



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Estudo de interferências e danos causados por  
descargas atmosféricas em aeronaves**

**Leonardo Henrique de Moura**

Brasília, Dezembro 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica

**Leonardo Henrique de Moura**

**Estudo de interferências e danos causados por  
descargas atmosféricas em aeronaves**

Trabalho de Conclusão de Curso 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 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

Moura, Leonardo Henrique.

**Estudo de interferências e danos causados por descargas atmosféricas em aeronaves.** [Distrito Federal] 2018. xiv,67p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2018).

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

Departamento de Engenharia Elétrica 2018.

Orientação: Profº Dr. Alcides Leandro da Silva.

1. Descargas atmosféricas. 2. Raios. 3. Aeronaves. 4. Avarias

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Moura, Leonardo Henrique de (2018). Estudo de interferências e danos causados por descargas atmosféricas em aeronaves. [Distrito Federal] 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 páginas.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Leonardo Henrique de Moura

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo de interferências e danos causados por descargas atmosféricas em aeronaves

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.

---

Leonardo Henrique de Moura

AOS 7 Bloco D Apto 607, Área Octogonal, Brasília, DF - Brasil

E-mail: leonardolhm88@gmail.com

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

# **Estudo de interferências e danos causados por descargas atmosféricas em aeronaves**

**Leonardo Henrique de Moura**

## **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

Brasília, Dezembro 2018

# DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha amada esposa Sara F. Dias de Moura, que sempre me apoiou e me deu força para vencer as dificuldades durante a graduação e na vida.*

Leonardo Henrique de Moura

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me permitiu tudo isso. É a Ele que dirijo minha maior gratidão. Deus mais do que me criar, deu propósito a minha vida. Vem dEle tudo o que sou, o que tenho e o que espero. Tu és o maior mestre que uma pessoa pode conhecer e reconhecer.

Agradeço à minha esposa Sara, amor paciente, agradeço pelo companheirismo e por crescermos juntos. Aos meus familiares e amigos pelas palavras de estímulo e por participarem desta conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr Alcides Leandro da Silva por toda ajuda, atenção e consideração prestada, a sua orientação foi extremamente importante para a realização deste trabalho.

A vocês todos, minha gratidão.

## RESUMO

O Brasil com suas dimensões continentais e situado na zona tropical do planeta, região naturalmente quente e favorável à formação de tempestades, é tido como líder mundial de incidência de descargas atmosféricas.

A alta incidência de descargas elétricas aumenta a probabilidade de uma aeronave ser impactada pelos raios. Devido as características e dimensões territoriais, o Brasil tem no transporte aéreo uns dos seus principais meios de locomoção. Para garantir a segurança e confiabilidade deste sistema de locomoção é necessário pesquisas e investimentos para melhorar as proteções das aeronaves frente aos impactos de raios, minimizando os danos e interferências para comodidade dos usuários.

Este trabalho descreve a dinâmica das descargas atmosféricas, seus efeitos no sistema da aviação, comportamento das aeronaves numa região instável, medidas de segurança e proteção utilizada pelas aeronaves.

**Palavras-chaves:** Descargas atmosféricas. Raios. Aeronaves. Avarias.

## ABSTRACT

Brazil, with its continental dimensions and located in the tropical zone of the planet, a naturally warm region and favorable to the formation of storms, is considered as the world leader in the incidence of atmospheric discharges.

The high incidence of electric discharges increases the probability of an aircraft being impacted by lightning. Due to the characteristics and territorial dimensions, Brazil has one of the main means of locomotion in air transport. To ensure the safety and reliability of this locomotion system, research and investments are needed to improve aircraft protection against lightning strikes while minimizing damage and interference to user comfort.

This work describes the dynamics of atmospheric discharges, their effects in the middle of aviation, aircraft behavior in an unstable region, safety measures and protection used by aircraft.

**Keywords:** Atmospheric discharges. Rays. Aircraft. Breakdowns.



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivo .....	3
1.3 Estruturação do trabalho .....	3
2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	4
2.1 Definição de Descargas Atmosféricas .....	4
2.2 Formação e tipos de nuvens .....	5
2.3 Formação de Descargas Atmosféricas .....	8
2.4 Tempestade .....	11
3. AERONAVES .....	16
3.1 Estrutura da aeronave .....	16
3.2 Material da aeronave .....	18
3.3 Teto operacional .....	19
4. A INTERAÇÃO ENTRE AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E AERONAVES .....	21
4.1. Campo elétrico .....	22
4.2 Integração entre aeronave e campo elétrico .....	24
4.3 Descarga de corona (Fogo de Santelmo) .....	25
4.4 Interação entre raios e aeronaves .....	26
4.5 Aeronave vista como gaiola de Faraday e mecanismos básicos de acoplamentos .....	30
4.6 Cálculo do campo elétrico no interior de um condutor esférico .....	38
4.7 Descarregadores de energia estática .....	41
4.8 Proteção na aeronave contra as descargas atmosféricas .....	43
4.9 Tensão de passo e de toque .....	43
4.10 Cálculo da máxima tensão de passo suportada para o ser humano .....	45

5. MEDIDAS PREVENTIVAS E DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E ACIDENTES/INCIDENTES .....	48
5.1 Medidas de prevenção contra descargas atmosféricas adotadas durante as fases do voo	
48	
5.2 Medidas de inspeção estrutural após o avião ser atingido pelo raio .....	49
5.3 Acidentes/Incidentes .....	51
5.4 Avarias nas estruturas da aeronave .....	54
6. CONTRIBUIÇÃO PARA O TRABALHO .....	58
6.1 Identificação do problema .....	58
6.2 Proposta de melhoria .....	59
7. CONCLUSÃO .....	61
7.1 Conclusões .....	61
7.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	62
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ACIDENTES - FATORES METEOROLÓGICOS [3] .....	2
FIGURA 2 – CORRENTE DE UMA DESCARGA DE UMA ESTAÇÃO MEDIDA NO MORRO DE CACHIMBO [6] .....	4
FIGURA 3 – TIPOS DE NUVENS [10] .....	7
FIGURA 4 – TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS [12] .....	8
FIGURA 5 – ETAPAS DE FORMAÇÃO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA NUVEM-TERRA [6] .....	9
FIGURA 6 – DESCARGAS ATMOSFÉRICAS MÚLTIPLAS – TORONTO, CANADÁ [15] .....	10
FIGURA 7 – ESTÁGIOS DA TEMPESTADE [16].....	14
FIGURA 8 – NUVEM CB [17].....	15
FIGURA 9 – AVIÃO 14 Bis [18].....	16
FIGURA 10 – ESTRUTURA EXTERNA DA AERONAVE [19] .....	17
FIGURA 11 – MATERIAL UTILIZADO NO BOEING 787 [22].....	19
FIGURA 12 – IMPACTO DO RAIOS EM AERONAVE NO SOLO [24] .....	21
FIGURA 13 – IMPACTO DO RAIOS EM AERONAVE NO VOO [25] .....	21
FIGURA 14 – INCIDÊNCIA DE RAIOS POR ALTITUDES [26].....	22
FIGURA 15 – SENTIDO DO CAMPO ELÉTRICO [27] .....	23
FIGURA 16 – CAMPO ELÉTRICO NA NUVEM [28] .....	24
FIGURA 17 – LINHA EQUIPOTENCIAL EM TORNO DA AERONAVE [30] .....	25
FIGURA 18 – DESCARGA DE CORONA [32] .....	26
FIGURA 19 – LINHAS EQUIPOTENCIAIS NO CANAL DE PROGRESSÃO DA DESCARGA [30].....	27
FIGURA 20 – CONEXÃO DA AERONAVE COM UM CANAL PROGRESSIVO [30] .....	29
FIGURA 21 – CAMINHO DE RETORNO DE CORRENTE DE RAIOS PELO AVIÃO E EM OUTRO RAMO [30].....	29
FIGURA 22 – PONTOS DE CONEXÃO DO RAIOS [30] .....	30
FIGURA 23 – EFEITO DA GAIOLA DE FARADAY NA FUSELAGEM DA AERONAVE [34] .....	31
FIGURA 24 – CORRENTE CIRCULANTE EM UM AVIÃO ATINGIDO POR UM RAIOS [30].....	31
FIGURA 25 – MECANISMO BÁSICOS DE ACOPLAMENTO [30] .....	32
FIGURA 26 – TENSÃO X RESISTÊNCIA [36] .....	33
FIGURA 27 – ACOPLAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO [30].....	35
FIGURA 28 – RESPOSTA INDUTÂNCIA MAGNÉTICA [30].....	36
FIGURA 29 – TESTE CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS [37] .....	37
FIGURA 30 – CAMPO ELÉTRICO NO INTERIOR DE UMA ESFERA. [39].....	39
FIGURA 31 – LOCALIZAÇÃO DOS DESCARREGADORES ESTÁTICO [40].....	42
FIGURA 32 – DESCARREGADOS ESTÁTICO NA EMPENAGEM [40] .....	42
FIGURA 33 – TENSÃO DE PASSO E TENSÃO DE TOQUE [42] .....	44
FIGURA 34 – CIRCUITO QUIVALENTE [43] .....	45
FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO DO SOLO ELETRICAMENTE [43] .....	47
FIGURA 36 – DEFINIÇÃO DE ZONAS [41].....	50

FIGURA 37 – ZONAS NO AVIÃO [41] .....	51
FIGURA 38 – QUEDA DE RAIOS – DANIFICAÇÃO DO PARA-BRISAS [46].....	55
FIGURA 39 – IMPACTO DE RAIOS NO BICO DA AERONAVE[45] .....	56
FIGURA 40 – DANIFICAÇÕES NOS ESTABILIZADORES [41] .....	56
FIGURA 41 – DANIFICAÇÃO NA FUSELAGEM [41] .....	57
FIGURA 42 – VISTA SUPERIOR.....	59
FIGURA 43 – VISTA LATERAL.....	60

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CAMADAS E REGIÕES DE FORMAÇÃO DAS NUVENS [9] .....	6
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DAS NUVENS [8] .....	6
TABELA 3 – TETO OPERACIONAL .....	20
TABELA 4 – PROPRIEDADES DOS MATERIAS [36] .....	33
TABELA 5 – RESISTIVIDADE DO MATERIAL DE RECOBRIMENTO [43].....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área da seção transversal do material	[m <sup>2</sup> ]
C	Coulomb	
E	Campo elétrico	[N/C]
E <sub>p</sub>	Máxima tensão de passo permissível	[V]
I <sub>chd</sub>	Máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano	[A]
F	Força elétrica	[N]
l	Comprimento	[m]
N	Newton	
Q	Carga elétrica	[C]
R	Resistência	[Ω]
R <sub>ch</sub>	Resistência do corpo humano	[Ω]
R <sub>p</sub>	Resistência própria de cada pé com relação a terra	[Ω]
R <sub>mp</sub>	Resistência mútua entre dois pés	[Ω]
R <sub>mp</sub>	Resistência mútua entre dois pés	[Ω]
t	Tempo	[s]
V	Volts	
ρ <sub>R</sub>	Resistividade	[Ω.m]
H	Intensidade de campo magnético	[A/m]
φ	Fluxo magnético total em webers	[wb]
μ <sub>o</sub>	Permeabilidade do vácuo	[H/m]

$\Psi$	Fluxo elétrico	[C]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ICAO	Organização da Aviação Civil Internacional	
AIN	Atlas Internacional de Nuvens	
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil	
AIS	Serviços de Informação Aeronáutica	
ASN	Aviation Safety Network	
CFC	Compósito de fibra de carbono	
CMV	Centro Meteorológico de Vigilância	
FSF	Flight Safety Foundation	
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	
NTSB	Aircraft Accident Digests, National Transportation Safety Board	

# 1. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas, como um fenômeno natural observada em todo o planeta, ainda desperta medo, curiosidade e a admiração dos seres humanos.

No mundo da aviação, as descargas atmosféricas começaram a ter destaque nos estudos e pesquisas à medida que os acidentes e incidentes foram ocorrendo com as aeronaves. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), todos aviões comerciais são atingidos por raios uma vez por ano em média. Em geral, durante procedimento de aterrissagem ou decolagem, em alturas inferiores a 5 km [1].

De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), em 2016, o Brasil obteve 964 mil voos regulares e não regulares por empresas brasileiras e estrangeiras, considerando o total das operações domésticas e internacionais [2], logo é fundamental que haja uma análise crítica da incidência das descargas atmosféricas em aeronaves e, conseqüentemente, uma avaliação dos impactos causados para a aviação e para os usuários em geral.

Com base neste contexto, este trabalho discorre sobre o comportamento de descargas atmosférica com foco nas questões teóricas da sua formação e a interação desses fenômenos têm com o meio aéreo.

## 1.1 Motivação

Os impactos causados pelas descargas atmosféricas são devastadores. Na maioria das vezes, na ocorrência inesperada, não há uma preparação para tomar decisões que possam amenizar os prováveis danos. No decorrer da história da aviação mundial e no Brasil, as descargas atmosféricas foram fatores preponderantes para a causa de acidentes ou incidentes. Em 1947 foi criada a Flight Safety Foundation (FSF), que é uma organização internacional que tem como objetivo a publicação de informações a respeito da aviação mundial. Um dos serviços prestados por esta organização é a Aviation Safety Network (ASN), uma iniciativa privada fundada em 1996 com o objetivo de catalogar todos acidentes e questões de segurança no que diz respeito aos aviões, aviões de transporte militar e jatos corporativos que possuem mais de



12 passageiros. O banco de dados de segurança ASN contém descrições detalhadas de mais de 20.300 incidentes, sequestros e acidentes, com base em informações de fontes oficiais como autoridades governamentais, conselhos de segurança, Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), Aircraft Accident Digests, National Transportation Safety Board (NTSB) etc [3].

Considerando fatores de tempo (meteorológicos), foram contabilizados 627 acidentes/incidentes publicados no banco da ASN, das quais foram classificados conforme os fatores que os geraram, como falhas estruturais, navegação, tripulação, fogo, manutenção, etc. Estes podem ser divididos nas seguintes subcategorias:

- Cinzas vulcânicas 2
- Chuva forte 9
- Gelo 221
- Queda de raios 29
- Tempestade de areia 2
- Tempestade 26
- Turbulência/vento cruzado 91
- Vento Windshear (pouso) 116
- Restrição à visibilidade 131

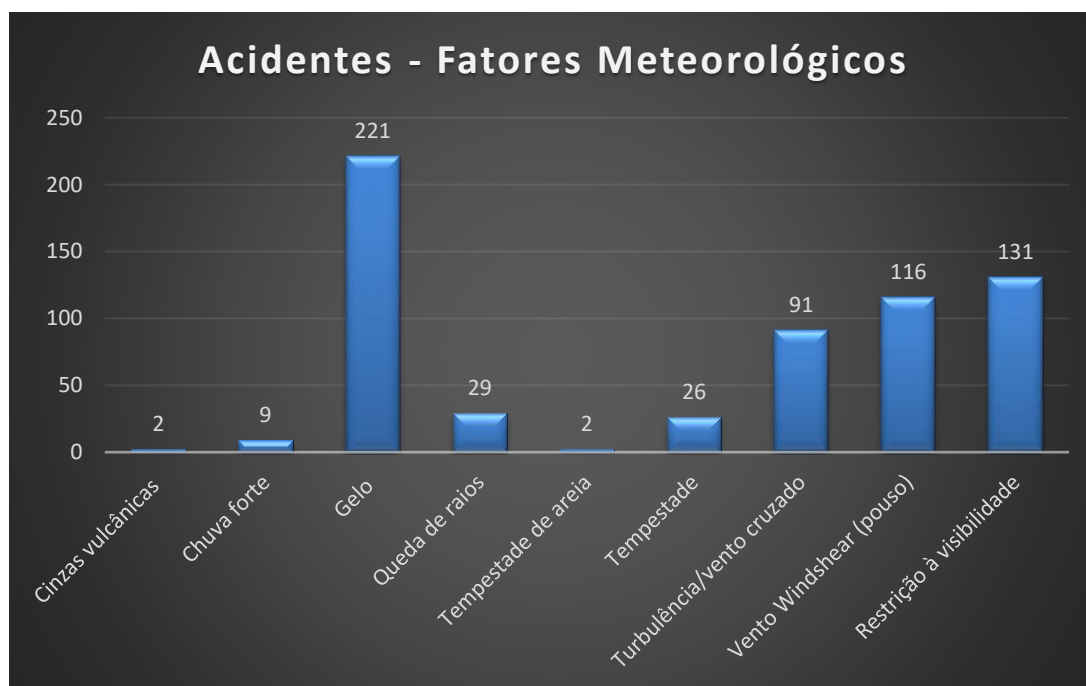


FIGURA 1 – ACIDENTES - FATORES METEOROLÓGICOS [3]

Dentre as subcategorias, 29 acidentes/incidentes estão relacionados com queda de raios, totalizando 4,6% dos 627 acidentes e incidentes.

## **1.2 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo um estudo qualitativo da interação entre descargas atmosféricas e aeronaves, comportamento das aeronaves dentro de um campo elétrico atmosférico e, conseqüentemente, os danos causados pelos raios em aeronaves.

## **1.3 Estruturação do trabalho**

O presente trabalho é dividido em 6 capítulos. O Capítulo 1 é uma explicação do tema proposto. O Capítulo 2 explica a teoria das descargas atmosféricas. O Capítulo 3 contextualiza as aeronaves, demonstrando as partes das suas estruturas externas, o material utilizado na fabricação e o teto operacional. O Capítulo 4 versa sobre interação entre aeronaves e descargas atmosféricas. O Capítulo 5 descreve os meios de prevenção, medidas de proteção contra descargas atmosféricas, acidentes/incidentes e avarias na estrutura. O capítulo 6 traz a contribuição do aluno para o trabalho e capítulo 7 será abordada à conclusão.

## 2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

### 2.1 Definição de Descargas Atmosféricas

Descargas atmosféricas são descargas elétricas de grande extensão (alguns quilômetros) e de grande intensidade (picos de intensidade de corrente acima de um quilo ampere), que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro de tempestades. A descarga inicia quando o campo elétrico produzido por estas cargas excede a capacidade isolante, também conhecida como rigidez dielétrica, do ar em um dado local na atmosfera, que pode ser dentro da nuvem ou próximo ao solo [4]. A rigidez dielétrica de um certo material é um valor limite de campo elétrico aplicado sobre a espessura do material (kV/cm), sendo que, a partir deste valor, os átomos que compõem o material se ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante. Quebrada a rigidez, tem início um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas. Os elétrons se movem tão rápido que fazem o ar ao seu redor iluminar-se, resultando em um clarão, denominado como relâmpago, e o ruído produzido pelo rápido aquecimento e expansão súbita do ar é denominado como trovão. Já o raio é uma gigantesca faísca elétrica, dissipada rapidamente sobre a Terra, causando efeitos danosos [5].

Para exemplificar esta definição, recorreremos a figura 2, onde é registrado uma descarga atmosférica real entre nuvem e solo.

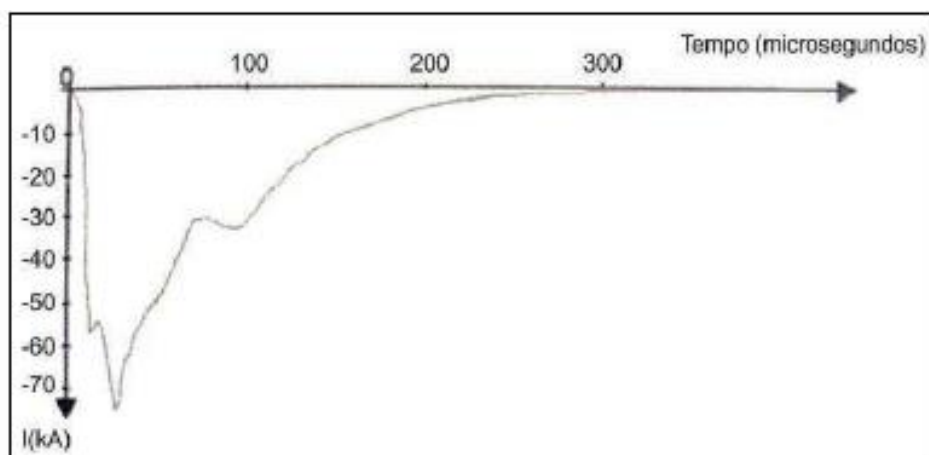


FIGURA 2 – CORRENTE DE UMA DESCARGA DE UMA ESTAÇÃO MEDIDA NO MORRO DE CACHIMBO [6]

Verifica-se que neste caso apresentado, a onda de corrente medida tem sinal de intensidade negativa, indicando o fluxo de cargas negativas para o solo. O formato impulsivo da onda também é perceptível na figura. Ocorre que, na fração de microssegundos, a corrente atinge seu valor máximo, conhecido como valor de pico ou de crista, na ordem de 75.000 A, onde, a partir daí, reduz seu valor mais lentamente, atingindo a faixa de 1.000 A aproximadamente em 500 microssegundos, extinguindo-se totalmente após alguns décimos de segundo. O percurso da corrente pode ter uma extensão variada, dependendo da natureza da descarga. Usualmente, em uma descarga entre nuvem e solo, o percurso visível varia de 1 a 3 km, sendo que seu trajeto total pode superar 10 km [6].

## **2.2 Formação e tipos de nuvens**

As nuvens são formadas de um aglomerado de gotículas d'água ou cristais de gelo, ou ambos misturados, sustentados por correntes ascendentes. O processo de formação se dá quando uma parte do vapor d'água, contido na atmosfera, passa para o estado líquido ou sólido através dos processos de condensação ou sublimação [7]. Para que isso aconteça, são necessárias duas condições fundamentais:

- i) Presença no ar de um grande número de núcleos higroscópicos, ao redor dos quais se fixará o vapor d'água;
- ii) O ar deverá estar em estado de saturação ou próximo dele.

O tipo de nuvem é determinado pela natureza, tamanho, número e distribuição no espaço de suas partículas constituintes. E sua classificação é de acordo com a sua forma, a aparência e a altura. Atualmente a classificação das nuvens é feita pelo Atlas Internacional de Nuvens (AIN), que as divide em dez gêneros [8]. A divisão e as suas respectivas características serão apresentadas na tabela 2. Na elaboração da tabela de classificação das nuvens, foram apresentados os estágios (camadas) de sua formação, tendo como referência a altura de suas bases, que se sobrepõem e variam de acordo com as regiões do globo terrestre [9], conforme tabela 1.

Tabela 1 – Camadas e Regiões de formação das nuvens [9]

<b>CAMADAS</b>	<b>REGIÃO TROPICAL</b>	<b>REGIÃO TEMPERADA</b>	<b>REGIÃO POLAR</b>
Superior	6000 a 18000 m	5000 a 13000 m	3000 a 8000 m
Média	2100 a 8000 m	2100 a 7000 m	2100 a 4000 m
Inferior	Da superfície até 2000 m	Da superfície até 2000 m	Da superfície até 2000 m

TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DAS NUVENS [8]

<b>GÊNEROS (TIPOS)</b>	<b>NÍVEL</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>
Cirrus (Ci)	SUPERIOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formada por cristais de gelos;</li> <li>Chamadas de nuvens sólidas;</li> <li>Não dão origem à precipitação.</li> </ul>
Cirrocumulus (Cc)		
Cirrostratus (Cs)		
Altostratus (As)	MÉDIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formada por cristais de gelo e gotículas de água;</li> <li>Chamadas de nuvens mistas;</li> <li>São nuvens que dão origem à precipitação (As e Ns)</li> </ul>
Nimbostratus (Ns)		
Stratus (St)		
Stratocumulus (Sc)	INFERIOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maior importância para operações aéreas;</li> </ul>

Cumulus (Cu)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Formada por cristais de gelo, gotículas de água e flocos de neve;</li> <li>Dão origem a precipitação, chuva, neve, chuvisco e granizo.</li> </ul>
Cumulonimbus (Cb)		

Para melhorar compreensão, a figura 3 ilustra o formado de cada tipo de nuvem.

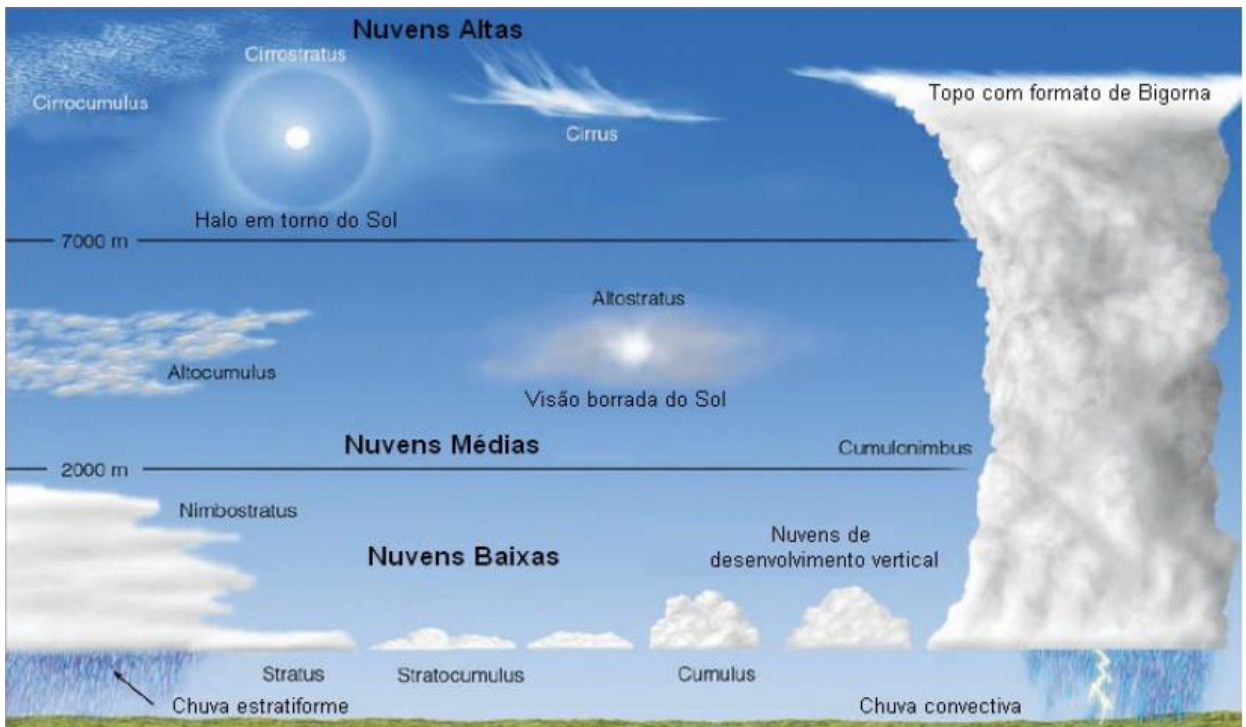


FIGURA 3 – TIPOS DE NUVENS [10]

Dentre as condições meteorológicas e tipos de nuvens, a nuvem CB, destacam-se a turbulência, a granizo, rajadas de vento, descargas elétricas e a formação de gelo, logo essas condições irá gerar um impacto considerável na aviação.

## 2.3 Formação de Descargas Atmosféricas

Descargas atmosféricas podem ocorrer da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, dentro da nuvem, da nuvem para um ponto qualquer na atmosfera, denominadas descargas no ar, ou ainda entre nuvens [11].

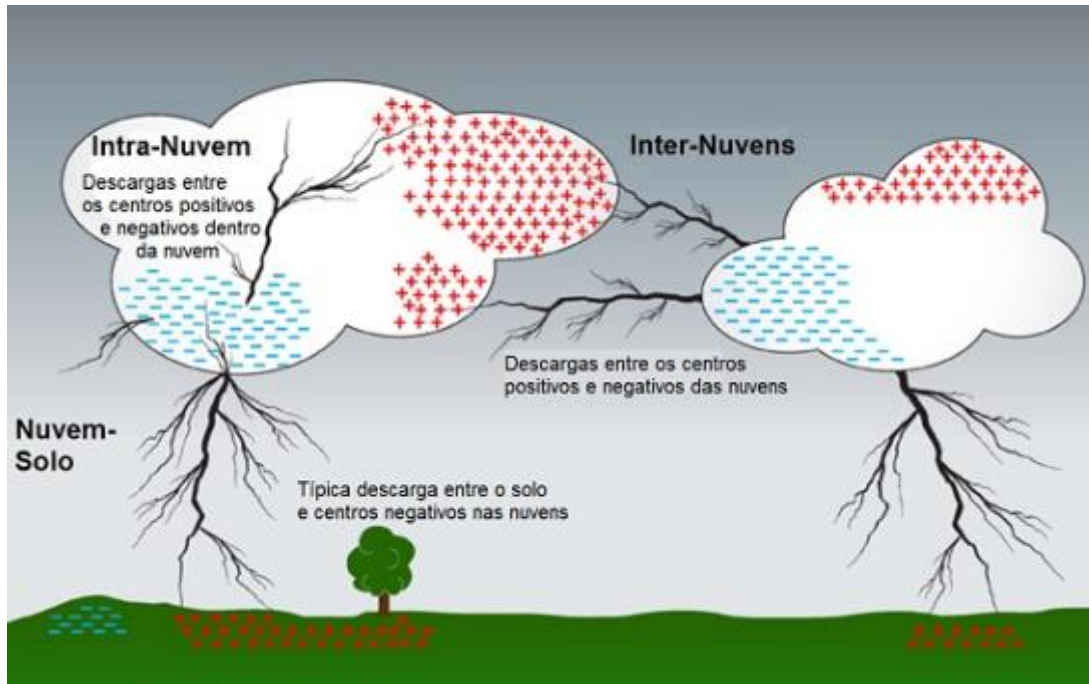


Figura 4 – Tipos de Descargas Atmosféricas [12]

Há algumas teorias que explicam como ocorre a eletrificação das nuvens e a mais aceitas são as teorias da precipitação e a teoria da convecção. Ambas as teorias concluem que na grande maioria dos casos (aproximadamente 90%) a nuvem se carrega positivamente na parte superior e negativamente em sua parte inferior. Esta separação de cargas não ocorre 100% das vezes, porém será adota como base para explicação da formação das descargas atmosféricas [8].

Com o aumento da diferença de potencial (ddp) entre a nuvem e a terra, superando a rigidez dielétrica do ar, que é de aproximadamente 3 MV/m [13], inicia-se um fenômeno chamado de descarga piloto descendente, ou seja, é a migração de cargas negativas da nuvem para terra. Conseqüentemente, é induzido uma carga ascendente, que são as cargas positivas da terra tentando encontrar as cargas negativas descendente. Quando as duas cargas se encontram, conectando o potencial da terra ao da nuvem, cria-se uma descarga de retorno que segue o

caminho ionizado desde a terra até a nuvem. Logo é originado a descarga principal, de grande intensidade, no sentido da nuvem para terra. A figura 5 ilustra as etapas de formação.

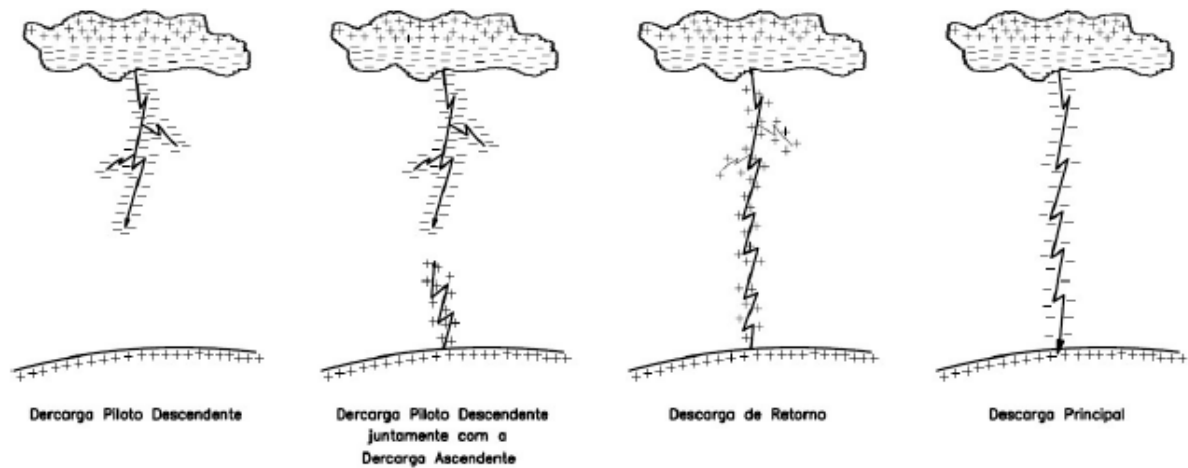


FIGURA 5 – ETAPAS DE FORMAÇÃO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA NUVEM-TERRA [6]

O processo completo de uma descarga atmosférica provoca uma corrente elétrica de imensa intensidade que ao longo do seu percurso ioniza o ar, criando uma radiação eletromagnética, em parte sob forma de luz. Outra parte da grande energia de uma descarga atmosférica é responsável pela geração de um grande estrondo proveniente da onda de choque, consequente aquecimento e subsequente expansão supersônica do ar, este efeito comumente leva o nome de trovão [6].

A elevação térmica em uma descarga atmosférica consegue alcançar os incríveis 30000°C em frações de segundo e o local onde a descarga atmosférica atinge o solo e chamado de ponto de impacto [14]. É importante saber que descarga elétrica atmosférica é um fenômeno natural absolutamente imprevisível e aleatório e de magnitudes da mesma forma imprevisíveis, tanto em características elétricas como em efeitos destruidores quando incidindo sobre estruturas, edificações e equipamentos.

As descargas atmosféricas podem ser simples ou múltiplos, isto devido sua descarga de retorno poder ser constituída de uma ou várias descargas consecutivas. Cada descarga de retorno dura algumas centenas de microssegundos e, em relâmpagos múltiplos, o intervalo de tempo entre descargas de retorno consecutivas é tipicamente de 40 milissegundos. Quando o intervalo de separação entre as descargas de retorno é próximo de 100 milissegundos, a



descarga é vista piscar no céu, porque o olho humano consegue identificá-las individualmente [6].



FIGURA 6 – DESCARGAS ATMOSFÉRICAS MÚLTIPLAS – TORONTO, CANADÁ [15]

No processo de formação das descargas atmosféricas, existem dois tipos de descarga, ou seja, ela pode ser uma descarga positiva ou negativa. O que vai individualizá-la é o local onde ocorre o encontro dos canais.

- **Descargas negativas**

As descargas negativas podem ser expostas como uma transferência de cargas elétricas das nuvens para a terra. Após a polarização das nuvens, é criado um campo elétrico no solo com cargas oposta a base das nuvens. Devido a uma elevação do campo elétrico no centro das nuvens, este valor pode ultrapassar a rigidez elétrica do ar, que neste caso é por volta de 3 MV por metro. A elevação do campo elétrico e a densidade das cargas elétricas positivas induzidas na superfície do solo ocorrem devido à proximidade do canal carregado negativamente ao solo. Devido esta proximidade do canal descendente a superfície do solo pode surgir a descarga elétrica ascendente, com estas suas últimas pode se relatar uma provável ocorrência de descargas elétricas que interliga o canal descende e um dos ascendentes. Nesse momento que esta descarga unir o canal descendente e o ascendente entre solo e nuvem é estabelecida uma corrente de alta potência. Por este motivo estes tipos de descargas elétricas são conhecidos como descargas negativas [6].

- **Descarga Positiva**

As descargas elétricas positivas a polarização das nuvens não muda. As cargas elétricas positivas, normalmente estão concentradas na parte superior das nuvens. Com ação dos ventos fortes sobre as nuvens, estes projetam um descolamento maior da parte superior das nuvens diferentemente da parte inferior. Desta forma, um canal descendente de cargas elétricas positivas pode expandir de um ponto concentrado de cargas positivas e um canal ascendente negativo pode ocorrer partindo do solo [6].

## 2.4 Tempestade

As formações nebulosas com grande desenvolvimento vertical - CUMULONIMBUS (CB), também identificadas como tempestades de trovoadas. Elas podem ocorrer a qualquer hora, dia ou noite ao longo de todo o ano. As ocorrências de tempestades com trovoadas são mais comuns nos meses mais quentes, no período final da tarde. A cada momento, aproximadamente 1.800 CB's estão em desenvolvimento em torno do planeta, associados a descargas atmosféricas (raios) que atingem a Terra, 100 vezes a cada segundo. Os CB's são muito importantes para a reposição e distribuição da precipitação. Para a aviação, além de ser um limitador de espaço aéreo, pois o voo dentro destas nuvens é de extremo risco, também pode afetar os procedimentos de pouso e decolagem devido às cortantes de vento geradas pelas fortes correntes, ascendentes e descendentes, em torno da nuvem. Turbulência, granizo, formação de gelo, saraiva (granizos que são lançados para fora da nuvem, em ar claro), relâmpagos e por vezes tornados poderão estar associados aos CB's e influenciarem na segurança das operações aéreas [7 e 8].

Para o desenvolvimento de um CB, existem três ingredientes essenciais:

- *Umidade*: a presença de umidade na atmosfera é necessária para a formação da nebulosidade e de precipitação. O sol, além de aquecer o solo e o ar sobre ele, provoca a evaporação da umidade do solo, lagos, rios e oceanos, aumentando assim a umidade do ar.
- *Instabilidade*: o aquecimento do ar nos níveis próximos ao solo associado ao aumento da umidade desestabiliza a massa de ar. O ar quente é menos denso (mais leve) que o ar frio, então, existindo ar frio e seco acima, a tendência será de troca de ar, com o ar frio descendo e o ar quente subindo. Isto é instabilidade

- *Levantamento:* este é o gatilho para o início de ascensão do ar e o princípio da tempestade. São exemplos de levantamentos:

- i) Ar movendo-se para cima de uma montanha (levantamento orográfico);

- ii) Ar colidindo com uma frente (levantamento frontal). Frente é a zona de transição entre duas massas de ar diferentes; onde as massas colidem, o ar menos denso (quente ou mais úmido) ascende sobre o outro;

- iii) Ar frio soprando do oceano ou lago podem formar frente de brisa marítima, caso o ar frio colida com o ar mais quente sobre o continente e

- iv) A corrente descendente fria que sai do CB forma “frentes de rajadas”, as quais podem vir a causar o desenvolvimento de novos CB's.

Uma tempestade possui três diferentes estágios: estágio de desenvolvimento, estágio maduro e estágio dissipativo, que duram de 20 a 40 minutos cada um [16].

- **Desenvolvimento**

A formação de uma tempestade isolada inicia-se a partir da reunião de pequenas nuvens Cumulus. Nuvens Cumulus são nuvens brancas que se formam tipicamente em torno de 1 km de altura, apresentando uma extensão horizontal e vertical de algumas poucas centenas de metros.

Se as condições atmosféricas são favoráveis, estas nuvens podem agrupar-se formando nuvens maiores, denominada Cumulus Congestus. Neste ponto, embora a base da nuvem ainda se encontre em torno de 1 km, seu topo já atinge alturas entre 3 e 5 km e sua extensão horizontal chega a alguns quilômetros.

Mas caso a nuvem continue seu movimento ascendente, ela pode ultrapassar o nível de congelamento e gerar uma tempestade unicelular em seu estágio de desenvolvimento. O diâmetro da nuvem neste estágio varia entre 3 e 8 km, o topo situa-se entre 5 e 8 km e apresenta irregularidades devido às partículas de gelo.

O movimento do ar dentro da nuvem é predominantemente ascendente, arrastando gotículas de água e partículas de gelo para cima. Nesse estágio, ocorre pouca chuva e quase nenhum relâmpago. No momento em que a velocidade terminal das partículas de água e gelo

em constante crescimento torna-se maior que a velocidade de ascensão, as partículas começam a cair gerando correntes descendentes. Neste instante, a nuvem atinge o estágio maduro.

- **Maduro**

No estágio maduro, a tempestade unicelular apresenta em sua parte inferior tanto movimentos ascendentes como descendentes. É nesse estágio que a maioria da chuva, relâmpagos, granizo, ventos fortes e tornados ocorrem. As gotículas de água e partículas de gelo crescem tanto de tamanho que já não são sustentadas e geram movimentos descendentes.

A chuva e o granizo em precipitação arrastam o ar consigo para baixo, intensificando as correntes de ar descendentes e produzindo correntes de ar horizontais, cujas frentes são denominadas frentes de rajadas à medida que o ar se espalha ao alcançar o solo. As frentes de rajadas podem atuar como gatilhos, dando início a outra nuvem de tempestade. As correntes de ar descendentes podem também ser intensificadas por arrastamento. Nesse estágio os movimentos ascendentes e descendentes podem atingir velocidades tão elevadas quanto 100 km/h.

O diâmetro da nuvem nesse ponto é de 10 km, embora possa atingir em alguns casos dezenas de quilômetros. A altura da base da nuvem pode variar de pouco menos de 1 km até cerca de 4 km, dependendo da umidade, e costuma ser relativamente plana.

O topo atinge alturas que variam de 8 a 20 km, alcançando e mesmo ultrapassando em alguns casos a tropopausa. A forma do topo também costuma apresentar um alargamento em relação ao diâmetro da nuvem, causado pelo espalhamento horizontal das partículas de gelo quando atingem o nível de equilíbrio.

Devido à influência dos ventos, esta região pode se estender horizontalmente, fazendo com que a nuvem assemelhe-se a uma bigorna formada por cristais de gelo, apontando na direção do vento. Os relâmpagos nuvem-solo são, em geral, precedidos por relâmpagos intranuvem e podem ocorrer tanto antes como depois do início da chuva.

- **Dissipação**

Depois de um tempo, as correntes de ar descendentes atuam de modo a inibir novas correntes ascendentes dentro da nuvem, fazendo com que ela se dissipe. Nesse estágio, o movimento de ar é descendente, provocando um esfriamento da nuvem em relação à sua vizinhança. A intensidade da chuva e a atividade de relâmpagos diminuem, embora permaneçam significantes.

A altura do topo da nuvem de tempestade nesse estágio também tende a diminuir até que a nuvem seja completamente dissipada. Os ventos nos níveis superiores espalham os cristais de gelo, de modo que o anvil é a última parte que resta da nuvem, tomando uma forma semelhante a nuvens Cirrostratus e Altostratus.

A altura atingida pelo topo das nuvens de tempestade em seus diversos estágios depende principalmente da latitude geográfica. Em regiões de média para altas latitudes (acima de  $45^\circ$ ), o topo das nuvens de tempestade raramente ultrapassa 8 km de altura, ao passo que em regiões de média para baixas latitudes (abaixo de  $45^\circ$ ), o topo em geral ultrapassa 10 km e pode alcançar altitudes de até 20 km.

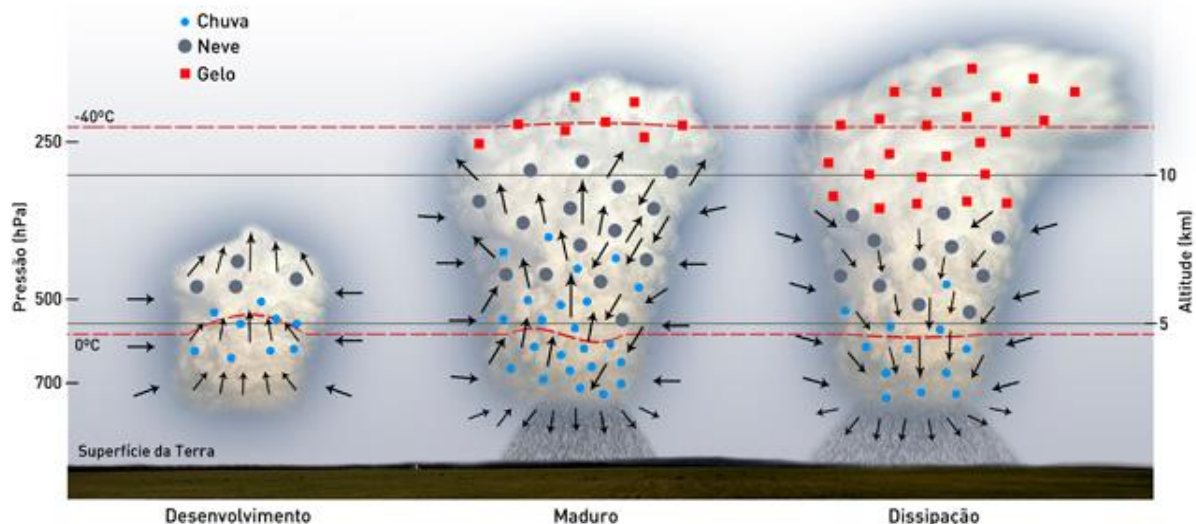


FIGURA 7 – ESTÁGIOS DA TEMPESTADE [16]

Os CB's podem ocorrer das seguintes formas:

- **ISOLADOS** - Quando a nuvem é única e de forma isolada dentro de uma determinada área;

- CACHOS MULTICÉLULAS - Quando existem vários CB's dentro de uma determinada área e sem uma disposição organizada.
- LINHA DE INSTABILIDADE - Quando existem vários CB's formados em linha, de maneira compacta. É muito comum preceder a sistemas frontais.
- SUPERCÉLULA - Formação extremamente perigosa, com correntes de ar ascendentes e descendentes, suficientemente capazes de se manterem sozinhas como uma só entidade por horas. A rotação do ar elevando-se dentro deste mesociclone favorece a formação de tornados [7].



FIGURA 8 – NUVEM CB [17]

Na figura 8 podemos verificar as dimensões de um CB, bem como as correntes de ar ascendentes e descendentes. Este tipo de nuvem causa grandes preocupações para a aviação, pois é um fenômeno que não se pode controlar, logo é preciso de um sistema avançado para realizar a detecção, o mais breve possível, a fim de evitar que o avião entre no seu interior.

### 3. AERONAVES

Um dos grandes sonhos da humanidade sempre foi voar. Em 1906 o inventor brasileiro Alberto Santo Dumont criou a aeronave 14 BIS testado em Paris, foi o primeiro objeto mais pesado que o ar a levantar voo sem auxílio de equipamento de impulsão externo. Após este feito, a humanidade não poupou esforços para evoluir na tecnologia empregada na aviação, objetivando aeronaves maiores, mais rápidas e com maior potencial de carga e fogo.



FIGURA 9 – AVIÃO 14 BIS [18]

Os impactos gerados pela aviação na sociedade são incontáveis, ela encurtou a distância entre continentes, aprimorou o sistema de transporte com mais velocidade, aumentou a capacidade bélica, tornou o sistema de transporte mais rápido e seguro.

#### 3.1 Estrutura da aeronave

Para conhecermos como as descargas atmosféricas interagem com as aeronaves, devemos conhecer as suas estruturas externas, qual o tipo de material utilizado na sua superfície e em qual altitudes que elas sobrevoam.

As aeronaves são basicamente formadas pela fuselagem (corpo da aeronave), empenagem (estabilizadores), asas, grupo propulsor-motor e trem de pouso.

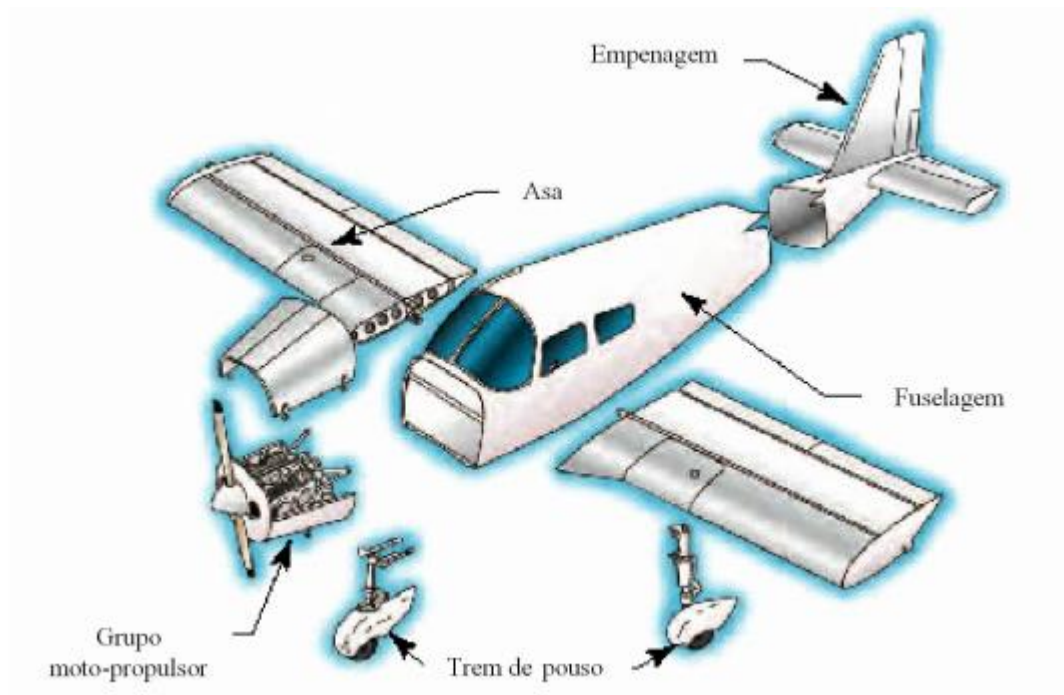


FIGURA 10 – ESTRUTURA EXTERNA DA AERONAVE [19]

- *Fuselagem:* é a parte do avião onde estão presas as asas e os estabilizadores e serve para transportar a carga útil.
- *Asa:* a principal função das asas é a de criar, através das reações aerodinâmicas, a força de sustentação que suporta o avião em voo, mediante o rápido deslocamento através do ar. Com finalidade secundária podem ser usadas também para que nelas se instalem: alojamento do trem de pouso, tanques de combustíveis, metralhadora, berço do motor, luzes, componentes em geral, etc.
- *Trem de pouso:* é o órgão necessário para suportar o avião no solo e permitir as manobras de solo, corrida para decolagem e pouso.
- *Empenagem:* é o conjunto de cauda formado pelos estabilizadores (vertical e horizontal) e as superfícies de controle a ele presos (profundor e leme de direção), cuja finalidade é estabilizar e governar o avião durante o voo.
- *Grupo motor-propulsor:* Serve para produzir tração necessária para vencer a resistência do ar. Ele consiste em motor ou motores, hélice (quando o motor for convencional ou turbohélice) e também turbojato.



## 3.2 Material da aeronave

Uma das grandes vantagens que os modernos aviões comerciais ou militares apresentam em termos de desempenho é resultado da elevada qualidade dos materiais que são construídos. Atualmente, a vida útil de um avião é de 60.000 horas, aproximadamente 20.000 voos no decorrer de 30 anos, para obter esse resultado os engenheiros estão constantemente a procura de novas tecnologias em busca de materiais mais leves e mais fortes, quanto menor for a densidade do material, menor é o seu peso e conseqüentemente maior será o desempenho da aeronave, além desses benefícios, a busca por matérias que possa aumentar a vida útil da aeronave.

No mundo da indústria aeronáutica três grupos de ligas de alumínio são amplamente utilizados por muitos anos e continuam a desempenhar um papel fundamental na construção de aeronaves, principalmente na fuselagem. A escolha de qual dos três tipos de liga de alumínio que deve ser utilizada é influenciada por diversos fatores que o componente irá sofrer, como a força, ductilidade, facilidade de fabricação, resistência e receptividade ao tratamento de proteção de corrosão, resistência a fadiga e a propagação de trincas[20].

O setor aeronáutico requer muita segurança e confiabilidade em seus produtos. Tais materiais podem ser ligas especiais, ligas de aço, ligas de alumínio e materiais compósitos. Dentre estes, os mais utilizados, quando se busca leveza e alto desempenho, são os materiais compósitos que devido à flexibilidade quanto a sua fabricação, podem-se obter propriedades mecânicas distintas de acordo com o projeto [20], esse tipo de material é ideal onde as relações altas resistência por peso e alta rigidez por peso são requeridas [21].

Cada tipo de aeronave fabricada possui suas diferentes exigências com relação a qual tipo de material deve ser utilizado na sua construção. Na figura 11 detalha a proporção de matérias utilizados na fabricação de um Boeing 787.

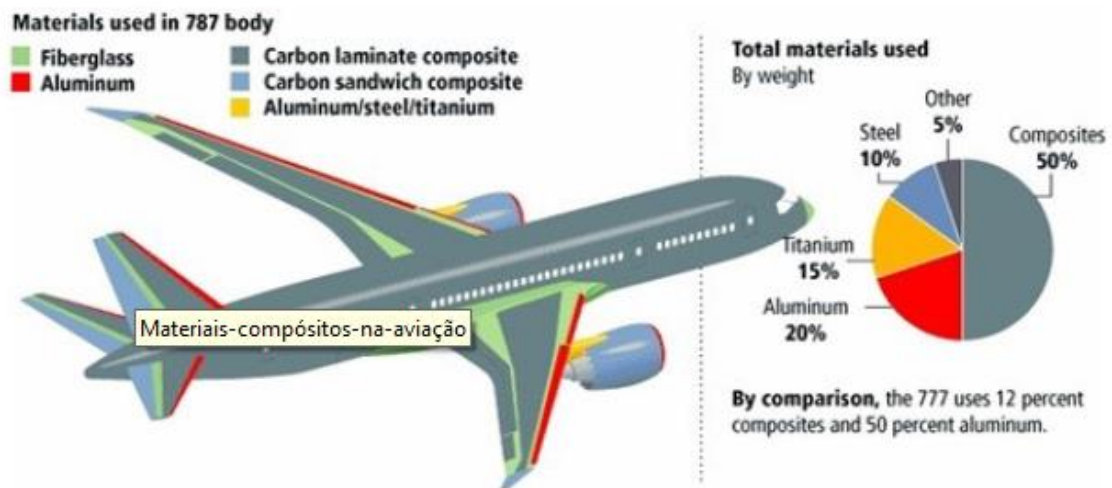


Figura 11 – Material utilizado no Boeing 787 [22]

Um dos requisitos na escolha do material para a fabricação de uma aeronave é a capacidade que o material tem contra as descargas atmosféricas. Se um raio atinge um avião de alumínio, a energia elétrica, naturalmente, é conduzida facilmente por meio da estrutura metálica. O revestimento exterior da aeronave é o caminho de menor resistência. Em uma aeronave de compósitos, a fibra de vidro é um excelente isolante elétrico, enquanto a fibra de carbono conduz eletricidade, mas não tão facilmente como o alumínio. Logo é preciso um estudo detalhado para escolher proporção do material utilizado na construção de uma aeronave sem perder o requisito da segurança.

### 3.3 Teto operacional

O teto operacional de uma aeronave é a altura máxima acima do nível médio do mar na qual uma aeronave poderá ser capaz de manter voo horizontal sobre condições estáveis [23]. O teto operacional de cada aeronave depende basicamente da potência do motor utilizado na sua fabricação. A tabela 3 ilustra algumas categorias de aeronaves e os seus respectivos tetos operacionais.

TABELA 3 – TETO OPERACIONAL

<b>AERONAVES</b>	<b>ALTITUDE [km]</b>	<b>ALTITUDE [ft]</b>
Aviões supersônicos	17 a 37	55800 a 114800
Aviões comerciais	8 a 12	26246 a 39370
Aviões turboélices	7 a 10	22965 a 32808
Monomotores	1 a 3	3280 a 9842

Sabendo que a conversão é: para cada 1000 pés temos 304,8 metros ou para cada 1000 metros temos 3280 pés.

A temperatura da atmosfera diminui de 7°C para cada quilômetro e esta diminuição da temperatura com a altitude gera turbulência em voos. Para a faixa entre 10 e 12 km, temos a temperatura praticamente constante de -55°C, por este motivo os aviões comerciais usam esta faixa para rotas comerciais e para voo com velocidade de cruzeiro, pois apresenta menor risco de turbulência[7].

## 4. A INTERAÇÃO ENTRE AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E AERONAVES

Desde o início da aviação, há uma preocupação em conhecer os efeitos causados pelos impactos de raios em aeronaves. Levando em consideração as consequências dos impactos causados pelos raios, houve uma necessidade de intensificar as pesquisas para saber como a aeronave se comportam diante de uma tempestade.



FIGURA 12 – IMPACTO DO RAIOS EM AERONAVE NO SOLO [24]



FIGURA 13 – IMPACTO DO RAIOS EM AERONAVE NO VOO [25]

A frequência de raios que um avião experimenta é afetada por vários fatores, incluindo a área geográfica onde o avião opera e com que frequência o avião passa pelas altitudes de

decolagem e aterrissagem, que é onde a atividade de raios é mais prevalente, ou seja, na faixa entre 5000 a 15.000 pés (1.524 a 4.572 metros) a atividade do raio é mais prevalente. Aviões que voam em rotas curtas em áreas com alta incidência de raios provavelmente serão atingidos com mais frequência do que aviões com rotas longas. Uma pesquisa realizada nos Estados Unidos com jatos comerciais demonstra que a maioria dos raios ocorre entre altitudes de 5.000 pés e 15.000 pés, conforme figura 14 [26].

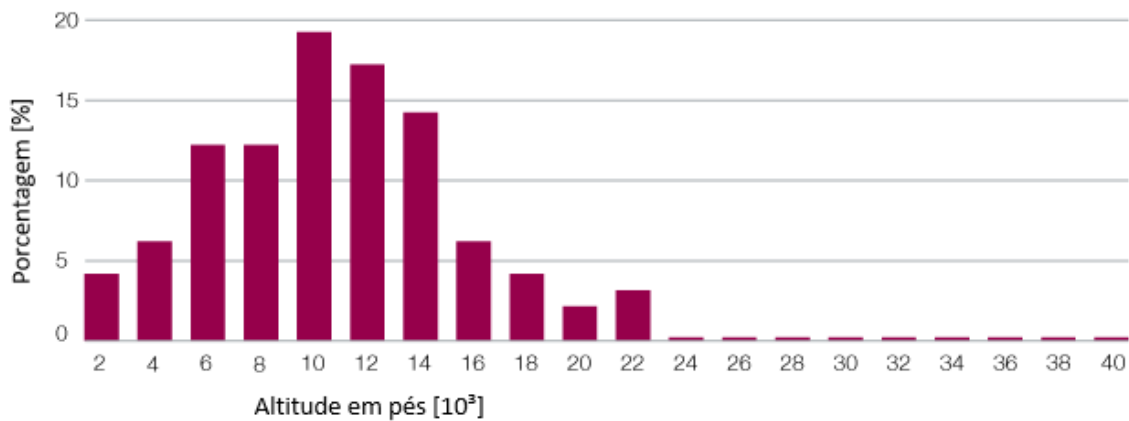


FIGURA 14 – INCIDÊNCIA DE RAIOS POR ALTITUDES [26]

Como demonstrado pela figura 14, quando um avião está na fase de decolagem ou na fase de aterrissagem ele tem maior probabilidade de ser atingido por um raio, aumentando o risco de ocasionar algum incidente/acidente.

## 4.1. Campo elétrico

Para compreendermos o campo elétrico gerado entre nuvens, devemos aplicar as regras básicas do eletromagnetismo. Utilizando a Lei de Coulomb, podemos calcular a força entre as cargas, logo a equação que representa esta lei é:

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2 \hat{a}_{r21}}{r^2} \quad (1)$$

Onde:

$q_1$  e  $q_2$  são as carga;

$r$  é a distância entre elas;

$\frac{1}{4\pi\epsilon}$  é uma constante de proporcionalidade; e

$\epsilon$  é a constante dielétrica ou permissividade elétrica do ar.

A força elétrica gerada entre as cargas pode ser de repulsão ou de atração, ou seja, vai depender das cargas  $q_1$  e  $q_2$ . Para conhecermos o campo gerado de uma carga, basta dividir, ambos os lados da equação 1, por uma das cargas, logo o campo elétrico será definido como:

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 \hat{a}_r}{r^2} \quad (2)$$

O campo elétrico de um ponto qualquer do espaço será proporcional à carga e inversamente proporcional com a distância  $r$ . O sentido do campo depende do sinal da carga, para cargas de sinal negativo o campo converge radialmente e para paras positivas, o campo diverge radialmente, como podemos verificar na figura 15.

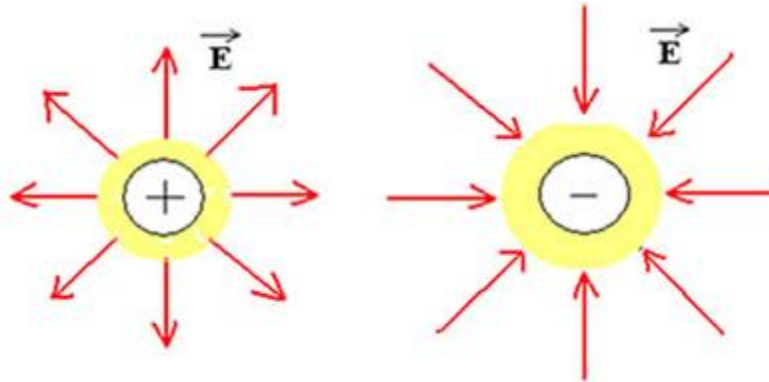


Figura 15 – Sentido do campo elétrico [27]

Sabendo que a distribuição das cargas positivas fica na parte superior da nuvem e as cargas negativas ficam na parte inferior, teremos um campo elétrico resultando que é a somatória da contribuição de cada carga individualmente e podemos representar como:

$$\vec{E}_{(r)} = \sum_{m=1}^n \frac{q_m}{4\pi\epsilon * |r - r_m|^2} \mathbf{a}_m \quad (3)$$

Para melhor compreensão, a figura 16 ilustrará um campo elétrico dentro da nuvem.

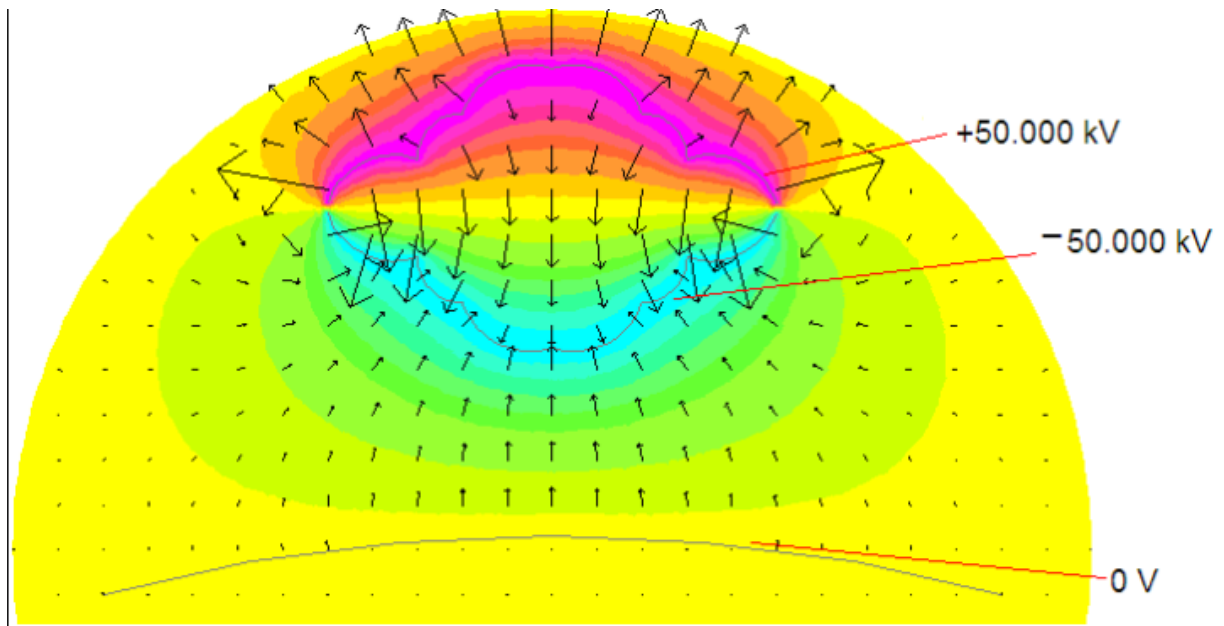


FIGURA 16 – CAMPO ELÉTRICO NA NUVEM [28]

A figura 16 ilustra o comportamento do campo elétrico ao redor de uma nuvem carregada. Após conhecer o comportamento do campo elétrico, definiremos a superfície equipotencial como toda superfície composta de todos aqueles pontos que possui o mesmo valor de potencial, sendo que todas as linhas de campo devem ser perpendiculares à superfície equipotencial, nos pontos onde tais linhas interceptam a superfície [29]. Feito estas considerações de campo elétrico e superfícies equipotenciais, queremos conhecer como uma aeronave se comporta dentro do campo elétrico e como ela modifica as superfícies equipotenciais.

## 4.2 Integração entre aeronave e campo elétrico

Quando uma aeronave desloca dentro do campo eletrostático da atmosfera, pode produzir intensa ação sobre o meio dielétrico, adjacente à sua superfície. A teoria do poder das pontas explica este fenômeno, ou seja, nos corpos carregados eletricamente, esta propriedade traduz a tendência das cargas elétricas se encontrarem nas extremidades do corpo. Uma importante consequência desse efeito consiste no aumento do campo elétrico nessas extremidades, em relação a outras partes do corpo [8]. Além disso, nas extremidades da superfície da aeronave induzem o aparecimento de um gradiente de potencial suficientemente alto para produzir ionização atmosférica local [30]. Para melhor compreensão, a figura 17

demonstra o efeito causado nas superfícies equipotenciais quando uma aeronave se desloca dentro do campo elétrico.

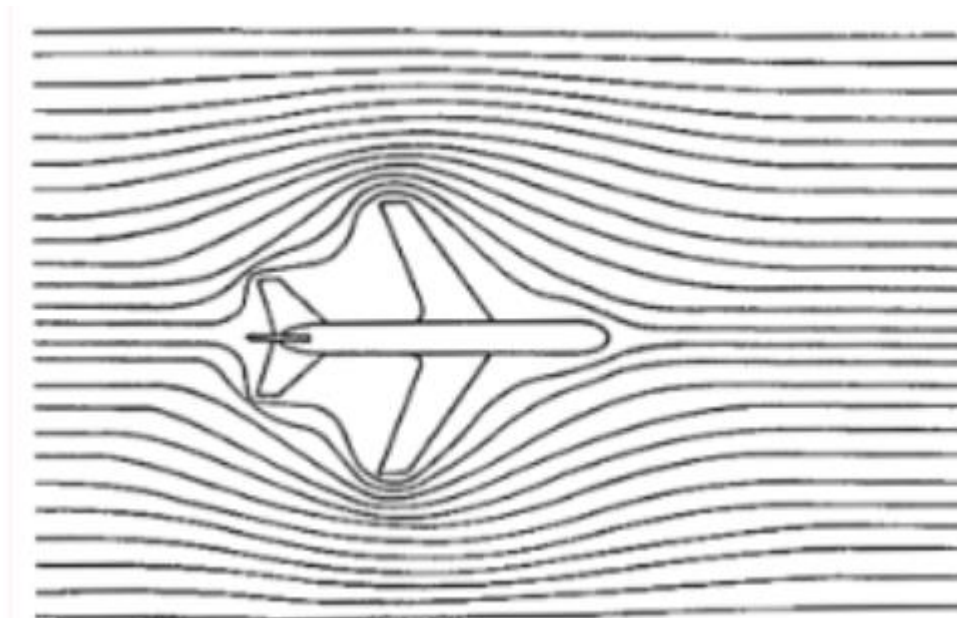


Figura 17 – Linha equipotencial em torno da aeronave [30]

### 4.3 Descarga de corona (Fogo de Santelmo)

A descarga de corona, é definido como uma descarga luminosa resultante da ionização da atmosfera próxima à ferragem e aos isoladores, onde o gradiente da tensão excede a um certo valor crítico. O efeito corona aparece da aceleração de elétrons livres no ar devido à intensidade do campo elétrico, excedendo à força de ruptura do ar. A ionização acontece quando os elétrons livres adquirem determinada energia e provoca uma colisão com um átomo neutro, que libera o íon positivo, provocando uma avalanche sobre os elétrons. Alguns fatores podem influenciarem o efeito corona, tais como: umidade, densidade do ar, geométrica da superfície, poeira, gota d'água etc [31].

Uma aeronave se deslocando através de campos eletrostáticos da atmosfera, pode produzir, localmente, intensa ação sobre o meio dielétrico, imediatamente adjacente à sua superfície. Com o aumento significativo desta ação, o dielétrico do ar torna-se ionizado e o fluxo de corrente ou corona resultante pode gerar emissões de rádio frequência que, uma vez interagindo com os sistemas da aeronave, podem causar interferência nos sistemas de



navegação e de comunicação [31]. Corona é uma descarga localizada, mas pode ser o precursor do raio completo e fonte potencial de interferência em receptores de rádio [30].

Este efeito pode ser aproveitado para a remoção de cargas elétricas indesejáveis em superfícies de aeronaves, pois sendo a aeronave um excelente meio de absorção de cargas estáticas devido a sua estrutura ser em quase sua totalidade metálica, é de vital importância garantir uma forma segura e controlada para o escoamento dessa carga. Em voo, o atrito da aeronave com o ar faz com que a eletricidade estática seja coletada em sua estrutura, além disso, as chuvas e campos elétricos em formações de nuvens também geram o acúmulo da eletricidade estática na estrutura da aeronave [31], logo é preciso de um mecanismo seguro para realizar a descargas eletrostáticas com mínimo impacto possível para as aeronaves.

Na aviação, a descarga de corona também é conhecida como Fogo de Santelmo, este fenômeno é comum aparecer quando uma aeronave voa pelo céu pesadamente carregado e, normalmente, são observados na ponta da antena, nas asas, nas hélices ou para-brisas.



FIGURA 18 – DESCARGA DE CORONA [32]

#### 4.4 Interação entre raios e aeronaves

A interação entre raios e aeronaves tem sido objeto de pesquisas na qual busca entender como ocorre a interação do canal de descargas de raios com a estrutura das aeronaves, além disso, busca entender se as aeronaves apenas interceptam o canal ou podem disparar o processo de descarga.

O canal de descarga geralmente entra em uma das extremidades da aeronave e sai na outra, esses pontos de entradas e saídas normalmente são as pontas das asas, no nariz do avião

ou nas extremidades da empenagem. O ponto de entrada ou saída pode mudar durante o processo de impacto do raio com a aeronave, pois a aeronave tem um deslocamento maior que o seu comprimento no tempo de duração da descarga, logo para um mesmo raio, podem existir diversos pontos de impactos tanto na entrada como na saída.

Na formação de um canal de descarga de raio, a ionização do ar se processa em saltos progressivos entre os centros de carga, ou seja, depende do destino final do raio, podendo ser entre nuvens ou entre nuvem e solo. A diferença de potencial que existe entre o canal progressivo em formação e o centro de carga oposto estabelece um campo de força eletrostática entre eles, representado por superfícies equipotenciais imaginárias. A figura 19 ilustra as linhas equipotenciais gerado entre a terra e uma nuvem carregada na formação de um canal em progressão [30].

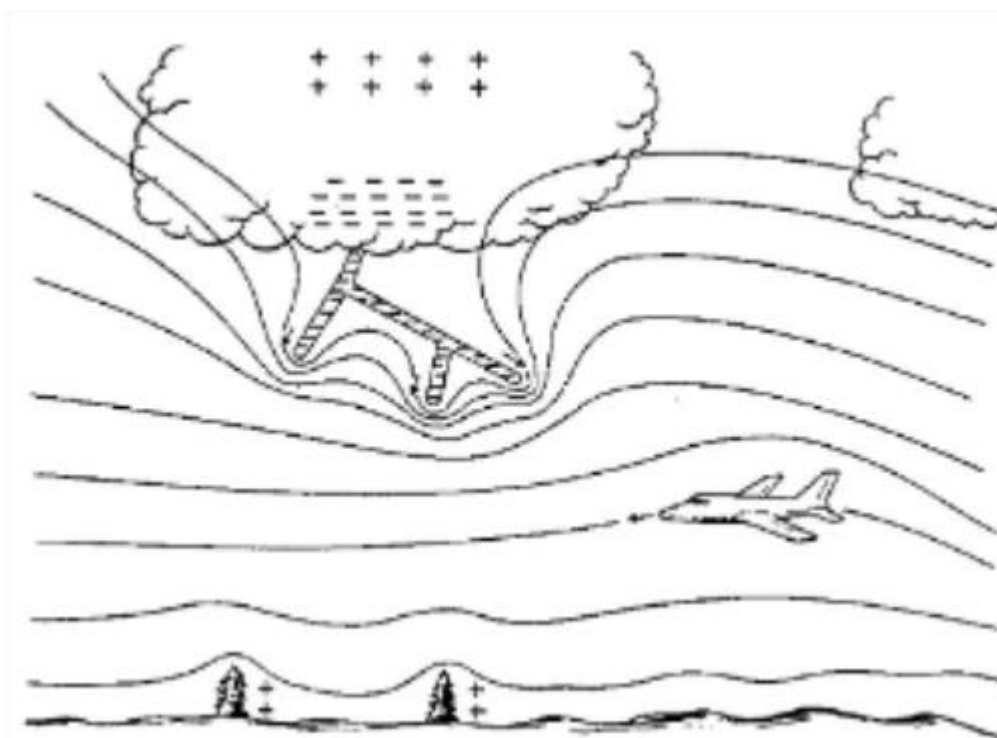


FIGURA 19 – LINHAS EQUIPOTENCIAIS NO CANAL DE PROGRESSÃO DA DESCARGA [30]

A intensidade do campo elétrico é maior onde as linhas equipotenciais estão mais próximas uma da outra. O campo elétrico é responsável por ionizar o ar e formar o caminho condutivo em progressão. Sabendo que a direção da força eletrostática é normal às linhas equipotenciais e maior onde elas estão mais próximas, o caminho de ionização do ar progride na direção das regiões onde o campo elétrico é mais intenso. Com a aproximação de uma

aeronave nesta região, ela assumirá o potencial elétrico de sua localização. Sendo a aeronave um objeto condutor e estando no mesmo potencial da sua localização, ela modificará as linhas equipotenciais adjacentes e aumentará o campo elétrico nas suas extremidades, conforme figura 17. Como a progressão do canal tende a ir na direção onde existe maior intensidade de campo elétrico, a aeronave acaba atraindo a subsequente progressão do canal para si. A medida que o canal se aproxima da aeronave, o campo elétrico entre ambas intensifica cada vez mais [30].

Quando o canal avançar de modo que o campo adjacente a uma das extremidades chegue próximo de 3 MV/m, o ar se ionizará e faíscas elétricas se formarão nas extremidades da aeronave, estendendo-se na direção do canal em progressão. Várias dessas faíscas, denominadas *streamers*, em geral, ocorrem simultaneamente, a partir de várias extremidades. Estes *streamers* continuarão a propagar-se enquanto o campo estiver acima de 5 a 7 kV/cm. Um desses *streamers*, chamado de líder de junção, encontrará o ramo mais próximo do canal progressivo e formará um arco contínuo entre o centro de carga e a aeronave. Portanto, quando a aeronave estiver próxima o suficiente para influenciar a direção de propagação do canal em progressão, também denominado líder, ela, muito provavelmente, será conectada a um ramo desse sistema progressivo [30].

Quando a aeronave estiver conectada ao canal em progressão (líder), alguma carga (elétrons livres) fluirá para a aeronave, mas a quantidade que pode ser absorvida é muito pequena, se comparada à disponível numa descarga de raio. A carga elevará a aeronave a uma tensão muito alta e a carga excessiva fará com que o campo elétrico no entorno do avião se torne tão elevado que descargas intensas, do tipo corona, se formarão a partir das principais extremidades. Esses *streamers* descarregarão o excesso de carga. Quanto mais carga fluir para o avião, mais profusos os *streamers* se tornarão. De fato, a carga máxima que pode ser absorvida pela aeronave é muito inferior aos 1 a 10 C, estatisticamente verificados em típicos canais progressivos em descargas naturais de raios. Não há capacidade de uma porção significativa desses valores se acumularem em uma aeronave. Portanto, o avião se torna uma mera extensão do canal de busca por uma conexão entre dois reservatórios de cargas opostas [30], conforme figura 20.



FIGURA 20 – CONEXÃO DA AERONAVE COM UM CANAL PROGRESSIVO [30]

Quando o canal progressivo atingir seu destino e um canal ionizado contínuo for formado entre dois centros de carga, ocorrerá a recombinação de elétrons com íons positivos no canal acima, e isso formará a descarga de retorno de corrente de grande amplitude. Se outro ramo do canal progressivo atingir o solo antes do ramo que envolvia o avião, essa descarga de grande amplitude envolverá esse outro ramo e todos os demais morrerão. Nesse caso, nenhuma corrente substancial fluirá pela aeronave e os danos, se houver serão mínimos [30]. Estes dois casos estão ilustrados na figura 21.

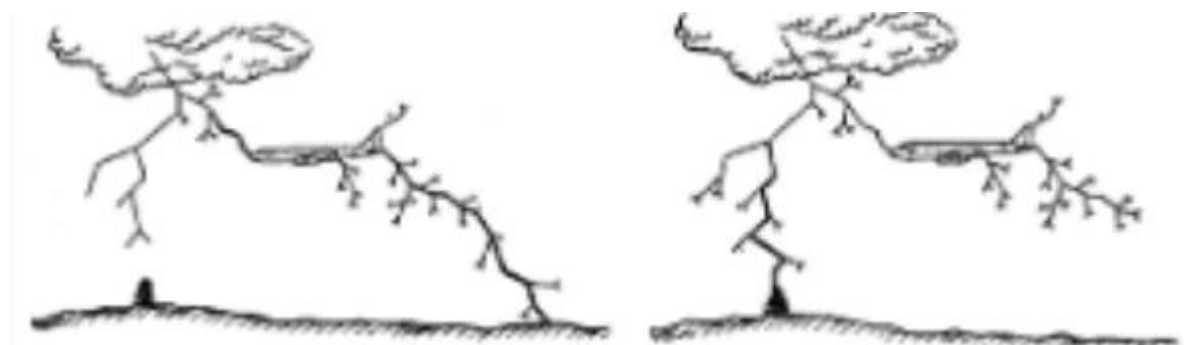


FIGURA 21 – CAMINHO DE RETORNO DE CORRENTE DE RAIO PELO AVIÃO E EM OUTRO RAMO [30]

Após o avião passar a fazer parte de um canal completo de descarga de raio, o pico de corrente e as correntes contínuas seguintes que fluirão pelo canal podem ter a duração de até um segundo ou mais. O canal de descarga permanece estático no ar, mas a aeronave se movimenta para frente a uma distância considerável durante a vida do raio. Em consequência, além dos pontos de entrada e saída do raio, determinados durante o processo recém-descrito, poderão ocorrer outros pontos de conexão da estrutura da aeronave com o canal estacionário no ar [30], conforme figura 22.

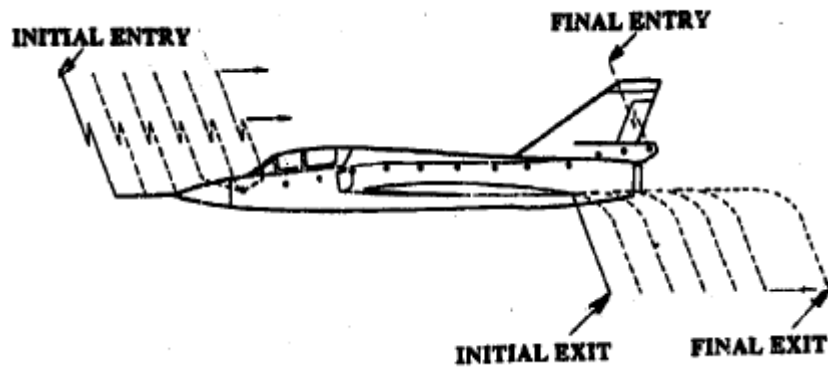


FIGURA 22 – PONTOS DE CONEXÃO DO RAIO [30]

Podemos observar que quando uma aeronave faz parte do caminho de uma descarga atmosférica, ela se assemelha a um condutor, a corrente da descarga apenas passa pela estrutura da aeronave até o seu destino final.

## 4.5 Aeronave vista como gaiola de Faraday e mecanismos básicos de acoplamentos

O método também conhecido como blindagem eletrostática, foi baseado na famosa experiência desenvolvida por Michael Faraday (1791-1867) onde demonstrava que, no interior de um cubo - semelhante a uma gaiola - feito de material condutor, não havia formação de campo elétrico. O fato é que, em uma “casca” condutora carregada, as cargas tendem a ficar concentradas na superfície externa e essa configuração gera um campo elétrico com direção perpendicular à superfície e com sentido apontado para fora, resultando em um campo elétrico interno nulo. Se houver a indução de carga externa próxima ou se a casca estiver neutra, esse campo interno permanece nulo. Dessa forma, qualquer campo elétrico de origem externa produz uma distribuição de cargas na superfície externa de cancela o campo na parte interna [33].



FIGURA 23 – EFEITO DA GAIOLA DE FARADAY NA FUSELAGEM DA AERONAVE [34]

Uma aeronave metálica é comumente vista como uma gaiola de Faraday, pois o ambiente elétrico interno é visto como separado e distinto do ambiente externo. O ambiente eletromagnético interno durante um evento de raio não é tão agressivo quanto o externo. Há, na verdade, alguns mecanismos importantes pelos quais a energia elétrica se acopla ao interior da aeronave. Os mecanismos básicos de acoplamento são: resistivo, campos magnéticos, campos elétricos [30]. As figuras 24 e 25 demonstram os mecanismos básicos de acoplamento.

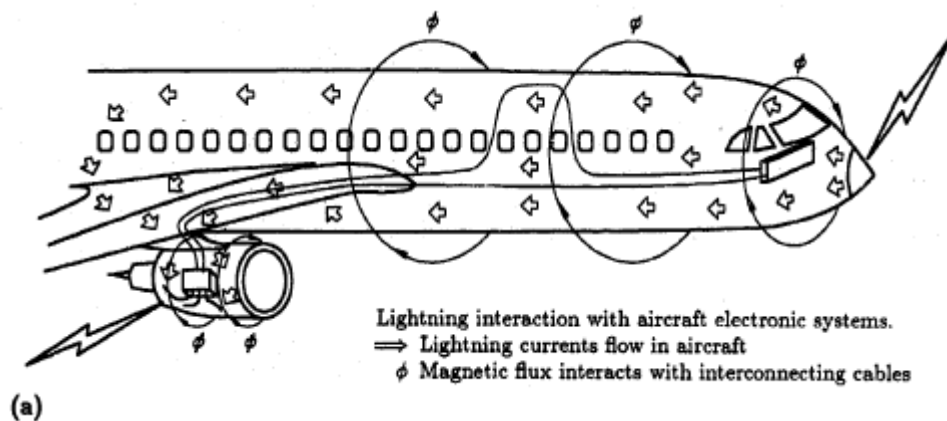


FIGURA 24 – CORRENTE CIRCULANTE EM UM AVIÃO ATINGIDO POR UM RAI [30]

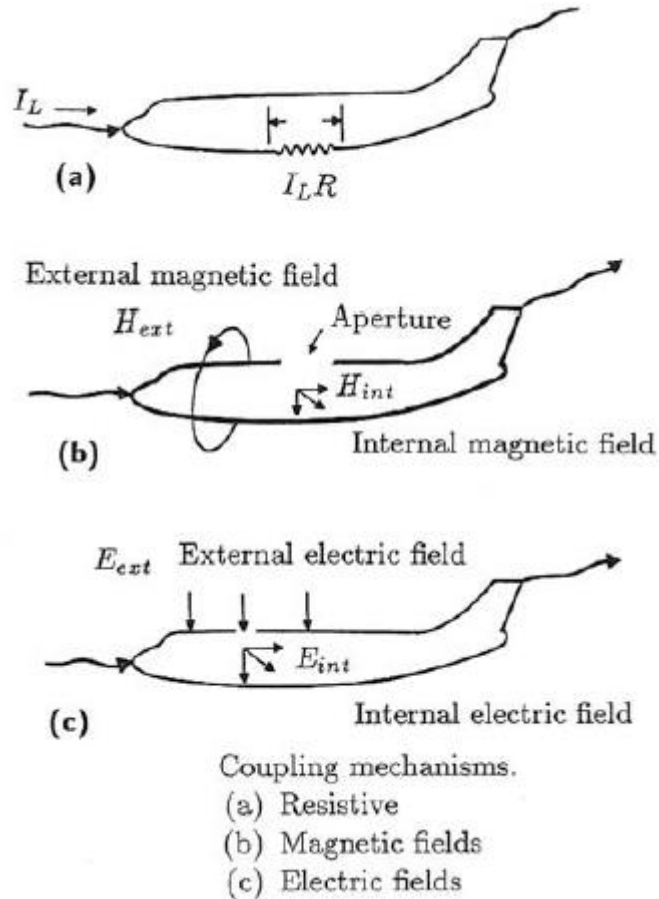


FIGURA 25 – MECANISMO BÁSICOS DE ACOPLAMENTO [30]

O efeito resistivo é função, basicamente, da resistividade da estrutura versus a intensidade da corrente elétrica da descarga ( $V = Ri$ ), circulando pela estrutura da aeronave. Para uma aeronave metálica que os valores típicos de resistência CC (corrente contínua) são da ordem de 2,5 miliohms ( $m\Omega$ ), para uma corrente de raio de 200 quiloampères (kA), haveria uma tensão máxima, de extremo a extremo da ordem de 500 volts. A Figura 26, mostra diversas diferenças de potencial (ddp) geradas em função da resistência CC [35].

Essa resistência pode ser dada por:

$$R = \frac{\rho l}{A} (\Omega) \quad (4)$$

Onde:

**R** é a resistência ( $\Omega$ );

**$\rho$**  é a resistividade do material ( $\Omega m$ );

**l** é o comprimento (m); e

**A** é a área da seção transversal do material ( $m^2$ ).

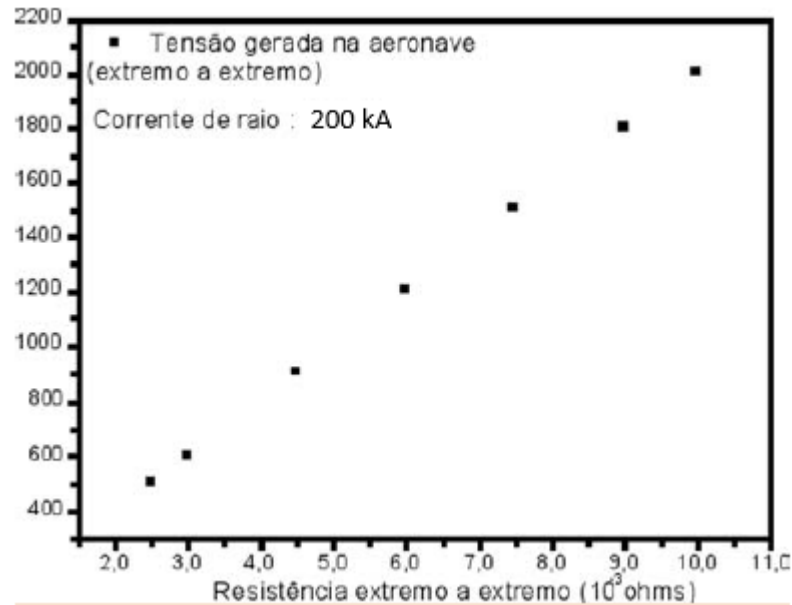


FIGURA 26 – TENSÃO X RESISTÊNCIA [36]

Numa aeronave com estrutura de material compósito de fibra de carbono (CFC), os valores típicos de resistência CC podem ser da ordem de 60 mΩ. Para a mesma descarga de 200 kA, a tensão gerada na estrutura, de extremo a extremo, seria da ordem de 12.000 volts, o que representa um aumento de 24 vezes no valor da tensão gerada. Dependendo da configuração e do aterramento dos circuitos e cabos elétricos internos, esses valores de tensão podem surgir entre equipamentos ou entre equipamentos e estrutura, causando danos consideráveis aos sistemas embarcados [36]. Para ilustrar a importância do material utilizada na estrutura da aeronave, segue a tabela 4 caracterizando suas propriedades.

TABELA 4 – PROPRIEDADES DOS MATERIAS [36]

<b>MATERIAL/ PROPRIEDADES</b>	Al	Cu	Ti	Aço ino.	CFC
$\rho_R$ (Ω.m)	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$42 \cdot 10^{-8}$	$72 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-5}$
$\lambda$ (1/°C)	0,0043	0,0034	0,0035	0,001	-
Coeficiente térmico	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$0,164 \cdot 10^{-4}$	$0,085 \cdot 10^{-4}$	$0,120 \cdot 10^{-4}$	$0,125 \cdot 10^{-4}$
$\rho$ (g/cm³)	2,7	8,89	4,51	7,9	1,55
Ponto de fusão	660	1084	1670	1150	160



Onde:

$\rho_R$  é a resistividade elétrica a 25°C;

$\lambda$  é o coeficiente de temperatura de resistência ;

$\rho$  é a densidade CFC – compósito de fibra de carbono

Principais conclusões da tabela 4:

1. A resistividade elétrica de materiais à base de compósitos laminados de fibra de carbono são duas mil vezes maiores que os materiais metálicos à base de alumínio. Logo CFC possui menor condutividade elétrica e maior permeabilidade a campo eletromagnético associada à maior resistência a corrente elétrica, representando um fator significativo na ampliação nas tensões e correntes induzidas em componentes elétricos e eletrônicos embarcados [36].
2. A densidade do CFC é menor que a do alumínio, o que permite a redução do peso final de 20 a 30% [36].

O segundo mecanismo de acoplamento envolve campos magnéticos que invadem o interior da aeronave, conforme figura 27.

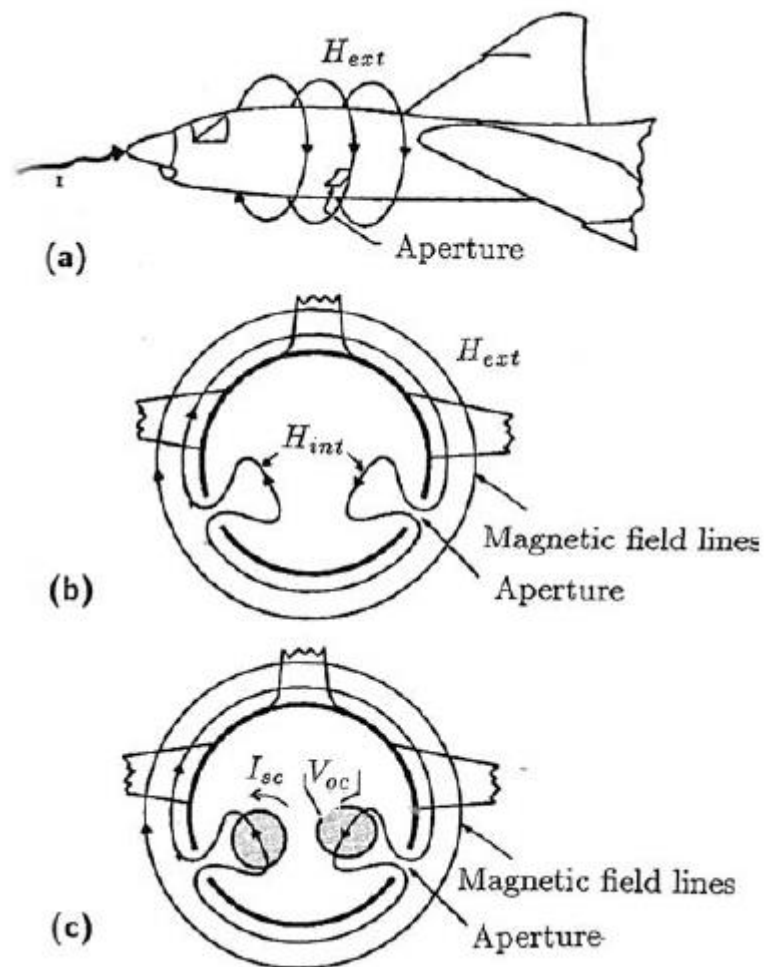


FIGURA 27 – ACOPLAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO [30]

Um campo magnético variável, passando através de um loop, gera uma tensão de circuito aberto dado por:

$$V_{oc} = 4\pi \cdot 10^{-7} \mathbf{A} \cdot \frac{d\mathbf{H}}{dt} \quad (5)$$

ou

$$V_{oc} = \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 \cdot \mathbf{A} \cdot \frac{d\mathbf{H}}{dt} \quad (6)$$

Onde:

$\mathbf{H}$  é a intensidade de campo magnético (A/m);

$\phi$  é o fluxo magnético total em webers (wb), passando através do loop de área  $\mathbf{A}$ ;

$\mathbf{A} = \mathbf{l} * \mathbf{h}$  é a área (m<sup>2</sup>) (Figura 28);

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , é a permeabilidade do vácuo (H/m);

$t$  é o tempo (s).

Se o loop for “curto circuitado”, uma corrente será induzida, com magnitude dada por:

$$I_{sc} = \frac{1}{L} \int V_{oc} dt \quad (7)$$

Onde:

$L$  é a autoindutância do loop.

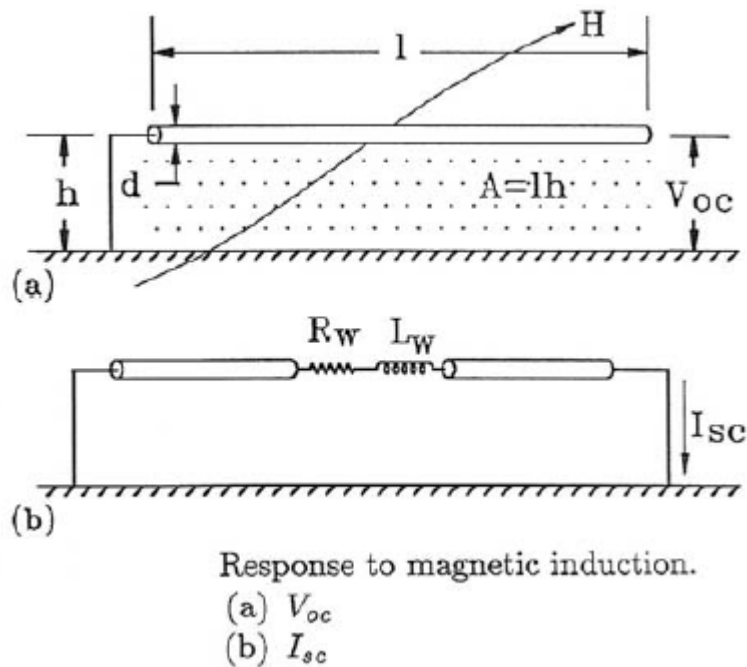


FIGURA 28 – RESPOSTA INDUTÂNCIA MAGNÉTICA [30]

A corrente no loop tende a apresentar forma de onda semelhante à do campo magnético indutor, diferentemente da tensão, que responde a razão de variação do campo magnético [35].

As aeronaves metálicas têm suas estruturas desenvolvidas, visando a uma boa condutividade elétrica em toda a extensão do veículo, para minimizar o emprego de fiação de retorno de corrente elétrica dos equipamentos embarcados. Esse recurso de projeto permite obter uma redução de peso considerável, pois os cabos de cobre eliminados representam uma expressiva parcela do peso total de uma aeronave. Ademais, as antenas de sistemas de

comunicação e de navegação desenvolvidas para uso aeronáutico utilizam a superfície metálica sobre a qual estão usualmente montadas, como plano terra, para garantir a performance esperada e requerida, especialmente com relação a qualidade de sinal e ao alcance de transmissão ou de recepção de sinal [35].

As superfícies metálicas de ligas de alumínio representam uma barreira considerável para a penetração de campos eletromagnéticos. Medições da função transferência em aeronaves com estrutura e revestimento a base de alumínio tem demonstrado níveis de atenuação de campos de radiofrequência consideráveis, variando mais expressivamente em razão das aberturas (para-brisas e janelas) ou outras discontinuidades elétricas da estrutura [36].

Para testar a efetiva proteção contra raios, todas aeronaves passam por testes para verificar a condutividade da sua estrutura externa e nos pontos sensíveis, avaliar a sua resistência contra descargas atmosféricas e obter certificado de aprovação junto aos órgãos aeronáuticos. Como exemplo de teste realizado, podemos citar o teste realizado pela Embraer no avião E190-E2 (jato regional da Embraer), conforme figura 29.



FIGURA 29 – TESTE CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS [37]

O ensaio é realizado com equipamentos especiais, com uma série de anéis que envolvem a estrutura da aeronave, estes anéis disparam picos de corrente de curta duração e alta intensidade, semelhante a uma descarga atmosférica, em diversos pontos da fuselagem e de componentes relevantes.

O processo de certificação que atesta serem as aeronaves adequadamente protegidas contra efeitos de raio que possam afetar a segurança de voo baseia-se num conjunto de requisitos e de normas emitidos pelas autoridades homologadoras, um exemplo de autoridade que realiza a homologação é a SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS, que orientam tanto o projeto quanto possíveis métodos de demonstração de cumprimento das normas [35].

## 4.6 Cálculo do campo elétrico no interior de um condutor esférico

Como a estrutura da aeronave comporta-se como um condutor quando atingida por um raio, devemos conhecer o que acontece com o campo elétrico no interior da mesma. Pela teoria de eletromagnetismo, o campo elétrico é igual à zero no interior de um condutor. Para comprovar este resultado, recorreremos a lei de Gauss.

A lei de Gauss permite demonstrar um teorema importante dos condutores:

*Se uma carga em excesso é introduzida em um condutor, a carga se concentra na superfície do condutor, o interior do condutor continua a ser neutra [38]*

O campo elétrico dentro de um condutor deve ser nulo, se não fosse assim, o campo exerceria uma força sobre os elétrons de condução (elétrons livres) e isso produzirá uma corrente elétrica, ou seja, haveria um movimento de cargas no interior do condutor [38].

Para melhor compreensão será demonstrada, matematicamente, este resultado.

Suposição: a densidade volumétrica de carga de um condutor em equilíbrio eletrostático seja constante. Seja um ponto qualquer no interior P, logo queremos provar que o campo elétrico nesse ponto é nulo, veja a figura 30 para compreender o problema proposto.

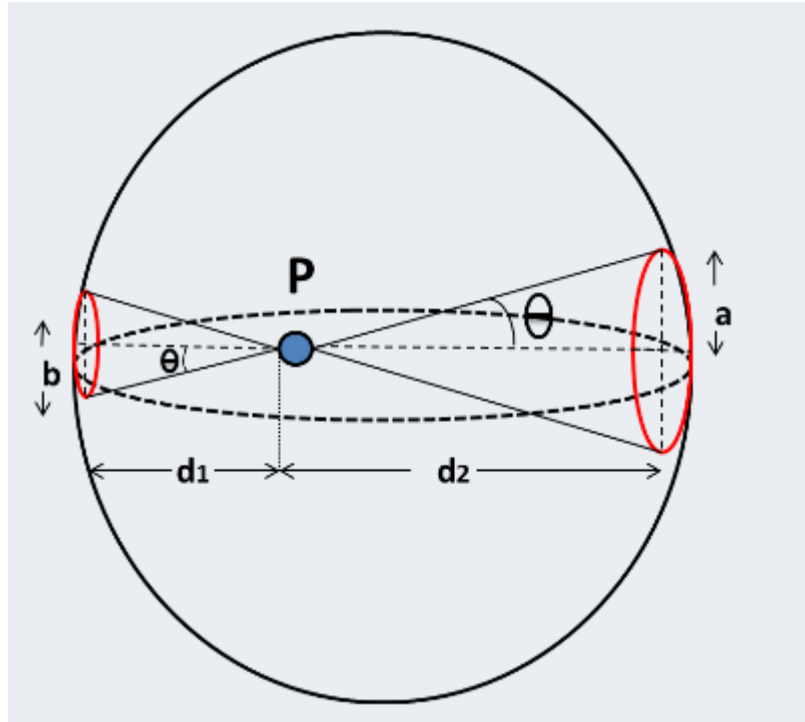


FIGURA 30 – CAMPO ELÉTRICO NO INTERIOR DE UMA ESFERA.[39]

As circunferências em vermelho são pequenas porções infinitesimais, ambas de carga  $Q_1$  e  $Q_2$ . O campo elétrico resultante em P é dado pela soma vetorial dos campos elétricos causados por  $Q_1$  e  $Q_2$ .

$$E_r = k \frac{Q_1}{d_1^2} - k \frac{Q_2}{d_2^2} = k \left( \frac{Q_1}{d_1^2} - \frac{Q_2}{d_2^2} \right) \quad (\text{N/C}) \quad (8)$$

Sendo a densidade de carga volumétrica constante, logo a densidade superficial de carga das porções infinitesimais ( $\sigma$ ) também será constante. Logo:

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (\text{C/m}^2) \quad (9)$$

Para  $A_1 = \pi b^2$  e  $A_2 = \pi a^2$ , logo:

$$\frac{Q_1}{b^2} = \frac{Q_2}{a^2} \quad (10)$$

Pelas relações trigonométricas  $a = d_1 \cdot \text{tg } \theta$  e  $b = d_2 \cdot \text{tg } \theta$ , temos:

$$\frac{Q_1}{d_1^2} = \frac{Q_2}{d_2^2} \quad (11)$$

Fazendo a substituição na equação 8, temos como resultado o campo elétrico resultante nulo no interior de uma esfera. Este resultado foi demonstrado vetorialmente, porém podemos utilizar a lei de Gauss para demonstrar o mesmo resultado.

A lei de Gauss pode ser enunciada como:

*O fluxo elétrico que passa por qualquer superfície fechada é igual à carga total que está contida dentro desta superfície [29].*

$$\Psi = \oint_S \mathbf{D}_s \cdot d\mathbf{S} = \text{carga envolvida} = Q \quad (12)$$

Onde:

$\Psi$  (psi) é o fluxo elétrico (C);

$d\mathbf{S}$  é a diferencial que indica uma integral de superfície;

$\mathbf{D}_s$  é a densidade do fluxo elétrico na superfície; e

$Q$  é a carga total dentro da esfera.

A integral com um círculo indica que é uma superfície fechada e é comumente conhecida como superfície gaussiana.

Para um condutor, conforme dito anteriormente, a carga concentra-se na superfície, permanecendo neutro o seu interior. Logo a carga envolvida  $Q$  é igual à zero ( $Q = 0$ ).

Como exemplo, calcularemos o campo elétrico no interior de um condutor esférico.

Sabendo que:

$$\mathbf{D}_s = \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} \quad (13)$$

Onde:

$\mathbf{E}$  é o campo elétrico.

Logo podemos escrever a lei de Gauss da seguinte maneira:

$$\frac{Q}{\epsilon_0} = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (14)$$

Sendo a superfície de uma esfera igual à  $4\pi r^2$ , temos:

$$\frac{Q}{\epsilon_0} = E \cdot 4\pi r^2 \quad (15)$$

Como  $Q$  é zero, temos como resultado um campo elétrico nulo no interior do condutor. Este resultado comprova a eficiência da blindagem eletrostática.

## 4.7 Descarregadores de energia estática

Descarregadores de energia estática são responsáveis por eliminar a energia estática acumulado ao longo da fuselagem do avião. Quando o avião está em voo, há um constante atrito com o ar, ocasionando o processo de eletrização por atrito, ou seja, os elétrons das moléculas do ar se acumulam na fuselagem do avião. Os elétrons tendem a acumular nas partes pontiagudas da aeronave como: antenas, pontas das asas e ponta do leme. Quando os elétrons acumulam nas antenas no avião pode gerar interferências no sistema de comunicação, gerando ruído estático e faz com que a recepção de ondas de rádio e dos sistemas de navegação não sejam eficientes [40].

Seu funcionamento baseia-se em eliminar os elétrons acumulados, pois oferecem baixa resistência para escoamento dos mesmos. Eles estão localizados nas partes pontiagudas das aeronaves, onde ocorrem maior acúmulos de elétrons, as figuras 31 e 32 ilustram as suas respectivas localizações.





FIGURA 31 – LOCALIZAÇÃO DOS DESCARREGADORES ESTÁTICO [40]



FIGURA 32 – DESCARREGADOS ESTÁTICO NA EMPENAGEM [40]

## 4.8 Proteção na aeronave contra as descargas atmosféricas

Como dito anteriormente, a principal proteção de uma aeronave contra as descargas atmosféricas é o material que faz parte do revestimento da sua estrutura, o material metálico possui espessura suficiente para proteger o avião contra os raios. Porém há áreas no avião que são mais propensas ao impacto do raio, logo há necessidade de implementação de alguma proteção extra para garantir a segurança da aeronave [41]. Tais proteções são:

- *Escudos de pacote de fio*: é utilizado para proteger fios contra os efeitos magnéticos e térmicos.
- *Estruturas expandida de estrutura composta*: é utilizado nas partes sensíveis do avião (pontas das asas, nariz do avião, nos lemes, estabilizadores...), sua composição permite maior resistência na estrutura contra impactos.
- *Malha de arame*: utilizada para fazer a proteção de componentes importantes na aeronave, como motor, fuselagem etc.
- *Revestimento de spray de chama de alumínio*: utilizado para atenuar os efeitos de campo de radiofrequência, que tem uma variação nas partes de descontinuidades elétricas da estrutura (janelas e para-brisas).
- *Fios metálicos incorporados*: estes fios são utilizados na camada mais externa do avião, ele serve para fazer o escoamento das cargas acumuladas na sua estrutura e são utilizados para fazer o aterramento do avião antes do abastecimento.
- *Tecido de vidro revestido e folha de alumínio colada*: sua função é melhorar a condutividade e proteger contra os efeitos magnéticos.

## 4.9 Tensão de passo e de toque

A tensão de passo e de toque é muito importante na região onde há aeronaves no solo, principalmente no ambiente de um aeroporto, onde há muitos trabalhadores em contato com as aeronaves e nas suas redondezas. As aeronaves atraem as descargas atmosféricas, pois as suas estruturas externas são formadas por muitas superfícies pontiagudas, esta teoria foi abordada no item 4.2 na qual é explicado a teoria do poder das pontas. Logo é de extrema importância

saber quais são os riscos que os trabalhadores estão expostos nesta região e conhecer os limites permissíveis da tensão de passo nos seres humanos.

A norma ABNT NBR 15751 estabelece os valores máximos permissíveis para as tensões de passo e toque em condições locais preestabelecidas. Primeiramente vamos definir o que é tensão de passo e o que é tensão de toque:

- **Tensão de passo:** é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1 metro, com isto ele ficara com os pés em linhas equipotenciais diferentes provocando passagem de corrente pelo seu tronco, num ser vivo bípede isto raramente provoca a morte, pois a parcela de corrente é pequena (linhas equipotenciais próximas), já nos quadrúpedes geralmente é fatal (linhas equipotenciais distantes) maior diferença de potencial, logo maior corrente passando pelo tronco do ser vivo [42].
- **Tensão de toque:** é a diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Essa distância é também convencionada igual a 1 metro [42].



FIGURA 33 – TENSÃO DE PASSO E TENSÃO DE TOQUE [42]

## 4.10 Cálculo da máxima tensão de passo suportada para o ser humano

Para o cálculo da máxima tensão de passo suportada por um humano, iremos considerar o modelo de circuito equivalente descrito na NBR 15751 (Sistemas de aterramento de subestações – requisitos) [43].

Como as descargas atmosféricas geram correntes de altas intensidades e pequena duração, logo modelo utilizado será com base nessas informações.

Para melhor compreendermos o modelo do circuito equivalente correspondente aos parâmetros resistivos envolvidos, segue a figura 34.

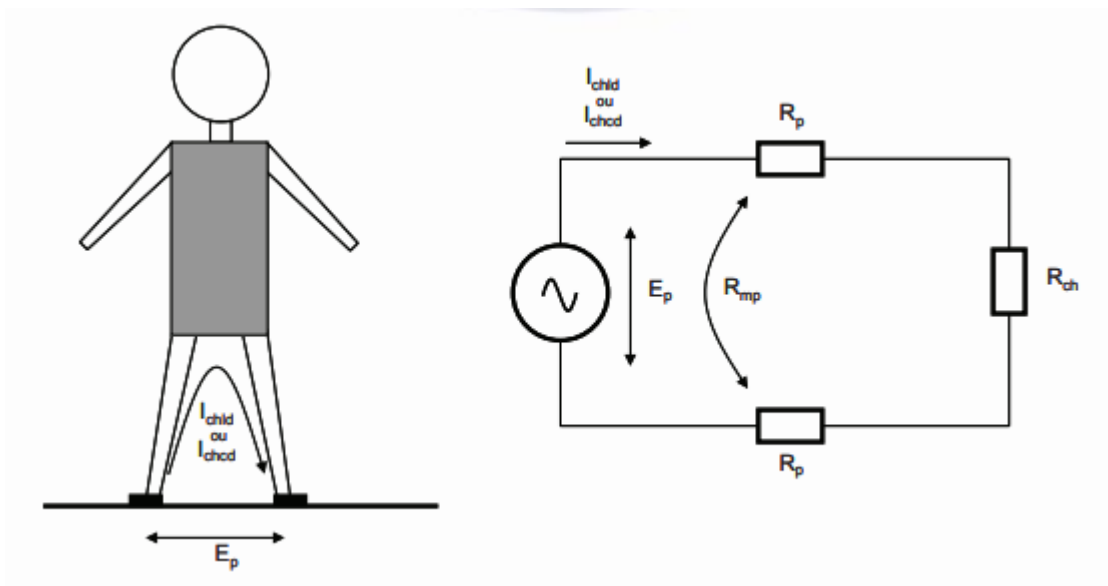


FIGURA 34 – CIRCUITO QUIVALENTE [43]

A máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano é dada pela equação 16:

$$E_p = [R_{ch} + 2(R_p - R_{mp})] * I_{chd} \quad (V) \quad (16)$$

Onde:

$E_p$  é a máxima tensão de passo permissível;

$R_{ch}$  é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000  $\Omega$ , expressa em ohms ( $\Omega$ );

$R_p$  é a resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto, expressa em ohms ( $\Omega$ );

$R_{mp}$  é a resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms ( $\Omega$ );

$I_{chd}$  é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

Dado que  $I_{chd} = \frac{0,166}{\sqrt{t}}$ , onde  $t$  é o tempo de duração do choque, expresso em segundos.

As resistências própria e mútua dos pés são dadas pelas equações 17 e 18:

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b}\right) \cdot C \quad (\Omega) \quad (17)$$

$$R_{mp} = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi \cdot dp} \quad (\Omega) \quad (18)$$

Onde:

$R_{mp}$  é a resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms ( $\Omega$ );

$b$  é igual a 0,083 m (raio do disco metálico – modelo estabelecido para o pé humano);

$dp$  é a distância entre os dois pés (1 m);

$\rho_s$  é a resistividade do recobrimento da superfície do solo ( $\Omega \times m$ ), conforme Tabela 5;

Caso não haja recobrimento, utilizar resistividade da camada superficial do solo.

$C$  é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento.

Considerando  $R_{mp}$  desprezível quando comparada a  $R_p$ , tem-se a equação 19:

$$E = (R_{ch} + 6 \cdot \rho_s \cdot C) \quad (V) \quad (19)$$

TABELA 5 – RESISTIVIDADE DO MATERIAL DE RECOBRIMENTO [43]

MATERIAL	RESISTIVIDADE ( $\Omega \times m$ )	
	MOLHADO	SECO
Brita número 1,2 ou 3	3000	N/A
Concreto	21 a 100	1200 a 280000
Asfalto	$10 \cdot 10^3$ a $6 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$ a $30 \cdot 10^6$

O fator de redução  $C$  é calculado pela equação (20):

$$C = \frac{1}{0,96} \left[ 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_s}{0,08}\right)^2}} \right] \quad (20)$$

Na forma simplificada, temos:

$$C \cong 1 - a \cdot \left[ \frac{1 - \rho_1}{2 \cdot h_s + a} \right] \quad (21)$$

Onde:

$A$  é igual à 0,106 m.

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_s}{\rho_1 + \rho_s} \quad (22)$$

O  $\rho_s$  é determinado pela tabela 5,  $\rho_1$  é a resistividade da primeira camada e  $\rho_s$  é a espessura da camada de revestimento superficial, conforme figura 35.

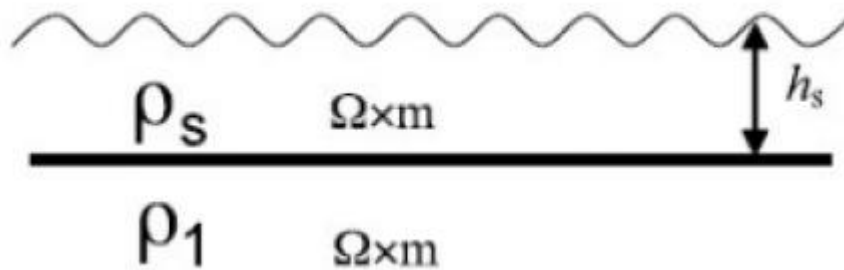


FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO DO SOLO ELETRICAMENTE [43]

Em complemento ao estudo da máxima tensão de passo suportado pelo ser humano, é interessante conhecer qual é a tensão entre o ponto de impacto até uma distância  $r$ . Este cálculo é dado pela equação 23 [44].

$$V_t = \frac{i(t)}{2 \cdot \rho_g \cdot \pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+s} \right) \quad (23)$$

## **5. MEDIDAS PREVENTIVAS E DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E ACIDENTES/INCIDENTES**

As medidas preventivas e de proteção contra descargas atmosféricas são de vital importância para os trabalhadores que estão expostos a esse risco, são medidas simples que podem salvar vidas. Como o enfoque deste trabalho é voltado para a área da aviação, logo as medidas serão voltadas para ambientes aeronáuticos.

### **5.1 Medidas de prevenção contra descargas atmosféricas adotadas durante as fases do voo**

Neste trabalho foram abordados tópicos que descrevem o comportamento de uma aeronave em um ambiente de tempestade. Com base nestas informações, serão abordadas as medidas de proteção contra descargas atmosféricas na situação em que a aeronave está prestes a voar e durante o voo.

Na fase que antecede o voo, é de extrema importância que o piloto obtenha informações relevantes sobre a meteorologia para que ele possa planejar todas as etapas do voo. A consulta às informações meteorológicas aeronáuticas, disponíveis nas salas de Serviços de Informação Aeronáutica (AIS), apresentará ao piloto as áreas e locais mais favoráveis a ocorrência dessas instabilidades. Esta consulta deverá ser efetuada sobre as cartas de tempo significativo, previsto em: rota do voo, rotas alternativas, condições dos aeródromos de destino e alternativos.

Na fase do voo, o piloto deverá manter contato com o Centro Meteorológico de Vigilância (CMV) da área, através da frequência de Informação Meteorológica para Aeronave em Voo (VOLMET), a fim de se manter informado sobre as condições meteorológicas em sua rota. O bom senso diz que a única regra de voo válida para todos os níveis e todas as categorias de aeronaves é evitar o voo dentro de um CB. Como isto nem sempre é possível, um piloto deverá estar preparado psicologicamente para um voo dentro de um CB. Para tal, dois requisitos são essenciais: O piloto deverá ter experiência de voo e a aeronave deverá estar convenientemente equipada e possuir estrutura condicionada para tal voo [9].

Antes de iniciar a penetração na nuvem, o piloto deve tomar algumas providências:

- i. Apertar os cintos de segurança e fixar todos objetos que estejam soltos;

- ii. Confeccionar mensagem de posição (AIREP);
- iii. Efetuar varredura com radar, para uma melhor avaliação da nuvem;
- iv. Desligar o rádio e retirar os fones;
- v. Luzes acesas e cortinas fechadas para evitar cegueira causada pelos relâmpagos; e
- vi. Ajustagem da potência para manutenção da velocidade ótima de penetração.  
Tomadas essas providências, a penetração na nuvem obedecerá às seguintes regras:
  - 1) Manter o rumo de penetração e nunca tentar voltar;
  - 2) Manter altitude de voo baseado no horizonte artificial;
  - 3) Esquecer as variações de altitude; e
  - 4) Ajustar a potência da aeronave apenas para manter a velocidade em torno da velocidade ótima de penetração.

## **5.2 Medidas de inspeção estrutural após o avião ser atingido pelo raio**

Se um raio atingir um avião, uma inspeção condicional de impacto de um raio deve ser realizada para localizar os pontos de entrada e saída de impacto. A inspeção condicional é necessária para identificar qualquer dano estrutural e dano ao sistema antes de retornar ao serviço. A estrutura pode ter orifícios de queimadura que podem levar a perda de pressurização ou rachaduras. Os componentes críticos do sistema, os feixes de fios e as tiras de ligação devem ser verificados quanto à aeronavegabilidade antes do voo[41].

As zonas de impacto de raio do avião são definidas pelas Práticas Recomendadas SAE. Algumas zonas são mais suscetíveis a raios do que outras, conforme figura 36. Os pontos de entrada e saída de raio são normalmente encontrados na Zona 1, mas podem ocorrer muito raramente nas Zonas 2 e 3. Um relâmpago geralmente se liga ao avião na Zona 1 e parte de uma área Zona 1 diferente. Os componentes externos com maior probabilidade de serem atingidos são: pontas das asas, pontas estabilizadoras horizontais, elevadores, pontas verticais da aleta, extremidades das abas da borda de ataque e trem de pouso [41].



Designação de Zona	Descrição	Definição
1A	Primeira zona de golpe de retorno	Todas as áreas das superfícies do avião, onde um primeiro retorno é provável durante a conexão do canal de raio com uma baixa expectativa de travamento do flash.
1B	Primeira zona de curso de retorno com um longo tempo de espera	Todas as áreas das superfícies do avião, onde um primeiro retorno é provável durante a conexão do canal de raio com uma baixa expectativa de travamento do flash.
1C	Zona de transição para o primeiro curso de retorno	Todas as áreas do avião surgem onde um primeiro curso de retorno de amplitude reduzida é provável durante a conexão do canal de raio com uma baixa expectativa de travamento do flash.
2A	Zona de traçado varrida	Todas as áreas das superfícies do avião onde um primeiro retorno de amplitude reduzida é provável durante a conexão do canal de raio com uma baixa expectativa de travamento do flash.
2B	Varrer zona de acidente vascular cerebral com longa espera	Todas as áreas das superfícies do avião, nas quais um canal de raio transporta um curso de retorno subsequente, provavelmente serão varridas com uma alta expectativa de travamento do flash.
3	Locais de ataque que não sejam Zona 1 e Zona 2	Aquelas superfícies fora da Zona 1A, 1B, 1C, 2A ou 2B, onde qualquer conexão do canal de raio é improvável, e aquelas partes do avião que estão abaixo ou entre as outras zonas e / ou conduzem uma quantidade substancial de corrente elétrica entre pontos de fixação de traços diretos ou varridos.

FIGURA 36 – DEFINIÇÃO DE ZONAS [41]

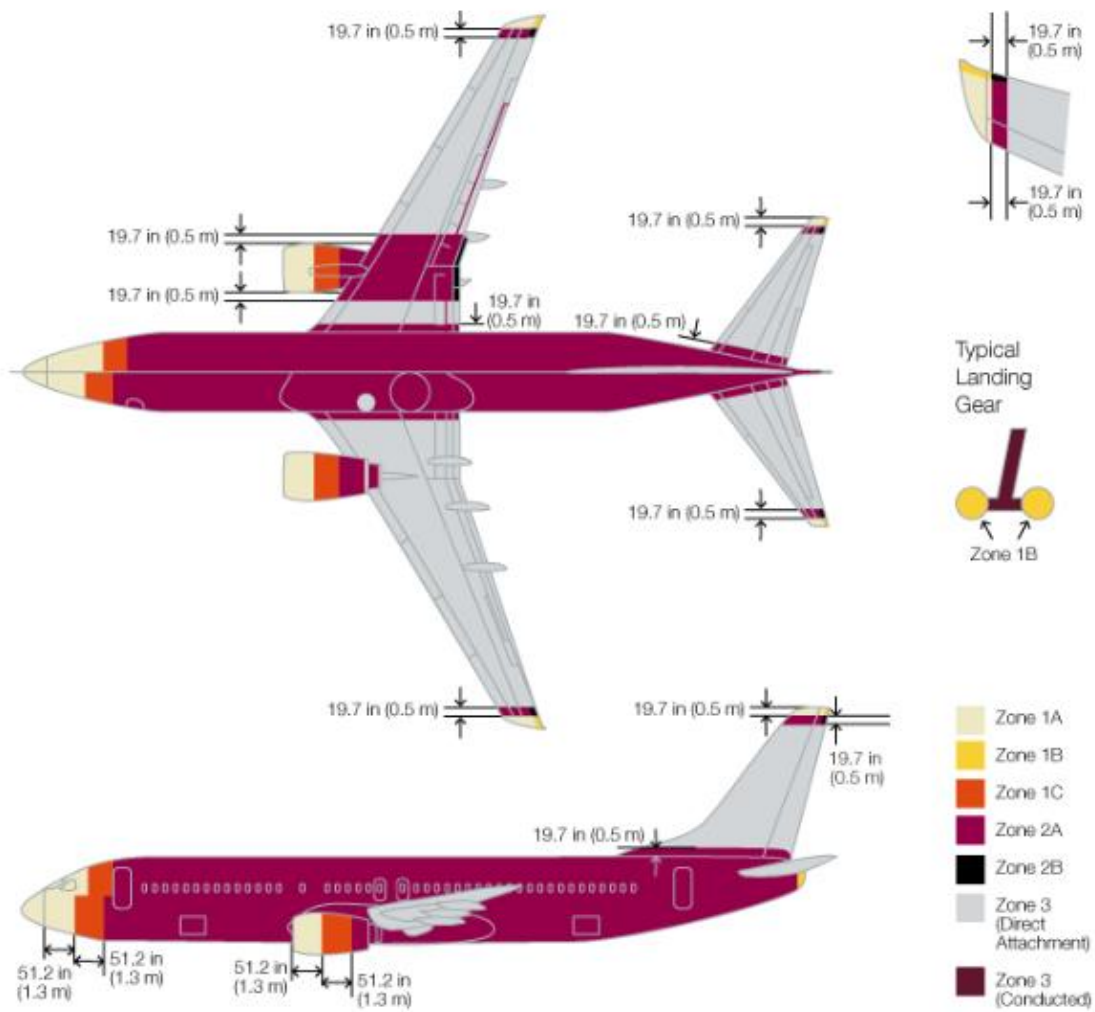


FIGURA 37 – ZONAS NO AVIÃO [41]

### 5.3 Acidentes/Incidentes

Os acidentes e incidentes foram os principais incentivadores para pesquisas e modernização na aviação. Quando ocorria acidentes/incidentes com aeronaves, a busca por informações e detalhamento do ocorrido foram cruciais para alimentar o banco de dados e, conseqüentemente, estudar cada caso para obter propostas de melhorias futuras.

Este capítulo citará os alguns acidentes/incidentes aéreos que teve a queda de raio o seu principal gerador [47]. São eles:

1. Em 14/06/1945, avião Curtiss C-46D nos Estados Unidos (17 vítimas) – um raio atingiu a asa e o avião começou a perder altitude até atingir o chão;
2. Em 13/05/1949, avião Ilyushin 12P na Rússia (25 vítimas) – avião entrou em uma área de tempestade e o primeiro oficial e o operador de rádio foram incapacitados por um raio;
3. Em 09/01/1951, avião Ilyushin 12P na Rússia (8 vítimas) – um raio atingiu o tanque de combustível traseiro esquerdo, que explodiu e causou um incêndio, assim como a perda de controle e queda da aeronave;
4. Em 27/01/1951, avião Savoia-Marchetti SM-95B na Itália (14 vítimas) – fogo em voo, devido a um raio atingindo a asa e acender uma mistura de ar e vapores de gasolina em um dos painéis da asa ou tanques de combustível;
5. Em 14/06/1953, avião Ilyushin 12 na Geórgia (18 vítimas) – novamente é afirmado que o avião foi atingido por um raio e perdeu o controle (“The airplane was struck by lightning and entered an uncontrolled dive”), sendo mais provável ter acontecido cisalhamento de vento e isso ter gerado a perda de controle;
6. Em 26/06/1959, avião Lockheed L-1649A Starliner na Itália (68 vítimas) – explosão no tanque de combustível causou a queda do avião; suspeita-se que a ignição tenha ocorrido por uma descarga elétrica devido ao acúmulo eletrostático em um campo elétrico intenso (“efeito corona”);
7. Em 22/06/1962, avião Boeing 707-328 em Guadalupe (113 vítimas) – raios teriam interferido na comunicação do sistema de navegação ADF (automatic direction finder);
8. Em 12/08/1963, avião Vickers 708 Viscount na França (16 vítimas) – além da redução de visibilidade devido à tempestade, considera-se que um relâmpago tenha causado cegueira temporária em ambos os membros da tripulação;
9. Em 08/12/1963, avião Boeing 707-121 nos Estados Unidos (81 vítimas) – ignição induzida pelo relâmpago na mistura ar/combustível no tanque de combustível reserva, com desintegração explosiva resultante da asa externa esquerda e perda de controle;
10. Em 18/04/1967, avião Lockheed C-130E Hercules no Irã (23 vítimas) – queda após a ocorrência de um raio (devido a falta de informações, não é possível saber a relação entre o raio e a queda do avião);
11. Em 24/12/1971, avião Lockheed L-188A Electra no Peru (91 vítimas) – relâmpago atingiu a aeronave, causando incêndio na asa direita que se separou, juntamente com parte da asa esquerda; no entanto, o avião estava carregado demais para enfrentar uma tempestade, o que por si só já causava um grande esforço estrutural;

12. Em 09/05/1976, avião Boeing 747-131F na Espanha (17 vítimas) – um raio atingiu a parte dianteira da aeronave e saiu de um descarregador estático na ponta da asa esquerda, ocorrendo uma concentração de corrente na junta rebitada entre uma cinta de ligação e uma nervura de asa, que era suficientemente condutora para fazer com que a corrente elétrica voltasse a ligar a este rebite em vez de seguir somente para o descarregador; isso causou a ignição do vapor de combustível preso no tanque;
13. Em 30/11/1978, avião Lockheed C-130E Hercules nos Estados Unidos (6 vítimas) – queda após a ocorrência de um raio (devido à falta de informações, não é possível saber a relação entre o raio e a queda do avião)
14. Em 05/09/1980, avião Lockheed L-100-20 Hercules na França (8 vítimas) – queda após a ocorrência de um raio (devido a falta de informações, não é possível saber a relação entre o raio e a queda do avião);
15. Em 08/02/1988, avião Swearingen SA227-AC Metro III na Alemanha (21 vítimas) – o fornecimento total de eletricidade falhou devido a um raio em condições de voo por instrumento, causando a falha da iluminação do cockpit e dos instrumentos, tornando impossível controlar os flaps e outras superfícies aerodinâmicas (modelo não possui APU – Auxiliar Power Unit);
16. Em 26/02/1998, avião Fokker 100 nos Estados Unidos (sem vítimas) – o projeto de proteção contra raios do avião entre os estabilizadores horizontais e verticais era inadequado para suportar a descarga elétrica de um raio, o que resultou em danos nos sistemas hidráulicos;
17. Em 14/08/2000, avião Rockwell Sabreliner 75A nos Estados Unidos (2 vítimas) – cisalhamento de vento em meio à tempestade foi a principal causa de falta de controle na aeronave, e não o raio em si;
18. Em 06/07/2001, avião Lockheed L-1011-385-1-14 TriStar 15 na França (sem vítimas) – área de tempestade não apareceu tão destacada na imagem de radar (provavelmente por atenuação do sinal), mas os problemas foram devido à ocorrência de granizo e não de raios;
19. Em 10/10/2001, avião Swearingen SA226-AT Merlin IVA na Espanha (10 vítimas) – perda total do sistema elétrico, causada por um relâmpago no meio da tempestade, sem que a tripulação pudesse recuperar;
20. Em 27/12/2002, avião Let L-410UVP nas Ilhas Comoros (1 vítima) – o avião foi atingido por um raio na aproximação final da pista; foi feita uma tentativa de arremeter mas o avião perdeu os horizontes artificiais e compassos giroscópios como resultado do raio; sem controle, o avião caiu;

21. Em 04/12/2003, avião Dornier 228-202 na Noruega (sem vítimas) – até 30% dos fios em ligações entre a fuselagem, o estabilizador horizontal e o profundor podem ter sido quebrados antes do raio ter atingido; essas ligações não foram capazes de conduzir a energia elétrica do raio e a haste de transferência da cabine para o profundor foi rompida, levando a descontrolado e queda do avião;
22. Em 29/11/2013, avião Bombardier DHC-8-402Q Dash 8 no Japão (sem vítimas) – existe uma probabilidade de que os danos acontecidos na aeronave durante o voo tenham acontecido por raios (pouso foi normal);
23. Em 13/03/2015, avião Gulfstream G-IV no Japão (sem vítimas) – acredita-se que a aeronave tenha passado perto de uma nuvem Cumulus carregada eletricamente e algum raio tenha atingido o avião (pouso foi normal);

## **5.4 Avarias nas estruturas da aeronave**

Neste tópico foi destinado para ilustrar algumas avarias causadas pelas descargas atmosféricas em aeronaves.

Para-brisas de um Boeing 787-8 da Air Europa danificado após avião ser atingido por um raio em voo no dia 24/05/2017 partindo do aeroporto de Miami com destino a Madri, avião retornou e fez o pouso em segurança [46].



FIGURA 38 – QUEDA DE RAI0 – DANIFICAÇÃO DO PARA-BRISAS [46]

Em abril de 2015, os passageiros da empresa Icelandair se assustaram quando um raio atingiu o bico do Boeing 757 da companhia e deixou um rombo na fuselagem.



FIGURA 39 – IMPACTO DE RAIO NO BICO DA AERONAVE[45]

A figura 40 e 41, ilustram danos causados nas partes dos estabilizadores e fuselagem.

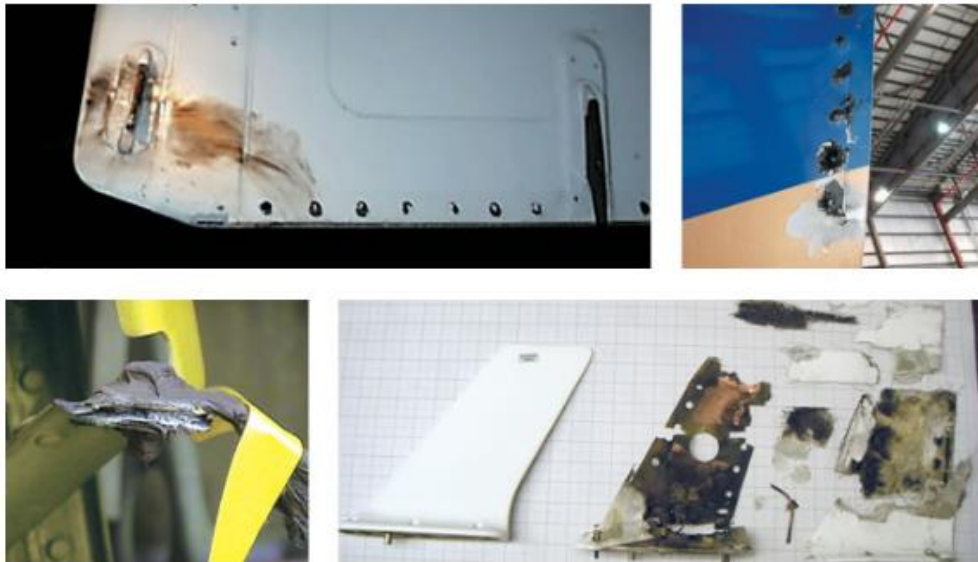


FIGURA 40 – DANIFICAÇÕES NOS ESTABILIZADORES [41]



FIGURA 41 – DANIFICA NA FUSELAGEM [41]



## 6. CONTRIBUIÇÃO PARA O TRABALHO

### 6.1 Identificação do problema

Na aviação, os materiais utilizados para a construção de aeronaves são materiais leves e de alta resistência, alguns fatores podem influenciar na escolha, tais como: redução de peso, custo, aumento da segurança e desempenho. No século passado, o material mais utilizado na construção das aeronaves era as ligas de alumínio, pois as suas características físicas são: baixa densidade, baixo custo, maleabilidade e resistência a fadiga e corrosão. Porém com o avanço da tecnologia, novos materiais estão sendo empregados na construção de aeronaves visando otimizar os custos de fabricação, obter melhores desempenhos, melhorar a vida útil da aeronave etc.

No capítulo três deste trabalho, foi mencionado o material compósito que está substituindo o alumínio devido as suas características físicas e financeiras, tais como: baixa densidade, alta rigidez, maior resistência a impactos e corrosão e baixo custo na fabricação. Porém o material compósito tem um propriedade de baixa condutividade elétrica que vem impactando a segurança das aeronaves.

A condutividade elétrica do compósito é menor que a do alumínio, sendo a resistividade duas mil vezes maior, nas condições estabelecidas pela tabela 4. Em consequência, haverá maior diferença de tensão entre o ponto de entrada e de saída do raio, gerando danos consideráveis aos sistemas embarcados.

Superfícies de materiais como o CFC, apesar de sua condutividade elétrica, apresentam níveis de atenuação dos campos externos consideravelmente inferiores quando comparados aos obtidos de superfícies equivalentes compostas de materiais metálicos. Os campos magnéticos não serão apenas mais intensos, mas atingirão o pico mais rapidamente que em aeronaves de metal, como consequência natural da alta resistência elétrica de materiais de CFC. Uma das causas de os campos magnéticos serem mais intensos é o fato de que uma parte significativa da intensidade de corrente do raio circula por objetos metálicos internos da aeronave, diferente do que se verifica em relação às aeronaves com estrutura metálica [36].

## 6.2 Proposta de melhoria

A proposta para melhorar os efeitos causados pelo aumento da tensão entre os pontos de entrada e saída do raio na aeronave é baseado em proporcionar uma forma alternativa para a passagem do raio pela aeronave. Este método consiste em instalar na parte externa da aeronave um cabo condutor de cobre (maior condutividade), ligando os pontos que possuem maior probabilidade de impacto do raio, conforme mencionado no item 5.2, ou seja, na zona 1. Para melhor compreensão, as figura 42 e 43 ilustrarão tal proposta.

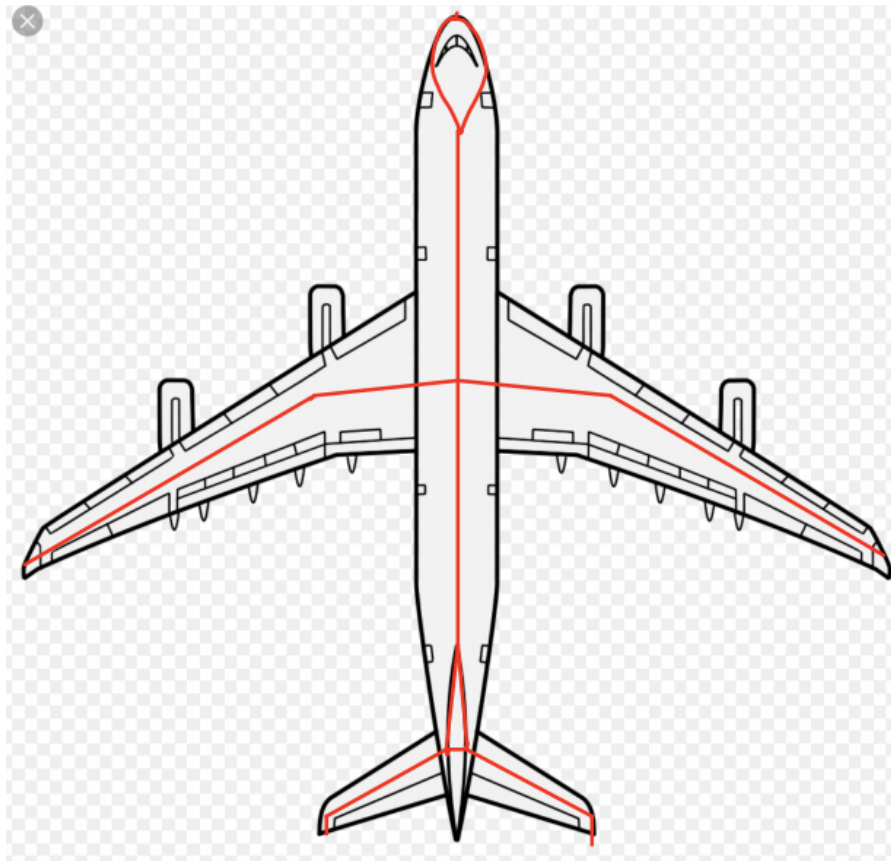


FIGURA 42 – VISTA SUPERIOR

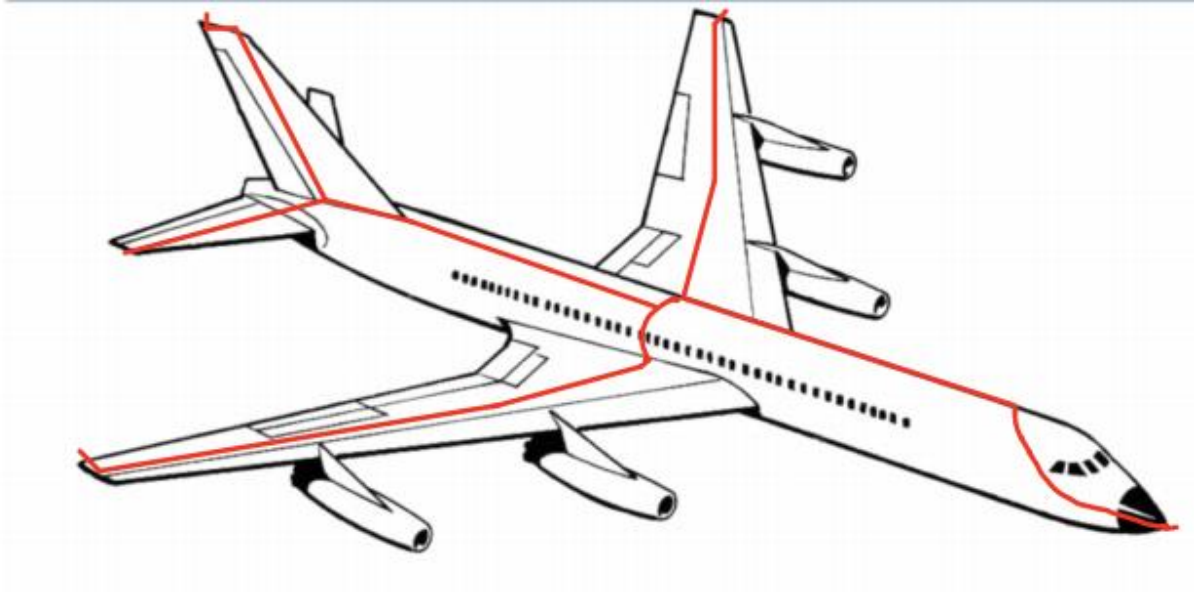


FIGURA 43 – VISTA LATERAL

O objetivo desta proposta é fornecer duas alternativas para a passagem de corrente do raio na aeronave. Sendo a resistividade do cobre menor que a do compósito, maior parcela da corrente irá passar pelo condutor, conseqüentemente a parcela da corrente que passa pela estrutura do avião será menor e a diferença de tensões entre os pontos de entradas e saídas do raio diminuirá. Logo os efeitos magnéticos irão atenuar-se, diminuindo o risco de interferências indesejadas nos sistemas embarcados.

## 7. CONCLUSÃO

### 7.1 Conclusões

As descargas atmosféricas enquanto fenômenos incontroláveis pela tecnologia até o presente, impulsionam os engenheiros e pesquisadores estudarem meios de contornar os efeitos e minimizarem os danos gerados. Mediante pesquisas sobre descargas atmosféricas é possível entender todo o seu ciclo, desde a formação até a dissipação, facilitadores de propagação, dimensionamento da corrente, meios de propagação e, conseqüentemente, obter parâmetros para formular meios de proteção contra descargas atmosféricas.

Este trabalho abordou as descargas atmosféricas com as aeronaves, trazendo informações relevantes da interação entre elas. Com base teórica, foi explicitado o comportamento de aeronaves diante tempestades, os efeitos causados no campo elétrico e nas superfícies equipotenciais da atmosfera quando uma aeronave entra numa zona de instabilidade. Foram abordados, também, meios de proteção inerente às aeronaves visando minimizar os impactos gerados pelos raios na sua estrutura. Ressalta-se como meio mais utilizado na sua proteção a tecnologia baseado na gaiola de Faraday.

Os registros de incidentes e acidentes de aeronaves provocados por descargas atmosféricas, levam à construção de banco de dados como auxílio a tecnologia propiciando melhorias nas próprias aeronaves e mais eficiente proteção. A catalogação dos acidentes e incidentes possibilita os órgãos responsáveis editar normas de segurança da aviação e dados estatísticos reais para formularem normas e procedimentos técnicos.

Embora, um fenômeno incrível e fascinante, a descarga atmosférica tem o poder de obrigar a mudança de rota das aeronaves como melhor forma de proteção, desviando-se das tempestades.

A tecnologia teve um avanço significativo na construção de aeronaves e meios de proteção, diminuindo drasticamente os acidentes, porém os fenômenos da natureza sempre demonstram ser incontroláveis, independentemente da tecnologia utilizada, pois nenhuma tecnologia garante segurança na totalidade.

## **7.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão para trabalhos futuros no ambiente da aviação, sugere-se estudos mais específicos de como os materiais compósitos podem influenciar na proteção contra descargas atmosféricas.

Vislumbram-se como novos campos de estudos e pesquisas, a construção de um material compósito para melhorar a condutibilidade e a permeabilidade eletromagnética.

Como sugestão adicional, os estudos dos impactos elétricos e magnéticos em aeronaves como VANT (veículo aéreo não tripulável) e drones devem ser desenvolvidos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INPE. **ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica.**

Disponível em

<<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/avioes.php>> Acesso em março de 2018.

[2] ANAC. **Anuário do Transporte Aéreo 2016.**

Disponível em <<http://www.anac.gov.br/noticias/2017/anac-apresenta-o-anuario-do-transporte-aereo-2016>> Acesso em março de 2018.

[3] Flight Safety Foundation. **ASN Aviation Safety Database.**

Disponível em <<https://aviation-safety.net/database/>> Acesso em março de 2018.

[4] RINDAT. **Perguntas e Respostas: Definição Descargas Atmosféricas.**

Disponível em <<http://www.rindat.com.br/>> Acesso em abril de 2018.

[5] KINDERMANN, Geraldo. **Descargas atmosféricas.** 2. Ed. Sagra Luzzatto. Porto Alegre, 1997.

[6] VISACRO FILHO, S. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia.** 1. Ed. Artliber Editora Ltda. São Paulo, 2005.

[7] CHEDE, Cezar. Farid. **Manual de Meteorologia Aeronáutica.** ETA Editora Técnica de Aviação LTDA. Rio de Janeiro, 1974.

[8] BLAIR, Thomas A. **Meteorologia.** Editora: Livro Técnico. Rio de Janeiro, 1964.

[9] RIEHL, Herbert. **Meteorologia Tropical.** Editora: Aliança. Rio de Janeiro, 1965.

[10] Tipos de nuvens. Imagem. Disponível em <<http://meteoropole.com.br/2011/10/as-nuvens-possuem-nomes>> Acesso em abril de 2018

[11] INPE. **Descargas atmosféricas.**

Disponível em <<http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/>> Acesso em abril de 2018.

- [12] Tipos de descargas atmosféricas. **Imagem**. Disponível em <<https://nikolateslabrasil.wordpress.com/2018/07/25/raios-de-tempestade-disparam-reacoes-nucleares-no-ceu/>> Acesso em abril de 2018
- [13] SADIKU, MATTHEW N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, Edição 5, 2012.
- [14] Mundo da elétrica. **Descargas atmosféricas**. Disponível em <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-descargas-atmosfericas/>> Acesso em abril de 2018.
- [15] Raios. **Imagem**. Disponível em <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Raio\\_\(meteorologia\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Raio_(meteorologia))> Acesso em abril de 2018.
- [16] INPE. **Estágios de formação**. Disponível em <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/evolucao.php>> Acesso em maio de 2018.
- [17] INPE. **Tempestade**. Disponível em <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php>> Acesso em maio de 2018.
- [18] WIKIPEDIA. **14 BIS**. Disponível em <[https://pt.wikipedia.org/wiki/14-bis#/media/File:14-bis\\_de\\_Alberto\\_Santos\\_Dumont.jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/14-bis#/media/File:14-bis_de_Alberto_Santos_Dumont.jpg)> Acesso em maio de 2018.
- [19] Aeronaves. **Estrutura da aeronave**. Disponível em <[https://www.google.com.br/search?q=componentes+estruturais+de+aeronaves&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiMgs63v9LeAhWGnJAKHdncBCgQ\\_AUIDigB&biw=1366&bih=657#imgrc=HNz0rsf95xfJmM](https://www.google.com.br/search?q=componentes+estruturais+de+aeronaves&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiMgs63v9LeAhWGnJAKHdncBCgQ_AUIDigB&biw=1366&bih=657#imgrc=HNz0rsf95xfJmM)> Acesso em maio de 2018.
- [20] MIDDLETON, D. H. **Composite Materials in Aircraft Structures**, Logman, 1990.
- [21] NIU, M. C. **Airframe Structural Design**, Conmilit Press LTD, California, 1988.
- [22] MATERIAL. **Boeing 787**. Disponível em <<https://aviation.stackexchange.com/questions/35441/why-are-the-leading-edges-on-the-boeing-787-made-from-aluminum>> Acesso em junho de 2018.

[23] DUTRA, Luiz Costa e Silva. **Glossário aerotécnico: inglês-português**. São Paulo: Traço, 1979.

[24] Disponível em

<[https://www.google.com.br/search?q=aeronaves+raios&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjF7srEovfeAhVEH5AKHcT4CysQ\\_AUIDigB&biw=1366&bih=657#imgdii=ghWeiKn9VYfh5M:&imgsrc=SyjRYf78c84WeM:](https://www.google.com.br/search?q=aeronaves+raios&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjF7srEovfeAhVEH5AKHcT4CysQ_AUIDigB&biw=1366&bih=657#imgdii=ghWeiKn9VYfh5M:&imgsrc=SyjRYf78c84WeM:)> Acesso: novembro de 2018.

[25] Disponível em

<[https://www.google.com.br/search?biw=1366&bih=657&tbn=isch&sa=1&ei=SaT-W-GbI8SmwgTpnP6ADA&q=raio+atinge+avi%C3%A3o+na+decolagem&oq=raio+atinge+avi%C3%A3o+na+decolagem&gs\\_l=img.3...97083.101757..101940...0.0..0.158.2207.0j18.....1...1..gws-wiz-img.....35i39j0i24.SCFtZ36gYxU#imgsrc=0ibG7ET2WkNKM:](https://www.google.com.br/search?biw=1366&bih=657&tbn=isch&sa=1&ei=SaT-W-GbI8SmwgTpnP6ADA&q=raio+atinge+avi%C3%A3o+na+decolagem&oq=raio+atinge+avi%C3%A3o+na+decolagem&gs_l=img.3...97083.101757..101940...0.0..0.158.2207.0j18.....1...1..gws-wiz-img.....35i39j0i24.SCFtZ36gYxU#imgsrc=0ibG7ET2WkNKM:)> Acesso: novembro de 2018.

[26] Pesquisa. **Distribuição de raios por altitudes**. Disponível em <[https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012\\_q4/4/](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q4/4/)> Acesso em junho de 2018.

[27] Física. **Campo elétrico**. Disponível em <<http://fisicaidesa3.blogspot.com/2013/03/aula-3-campo-eletrico.html>> Acesso em maio de 2018

[28] Física. **Campo elétrico na nuvem**. Disponível em

<[https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-A-polaridade-do-campo-eletrico-proximo-ao-solo-e-revertida-pela-presenca-de-uma\\_fig4\\_259642168](https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-A-polaridade-do-campo-eletrico-proximo-ao-solo-e-revertida-pela-presenca-de-uma_fig4_259642168)> Acesso em maio de 2018

[29] Hayt Jr, William H.; Buck, John A. **Eletromagnetismo**. 8ª Edição. Livros Técnicos e Científicos, 2003.

[30] FISHER, F. A.; PLUMER, J. A.; PERALA, R. A. **Lightning protection of aircraft**. 1. ed. Pittsfield:Lightning Technologies, 1990.

[31] COOPER, C.E. **Corona – Generated Noise in Aircraft**. Wireless World, November 1966a.

[32] Disponível em <<http://www.cavok.com.br/blog/fogo-de-santelmo/>> Acesso em agosto de 2018.

[33] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Introdução à Eletrostática** (notas de aula). Instituto de Física de São Carlos. São Paulo, 2010.



- [34] Fabmil. **Lightning Strike**. Disponível em <http://www2.fab.mil.br/seripa2/images/previne/26---Previne---Edio-n-26---Lightning-Strike.pdf>> Acesso em: agosto de 2018.
- [35] LIBRANTZ, H.; LIBRANTZ, A. F. L. **Descargas elétricas atmosféricas e suas interações com aeronaves**. Exacta, Sao Paulo, v. 4, n. 2, p. 247-258, jul./dez. 2006.
- [36] LIBRANTZ, H.; RAMBO, C. R.; LIBRANTZ, A. F. H. **Efeitos do impacto dos raios nas aeronaves com estrutura composta de materiais compósitos**. Exacta, Sao Paulo, v. 4, n. 2, p. 259-271, jul./dez. 2006.
- [37] Uol. **Teste proteção contra raios**. Disponível em <https://airway.uol.com.br/embraer-testa-protecao-contra-raios-no-e190-e2/>> Acesso em agosto de 2018.
- [38] HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física. Vol. 3**. 8 ed. Editora LTC, 2009.
- [39] Disponível em <http://pir2.forumeiros.com/t149363-campo-eletrico-nulo-no-interior-do-condutor>> Acesso: novembro de 2018.
- [40] Piflightteoriasdevo2. **Descarregadores estáticos**. Disponível em <https://piflightteoriasdevo2.blogspot.com/2017/10/descarregadores-de-energia-estatica.html>> Acesso em agosto de 2018.
- [41] Disponível em [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012\\_q4/pdfs/AERO\\_2012q4.pdf](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q4/pdfs/AERO_2012q4.pdf)> Acesso: novembro de 2018.
- [42] Raio, Especialistas em Proteção Contra. **EVITAR RISCOS POR TENSÃO DE PASSO E CONTACTO**. *Aplicaciones Tecnológicas*. 01 de Dezembro de 2010. Disponível em <http://tecnicosauambiental.blogspot.com.br/2014/04/tensao-de-contacto-e-tensao-de-passo.html/>> Acesso em: agosto de 2018.
- [43] ABNT. NBR 15751, **Sistema de Aterramento de Subestações – Requisitos**. Disponível em <https://docslide.com.br/documents/nbr-15751-sistema-de-aterramento-de-subestacoes.html>> Acesso em: setembro de 2018.
- [44] Vernon Cooray. **”An Introduction to Lightning”**. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2015
- [45] Disponível em <http://blog.hangar33.com.br/e-se-o-aviao-for-atingido-por-um-raio-o-que-acontece/>> Acesso: novembro de 2018.
- [46] Disponível em <https://www.monolitonimbus.com.br/acidentes-aereos-com-raios/>> Acesso: novembro de 2018.

[47] Disponível em <<https://aviation-safety.net/database/dblist.php?Event=WXL>> Acesso: novembro de 2018.