definido pela forma de um cone circular cujo vértice está posicionado no eixo do mastro. O ângulo depende da classe do SPDA e da altura do mastro.

Este método é mais adequado para edificações com formato simples.

Na figura abaixo, extraída da NBR5419:2015, vemos o volume de proteção gerada utilizando o método de Franklin, e a tabela referente aos ângulos de proteção a depender da altura do mastro.

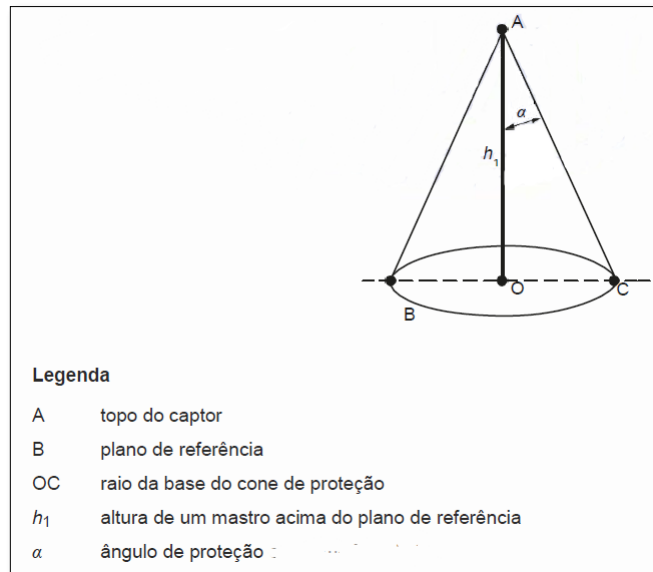


Figura 7.1 - Volume proteção provido por um mastro [22]

Níveis de Proteção	0-20m	21-30m	31-45m	46-60m	>60m
I	25°	*	*	*	**
II	35°	25°	*	*	**
III	45°	35°	25°	*	**
IV	55°	45°	35°	25°	**

Tabela 7.1 – Posicionamento de captores conforme nível de proteção [22]

* Aplicam-se somente os métodos eletrogeométrico, malha ou gaiola de Faraday

** Aplica-se somente o método da gaiola de Faraday.

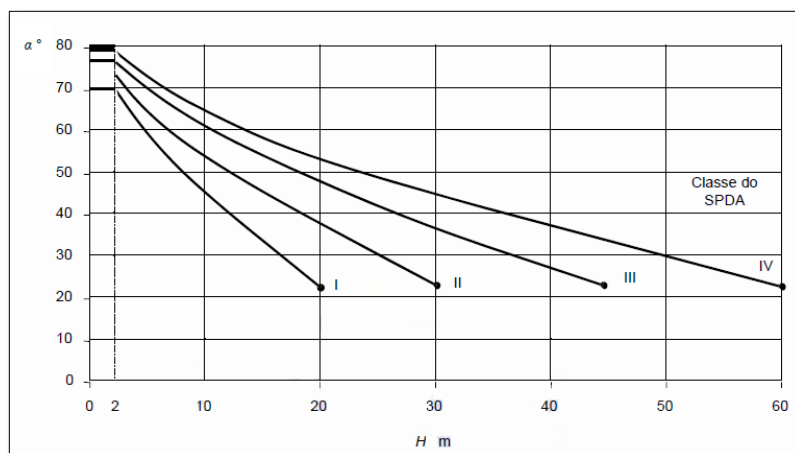


Figura 7.2 - Ângulo de proteção correspondente à classe de SPDA [22]

7.4.2 Método da Gaiola de Faraday

Inventado no século XIX por Michael Faraday. Ele descobriu que os corpos encerrados em uma caixa ou gaiola metálica ficavam protegidos contra descargas externas, funcionando como uma blindagem. A instalação de captores e condutores em malha proporciona um campo magnético nulo em seu interior, oferecendo uma proteção total. Os elementos metálicos estruturais, fachada e cobertura podem fazer parte do sistema.

Segundo a NBR5419 este método é mais apropriado para locais com telhados horizontais e inclinados sem curvatura, além de superfícies laterais planas para possibilitar a proteção contra descargas atmosféricas laterais.

Para se dimensionar a gaiola, devemos seguir os critérios da NBR5419:2015 para definir as dimensões de malha. Para isso, utilizamos os valores da tabela abaixo. O critério sempre será a classe do SPDA.

Classe do SPDA	Máximo Afastamento dos Condutores da malha (m)
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Tabela 7.2 - Tabela da Gaiola de Faraday [22]

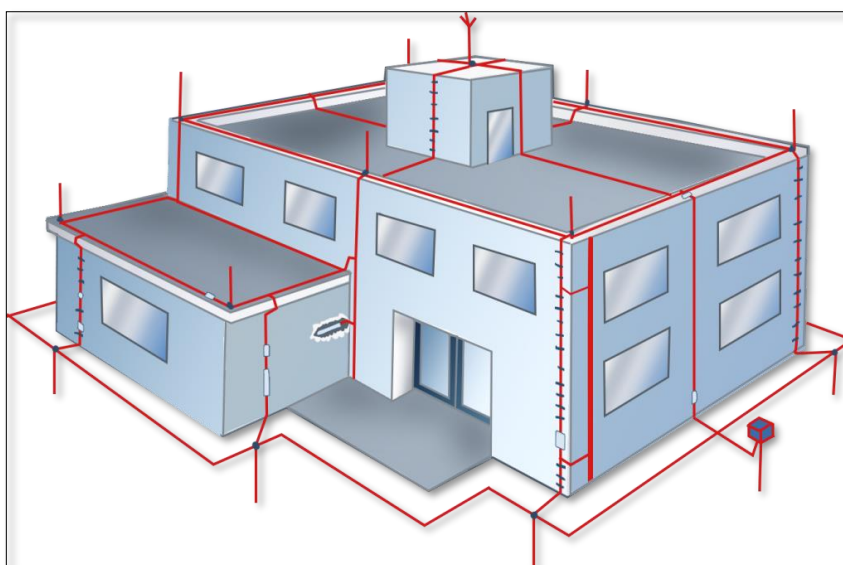


Figura 7.3 - Exemplo de Gaiola de Faraday [43]

7.4.3 Método da Esfera Rolante ou Eletrogeométrico

O modelo eletrogeométrico (MEG) resgatou o modelo sugerido por Preece em 1881, que previa que o volume de proteção de um elemento captor seria definido por um cone com vértice na extremidade do captor, delimitado pela rotação de um segmento de círculo tangente ao solo. O raio desse segmento de círculo é função do nível de proteção desejado para a instalação [23].

De acordo com esse modelo, os pontos do segmento de círculo determinam o lugar geométrico dos possíveis locais de onde pode partir o “líder ascendente”, que vai ao encontro ao “líder descendente” localizado no centro do círculo, de modo a completar o canal ionizado, por onde se fará a descarga de retorno [23].

A distância de atração, ou raio de atração R_a , é calculado por:

$$R_a = a \cdot I_{m\acute{a}x}^b$$

Onde $I_{m\acute{a}x}$ é o valor de pico da corrente de retorno do raio. Pela NBR 5419:2015 as constantes $a = 10$ e $b = 0,65$.

Através desse modelo, podemos perceber que estruturas for mais alta que a distância R , um elemento captor no topo do edifício não garantirá toda a proteção necessária, pois o segmento tangente ao solo tocará as laterais da estrutura.

Por isso o subsistema de captação deve ser posicionado corretamente, de modo que essa esfera fictícia não entre em contato com superfícies desprotegidas.

Abaixo podemos ver como funciona o modelo em estruturas abaixo e acima de 60 m de altura.

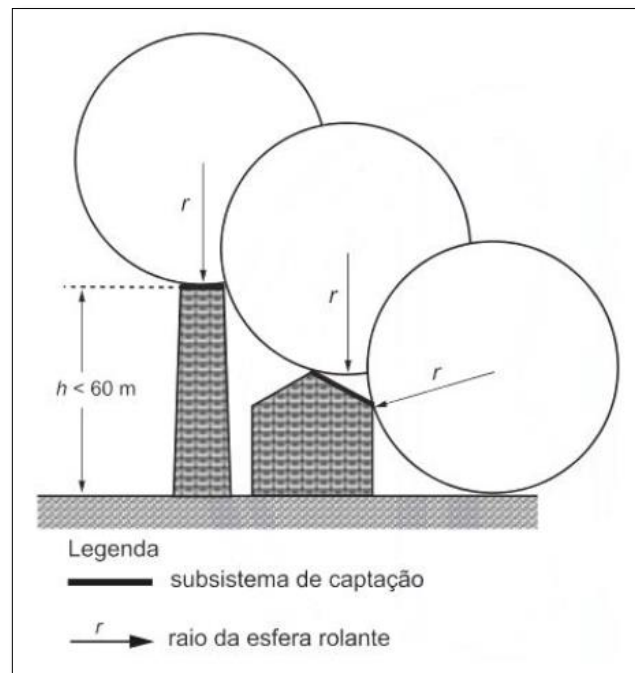


Figura 7.4 - Exemplo de estruturas menores que 60 m [22]

Observe que para estruturas acima de 60 m, a NBR 5419:2015 orienta a instalação de captação lateral, tipicamente num valor de 20% da altura da estrutura.

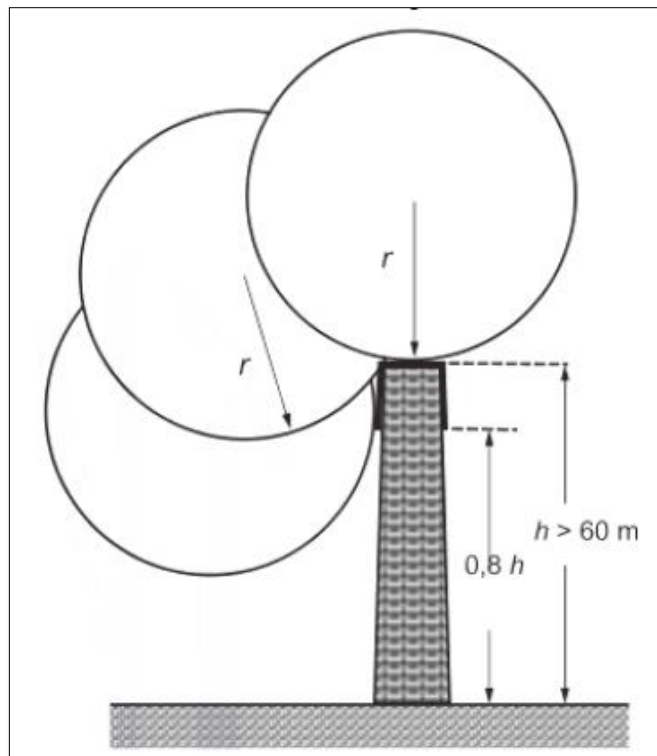


Figura 7.5 - Exemplo de estrutura com mais de 60 m [22]

Classe do SPDA	Raio da Esfera Rolante (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Tabela 7.3 Método da Esfera rolante [22]

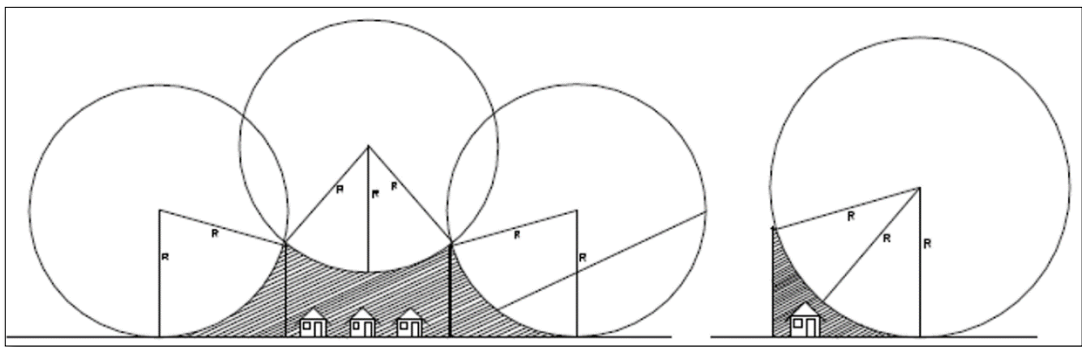


Figura 7.6 - Método das Esferas rolantes utilizando mastros para proteção de residências [55]

Para calcular de forma fácil o raio da área de proteção, podemos calcular via Pitágoras ou achar o ângulo α como na figura 7.7.

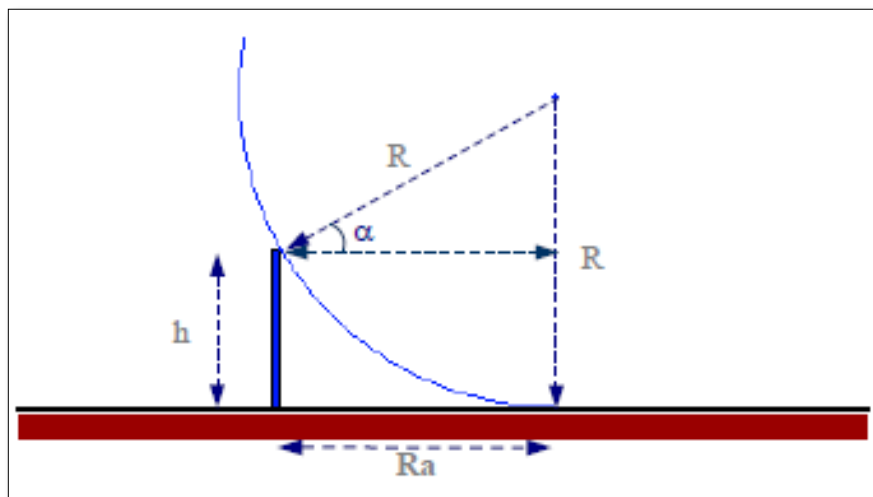


Figura 7.7 - Cálculo do ângulo α do Método da Esfera Rolante [24]

$$Ra = R \cos \alpha,$$

$$\alpha = \arcsen \left(\frac{R - h}{R} \right)$$

7.4 NBR 5419

Para a construção de proteções adequadas devemos seguir um padrão de segurança. A ABNT é a responsável pelas normas brasileiras, e a NBR 5419, com título de “Proteção contra descargas atmosféricas”, é a responsável pela padronização de SPDA; onde todas as medidas de proteções são comprovadamente eficazes na redução dos riscos associados às descargas atmosféricas.

Esta norma está dividida em quatro partes sendo:

Parte 1: Princípios gerais.

Parte 2: Gerenciamento de Risco.

Parte 3: Danos físicos a Estruturas e perigos à vida.

Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura

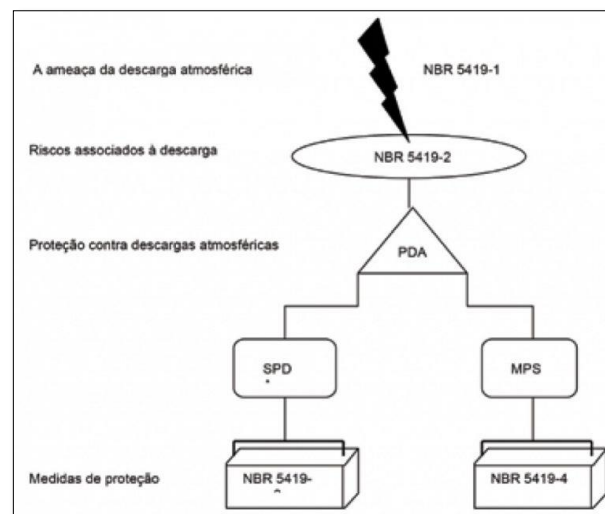


Figura 7.8 - Conexões entre as partes da ABNT NBR 5419:2015 [22]

7.4.1 NBR 5419-1

Estabelece os requisitos para a determinação de proteção contra descargas atmosféricas e fornece subsídios para projetos de proteção.

7.4.2 NBR 5419-2

Estabelece os requisitos para a análise de risco em estruturas devido às descargas atmosféricas para a terra e fornece procedimento para avaliação destes riscos.

Segundo a norma, o risco R é um valor relativo a uma provável perda anual média. Os riscos a serem avaliados dividem-se em: risco de perda de vida humana (R_1), risco de perda de serviço ao público (R_2), risco de perda de patrimônio cultural (R_3) e risco de perda de valores econômicos (R_4). Através da análise de risco definimos nosso nível de proteção e a classe de SPDA.

7.4.3 NBR 5419-3

Estabelece os requisitos para proteção de estruturas contra danos físicos e proteção de seres vivos contra lesões através de um SPDA. Aplica-se a projeto, instalação e manutenção de um SPDA.

7.4.4 NBR 5419-4

Fornecer informações para o projeto, instalação, inspeção, manutenção e ensaio de sistemas de proteção elétricos e eletrônicos para reduzir o risco de danos permanentes internos à estrutura devido aos impulsos eletromagnéticos de descargas atmosféricas.

Apesar de não proteger inteiramente contra interferências eletromagnéticas devido às descargas atmosféricas, tem alternativas para se reduzir, de forma satisfatória, os danos aos equipamentos.

8. ANÁLISE DE NORMAS

8.1 Introdução

Nesse capítulo iremos abordar as principais legislações que envolvem alguma área da engenharia elétrica e o controle de tráfego aéreo. Os regulamentos principais utilizados pela FAB são as ICA 66-30, que fala sobre sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em instalações do SISCEAB e a NSCA 66-2, que fala sobre instalação e substituição de sistemas de energia do SISCEAB, que foram editadas a partir de regulamentos internacionais da ICAO, mas adaptando também às normas brasileiras redigidas pela ABNT.

Além dos regulamentos da FAB, temos alguns da ANAC, o RBAC 154 que trata do projeto de aeródromos e o RBAC 153 que fala sobre operação, manutenção e resposta à emergência.

8.2 ICA 66-30: Requisitos Básicos para os Sistemas de Aterramento e Proteção contra surtos em instalações do SISCEAB

Regulamento atualizado em 2014, que tem por objetivo estabelecer as características básicas para os SPDA e instalações do SISCEAB contra surtos e descargas atmosféricas.

Um detalhe a se considerar é que este regulamento está baseado nas NBR5410:2004 e na NBR 5419:2005, uma versão bastante desatualizada dessa última norma. Por isso faz-se necessário abordar as principais diferenças na atualização da norma, e a partir dessas diferenças fazer uma análise do que pode ser alterado para uma atualização da ICA 66-30.

8.2.1 NBR 5419:2015 x NBR 5419:2005

A revisão da norma se deu com base na norma internacional IEC 62305 de 2010. O volume da norma cresceu aproximadamente 8 vezes em relação à anterior, por isso foi dividida em 4 partes, com um total de 310 páginas.

A norma de 2015 apresenta novidades desde a apresentação da fundamentação e terminologia para análise de risco, considerando uma gama bem maior de parâmetros para a definição do SPDA. Além disso o conceito de zonas de proteção contra raios e alguns parâmetros dos pulsos de corrente são novidades em termos de normalização [25].

Na parte 1 foram criadas quatro diferentes situações de dano, considerando o ponto de impacto na estrutura: descargas na ou próximas à estrutura, descargas sobre ou próximas às linhas conectadas a estruturas. Os danos foram divididos em três grupos: danos às pessoas devidos a tensões de toque e de passo; danos físicos (fogo, explosão, destruição mecânica, liberação de produtos químicos) devidos aos efeitos das correntes das descargas atmosféricas, inclusive centelhamento e falhas de sistemas internos devidas ao *Lightning ElectroMagnetic impulse* (LEMP). As perdas foram divididas em outros quatro grupos: perdas de vida humana; de serviço ao público; de memória cultural e perda de valor econômico (estrutura e seu conteúdo, serviços e perdas de atividades) [25].

São tratadas também nessa parte algumas medidas para redução de riscos de acordo com os tipos de dano, por exemplo, para redução dos efeitos das tensões de toque e passo, riscos físicos em estruturas e serviços, além de falhas em sistemas elétricos e eletrônicos.

A forma de determinar o nível de proteção mudou bastante, anteriormente era obtido através de tabela em função da classificação da estrutura, tipo da estrutura e efeitos das descargas atmosféricas. Já na norma atualizada, os níveis de proteção são atrelados à análise de risco da estrutura a ser protegida.

Na parte 2 temos o conceito de gerenciamento de risco em relação às descargas atmosféricas, com análise de danos possíveis em estruturas além de falhas associadas aos sistemas elétricos e eletrônicos. Temos também análise de danos aos seres vivos na estrutura ou perto dela.

A parte 3, talvez a mais importante, trata da proteção em si, dentro e ao redor da estrutura, abrangendo proteção contra danos à estrutura e aos seres vivos. Nessa parte há diversas diferenças entre as normas.

Em relação ao subsistema de captação utilizando o método das malhas: em relação às malhas, as dimensões podem ser bem diferentes para os diversos níveis de proteção; enquanto as malhas pela versão de 2005 podem chegar a 5 x 10 m (I); 10 x 20 m (II); 10 x 20 m (III) e 20 x 40 m (IV), as malhas pela versão 2015 são definidas em 5 x 5 m (I); 10 x 10 m (II); 15 x 15 m (III) e 20 x 20 m (IV). Assim, as malhas descritas na versão 2015 possuem dimensões menores, aumentando a proteção das edificações, porém aumentando também o material necessário para esta proteção [25].

Em relação ao subsistema de descidas, a versão de 2005 apresenta a Tabela 2 com os seguintes espaçamentos médios: 10 m para nível I; 15 m para nível II; 20 m para nível III e 25 m para nível IV, a nova versão apresenta como distâncias típicas: 10 m (I); 10 m (II); 15 m (III) e 20 m (IV). Apesar destes parâmetros nas duas normas serem próximos, em muitos casos, o número de descidas para uma mesma edificação poderá ser diferente, por exemplo, uma edificação classificada como nível III, com 300 metros de perímetro, pela versão de 2005 necessitaria de 15 descidas, no entanto, pela revisão este número subiria para 20 descidas [25].

As tabelas sobre as seções os condutores sofreram modificações apresentando materiais de forma mais detalhada. Os valores de seção mínima são geralmente maiores que na norma anterior. Na versão de 2015 tem-se o mínimo de 35 mm².

Na parte 4 concentra-se à proteção dos sistemas eletroeletrônicos dentro das edificações. Baseia-se principalmente nos conceitos de zonas de proteção com o objetivo de reduzir os riscos de falhas permanentes nos equipamentos devido aos surtos eletromagnéticos provocados pelas descargas atmosféricas. Temos conceitos de aterramento e equipotencialização, blindagens magnéticas e roteamento de cabos e a proteção utilizando os dispositivos de proteção contra surtos e a coordenação entre estes. O conjunto de ações descritas nessa parte da norma forma o MPS – Medidas de Proteção contra Surto que, detalhando a proteção geral contra descargas atmosféricas [25].

8.2.2 Sugestões de Modificação

8.2.2.1 Análise de Risco

Como não existia ainda a análise de risco, a ICA 66-30 não possui nada a respeito e considera todas as estruturas no âmbito do SISCEAB com as mesmas características. Sabemos que há grande diferença quando comparamos locais onde há grande aglomeração de pessoas todos os dias, como nos SRPV e CINDACTA, onde efetivamente acontece o controle e tráfego aéreo e os destacamentos, onde apenas há radares e/ou sítios de frequência, que às vezes só se vai para manutenção.

8.2.2.2 Subsistema de Captação

Como regulamento está baseado na versão de 2005, a captação via método das malhas está defasada, pois a tabela foi alterada na versão de 2015. Consequentemente, as proteções atuais nas estruturas provavelmente estão em desacordo com a NBR 5419:2015, necessitando de vistoria e atualização.

8.2.2.3 Subsistema de Descida

Nesse subsistema, a ICA 66-30 é mais rígida que a NBR 5419:2015, pois no item 3.1.3.1 diz que: “O espaçamento entre os condutores de descida e as edificações de maneira geral (volume a proteger) não deve ser menor que 10 cm.”. Pode-se notar que o critério da parede ser constituída ou não de material combustível é ignorado, utilizando sempre o pior caso (parede feita de material prontamente combustível e a elevação da temperatura dos condutores de descida for perigosa) no qual a NBR 5419 exige a distância de 0,1 m entre o condutor e a parede.

Outra diferença clara é a exigência de um intervalo de cabos de descida paralelos de exatamente 20 m sempre, algo que na NBR 5419 ocorre apenas se o SPDA for de classe IV.

8.2.2.4 Subsistema de Aterramento

Não há mais necessidade de o valor da resistência de aterramento ser abaixo de 10Ω conforme solicitado na ICA 66-30. A norma não especifica valores, mas o valor da resistência ainda precisa ser baixo.

Nada se fala acerca da profundidade do eletrodo de aterramento, este item deve ser adicionado ao regulamento.

8.2.2.5 Proteção de equipamentos eletrônicos

Nesta parte da ICA 63-30 não há necessidade de alterações pois está de acordo com a versão mais recente da NBR 5410.

8.3 NSCA 66-2: Implantação/Substituição de Sistemas de Energia do SISCEAB

Esta norma busca estabelecer critérios técnicos mínimos para a configuração de sistemas de energia, incluindo a capacidade de redundância, visando ao serviço de manutenção programada ou à resposta às falhas, sem impacto às cargas críticas que sustentam às operações de controle de tráfego aéreo [26].

O grande objetivo é garantir que cargas críticas como radares, sistemas de telecomunicações, auxílios à navegação e sistemas de tratamentos de dados tenham suprimento de energia ininterrupta. Para cumprir esse objetivo, utiliza-se esquemas de fornecimento de energia cumprindo um padrão de certificação TIER.

8.3.1 Certificação TIER

Padrão criado pelo *Uptime Institute* como meio de avaliar efetivamente a infraestrutura de *data centers* em termos de disponibilidade esperada de sistemas [26].

8.3.1.1 TIER I

Capacidade básica: é necessário desligar toda a extensão do sítio para realizar serviços de manutenção ou reparo.

8.3.1.1 TIER II

Componentes de capacidade redundante: alguns componentes são redundantes, mas ainda é necessário desligar toda a extensão do sítio para realizar serviços de manutenção.

8.3.1.1 TIER III

Manutenção concorrente: todo e qualquer componente de capacidade ou caminho de distribuição em um sítio pode ser removido de maneira planejada, para realizar manutenção ou substituição sem impactar as operações.

8.3.1.1 TIER IV

Tolerante a falhas: uma falha de equipamento individual ou interrupção de caminho de distribuição não terá impacto nas operações.

Para efeito de comparação veremos na figura 8.1 a KF Tipo 0, que é o mais simples, e na figura 8.2, a KF Tipo III usado no CINDACTA I.

A KF Tipo 0 tem fonte principal proveniente da rede de energia comercial em um único alimentador com transformador de entrada. Não há fonte de reserva. O banco de baterias deve ser dimensionado para autonomia estendida.

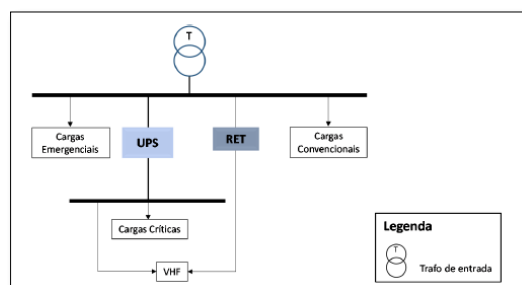


Figura 8.1 - KF Tipo 0 [26]

Na KF Tipo III tem fonte principal proveniente da rede de energia comercial em dois alimentadores de uma mesma subestação e dois transformadores de entrada. A fonte reserva é composta por dois grupos de geradores, com um tanque combustível cada.

Há duplicidade de equipamentos com componentes redundantes e caminhos de distribuição independentes para alimentação de cargas críticas.

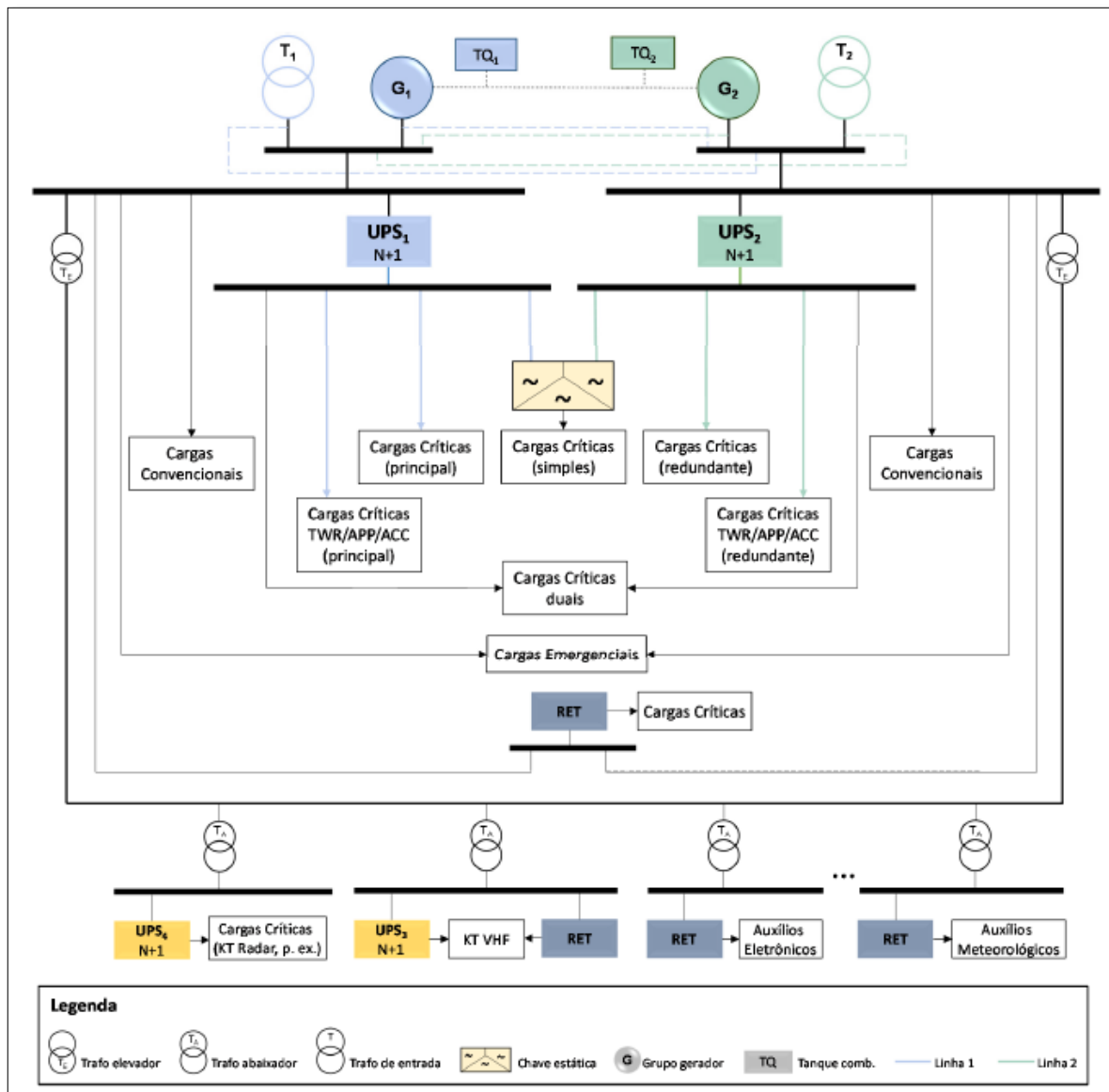


Figura 8.2 - KF Tipo III [26]

8.4 RBAC 154: Projeto de Aeródromos

Esse regulamento produzido pela ANAC estabelece as regras a serem adotadas no projeto de aeródromos públicos e tem como base o Anexo 14 da ICAO. Aqui encontraremos

desde requisitos para pavimentação, sinalização, auxílios visuais e até a parte elétrica do aeródromo. E é nesta parte que iremos focar.

8.4.1 Sistemas Elétricos

O RBAC 154 é um documento relativamente extenso, com 259 páginas e incrivelmente não há sequer uma menção a SPDA. E a parte de sistemas elétricos se restringe a apenas 5 páginas.

Basicamente o conteúdo que envolve sistemas elétrico está na subparte F do documento e contempla o suprimento de energia elétrica para luzes de pista e auxílios de navegação.

Quando analisarmos as consequências de descargas atmosféricas em aeródromos mais a frente, iremos perceber o quão importante seria ter algo relativo a SPDA nesta norma de projetos de aeródromo.

Sequer os sistemas de alerta de descargas atmosféricas, muito utilizado no exterior, consta no documento.

8.5 NBR-12971: Emprego de Sistema de Aterramento para Proteção de Auxílios Luminosos em Aeroportos

Responsável por fixar os requisitos mínimos exigíveis para projeto, execução, recebimento e manutenção de sistemas de aterramento elétrico para proteção de auxílios luminosos em aeroportos [27]. É fácil perceber que obrigatoriamente a malha de aterramento irá abranger toda região do aeroporto, pois há luzes de pista, luzes de táxi, etc.

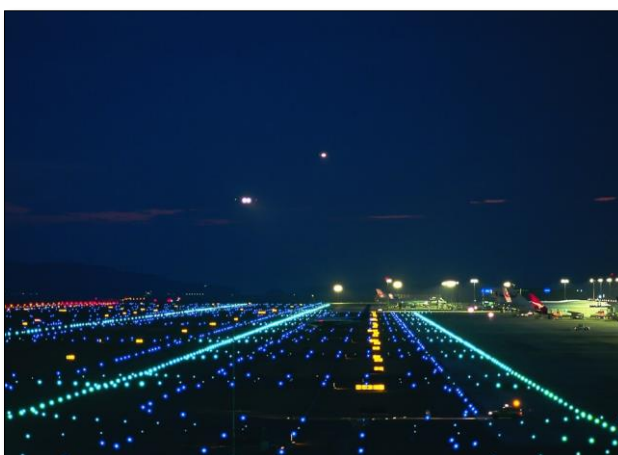


Figura 8.3 - Sistema de Luzes nos Aeroportos [28]

9. INFLUÊNCIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO TRÁFEGO AÉREO

9.1 Introdução

As descargas atmosféricas influenciam bastante não só controle de tráfego aéreo, mas tudo que envolve a aviação. É um perigo para quem está em solo e nos ares. Neste capítulo iremos abordar diversas áreas que envolvem o controle de tráfego aéreo e a aviação e ver se são ou não influenciadas pela atuação de descargas atmosféricas.

9.2 Rotas da Aviação

Não há como negar que a maior influência se dá nos ares. As nuvens de tempestades são evitadas a qualquer custo pelas aeronaves. Isto faz com que haja o que chamamos de “desvios meteorológicos”.



Figura 9.1 – Cumulonimbus [29]

Apesar de possuírem um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, não é recomendado que os aviões se arrisquem a passar por nuvens de tempestade como a Cumulonimbus, afinal mesmo com tal proteção, pode ocorrer ignição do vapor de combustível

dos motores, falhas e danos em equipamentos eletro/eletrônicos como sistemas de navegação, comunicação, elétrico, controle e atuadores, além de danos mecânicos.

Quando se enfrenta uma tempestade dessas, existe a possibilidade da aeronave ser atingida por diversos raios intranuvem, além de encontrar gelo e turbulência severa dentro da formação, podendo ser uma junção fatal de elementos. Por isso em manuais de cursos de piloto redigidos pela ANAC, a recomendação é que seja mantida uma separação vertical de 5000 ft (aproximadamente 1500 m) e/ou separação lateral de 20 NM (aproximadamente 37 km) das nuvens.

Em geral as aeronaves possuem um radar meteorológico que auxiliam a visualização do mau tempo com certa antecedência e informam ao controlador que será necessário sair de sua rota prevista para evitar as nuvens de tempestade, quando falarmos dos radares, veremos que os radares meteorológicos trabalham em frequências diferentes dos radares de controle, e há também diferenciação dos radares meteorológicos de bordo e os que ficam no solo. Outra ferramenta a se utilizar ao longo do caminho é o SIGMET, que é emitido por um órgão de vigilância meteorológica que informa fenômenos meteorológicos que possam afetar a segurança das aeronaves.



Figura 9.2 – Radar Meteorológico no nariz de um B767 [30]



Figura 9.3 - Display do radar meteorológico na aeronave [31]

Para planejamento do voo, o piloto também pode utilizar o STSC, que é um sistema desenvolvido pelo DECEA que fornece a localização e o monitoramento de Cumulonimbus.

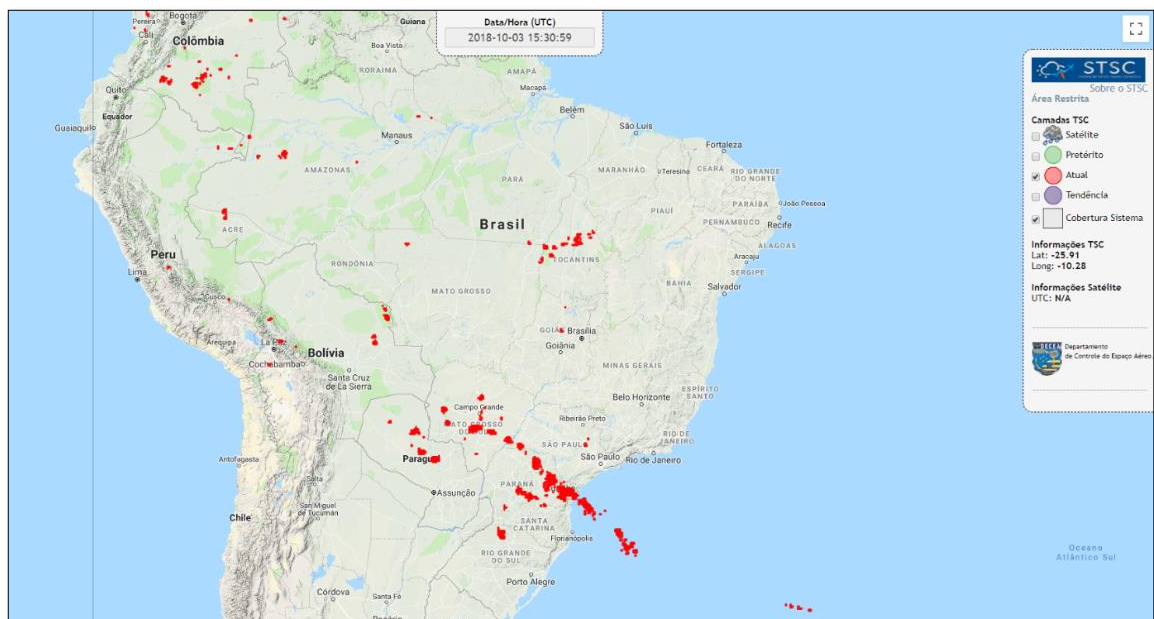


Figura 9.4 - Sistema de Tempo Severo Convectivo (STVC) – Células atuais [32]

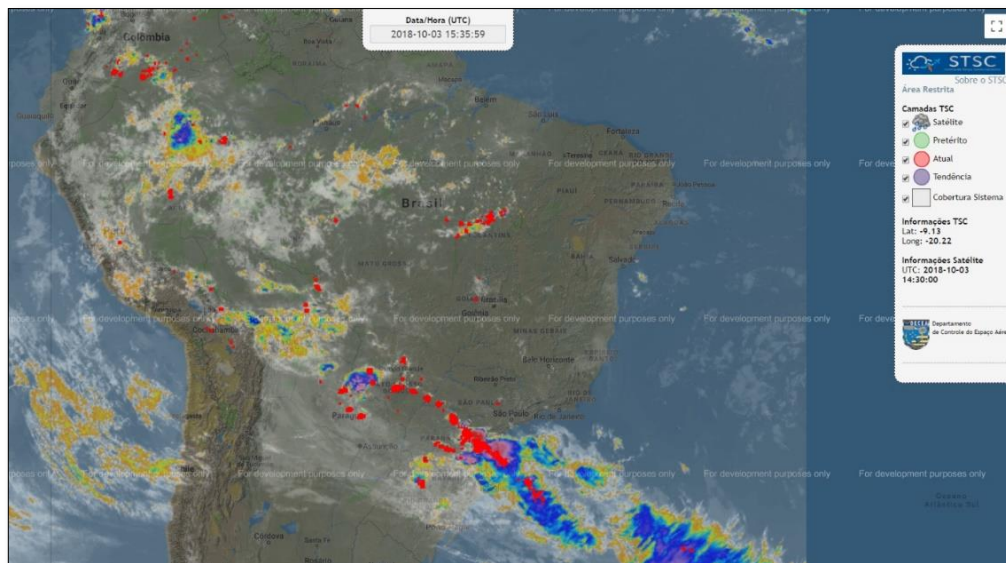


Figura 9.5 - Sistema de Tempo Severo Convectivo (STVC) – Células atuais e previsão [32]

9.3 Comunicação

As frequências VHF são o elo mais importante entre pilotos e controladores, pois sem elas não conseguimos efetuar a comunicação entre eles, deixando as aeronaves sem informações sobre outros tráfegos, sem organização, elevando o perigo nos ares.

As piores épocas do ano são quando temos interferências solares, quando as comunicações ficam bem ruins. Porém em épocas de tempestades não temos problemas graves nas comunicações.

As interferências devido aos relâmpagos intranuvem ou nuvem-nuvem não afetam as comunicações no controle de tráfego aéreo de forma significativa, mas gera alguns ruídos e às vezes é necessário repetir a informação para que não haja enganos. Tal geração de ruídos se dá devido as CIDs (Compact Intracloud Discharge). São descargas atmosféricas intranuvem que produzem radiação HF-VHF (3 a 300 MHz), mas tem extensão pequena (por isso são chamadas de compactas), chegando a algumas centenas de metros. Ocorrem a altas altitudes (geralmente acima de 10 km) e tendem a produzir menos luz [33].

Um estudo feito pela NASA sobre a radiação produzida por descargas atmosféricas intranuvem mostra que essas descargas provocam pequenas mudanças rápidas e lentas no campo magnético e que a radiação produzida é diferente das descargas nuvem-solo [34].

O maior perigo está nas descargas nuvem-solo nos locais dos sítios de frequência, e se não houver proteção adequada, danificar os equipamentos, desabilitando o sítio de frequência.

Em 2015 um raio atingiu a torre de transmissão da Rede Amazônica de Televisão e danificou alguns equipamentos, tirando do ar a emissora [35].

Em 2012 a Rede Bandeirantes de Televisão também foi “vítima” de descargas atmosféricas ao perder seu sinal por alguns minutos após a torre ser atingida [36].

9.4 RADAR

Utilizamos dois tipos de radares para detecção de tráfegos, o radar primário e o secundário.

O radar primário é composto basicamente por transmissor, antena e receptor e utiliza o efeito Doppler como princípio de funcionamento. O transmissor gera pulsos de energia eletromagnética que ao encontrar um alvo refletem tridimensionalmente. Quando a onda refletida tiver um componente razoável de retorno, será detectada pelo receptor. A partir daí, de acordo com o tempo entre a emissão do pulso e recepção, a posição dos alvos é calculada.

Os radares meteorológicos seguem o mesmo princípio, porém utilizam frequências diferentes. Os radares primários utilizam frequências de 1 a 2 GHz enquanto os radares meteorológicos utilizam de 2 a 12 GHz, a depender do tipo de detecção desejado, como descrito na tabela 9.1.

Banda	Frequência	Comprimento de Onda	Principais Aplicações
L	1 – 2 GHz	30 – 15 cm	Controle de Tráfego Aéreo
S	2 – 4 GHz	15 – 9 cm	Rede Operacional (precipitação)
C	4 – 8 GHz	8 – 4 cm	Alerta local (precipitação)
X	8 – 12 GHz	4 – 2,5 cm	Radar de Bordo, Física das Nuvens

Tabela 9.1 - Frequência de Radares [37]

O radar secundário funciona como uma conversa entre equipamentos onde o radar secundário envia uma interrogação na frequência de 1030 MHz e recebe uma resposta do transponder em 1090 MHz.

A visualização radar pelos controladores não é afetada pelas tempestades, nem pelas descargas atmosféricas. Isso se dá primeiramente, porque como já vimos, a radiação eletromagnética das descargas atmosféricas está em outra faixa de frequência (3 a 300 MHz) e

9.5 Instalações

Os edifícios e instalações dos ACC e APP são tem suas proteções contra descargas atmosféricas baseadas na ICA 66-30, que como já vimos, precisa de uma atualização.

As instalações de maior interesse são os aeródromos, que são os locais onde há maior chance de acontecer algum evento perigoso devidos às descargas atmosféricas.

Veremos mais a frente, as restrições impostas pelos regulamentos pertinentes quando há incidência de raios e/ou tempestades elétricas nas redondezas. Veremos também alguns casos onde descargas atmosféricas atingiram pessoas efetuando algum tipo de serviço dentro dessas áreas.

Existe certa preocupação por parte das empresas pela integridade física dos envolvidos na operação, mas uma preocupação muitas vezes maior com os prejuízos financeiros gerado na paralização temporária das atividades, por isso, com exceção do abastecimento, fica a critério das empresas decidirem sobre as demais atividades, e cada uma delas decide como bem quer.

Muitos investimentos são realizados no exterior, principalmente na área de avisos de descargas atmosféricas em aeroportos, procurando melhorar a previsibilidade de ocorrência de descargas, de forma a que pelo menos diminua o tempo em que as operações estão suspensas.



Figura 9.7 - Sistema de Alerta de Descargas Atmosféricas [46]

A paralização das atividades causa atraso para os passageiros e podem repercutir em todo fluxo aéreo nacional.

Os incidentes/acidentes causados por descargas atmosféricas nos pátios de aeroportos dificilmente entram em alguma estatística de interesse do tráfego aéreo, ficando difícil ter um bom registro desses casos.

A obrigação de melhores projetos de proteção e/ou de detecção não agrada a todos os operadores de aeroportos, principalmente aqueles que a incidência de descargas atmosféricas é menor, devido ao custo de instalação dos mesmos. Porém temos que pensar que qualquer instalação desse tipo visa à segurança do trabalhador.

Foi feito um estudo nos EUA acerca dos custos relativos a esse tipo de paralização de operação, que inclui horas extras para funcionários, combustível gasto enquanto aguardam, custos com passageiros que aguardam o voo, reembolso de conexões perdidas e custos relacionados ao próprio tempo de voo. O custo pode ser de 12.000 dólares por minuto parado em um grande aeroporto, sendo que os atrasos devido a descargas atmosféricas gira em torno de 3000 minutos no ano, gerando um gasto total de aproximadamente 36 milhões de dólares [38].



Figura 9.8 – Aeronave sendo atingida por um raio no aeroporto [39]

9.5.1 Estudos em Aeroportos Brasileiros

A ANAC tem realizado estudos para analisar o que pode ser melhorado em relação a proteções, sistema de alertas ou a própria regulamentação que abrange os casos de descargas atmosféricas nas proximidades de aeródromos.

Hoje temos algumas ferramentas que nos auxiliam na previsão e monitoração das atividades das descargas atmosféricas nas localizações desejadas, como a REDEMET, monitoramento do INPE, SPECI.

9.5.1.1 IGOM-174

A IATA fornece um documento chamado IGOM, que é basicamente um manual de operações. Nele são definidos níveis de alerta quanto a proximidade das descargas atmosféricas e como são definidos esses níveis.

A IGOM-174 define 3 níveis diferentes de notificação: verde, âmbar e vermelho. Esses níveis são definidos de acordo com a distância onde os fenômenos meteorológicos estão ocorrendo em relação ao aeroporto.

Através dela também é possível ver como é feito o cálculo da distância de referência.

NÍVEIS	AÇÕES
VERDE – Possibilidade de Raios ou Tempestades Elétricas a mais de 8 km do aeroporto	Sinal de alerta é enviado aos operadores
ÂMBAR – Alerta – Incidência de Raios a menos 8 km do aeroporto	Sinal de alerta é enviado aos operadores. Devem se preparar e planejar para o alerta vermelho de acordo com as regras locais
VERMELHO – Suspensão/Paralisação – Incidência de raios a 5 km do aeroporto	Sinal para paralisação de todas as atividades e manter-se em local seguro

Tabela 9.2 – Tabela de Sinalização de Descargas Atmosféricas

Basicamente o cálculo da distância é feito através da diferença de tempo entre a visualização do relâmpago e o som do trovão. Se o tempo for inferior a 15 segundos, as atividades estão ocorrendo a menos de 5 km, se for entre 15 e 25 segundos, as atividades estão ocorrendo entre 5 a 8 km de distância.

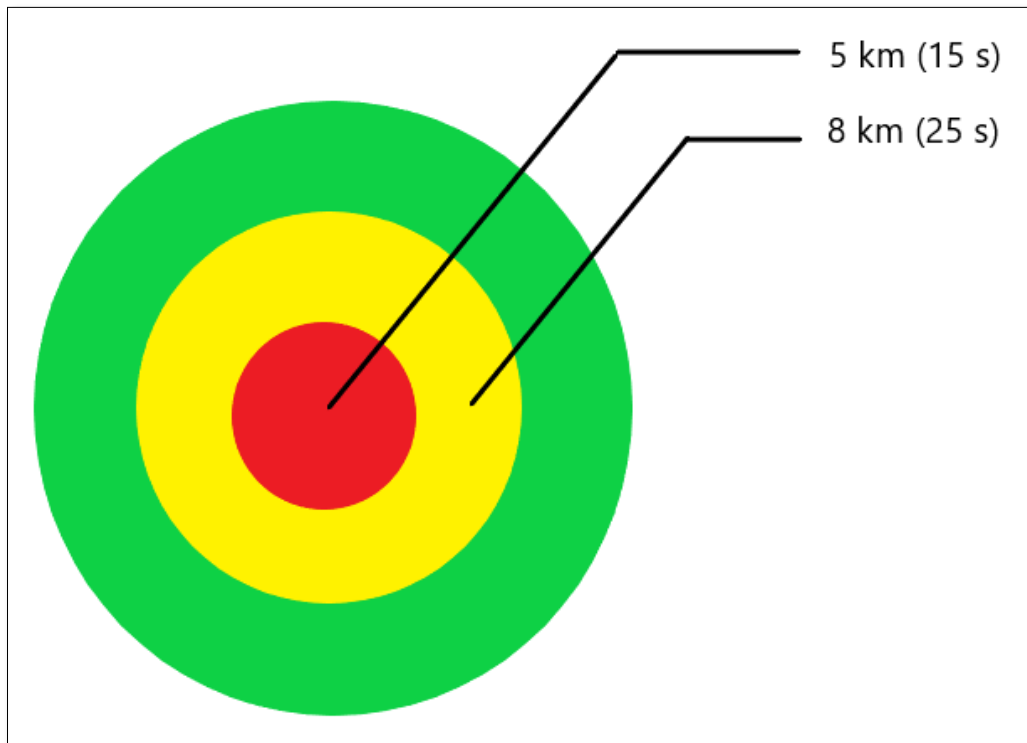


Figura 9.9 - Raios do Sistema de Alerta

Os regulamentos nacionais não funcionam exatamente assim e veremos ao discutir a RBAC 153.

9.5.1.2 RBAC 153: Aeródromos – Operação, manutenção e resposta à emergência

A RBAC 153 regulamenta todo funcionamento regular dos aeródromos e é nela que encontraremos as restrições de operações quando há incidência de raios nas redondezas do aeródromo, porém perceberemos que ela é muito limitada quanto a esta situação.

O item 153.125 fala sobre abastecimento e transferência do combustível da aeronave. Aqui especifica-se que durante a incidência de raios ou tempestades elétricas nas redondezas do aeródromo o abastecimento deve ser interrompido.

Note que a única restrição que se impõe é para o abastecimento. Nada se fala sobre o manejo de cargas ou bagagens, ou momentos de inspeção da aeronave pelos mecânicos, etc. Veremos abaixo alguns casos onde outras atividades diferentes de abastecimento eram exercidas e pessoas foram atingidas por raios pela ausência de proteção em aeronaves no pátio distantes do terminal.

9.5.1.3 Conclusões do estudo da ANAC

Percebeu-se que é necessário estabelecer um serviço contínuo de aviso de presença de raios em distâncias escalonadas e com antecedência adequada ao risco de cada aeroporto nos moldes da IGOM-174. Além disso, definir parâmetros para que os operadores aeroportuários tomem decisões de interrupção de serviço baseadas nas informações recebidas, de modo a proteger as pessoas e bens de acordo com o risco de cada aeroporto [40].

A criação de um registro de acidentes/incidentes com raios em aeroportos também é importante para análise de dados.

9.5.2 Casos de Acidentes devido descargas atmosféricas em aeroportos

Abaixo veremos alguns casos de descargas atmosféricas em aeroportos que foram responsáveis por causar lesão ou morte. A falta de registros oficiais dos incidentes dificulta uma maior quantidade de detalhes.

9.5.2.1 Aeroporto Salgado Filho (Jan/2018)

Uma descarga elétrica atingiu um avião e conseqüentemente um trabalhador da empresa Dnata, que presta serviço para a Azul. No momento do acidente, o trabalhador estava carregando o porão da aeronave. Felizmente após ser atingido, recebeu os cuidados médicos necessários e nada mais grave aconteceu [41].

9.5.2.2 Aeroporto Salgado Filho (Set/2016)

Quatro trabalhadores da TAP que faziam manutenção em uma aeronave a céu aberto durante uma tempestade de raios, em frente ao hangar, sofreram uma descarga elétrica oriunda de um raio que atingiu as imediações. Todos foram atendidos no hospital e depois liberados sem sequelas [42].

9.5.2.2 Southwest Florida International Airport (Jul/2017)

Um raio atingiu a calda de uma aeronave, passa por toda a fuselagem e atinge um funcionário que está caminhando abaixo do nariz do avião. O funcionário teve queimaduras de 3º grau em muitas partes do corpo, mas sobreviveu [43].

10. SISTEMAS MÓVEIS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: PROPOSTAS TÉCNICAS

Após analisar os casos é hora de fazer propostas para aumentar a segurança. Isto inclui mudanças em regulamentos da aviação e propostas de engenharia para aumentar a segurança.

10.1 SPDA

O SPDA que temos para proteger os aviões no solo são apenas os localizados próximos aos gates, localizados nos terminais principais. Nas vagas mais isoladas nos pátios, nas vagas dos cargueiros e nas vagas hangares de manutenção não existem esse tipo de proteção. Os locais de embarque de voos militares também não têm esse tipo de proteção.



Figura 10.1 – Pátio do Aeroporto de Brasília [44]

10.1.1 Situação Atual

Vamos verificar através do Método das Esferas Rolantes qual a cobertura de proteção atual nos gates dos aeroportos.

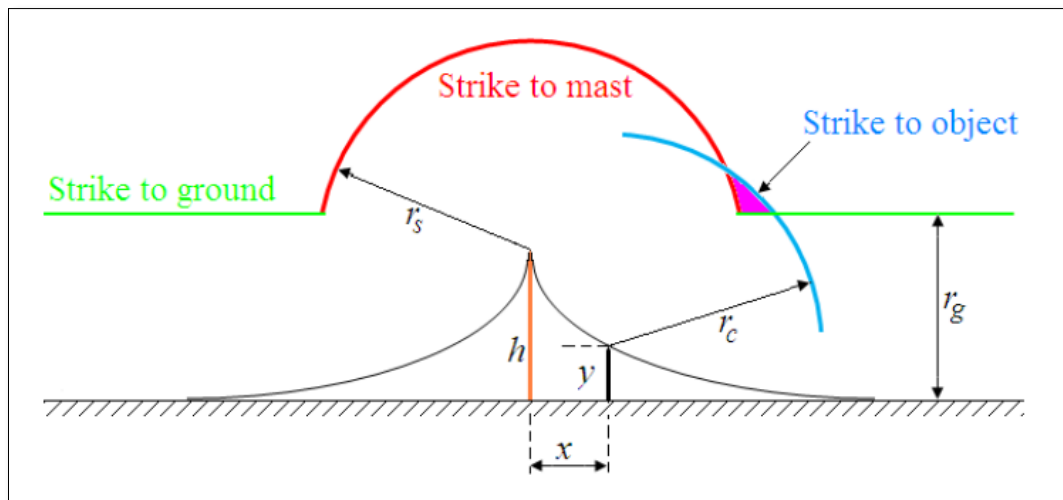


Figura 10.2 - Método das Esferas Rolantes [45]

Observe a Figura 10.5, onde r_s é a distância da origem do raio até o captor na ponta do mastro, r_c é a distância até o objeto, r_g distância até o solo, h é a altura do mastro, x é a distância do mastro até o objeto e y é a altura do objeto.

A situação ideal é que $r_s = r_c = r_g$, onde $r_g = 10 * I^{0,65}$ como já vimos anteriormente.

Iremos calcular o valor horizontal da proteção:

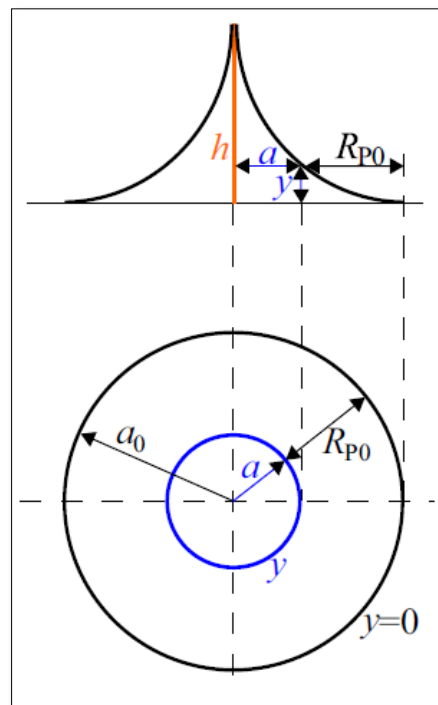


Figura 10.3 – Utilizando um mastro [45]

Hoje temos nas proximidades de cada gate, um mastro com altura entre 35 a 45 metros com um captor Franklin. Considerando os dois casos e um SPDA Classe IV, utilizamos o Método da Esfera Rolante para verificar a cobertura da proteção descrita na Figura 10.4.

Então:

$h = 35 \text{ m}$	$h = 45 \text{ m}$
$r_g = 60 \text{ m}$	$r_g = 60 \text{ m}$
$r_g - h = 25 \text{ m}$	$r_g - h = 15 \text{ m}$
$a_0 = \sqrt{r_g^2 - (r_g - h)^2}$	$a_0 = \sqrt{r_g^2 - (r_g - h)^2}$
$a_0 = 54,54 \text{ m}$	$a_0 = 58,09 \text{ m}$

Para estar totalmente protegido, precisamos verificar duas condições:

1ª Condição: Verificar se a área de cobertura (a_0) é maior que o espaço utilizado pelo avião (a), onde são somados tamanho do avião mais distância do nariz ao mastro.

$$a_0 > a$$

$$a = \text{comprimento do avião} + \text{distância do nariz até o mastro}$$

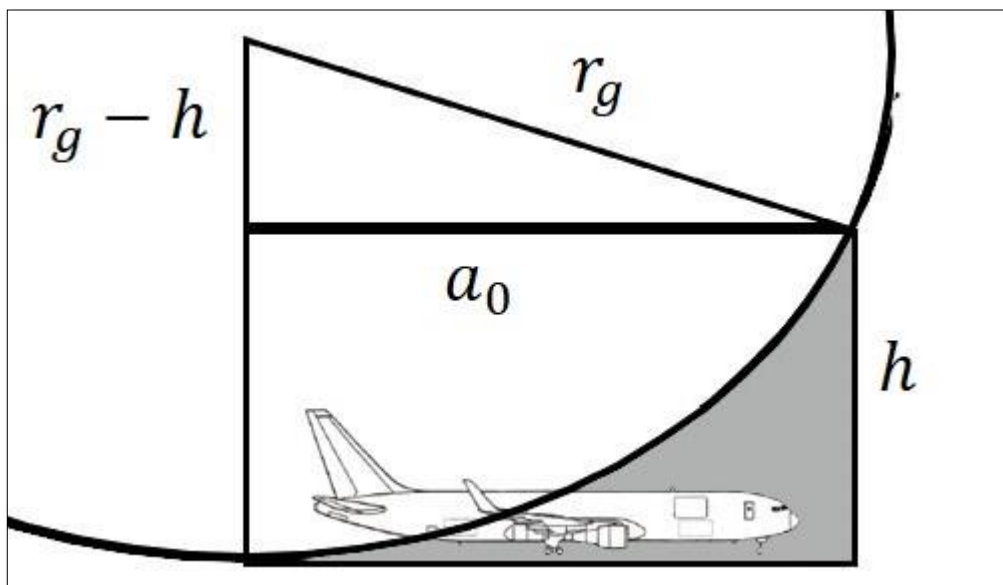


Figura 10.4 – Método da Esfera Rolante com 1 Mastro

2ª Condição: Verificar qual a altura de proteção na cauda (parte mais alta) do avião (y) e se esta é maior que a altura do avião.

$$y > y_{av}$$

Se as duas condições forem cumpridas podemos afirmar que o avião está protegido. Mais a frente iremos ver se o E190 está protegido com as instalações atuais ou se precisa de uma proteção adicional.

Sabemos que quanto maior o tamanho do avião, mais próximo ele estará do mastro devido ao espaço disponível. A aeronave é estacionada de acordo com as marcações pintadas no solo próximas ao gate, similar a figura 10.5. Essas marcações são relativas ao local onde o trem de pouso da dianteira deve ficar.

Para facilitar a visualização e os cálculos, utilizaremos a figura 10.6 que está marcando a posição do nariz do avião. Para evitar possíveis danos ao mastro por um possível avanço da aeronave, considera-se uma margem de segurança de 5 a 10 metros entre o nariz do avião e o mastro.

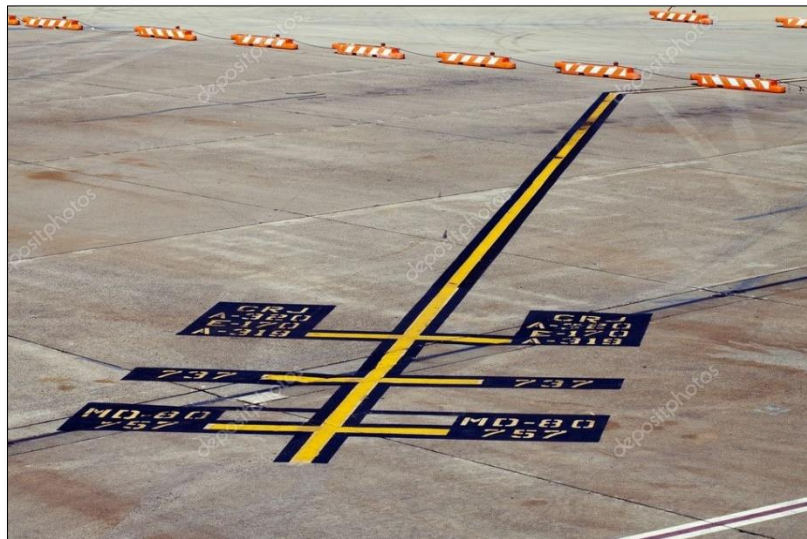


Figura 10.5 – Marcação do Trem de Pouso [46]

Os aviões mais utilizados em voos nacionais são o A320, B737 e E190. O comprimento máximo dessas aeronaves é de aproximadamente 40 metros.

Utilizaremos outros modelos como o B777 e B787 para comparação, pois são geralmente utilizados em voos internacionais.

Aviões como B747, A380 e AN225 não param nos portões padrões, sendo obrigados a ficarem mais afastados.

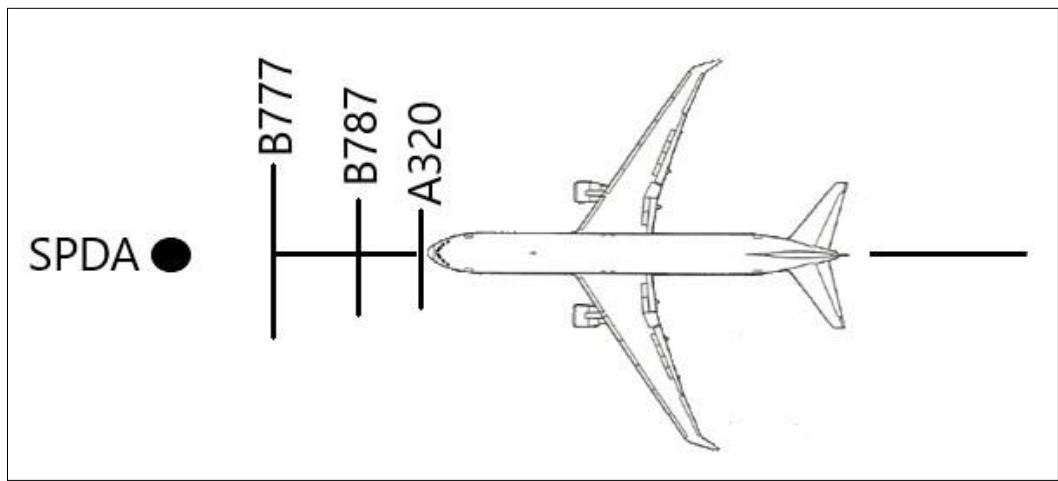


Figura 10.6 – Marcação do Nariz

TIPO	Comprimento	Dist. Seg.	Espaço utilizado	Envergadura	Altura
B777	74 m	5 m	79 m	65 m	18,5 m
B787	63 m	8 m	71 m	60 m	17 m
B738	40 m	10 m	50 m	36 m	11,5 m
A320	38 m	10 m	48 m	36 m	12 m
E190	36 m	10 m	46 m	29 m	10,5 m

Tabela 10.1 – Tabela de Aeronaves 1

Vamos verificar agora se o E190 está dentro das duas condições propostas, tanto com mastros de 35 m, quanto com os mastros de 45 m.

Utilizando os dados da tabela 10.1:

Altura da Aeronave: 10,5 m $\rightarrow y_{av} = 10,5 m$

Espaço utilizado: 46,0 m $\rightarrow a = 46 m$

Caso 1: Mastro instalado de 35 metros, SPDA Classe IV

$$h = 35 m$$

$$r_g = 60 m$$

$$a_0 = 54,54 m$$

1ª Condição: $a_0 > a$?

$$a_0 = 54,54 \text{ m} > a = 46 \text{ m} \rightarrow OK$$

2ª condição: $y > y_{av}$

$$R_{P0} = a_0 - a$$

$$R_{P0} = 8,54 \text{ m}$$

$$y = r_g - \sqrt{r_g^2 - R_{P0}^2}$$

$$\boxed{y = 0,63 \text{ m}}$$

$$y = 0,63 \text{ m} > y_{av} = 10,5 \text{ m} \rightarrow FALHOU$$

Caso 2: Mastro instalado de 45 metros, SPDA Classe IV:

$$\boxed{a_0 = 58,09 \text{ m}}$$

1ª Condição: $a_0 > a$?

$$a_0 = 54,54 \text{ m} > a = 46 \text{ m} \rightarrow OK$$

2ª Condição: $y > y_{av}$

$$R_{P0} = 12,09 \text{ m}$$

$$y = r_g - \sqrt{r_g^2 - R_{P0}^2}$$

$$\boxed{y = 1,23 \text{ m}}$$

$$y = 1,23 \text{ m} > y_{av} = 10,5 \text{ m} \rightarrow FALHOU$$

O E190 é um dos menores aviões que param no gate e se observarmos, não está totalmente protegido, devido à altura do estabilizador vertical. Consequentemente os aviões maiores também não estão.

Os modelos maiores como o B787 e o B777 nem cumpre a 1ª condição, causando risco aos funcionários que estão próximas às aeronaves.

Como o B777 é o maior, utilizaremos essa aeronave para cálculo da proteção adicional, que será provavelmente a adição de um mastro à retaguarda do avião.

10.1.2 SMPDA: Sistemas Móveis de Proteção contra Descargas Atmosféricas

10.1.2.1 SPPDA: Sistema Portátil de Proteção contra Descargas Atmosféricas

O maior problema é como instalar essa proteção adicional. Uma primeira hipótese é a utilização de um mastro portátil. Eles são geralmente utilizados em acampamentos militares por sua simplicidade de transporte e fácil montagem, como os da figura 10.7 e 10.8. Mas o problema é que além da sua montagem não ser tão rápida o quanto queremos, há também o risco para o funcionário ao montar o equipamento no meio de tempestades.

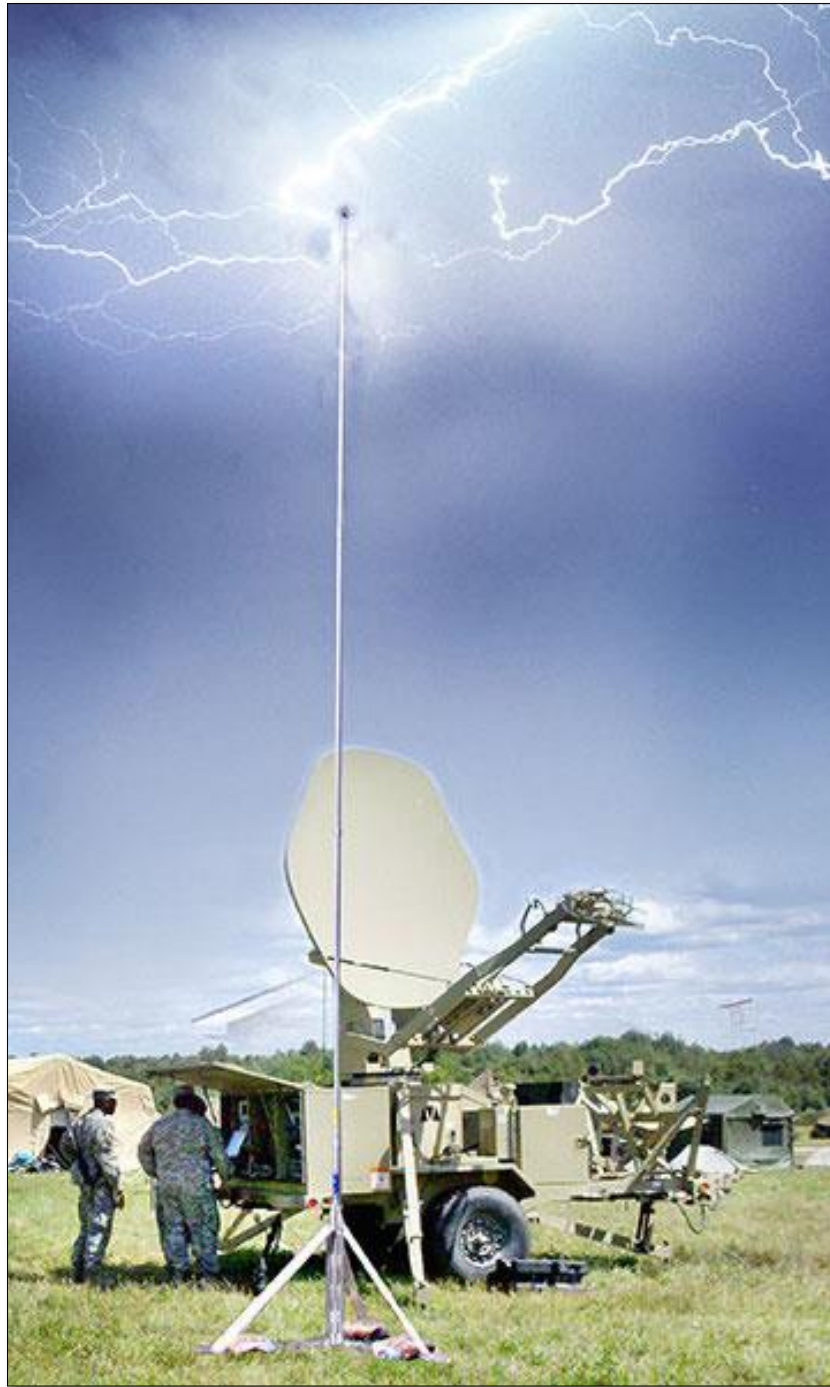


Figura 10.7 - SPDA portátil no campo militar [47]

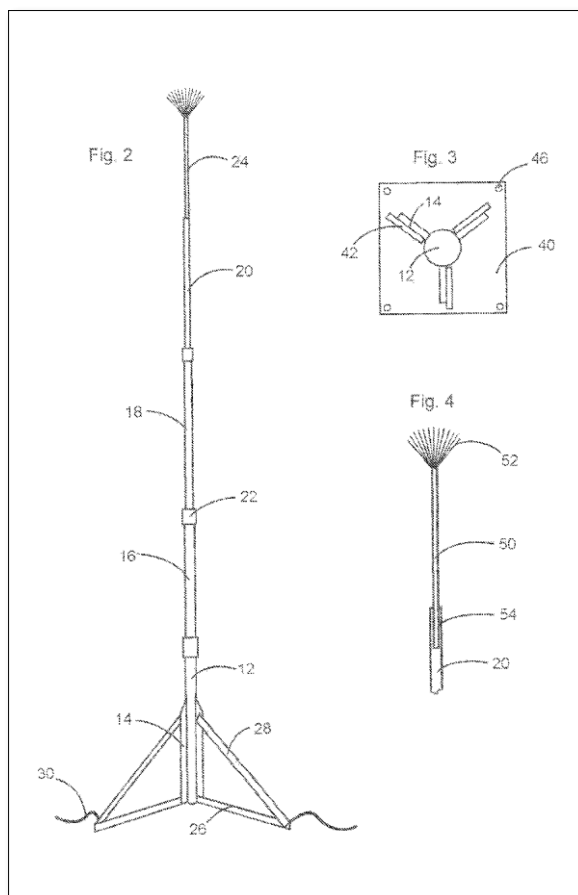


Figura 10.8 – Imagem da patente do SPDA móvel [48]

10.1.2.1 SRPDA: Sistema Retrátil de Proteção contra Descargas Atmosféricas

A melhor opção encontrada é a utilização de um mastro telescópico retrátil, similar às figuras 10.9, 10.10 e 10.11. Hoje é possível encontrar esse tipo de mastro motorizado ou pneumático com até cerca de 45 metros de altura para os que são colocados no solo e até 30 metros para os instalados em veículos. É possível encontrar à pronta entrega os mastros com até 35 metros, acima disso, somente via encomenda.

Esses mastros geralmente são utilizados como suporte de luz, câmera, antenas, etc. Podendo suportar uma carga máxima entre 10 a 200 kg a depender do modelo, material em que é feito, se motorizado ou pneumático, além do fabricante. É capaz de resistir a ventos de até 25 m/s (90 km/h).

Abaixo podemos encontrar na tabela 10.2, alguns modelos para instalação no solo, disponibilizados pela Tianjin Talents, contendo o tamanho do mastro retraído, quantidade de seções, tamanho estendido e capacidade de carga.

No Brasil, podemos encontrar através da TransTel alguns modelos de mastros pneumáticos, porém estão limitados a 16 metros e com carga limitada a 12 kg.

MODELO	TAMANHO RETRAÍDO (m)	Nº DE SECCÕES	TAMANHO ESTENDIDO (m)	CARGA MÁXIMA (kg)
TAL-M3	1	3	3	20
TAL-M10	2	7	10	40
TAL-M15	2,5	7	15	35
TAL-M20	2,95	9	20	10
TAL-M30	3,85	10	30	10
TAL-M35	4,5	10	35	25
TAL-M45	5	12	45	15

Tabela 10.2 - Tabela de Mastros de Alumínio para instalação no solo [49]

A vantagem do modelo pneumático, como o da figura 10.9, é que em caso de necessidade, pode-se usar bombas manuais para elevação do mastro. Os modelos motorizados, como os da figura 10.10, são mais velozes para subida.

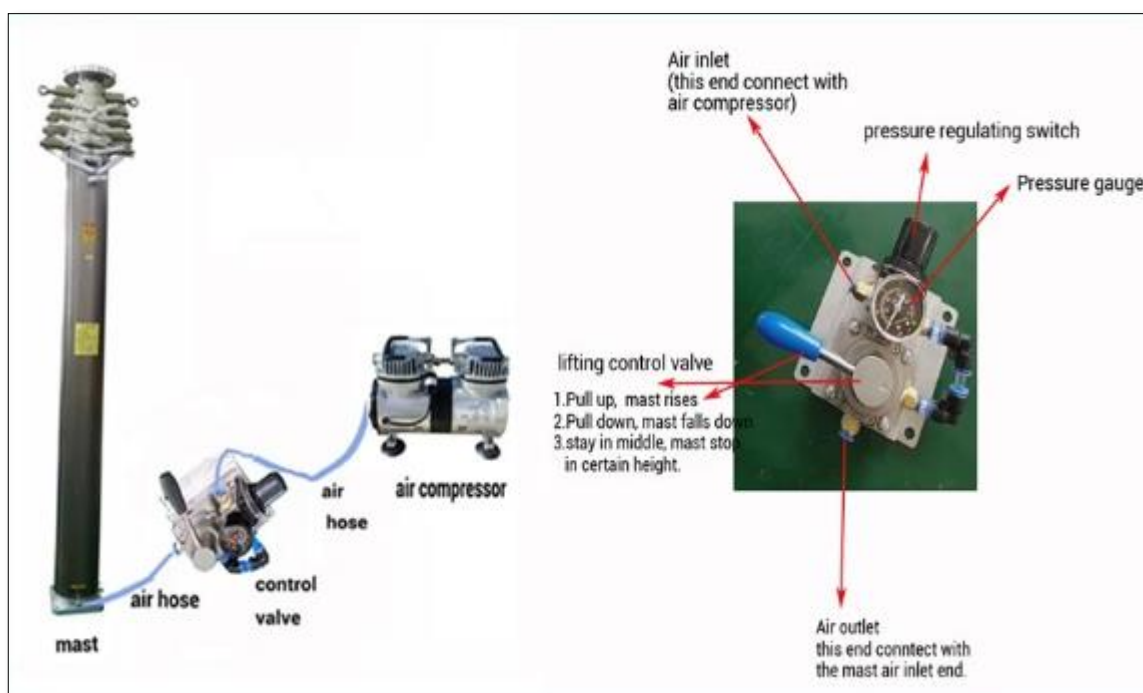


Figura 10.9 - Mastro Telescópico Pneumático [49]

Para aproveitamento dos mastros telescópicos na proposta a seguir, deve-se adicionar um captor na ponta e um sistema de controle remoto para o acionamento à distância. Existem modelos que também possuem cabo condutor como na figura 10.11



Figura 10.10 – Mastro Telescópico Motorizado [49]



Figura 10.11 - Mastro com cabo opcional [49]

10.1.3 Proteção Adicional

10.1.3.1 Vagas nos Gates

Como vimos acima, faz-se necessário uma proteção adicional para garantir a segurança dos trabalhadores que estão exercendo alguma atividade nas imediações de aeronaves maiores, para isso vamos aproveitar a malha de aterramento já existente e utilizar o Método das Esferas Rolantes com mais de um mastro.

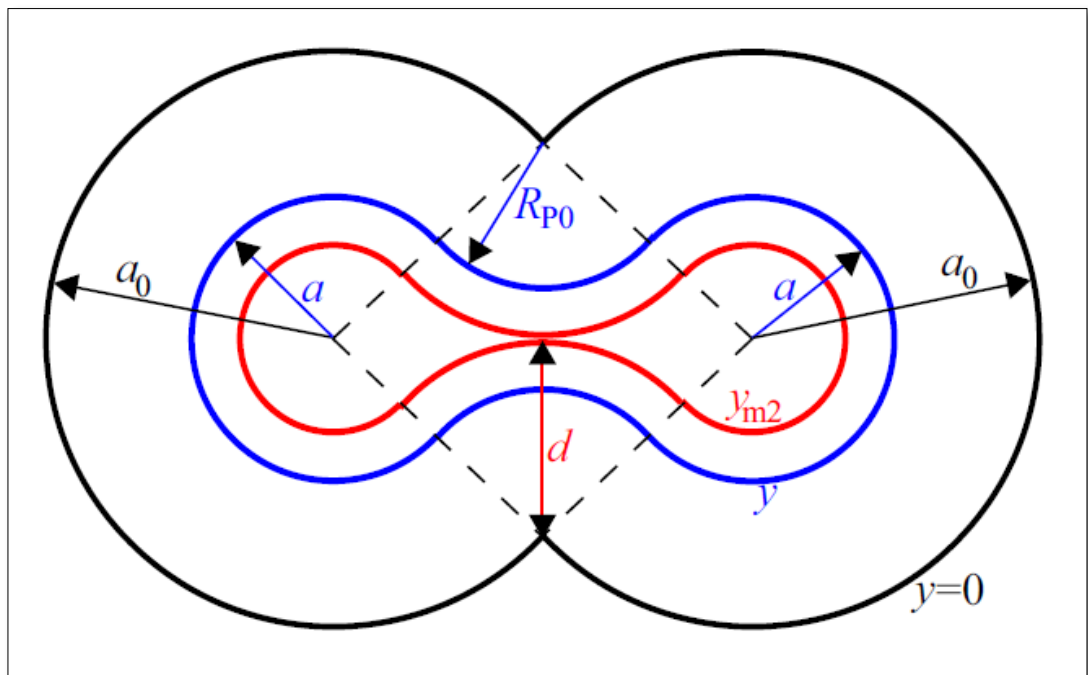


Figura 10.12 – Utilizando dois mastros [45]

Utilizaremos o B777, por ser a maior em um gate, para cálculo da proteção adicional.

A ideia é adicionar mais um mastro na parte de trás do avião, como na Figura 10.13. Após os cálculos para saber se a medida será suficiente, iremos analisar como implantar esse sistema.

Através dos artigos estudados, incluindo suas simulações, acerca do método eletrogeométrico, temos que a altura mínima a ser protegida na área mais central entre os mastros será:

$$y_{m2} = r_g - \sqrt{r_g^2 - d^2}$$

Onde o d ideal para cobrir grandes envergaduras será:

$$d = \frac{a_0\sqrt{2}}{2}$$

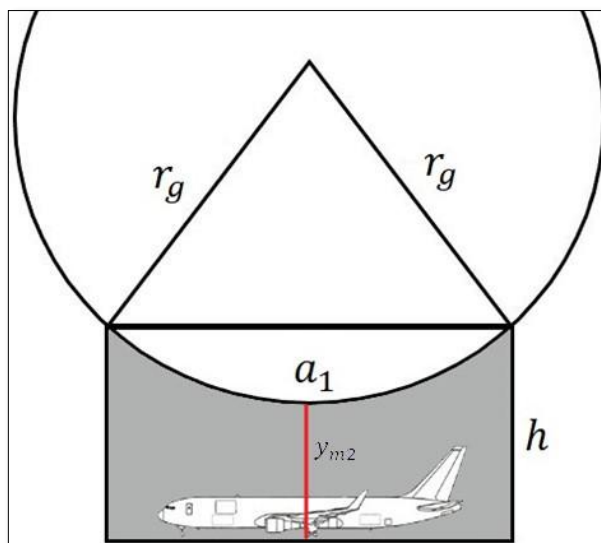


Figura 10.13 – Método das Esferas Rolantes com 2 mastros

Considerando os dois casos e um SPDA Classe IV, utilizamos o Método da Esfera Rolante para verificar a cobertura da proteção descrita na Figura 10.12.

Então:

$$h = 35 \text{ m}$$

$$a_0 = 54,54 \text{ m}$$

$$a_1 = a_0 * \sqrt{2}$$

$$\boxed{a_1 = 77,13 \text{ m}}$$

$$h = 45 \text{ m}$$

$$a_0 = 58,09 \text{ m}$$

$$a_1 = a_0 * \sqrt{2}$$

$$\boxed{a_1 = 82,15 \text{ m}}$$

O valor da distância a_1 depende do tamanho do mastro. Podemos perceber que com mastros de 35 metros conseguimos cumprir a 1ª condição para um B787, mas ainda não é suficiente para um B777 que só estará coberto com mastros de aproximadamente 45 metros nesse modelo proposto.

No caso da utilização de dois mastros a 2ª condição é mais fácil de cumprir, pois agora a altura que interessa é a da cabine do avião, ou seja, a altura total excluindo a estabilizador vertical, pois este está mais próximo do mastro, garantindo sua cobertura.

Então a segunda condição será:

$$y_{m2} > y_{av} *$$

Onde

$$\boxed{y_{av} * = y_{av} - \text{altura do estabilizador vertical}}$$

Para o E190:

Altura da Aeronave: 10,5 m $\rightarrow y_{av} = 10,5 m$

Espaço utilizado: 46,0 m $\rightarrow a = 46 m$

Caso 1: Mastro instalado de 35 metros, SPDA Classe IV

$$h = 35 m$$

$$r_g = 60 m$$

$$a_1 = a_0 \sqrt{2}$$

$$\boxed{a_1 = 77,13 m}$$

1ª Condição: $a_1 > a$?

$$a_1 = 77,13 m > a = 46 m \rightarrow OK$$

2ª condição: $y_{m2} > y_{av}$ *

$$d = \frac{a_0 \sqrt{2}}{2}$$

$$d = 38,57 m$$

$$y_{m2} = r_g - \sqrt{r_g^2 - d^2}$$

$$\boxed{y_{m2} = 14,03 m}$$

$$y_{m2} = 14,03 m > y_{av} = 10,5 m \rightarrow OK$$

Caso 2: Mastro instalado de 45 metros, SPDA Classe IV:

$$\boxed{a_1 = 82,15 m}$$

1ª Condição: $a_1 > a$

$$a_1 = 82,15 m > a = 46 m \rightarrow OK$$

2ª Condição: $y_{m2} > y_{av}$ *

$$d = 38,57 \text{ m}$$

$$y_{m2} = 16,26 \text{ m}$$

$$y_{m2} = 16,26 \text{ m} > y_{av} = 10,5 \text{ m} \rightarrow OK$$

Utilizamos acima $y_{av} = y_{av}^*$ apenas por conveniência, mas o valor de $y_{av} > y_{av}^*$.

Se considerarmos que a altura do estabilizador vertical varia entre de 30% a 40% da altura total do avião, o B777 já cumpriria também as duas condições impostas para estar protegido. Pois seu $y_{av} = 18,5 \text{ m}$, considerando o estabilizador como 30% da altura total, teremos que $y_{av}^* = 12,95 \text{ m}$. Cabe ressaltar que o mastro de 35 m não cumpriria a 1ª condição, precisando de um mastro de pelo menos 40 m.

A depender do aeroporto, o mastro do SPDA fica bem em frente ao nariz do avião, outros ficam localizados numa distância equidistante entre os gates adjacentes. Isso influenciará na instalação do mastro retrátil.

No caso 1, como na figura 10.14, os mastros podem ser instalados a nível do solo, não interferindo na manobrabilidade das aeronaves. Esse tipo de instalação facilita a manutenção, tamanho do mastro será menor e o custo de instalação também.



Figura 10.14 – Caso 1

No caso 2, como na figura 10.15, os mastros devem ser instalados abaixo do nível do solo, para não interferir na manobrabilidade das aeronaves. Esse tipo de instalação dificulta a manutenção, tamanho do mastro deverá ser maior para compensar a profundidade em que estará instalado e o custo de instalação será maior devido sua complexidade.



Figura 10.15 – Caso 2

10.1.3.2 Vagas isoladas no pátio

Existem aviões que são ainda maiores quando comparados ao que já vimos até aqui, principalmente pela envergadura (distância entre as pontas das asas). Entre eles estão o B747, A380 e AN225, destaque para o AN225 que é o maior avião do mundo. Devido a capacidade de nossos aeroportos, o número de voos com essas aeronaves é baixo, mas existe. Não existindo gates tradicionais para elas, acabam parando em local mais isolado, geralmente sem nenhum tipo de proteção.

TIPO	Comprimento	Distância de Segurança	Espaço utilizado	Envergadura
B747	74 m	5 m	79 m	60 m
A380	59 m	5 m	64 m	80 m
AN225	84 m	5 m	89 m	88 m

Tabela 10.3 – Tabela de Aeronaves 2

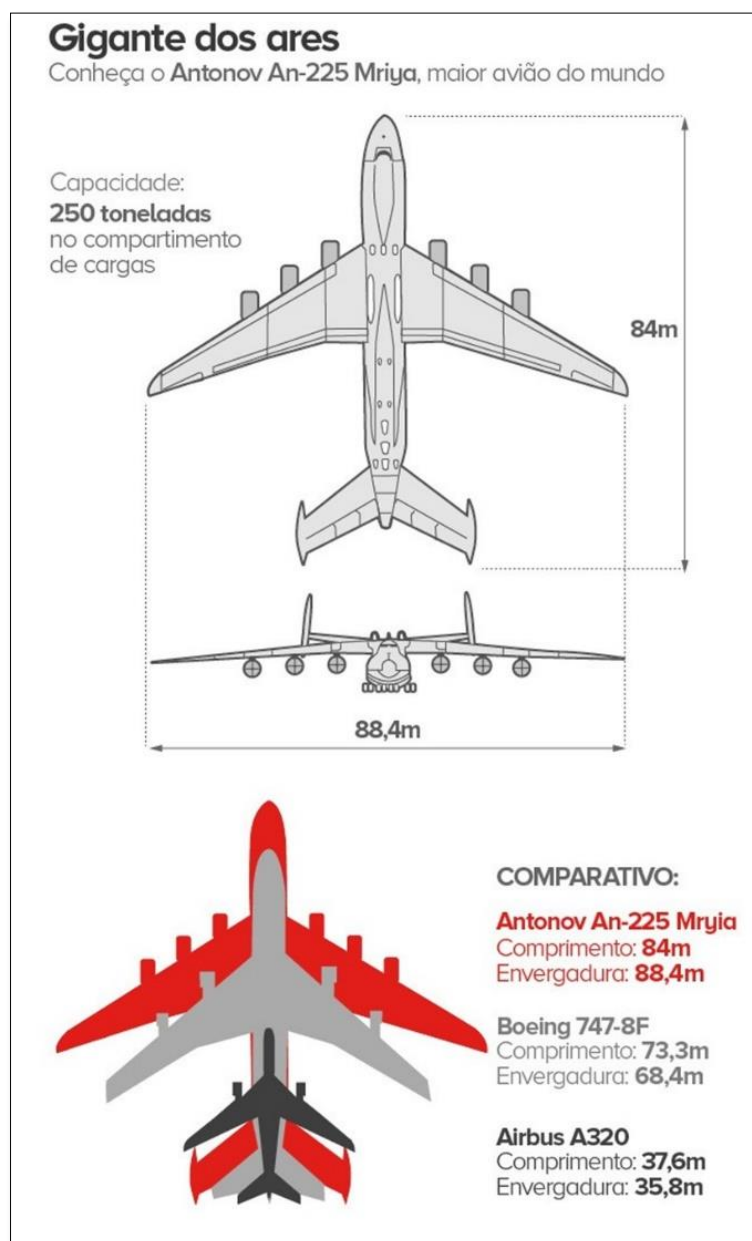


Figura 10.16 - Comparação entre AN225 com outros tipos de aeronaves [50]

Por isso será necessária uma vaga diferenciada para esse tipo de aeronave. Esse é o caso 3, como na figura 10.17, onde são necessários 4 mastros para formar uma área de cobertura maior. Nesse caso a instalação abaixo do solo seria o ideal, para que os condutores não atrapalhem a manobrabilidade das aeronaves.



Figura 10.17 – Caso 3

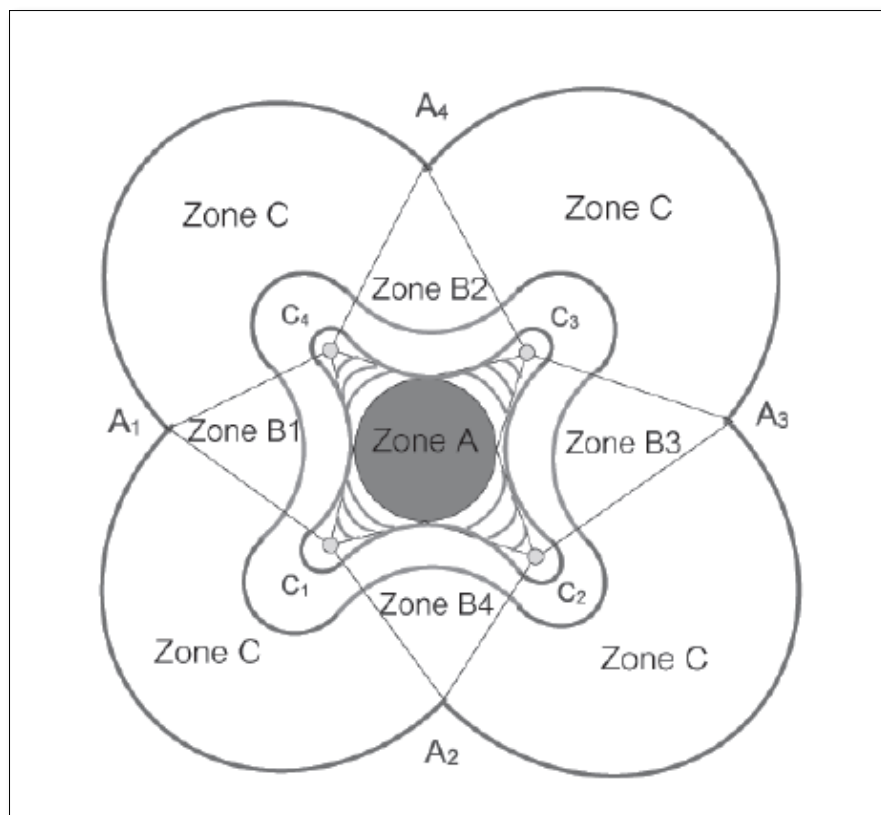


Figura 10.18 – Área de cobertura com 4 mastros [51]

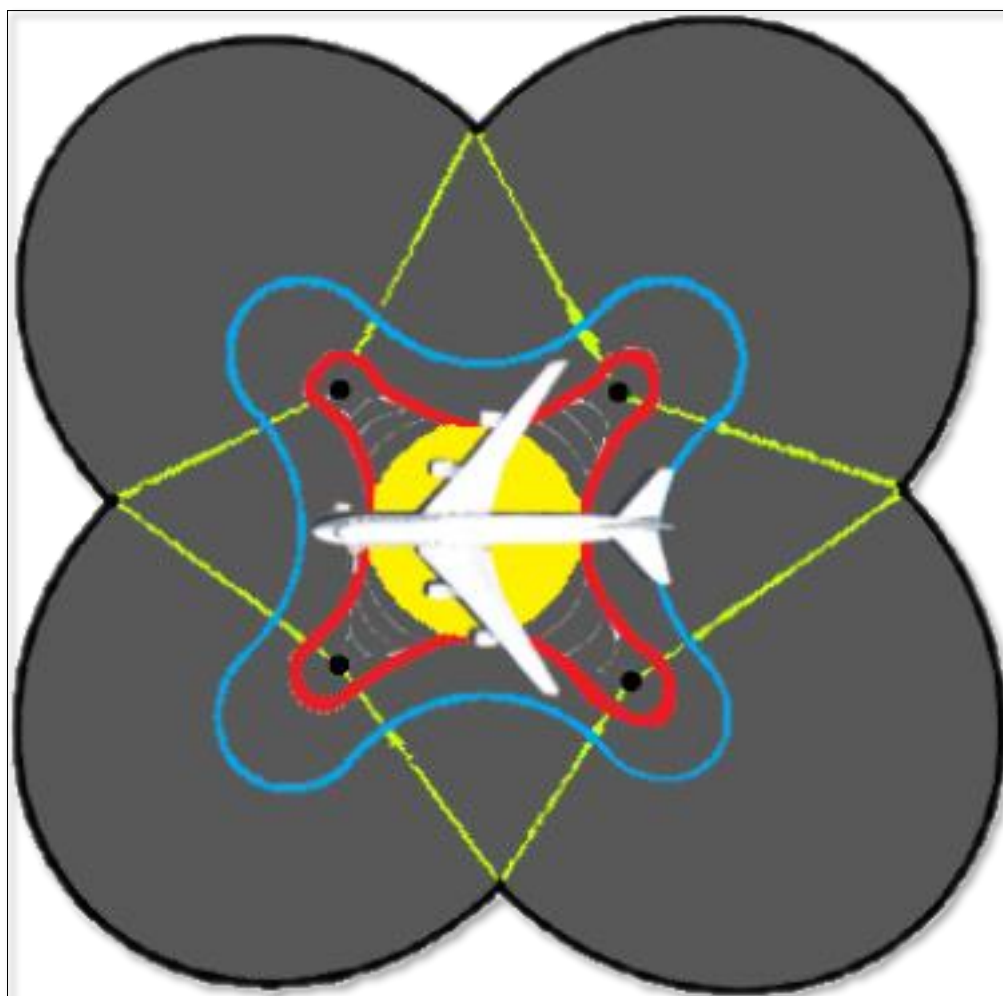


Figura 10.19 - Aeronave dentro da zona de proteção

10.1.3.3 VPDA: Veículos de Proteção contra Descargas Atmosféricas

Existem algumas situações inesperadas, onde por algum tipo de problema pode acontecer com a aeronave que a impossibilite de deslocar-se até um local onde haja proteção instalada.

Para solucionar esse problema, a proposta é utilizar um veículo que tenha um mastro telescópico, como na figura 10.19, e utilizar os acessos à malha de aterramento espalhados pelo aeroporto para conectar o mastro, criando um SPDA temporário no local desejado.

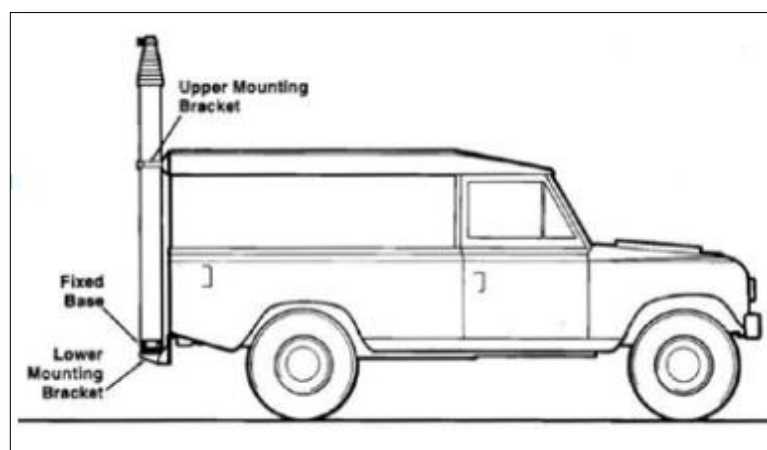


Figura 10.20 - Veículo com Mastro Telescópico instalado

Os mastros que são instalados em veículos produzidos pela Clark Masts são bem robustos, inclusive tem capacidade de carga melhor dos que os que vimos anteriormente, mas estão limitados a 34 metros como podemos ver na tabela 10.4.

MODELO	TAMANHO RETRAÍDO (m)	Nº DE SECCÕES	TAMANHO ESTENDIDO (m)	CARGA MÁXIMA (kg)
48651	1,51	9	6	180
48653	2,00	9	10	150
48655	2,65	9	15	130
48657	3,50	9	21	100
48658	4,10	9	26	90
48659	4,70	9	30	80
48660	5,30	9	34	55

Tabela 10.4 - Tabela de Mastros para veículos [52]



Figura 10.21 - Carro com Mastro da “Clark Masts” instalado [53]

11. CONCLUSÃO

É bem complexo o sistema eletroeletrônico do tráfego aéreo brasileiro, pois engloba diversos ramos da Engenharia Elétrica, como as áreas de comunicação, potência, proteção, eletromagnetismo etc.

Abranger todo esse conteúdo de forma detalhada poderia fugir um pouco do escopo do trabalho de conclusão de curso, exigindo uma maior dedicação do pesquisador. Para um melhor aproveitamento do tema, o foco do trabalho foi definido no estudo das influências das descargas atmosféricas no tráfego aéreo. Assim, foram abordadas estudo de nuvens, como sua classificação e formação, além do processo de geração das descargas atmosféricas, incluindo em locais diferentes como desertos e vulcões.

Verificou-se que desvios de rota devem ser realizados pelas aeronaves, afim de evitar as pedras de gelo e descargas atmosféricas intranuvem. A visualização dos alvos devido a descargas atmosféricas não é afetada, mantendo a confiabilidade das informações enviadas ao controlador de tráfego aéreo.

O estudo do comportamento de ondas eletromagnéticas na atmosfera foi essencial para compreender a influência das descargas atmosféricas na comunicação controlador-piloto, que é realizada em sua maior parte em frequências VHF.

As CIDs (Compact Intracloud Discharge) produzem radiação que englobam a faixa de frequência utilizada na comunicação de tráfego aéreo e geralmente chegam a ocorrer acima de 10 km de altura e apenas gera ruídos na comunicação.

As instalações físicas foram divididas em duas partes principais. Uma das partes envolveu os edifícios que prestam o serviço de tráfego aéreo, onde as proteções são reguladas por normas internas da FAB e por normas da ABNT.

A outra parte das instalações engloba os aeródromos e aeroportos, com análise de problemas causados devido às descargas atmosféricas e propostas de engenharia para proporcionar maior segurança a usuários e trabalhadores.

Dentre as propostas, há destaque para o projeto de sistemas móveis de proteção contra descargas atmosféricas que garantem a segurança nos gates e de toda área disponível de trânsito dos aviões como pátio, pista de táxi ou pista de pouso quando necessário, através de veículos

de proteção contra descargas atmosféricas, explorando ao máximo a malha de aterramento já disponível no aeroporto.

11.1 Trabalhos Futuros

Sabemos que os mastros telescópicos existentes não são os ideais para a proposta técnica. Então é importante o desenvolvimento de mastros específicos para essa tarefa, de preferência mais leves, e caso não sejam de material condutor, utilizar o modelo com cabos para que possam fazer o sistema de descida do SPDA.

Os mastros atuais são bem robustos e conseguem suportar uma carga além do que propomos. Pensando na eficiência energética, podemos diminuir sua capacidade de carga e conseqüentemente, resultará na diminuição do seu peso, que é essencial para ajudar na economia de energia, pois um motor de menor capacidade poderá ser usado.

Testes em campo podem ser realizados para verificar a eficiência da proposta. O aeródromo de Botelho, localizado em São Sebastião no Distrito Federal, é ideal para testes, visto que há projetos de crescimento e pode servir de modelo para aeroportos maiores.

BIBLIOGRAFIA

[1] **Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo.** CGNA, 2017. Disponível em:

<http://portal.cgna.gov.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2017.pdf>.

Acesso em: 26 de nov. 2018.

[2] **Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro.** DECEA, 2010.

[3] BASTOS, A. L. D.; BAUM, D. M. **Tráfego Aéreo.** São Paulo, 2009. Disponível em:

<<http://www2.ita.br/~claudioj/trafegoaereo.pdf>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[4] **Revista Aerovisão.** 231. ed. 2011. Disponível em:

<https://issuu.com/portalfab/docs/aerovisao_231_2011>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[5] DCA 102-1: **Requisitos Básicos das Redes de Comunicações do COMAER.** Comando da Aeronáutica. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em:

<<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=3680>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[6] WALLACE, J.M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey.** 2. ed. Londres: Elsevier, 2006.

[7] Imagem Atmosfera. Disponível em:

<<https://www.todoestudo.com.br/wp-content/uploads/2018/01/atmosfera-01-1024x1024.png>>. Acesso em: 26 de nov. 2018

[8] SANTOS, A.; LAMBELHO, M.; CANAS, J.; FERNANDES, L.; REIS, A.; SEQUEIRA, D. A atmosfera como meio de aviação. In: Seminário Aeroespacial II, 03, 2015, Lisboa.

Anais eletrônicos. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2015. Disponível em:

<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428727958/Grupo%2002.pdf>>. Acesso em 26 de nov. 2018

[9] Imagem Atmosfera. Disponível em:

<<https://www.estudopratico.com.br/wp-content/uploads/2014/04/troposfera-1-1.jpg>>. Acesso em: 26 de nov. 2018

[10] MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: Noções básicas e climas do Brasil, 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

[11] DONALD AHRENS, C. **Meteorology Today**: An Introduction to weather, climate, and the environment. 9. ed. 2009.

[12] Grupo de Eletricidade Atmosférica. “**Tipos de Relâmpagos**”. 2018. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[13] WEIRUP, L. **Volcanic Lightning**. 2010. Disponível em: <<http://volcano.oregonstate.edu/volcanic-lightning>>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

[14] Imagem de raios em tempestade de areia. Disponível em:

<<https://outdoors360.com/wp-content/uploads/2016/04/catatumbo-lightning-04-1024x683.jpg>>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

[15] Emerging Technology. **How Sandstorms Generate Spectacular Lightning Displays**. Março, 2010. Disponível em:

<<https://www.technologyreview.com/s/418236/how-sandstorms-generate-spectacular-lightning-displays/>>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

[16] SHINKAI, R. de A. **Um simulador para avaliação da influência das características locais das descargas atmosféricas nuvem-solo em sistemas de detecção indireta**. 2017, 134f. Dissertação de Pós-graduação – UFPA, Belém, 2017.

[17] **Eletrônica**, volume II. Diretoria de Comunicações e Eletrônica da Marinha.

[18] SOARES, A. J. M.; SILVA, F. da C. **Antenas e Propagação**. 1. ed. Brasília, 2003.

[19] DE CARVALHO, J. N. **Propagação em áreas urbanas na faixa UHF**. 2003, 121f. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

[20] Teleco. **SPDA: Métodos de Proteção**. Disponível em:

<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialspda/pagina_4.asp>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

- [21] NISKIER, J.; MACINTYRE, A. J. **Instalações Elétricas**, 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [22] ABNT NBR 5419/2015: **Proteção contra descargas atmosféricas**.
- [23] CREDER, H. **Instalações Elétricas**, 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [24] LEITE, D. M. **Proteção contra descargas atmosféricas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Mydia, 1997.
- [25] SUETA, H. E. **A Revisão da ABNT NBR 5419: Proteção contra as Descargas Atmosféricas**. Boletim ABNT. Maio/Junho 2015.
- [26] NSCA 66-2: **Implantação/Substituição de Sistemas de Energia do SISCEAB**. Comando da Aeronáutica. Rio de Janeiro, 2017.
- [27] ABNT NBR 12971: **Emprego de Sistema de Aterramento para Proteção de Auxílios Luminosos em Aeroportos**.
- [28] Imagem de luzes de aeroporto. Disponível em:
<http://st.gde-fon.com/wallpapers_original/2607_ayeroport_ogni_vzletnaya-polosa_1600x1200_www.Gde-Fon.com.jpg>. Acesso em: 28 de nov. 2018.
- [29] BORJA, Santiago. **Lightning Strike**. 2017. Disponível em:
<<http://www.santiagoborja.com/portfolio-items/lightning-strike/>>. Acesso em: 26 de nov. 2018
- [30] LITO. **Você já viu um Boeing 767 de boca aberta?** 2010. Disponível em:
<<http://www.avioesemusicas.com/voce-ja-viu-um-boeing-767-de-boca-aberta.html>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.
- [31] FREITAS, Davi. **Dúvidas sobre o radar meteorológico**. 2016. Disponível em:
<<http://www.voovirtual.com/t40246-duvidas-sobre-o-radar-meteorologico-pmdg>>. Acesso em: 26 de nov. 2018
- [32] **STSC**. Disponível em: <<https://www.redemet.aer.mil.br/stsc/public/produto>>. Acesso em: 26 de nov. 2018
- [33] RAKOV, V. A. **The Physics of Lightning**. Abril, 2013

- [34] LE VINE, D. M.; KIDER, E. P.; WEIDMAN, C. C. **RF Radiation Produced by Intracloud Lightning Discharges**. NASA Technical Paper 1454, 1979. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19790014537.pdf>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.
- [35] FRANCIS, Toni. **Raio atinge torre e tira Rede Amazônica do ar em Porto Velho**. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2015/11/raio-atinge-torre-e-tira-rede-amazonica-do-ar-em-porto-velho.html>>. Acesso em: 26 de nov. 2018
- [36] JEFERSON. **Raio atinge torre da Band e tira "Brasil Urgente" do ar**. Disponível em: <<https://oplanetatv.clickgratis.com.br/noticias/bastidores/raio-atinge-torre-da-band-e-tira-brasil-urgente-do-ar.html>>. Acesso em: 26 de nov. 2018
- [37] SOARES, F da R. **Metodologia De Previsão de Descargas Atmosféricas Utilizando Dados de Radar, Rede de Sensores Eletromagnéticos e Modelagem Atmosférica**. 2014, 142f. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G2NJ92>>. Acesso em: 26 de nov. 2018
- [38] IATA. Disponível em: <<https://www.iata.org/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 28 de nov. 2018
- [39] **Lightning Strike at Brisbane Airport Appears to Hit Plane**. Disponível em: <https://www.huffpost.com/entry/lightning-strike-brisbane-plane-photo_n_2151346>. Acesso em: 26 de nov. 2018.
- [40] PINHO, A. **Entendendo o risco de raios nos aeroportos brasileiros**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/gerenciamento-da-seguranca-operacional/baist/arquivos/PerigodeRaiosnosAeroportosBrasileiros.pdf>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.
- [41] RODRIGUES, Osvaldo. Trabalhador da Dnata é atingido por raio no Salgado Filho. **AEROFOLHA: Jornal do Sindicato dos Aeroviários de Porto Alegre**. Porto Alegre, ano 32, ed. 637, p.1, 2018. Disponível em:

<<http://aerovarios.org.br/wp-content/uploads/2014/02/637.pdf>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[42] ASSCOM. **Aeroviários da TAP ME são vítimas de descarga elétrica durante temporal**. 2016. Disponível em:

<<http://aerovarios.org.br/2016/09/14/aerovarios-da-tap-me-sao-vitimas-de-descarga-eletrica-durante-temporal/>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[43] D'AMBRA, Delia. **Airport ground worker still working through recovery following lightning strike**. 2018. Disponível em:

<<http://www.nbc-2.com/story/37594059/airport-ground-worker-still-working-through-recovery-following-lightning-strike>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[44] Imagem pátio de SBBR. Disponível em:

<<https://www.aeroflap.com.br/wp-content/uploads/2017/12/LATAM-Aeroporto-de-Bras%C3%ADlia.jpg>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[45] DUNG, L. V.; PETCHARAKS, K. **Lightning Protection Systems Design for Substations by Using Masts and Matlab**. In: **International Journal of Mathematical and Computacional Science**. 2010

[46] Marcações de estacionamento do avião no aeroporto. Disponível em:

<<https://pt.depositphotos.com/7229149/stock-photo-airplane-parking-markings-on-airport.html>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[47] LBA GROUP, **Lightning Mast Systems provide portable or fixed asset protection**. 2015. Disponível em:

< <https://www.lbagroup.com/blog/lightning-mast-asset-protection/>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[48] BEHR, L. V. **US20140262410A1: Portable Lightning Protection System**. 2013.

Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US20140262410A1/en>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[49] Imagens de mastros telescópicos motorizado e pneumáticos. Disponível em:

<<http://www.tjtalents.cn/>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[50] STEGANHA, Roberta. **Maior avião do mundo pousa pela 1ª vez em Campinas**. 2016. Disponível em:

<<http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2016/11/maior-aviao-do-mundo-pousa-pela-1-vez-em-aeroporto-de-campinas-sp.html>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[51] PETCHARAKS, N. **Lightning Protection Zone in Substation using mast**. KKU Engineering Journal. Janeiro, 2013. Disponível em:

< <http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/> >. Acesso em: 28 de nov. 2018

[52] Clarck Masts. **Telescopic and Sectional Mast Systems**. Disponível em:

<<http://www.clarkmasts.com/media/dyn-docs/products/tm-sales-leaflet-tmsl-e-cms-1682018-low-res.pdf>>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

[53] Imagem de carro utilizando um mastro telescópico. Disponível em:

<<http://www.portablemasts.com.au/Clark/clarkp5.htm>>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

[54] GALVANI, E., **O Processo de Formação de Nuvens e de Chuva**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em:

<http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Emerson/Texto_Precipitacao.pdf>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[55] Termotécnica Para-raios. **Apostila Orientativa sobre SPDA**. 4. ed. Belo Horizonte, 2015. Disponível em:

< https://www.tel.com.br/imagenstel/institucional/apostila_spda.pdf>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[56] LBA GROUP, **Portable Lightning Mast Protection PLP Series**. Greenville, 2014. Disponível em:

<<https://www.lbagroup.com/images/PDFs/plp-lightning-mast-manual.pdf>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[57] LBA GROUP, **Lightning Protection Systems for Towers, Antennas and Structures**. Disponível em:

<<https://www.lbagroup.com/products/lightning-protection-masts-dissipators>>. Acesso em: 26 de nov. 2018.

[58] ROTEC ENGENHARIA. Imagem gaiola de Faraday. Disponível em:

<<http://roctecengenharia.com.br/wp-content/uploads/2018/08/gaiola-de-faraday-spda-em-sao-paulo-para-raios-em-sao-paulo-roctec-engenharia-eletrica.png>>. Acesso em: 26 de nov. 2018

[59] AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM. **Protecting Airport Personnel from Lightning Strikes**. Setembro, 2011.

[60] Dados de aeronaves da frota da TAM. Disponível em:

<https://www.latam.com/pt_br/conheca-nos/sobre-nos/nossa-frota/nossa-frota/>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

[61] PÄTHZ, T.; HERRMANN, H. J.; SHINBROT, T. **Why do Particle Clouds Generate Electric Charges?** Cornell University. Agosto, 2010. Disponível em:

<<https://www.nature.com/articles/nphys1631>>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

[62] ICA 66-30: **Requisitos básicos para os Sistemas de Aterramento e Proteção contra surtos em instalações do SISCEAB**. Comando da Aeronáutica. Rio de Janeiro, 2014.

[63] RBAC 154: **Projeto de Aeródromos**. ANAC. 2018.

[64] RBAC 153: **Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergência**. ANAC. 2018.