v7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

EFEITOS DAS DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS DE AERONAVES

EFFECTS OF ATMOSPHERIC ELECTRICAL DISCHARGES ON AIRCRAFT ELECTRICAL AND ELECTRONIC SYSTEMS

EFECTOS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS DE AERONAVES

Edson Aparecido dos Santos[1], Ronaldo Gomes Figueira[2], Fabiana Florian[3]

e798896
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.8896

PUBLICADO: 09/2026

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos das descargas elétricas atmosféricas em aeronaves, com ênfase nos danos e falhas observados nos sistemas elétricos e eletrônicos. A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma abordagem bibliográfica, de caráter exploratório e descritivo, baseada na análise de artigos científicos, trabalhos acadêmicos e normas técnicas relacionadas à proteção aeronáutica contra descargas atmosféricas. Os resultados obtidos a partir da literatura indicam que, embora os impactos diretos dos raios raramente comprometam a integridade estrutural das aeronaves, os efeitos indiretos representam um risco significativo para os sistemas eletrônicos embarcados, podendo ocasionar falhas temporárias, intermitentes ou permanentes. Observou-se também que a crescente complexidade e modernização dos sistemas aeronáuticos amplia a necessidade de estratégias cada vez mais eficazes, demandando o aperfeiçoamento das técnicas de blindagem, equipotencialização e supressão de surtos elétricos. Conclui-se que a aplicação adequada das normas de certificação e das técnicas de proteção elétrica é fundamental para mitigar os efeitos das descargas atmosféricas, independentemente da ocorrência de manifestações imediatamente perceptíveis, garantindo a segurança operacional e a confiabilidade dos sistemas aeronáuticos.

PALAVRAS-CHAVE: Aeronaves. Descargas atmosféricas. Proteção elétrica. Raios. Sistemas elétricos.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effects of atmospheric electrical discharges on aircraft, with emphasis on the damage and failures observed in electrical and electronic systems. The research was developed through a bibliographic approach of an exploratory and descriptive nature, based on the analysis of scientific articles, academic works, and technical standards related to aeronautical protection against atmospheric discharges. The results obtained from the literature indicate that, although the direct impacts of lightning strikes rarely compromise the structural integrity of aircraft, indirect effects pose a significant risk to onboard electronic systems, potentially causing temporary, intermittent, or permanent failures. It was also observed that the increasing complexity and modernization of aeronautical systems heightens the need for increasingly effective protection strategies aimed at improving shielding, bonding, and electrical surge suppression.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (Uniara)/ Araraquara – SP; Técnico em Eletroeletrônica pela Instituição SENAI Santos Dumont/ São José dos Campos-SP.
[2] Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (Uniara)/ Araraquara – SP; Especialista em Sistemas de Energia e especialista em Sistemas de Automação Industrial.
[3] Doutora em Alimentos e Nutrição pela Universidade Júlio de Mesquita Filho – FCFAr/ Araraquara-SP; Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio ambiente pela Universidade de Araraquara (Uniara)/ Araraquara – SP; Graduada em Direito e Economia pela Universidade de Araraquara/ Araraquara-SP.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

It is concluded that the proper application of certification standards and electrical protection techniques is essential to mitigate the effects of atmospheric discharges—whether immediately perceptible or not—thus ensuring operational safety and the reliability of aeronautical systems.

KEYWORDS: *Aircraft. Atmospheric discharges. Electrical protection. Lightning. Electrical systems.*

RESUMEN
Este trabajo tiene como objetivo analizar los efectos de las descargas eléctricas atmosféricas en aeronaves, con énfasis en los daños y fallas observados en los sistemas eléctricos y electrónicos. La investigación se desarrolló mediante un enfoque bibliográfico, de carácter exploratorio y descriptivo, basado en el análisis de artículos científicos, trabajos académicos y normas técnicas relacionadas con la protección aeronáutica contra descargas atmosféricas. Los resultados obtenidos a partir de la literatura indican que, aunque los impactos directos de los rayos rara vez comprometen la integridad estructural de las aeronaves, los efectos indirectos representan un riesgo significativo para los sistemas electrónicos embarcados, pudiendo ocasionar fallas temporales, intermitentes o permanentes. También se observó que la creciente complejidad y modernización de los sistemas aeronáuticos amplía la necesidad de estrategias cada vez más eficaces, orientadas a mejorar los blindajes, la equipotencialización y la supresión de sobretensiones eléctricas. Se concluye que la aplicación adecuada de las normas de certificación y de las técnicas de protección eléctrica es fundamental para mitigar los efectos de las descargas atmosféricas, ya sean perceptibles inmediatamente después de ocurrir o no, garantizando la seguridad operacional y la fiabilidad de los sistemas aeronáuticos.

PALABRAS CLAVE*: Aeronaves. Descargas atmosféricas. Protección eléctrica. Rayos. Sistemas eléctricos.*

INTRODUÇÃO

As descargas elétricas atmosféricas, popularmente conhecidas como raios, são fenômenos naturais caracterizados pela liberação abrupta de grandes quantidades de energia elétrica (RAKOV; UMAN, 2003). Na aviação, as descargas atmosféricas assumem especial relevância, pois as aeronaves operam frequentemente em regiões sujeitas à formação de tempestades e intenso desenvolvimento convectivo, aumentando a probabilidade de interação com esse fenômeno (LIBRANTZ; LIBRANTZ, 2006).

As aeronaves podem ser atingidas por descargas atmosféricas tanto em voo quanto em solo, durante operações de táxi, permanência em pátio e procedimentos de decolagem. Nessas condições, é comum que a aeronave inicie ou intercepte uma descarga elétrica, passando a integrar temporariamente o caminho de condução da corrente elétrica. Embora os projetos aeronáuticos modernos considerem desde sua concepção a ocorrência de impactos de raios, a evolução tecnológica trouxe novos desafios. A crescente dependência de sistemas elétricos e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eletrônicos, com destaque para o sistema *fly-by-wire*, aliada ao uso de materiais compósitos e à elevada integração dos aviônicos, tem exigido soluções cada vez mais eficazes de proteção dos sistemas elétricos, eletrônicos e estruturais da aeronave (FAA, 2011).

Assim, compreender os efeitos das descargas atmosféricas sobre esses sistemas tornou-se uma necessidade permanente para a manutenção dos níveis de segurança exigidos na aviação contemporânea.

O objetivo deste estudo é analisar os efeitos das descargas elétricas atmosféricas em aeronaves, com ênfase nos danos e falhas observados nos sistemas elétricos e eletrônicos embarcados, identificando os mecanismos associados aos efeitos diretos e indiretos dos raios, os principais modos de falha registrados e as práticas normativas adotadas para mitigação desses efeitos.

Embora os impactos diretos de raios raramente resultem em acidentes graves, os efeitos indiretos podem comprometer sistemas críticos e ocasionar falhas em equipamentos eletrônicos embarcados.

Diante desse cenário, busca-se responder à seguinte questão de pesquisa: como as descargas elétricas atmosféricas afetam os sistemas elétricos e eletrônicos das aeronaves modernas e quais são os principais danos e falhas associados a esses eventos?

Parte-se da premissa de que a crescente complexidade dos sistemas embarcados aumenta a sensibilidade a surtos eletromagnéticos induzidos, mesmo na ausência de danos estruturais visíveis, uma vez que a substituição de sistemas eletromecânicos por sistemas eletrônicos eleva a suscetibilidade aos efeitos indiretos das descargas atmosféricas (RTCA, 2010; FAA, 2011).

Quanto aos procedimentos metodológicos, esta pesquisa caracteriza-se como bibliográfica, de natureza exploratória e descritiva, fundamentada na análise de artigos científicos, normas técnicas, documentos regulatórios e publicações especializadas relacionadas à proteção de aeronaves contra descargas atmosféricas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Descargas elétricas atmosféricas

As descargas elétricas atmosféricas têm sido estudadas desde os primeiros anos da aviação, principalmente em razão do impacto potencial desses fenômenos sobre a segurança de voo. Os raios caracterizam-se por descargas elétricas de elevada intensidade, com correntes que podem atingir centenas de quiloampères e apresentar tempos de subida extremamente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

rápidos. Quando uma aeronave opera em regiões de instabilidade atmosférica, especialmente na presença de nuvens do tipo cumulonimbus, associadas à convecção profunda e à ocorrência de tempestades, descargas atmosféricas, granizo e rajadas intensas, torna-se suscetível à iniciação ou interceptação de uma descarga elétrica, passando a integrar temporariamente o trajeto de condução da corrente (LIBRANTZ; LIBRANTZ, 2006).

A interação entre a descarga atmosférica e a aeronave ocorre em intervalos de tempo muito curtos, geralmente da ordem de microssegundos a milissegundos. Apesar disso, os efeitos associados podem ser relevantes, tanto do ponto de vista estrutural quanto no comportamento dos sistemas elétricos e eletrônicos embarcados. Estudos indicam que a maioria das aeronaves comerciais é atingida por ao menos uma descarga atmosférica ao longo de sua vida operacional, o que reforça a necessidade de compreender e mitigar adequadamente esses efeitos (MOURA, 2018).

Danos estruturais

Historicamente, as aeronaves possuíam estruturas predominantemente metálicas, o que favorecia a condução da corrente elétrica ao longo da superfície externa da fuselagem. Esse comportamento fundamenta o conceito de gaiola de Faraday, amplamente citado na literatura aeronáutica, segundo o qual a corrente do raio tende a se distribuir externamente, reduzindo a exposição dos sistemas internos. Ainda assim, mesmo nessas aeronaves, foram observados danos localizados, como erosão superficial, degradação de antenas e falhas pontuais em componentes elétricos externos. Esses danos estão normalmente associados aos pontos de entrada e saída da descarga, onde ocorre maior concentração de corrente elétrica e energia térmica.

Em aeronaves metálicas, a elevada condutividade elétrica contribui para a dissipação eficiente da energia do raio, porém não elimina completamente os riscos de danos localizados. Assim, medidas adicionais de proteção, como reforço estrutural em regiões críticas, tratamento de superfícies condutivas e utilização de dispositivos específicos para condução de corrente, são aplicadas com o objetivo de minimizar os efeitos diretos das descargas atmosféricas.

Efeitos diretos e indiretos das descargas atmosféricas

Com a evolução tecnológica, o cenário tornou-se progressivamente mais complexo. A introdução de aviônicos digitais, sistemas fly-by-wire e arquiteturas altamente integradas aumentou a sensibilidade das aeronaves aos efeitos indiretos das descargas atmosféricas. Esses efeitos estão relacionados, principalmente, à indução de surtos de tensão e corrente em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

cabos, chicotes elétricos e interfaces de equipamentos, resultantes dos intensos campos eletromagnéticos associados ao fenômeno do raio (SAE INTERNATIONAL, 2013). Diferentemente dos efeitos diretos, os efeitos indiretos podem provocar falhas funcionais sem deixar evidências físicas imediatas.

A literatura técnica classifica os efeitos das descargas atmosféricas em dois grupos principais: efeitos diretos e efeitos indiretos. Os efeitos diretos decorrem da passagem da corrente elétrica pela estrutura da aeronave e podem resultar em perfurações, aquecimento localizado, fusão de materiais e danos em sensores e antenas. Já os efeitos indiretos estão associados às perturbações eletromagnéticas induzidas nos sistemas elétricos e eletrônicos, capazes de comprometer o desempenho ou a integridade de equipamentos sensíveis (FAA, 2011).

No que se refere aos efeitos diretos, nota-se que as regiões mais suscetíveis ao impacto inicial e à saída da corrente elétrica são as extremidades da aeronave, como o nariz, as pontas das asas e os estabilizadores. Nessas áreas, a densidade de corrente tende a ser mais elevada, o que pode ocasionar danos estruturais localizados. Em aeronaves fabricadas com materiais compósitos, como fibra de carbono, esses efeitos tornam-se mais críticos devido à menor condutividade elétrica desses materiais em comparação aos metais tradicionais.

A crescente utilização de materiais compósitos na estrutura primária das aeronaves trouxe benefícios relevantes em termos de redução de peso e eficiência estrutural. Contudo, do ponto de vista da proteção contra descargas atmosféricas, esses materiais exigem a adoção de soluções adicionais, como malhas metálicas incorporadas, fitas condutoras e revestimentos específicos. A literatura destaca que a ausência ou a aplicação inadequada desses recursos pode resultar em danos mais severos, incluindo delaminações e degradação do material estrutural.

Os efeitos indiretos das descargas atmosféricas assumem papel central nas aeronaves modernas, dada a elevada dependência dos sistemas eletrônicos para a operação segura. Sistemas de navegação, comunicação, controle de voo e monitoramento são particularmente sensíveis a surtos eletromagnéticos, podendo apresentar falhas temporárias, como reinicializações inesperadas, ou falhas permanentes decorrentes da queima de componentes eletrônicos (RTCA, 2010).

Relatos técnicos indicam que, embora eventos associados a descargas atmosféricas raramente resultem em acidentes catastróficos, podem comprometer a continuidade operacional e aumentar a carga de trabalho da tripulação. Em determinadas situações, falhas temporárias

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

em sistemas críticos exigem a adoção de procedimentos de contingência, como o retorno ao aeroporto de origem, acarretando impactos operacionais e econômicos relevantes.

Fatores que aumentam a sensibilidade a surtos eletromagnéticos

O uso extensivo de materiais compósitos, como o CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), que apresentam menor condutividade elétrica em relação ao alumínio, reduz a eficiência da blindagem natural do tipo gaiola de Faraday. Além disso, em estruturas compostas, campos eletromagnéticos associados a descargas atmosféricas podem penetrar com maior facilidade e acoplar-se aos sistemas internos. Adicionalmente, a elevada densidade de cabeamento, arquiteturas digitais integradas, descontinuidades estruturais e a miniaturização eletrônica contribuem para o aumento da suscetibilidade a surtos eletromagnéticos induzidos, mesmo na ausência de danos estruturais visíveis. Esses efeitos podem resultar em falhas de natureza transitória, intermitente ou latente, comprometendo a confiabilidade operacional dos sistemas embarcados (NASA, 2020; YANG; WEI; SHI, 2024).

Normas técnicas para proteção contra descargas atmosféricas

Com o objetivo de reduzir esses riscos, foram desenvolvidas normas técnicas específicas voltadas à proteção contra descargas atmosféricas. As práticas recomendadas da SAE estabelecem os parâmetros fundamentais para análise dos efeitos de raios em aeronaves: a SAE ARP 5412 define o ambiente de descargas e as formas de onda de ensaio, enquanto a SAE ARP 5414 trata da determinação das zonas de impacto de raios, fornecendo subsídios essenciais para o projeto e a certificação de sistemas aeronáuticos (SAE INTERNATIONAL, 2013; SAE INTERNATIONAL, 2018).

Complementarmente, as circulares consultivas emitidas por autoridades certificadoras estabelecem diretrizes para a verificação da robustez dos sistemas elétricos e eletrônicos frente aos efeitos diretos e indiretos das descargas atmosféricas. Esses documentos enfatizam a necessidade de ensaios representativos e da aplicação integrada de técnicas de blindagem, *bonding*, segregação de sistemas e supressão de surtos elétricos.

Dessa forma, a revisão bibliográfica evidencia que a proteção contra descargas atmosféricas deve ser tratada como parte integrante do projeto aeronáutico. A compreensão dos mecanismos de dano e falha, aliada à aplicação rigorosa das normas técnicas, constitui fator essencial para a manutenção da segurança e da confiabilidade das aeronaves modernas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica de natureza exploratória e descritiva, desenvolvida por meio de revisão narrativa da literatura. A escolha dessa modalidade de revisão fundamenta-se na necessidade de reunir, analisar e discutir conhecimentos científicos, normativos e técnicos provenientes de diferentes fontes, permitindo uma compreensão abrangente dos efeitos das descargas atmosféricas em aeronaves e das estratégias de proteção empregadas pela indústria aeronáutica.

O objetivo deste estudo foi identificar e analisar os principais efeitos das descargas atmosféricas em aeronaves, com ênfase nos impactos sobre sistemas elétricos e eletrônicos embarcados, bem como nas estratégias de proteção adotadas pela indústria aeronáutica.

A busca bibliográfica foi realizada entre janeiro e maio de 2026 nas bases de dados Scopus, ScienceDirect e Google Scholar, complementada pela consulta a documentos técnicos e normativos emitidos por organismos reconhecidos internacionalmente, incluindo Federal Aviation Administration (FAA), SAE International, RTCA e National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Foram utilizados os seguintes descritores em língua inglesa: *aircraft lightning protection*, *lightning strike aircraft*, *lightning indirect effects*, *lightning zoning aircraft*, *electromagnetic compatibility in aircraft*, *aircraft electromagnetic interference*, *composite aircraft lightning protection* e *lightning effects on avionics*. Em língua portuguesa, foram empregados os descritores: *proteção contra raios em aeronaves*, *efeitos indiretos de descargas atmosféricas*, *compatibilidade eletromagnética em aeronaves*, *descargas atmosféricas em aeronaves* e *proteção elétrica aeronáutica*.

Foram considerados documentos publicados entre 2003 e 2025. A definição desse recorte temporal justifica-se pela necessidade de contemplar publicações que acompanham a crescente utilização de sistemas aviônicos digitais, arquiteturas *fly-by-wire*, materiais compósitos avançados e atualizações relevantes das normas de certificação relacionadas à proteção contra descargas atmosféricas.

Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos científicos, trabalhos acadêmicos, livros, normas técnicas e documentos regulatórios publicados em português ou inglês, disponíveis integralmente e que abordassem diretamente os efeitos das descargas atmosféricas sobre aeronaves, sistemas elétricos, sistemas eletrônicos embarcados, compatibilidade eletromagnética ou métodos de proteção contra raios.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Foram adotados como critérios de exclusão documentos duplicados, publicações sem acesso ao texto completo, estudos voltados exclusivamente para instalações terrestres, sistemas elétricos não aeronáuticos ou fenômenos atmosféricos sem relação com a aviação, além de materiais sem conteúdo técnico ou científico relevante para os objetivos da pesquisa.

A busca inicial resultou em 42 documentos. Após a eliminação de registros duplicados e a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 18 documentos para compor o corpus de análise da pesquisa, incluindo artigos científicos, normas técnicas, manuais regulatórios e publicações especializadas.

Os documentos selecionados foram submetidos à análise qualitativa de conteúdo, buscando identificar:

- mecanismos de interação entre descargas atmosféricas e aeronaves;
- efeitos diretos e indiretos dos raios;
- falhas registradas em sistemas elétricos e eletrônicos embarcados;
- influência dos materiais compósitos na suscetibilidade aos efeitos eletromagnéticos;
- métodos de proteção empregados pela indústria aeronáutica;
- requisitos normativos aplicáveis ao processo de certificação.

Os resultados foram organizados por categorias temáticas e comparados entre diferentes tecnologias construtivas, especialmente aeronaves de estrutura metálica e aeronaves com elevada utilização de materiais compósitos, permitindo identificar tendências, vulnerabilidades e estratégias de mitigação descritas na literatura especializada.

Por tratar-se de uma revisão narrativa, os resultados apresentados refletem a interpretação crítica da literatura selecionada, não tendo como finalidade o estabelecimento de relações quantitativas ou estatísticas entre os estudos analisados.

Como limitação metodológica, destaca-se que os resultados desta pesquisa foram obtidos exclusivamente a partir da análise qualitativa da literatura científica, técnica e normativa selecionada, não contemplando a realização de ensaios experimentais, simulações computacionais ou medições em sistemas aeronáuticos. Dessa forma, as conclusões apresentadas refletem as evidências disponíveis nas fontes consultadas. Estudos futuros poderão complementar esta abordagem por meio de investigações experimentais voltadas à avaliação dos efeitos indiretos de descargas atmosféricas em sistemas elétricos e eletrônicos de aeronaves modernas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise das zonas de impacto de raios

As zonas de raio classificam as diferentes regiões da aeronave de acordo com a probabilidade de impacto e a intensidade dos efeitos eletromagnéticos associados. Conforme estabelecido na norma SAE ARP 5414 – *Aircraft Lightning Zoning*, a aeronave é dividida em zonas específicas que consideram tanto a probabilidade de ocorrência de impacto quanto o tipo de interação do raio com a estrutura. Dentre essas zonas, destacam-se 1A, 1B, 1C, 2A, 2B e 3. Essas zonas diferem quanto à probabilidade de incidência e permanência do canal de descarga sobre a estrutura. Na literatura técnica, as regiões associadas às zonas 2B e 3 são frequentemente analisadas sob a perspectiva dos efeitos indiretos, em razão dos campos eletromagnéticos gerados pela circulação da corrente elétrica na aeronave.

A norma divide a aeronave com base na forma como o raio interage com sua estrutura, conforme descrito a seguir:

Zona 1: regiões onde o raio entra ou sai da aeronave (pontos de fixação);

Zona 2: regiões onde o raio percorre (*sweep*) a superfície externa da aeronave;

Zona 3: regiões com menor exposição ao impacto direto, porém sujeitas a efeitos indiretos significativos (SAE INTERNATIONAL, 2018).

Os principais pontos de entrada e saída do raio localizam-se, tipicamente, nas seguintes regiões:

- nariz (radome);
- pontas das asas;
- ponta da empenagem (estabilizador vertical e horizontal).

As regiões mais suscetíveis ao início do impacto do raio estão associadas às zonas de fixação, especialmente nas extremidades da aeronave. Após o ponto de entrada, o canal de descarga tende a se deslocar ao longo da superfície, atingindo regiões classificadas como Zona 2A. Essas áreas estão localizadas ao longo do bordo de ataque das asas e da fuselagem frontal, onde o raio já começa a percorrer a estrutura da aeronave.

Zonas críticas para efeitos indiretos

A Zona 2B compreende regiões da aeronave sujeitas à varredura da descarga atmosférica, nas quais o canal do raio pode permanecer ativo por um intervalo de tempo mais prolongado, conduzindo corrente elétrica ao longo da superfície da estrutura. Fisicamente, essa zona está frequentemente associada às seguintes regiões:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

- fuselagem lateral (ao longo do corpo da aeronave);
- superfícies médias das asas (excluindo as pontas);
- partes superior e inferior da fuselagem.

Nessas áreas, a descarga atmosférica pode percorrer a superfície da aeronave de forma contínua, caracterizando um processo de varredura (*sweep*). Como consequência, podem ser gerados campos eletromagnéticos intensos capazes de induzir tensões e correntes transitórias em condutores, chicotes elétricos e sistemas aviônicos.

A Zona 3 corresponde às regiões com baixa probabilidade de fixação direta (*attachment*) do canal do raio. De acordo com a classificação da SAE ARP 5414, essas áreas incluem superfícies que não pertencem às zonas 1 e 2, bem como partes da aeronave responsáveis por conduzir corrente elétrica entre pontos de conexão da descarga.

Embora a ocorrência de impacto direto seja improvável nessas regiões, a circulação da corrente elétrica pela estrutura pode gerar campos eletromagnéticos internos significativos. Por esse motivo, a Zona 3 é frequentemente considerada em estudos relativos aos efeitos indiretos das descargas atmosféricas, especialmente no que se refere à suscetibilidade de sistemas elétricos e eletrônicos embarcados a tensões e correntes induzidas.

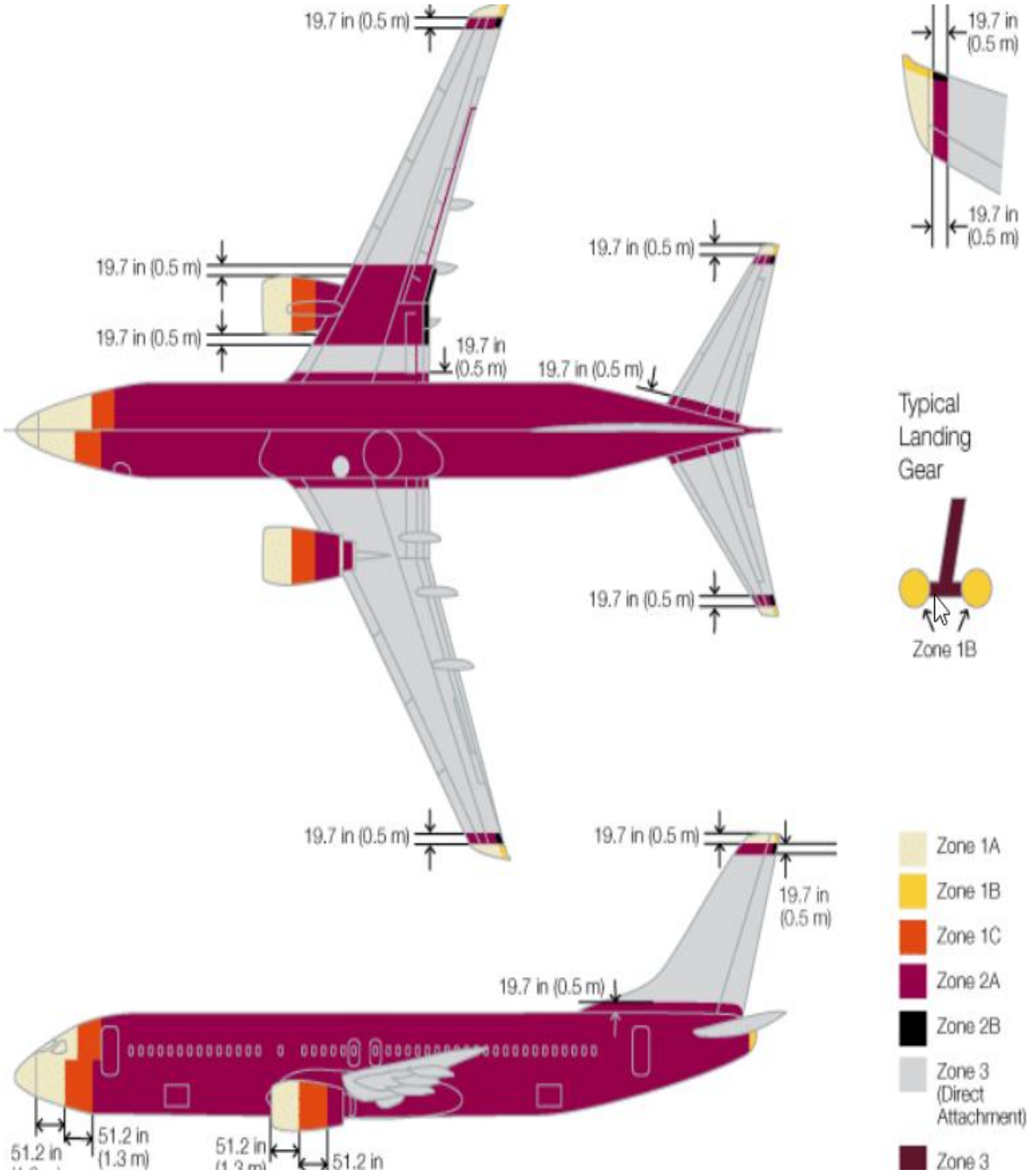
A classificação das zonas de raio adotada neste trabalho segue os critérios estabelecidos pela SAE ARP 5414, que consideram a probabilidade de fixação, o tempo de permanência do canal de descarga e o modo de interação do raio com a aeronave. Dessa forma, as zonas não representam níveis de severidade, mas categorias utilizadas para fins de projeto, ensaio e certificação aeronáutica.

A seguir, a Figura 1 ilustra as zonas de impacto de raios em aeronaves e suas respectivas localizações na estrutura.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 1. Zonas de impacto de raios em aeronaves



Fonte: Mainblades (2023).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A Tabela 1 detalha as definições das diferentes zonas de proteção contra descargas atmosféricas, as quais estão diretamente correlacionadas com a Figura 1, que ilustra a distribuição das zonas de incidência de descargas atmosféricas em aeronaves. Essa classificação segue os critérios estabelecidos pela norma SAE ARP 5414, sendo fundamental para a análise dos efeitos diretos e indiretos do impacto de raios na estrutura e nos sistemas aeronáuticos.

Tabela 1. Descrição das zonas de proteção contra raios em aeronaves

Zonas	Descrição	Definição
1A.	Zona de primeiro retorno de impacto.	Todas as áreas das superfícies da aeronave onde um primeiro retorno é provável durante a formação do canal de raios, com baixa expectativa do raio permanecer ativo.
1B.	Zona de primeiro retorno de impacto com longa permanência.	Todas as áreas das superfícies da aeronave onde um primeiro retorno é provável durante a formação do canal de raios, longa duração e baixa expectativa do raio permanecer ativo.
1C.	Zona de transição do primeiro retorno de impacto.	Todas as áreas das superfícies da aeronave onde é provável que ocorra um primeiro retorno de descarga de amplitude reduzida durante a penetração do raio no canal, com baixa expectativa do raio permanecer ativo.
2A.	Zona de varredura de impacto.	Todas as áreas das superfícies da aeronave onde é provável que ocorra um primeiro retorno de descarga de amplitude reduzida durante a penetração do raio no canal, com média expectativa do raio permanecer ativo.
2B.	Zona de varredura de impacto com longa permanência.	Todas as áreas da superfície da aeronave que forem atingidas por um raio e, consequentemente, por uma descarga subsequente, provavelmente serão varridas, com alta probabilidade de o raio permanecer ativo.
3.	Zonas de impactos diferentes das zonas 1 e 2.	Todas as superfícies que não estão nas Zonas 1A, 1B, 1C, 2A ou 2B, onde qualquer conexão do canal do raio é improvável, e aquelas partes da aeronave que ficam abaixo ou entre as outras zonas e/ou conduzem uma quantidade substancial de corrente elétrica entre os pontos de conexão de descargas diretas ou varridas.

Fonte: Adaptado da SAE ARP 5414 (SAE INTERNATIONAL, 2018).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Mecanismos de acoplamento eletromagnético

Os surtos eletromagnéticos induzidos em sistemas aeronáuticos são explicados por diferentes mecanismos de acoplamento eletromagnético, principalmente os acoplamentos indutivo, capacitivo e conduzido, os quais descrevem a forma como a energia associada a uma descarga atmosférica interage com cabos, estruturas e equipamentos internos da aeronave.

Além desses, outros mecanismos também contribuem para a propagação de interferências, como o acoplamento radiado, decorrente da incidência direta de campos eletromagnéticos intensos, e o acoplamento por impedância comum, associado a diferenças de potencial em sistemas de *bonding* compartilhados.

No caso do acoplamento indutivo, os campos magnéticos gerados pelas elevadas correntes associadas às descargas atmosféricas podem induzir tensões transitórias em cabos e circuitos próximos, mesmo sem contato elétrico direto com a descarga. De forma semelhante, o acoplamento capacitivo ocorre devido à variação dos campos elétricos produzidos pelo raio, capazes de transferir energia para condutores adjacentes. Já o acoplamento conduzido está associado à propagação de correntes e sobretensões por caminhos condutivos conectados aos sistemas da aeronave.

Observa-se que as descargas atmosféricas apresentam correntes de elevada intensidade e tempos de subida extremamente reduzidos, produzindo altas taxas de variação de corrente e intensos campos eletromagnéticos. Como consequência, podem ser induzidas sobretensões significativas em cabos, chicotes elétricos e equipamentos eletrônicos, mesmo sem contato direto entre a descarga e os sistemas embarcados. Esse fenômeno constitui um dos principais mecanismos responsáveis pelos efeitos indiretos dos raios em aeronaves modernas (RTCA, 2010; FAA, 2011).

De forma geral, os mecanismos de acoplamento indutivo, capacitivo, conduzido, radiado e por impedância comum podem atuar simultaneamente, resultando na geração de sobretensões e correntes transitórias nos sistemas elétricos e eletrônicos. Tais efeitos podem comprometer o funcionamento dos sistemas embarcados, ocasionando falhas funcionais, degradação de desempenho e comportamentos anômalos, frequentemente sem evidência física imediata de dano estrutural, o que representa um desafio significativo para a confiabilidade e certificação de sistemas aeronáuticos (RTCA, 2010; FAA, 2011).

Nesse contexto, a análise desses fenômenos torna-se fundamental para a correta aplicação dos ensaios definidos na RTCA DO-160, especialmente na Seção 22, os quais simulam diferentes formas de acoplamento eletromagnético associadas aos efeitos indiretos das descargas atmosféricas (RTCA, 2010).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Efeitos indiretos e falhas funcionais

Os efeitos indiretos de descargas atmosféricas representam o principal risco para aeronaves modernas, especialmente no que se refere à confiabilidade dos sistemas eletrônicos embarcados. Diferentemente dos efeitos diretos, que provocam danos físicos visíveis na estrutura, os efeitos indiretos estão associados à indução de tensões e correntes transitórias nos sistemas elétricos e eletrônicos da aeronave.

Esses efeitos são resultantes dos mecanismos de acoplamento eletromagnético, responsáveis pela transferência de energia proveniente da descarga atmosférica para o interior da aeronave. Como consequência, podem surgir sobretensões nos circuitos, interferências em sinais e distúrbios no funcionamento dos equipamentos.

Entre as principais manifestações desses efeitos, destacam-se o reset de sistemas, falhas intermitentes, perda momentânea de funcionalidades e comportamentos anômalos em sistemas aviônicos. Em muitos casos, tais ocorrências são classificadas como *No Fault Found* (NFF), uma vez que não apresentam evidências físicas de dano após inspeção, dificultando significativamente os processos de diagnóstico e manutenção.

A ocorrência de eventos NFF está diretamente associada à natureza transitória e de curta duração dos surtos eletromagnéticos, os quais podem afetar temporariamente o funcionamento dos sistemas sem provocar degradação permanente dos componentes. Dessa forma, a avaliação dos efeitos indiretos torna-se um dos principais desafios no processo de certificação aeronáutica, sendo tratada por normas como a RTCA DO-160, que estabelece ensaios específicos para garantir a imunidade e a robustez dos sistemas embarcados frente a esses fenômenos.

Relação com certificação aeronáutica

Normas como RTCA DO-160, SAE ARP 5412/5414 e FAA AC 20-136 estabelecem ensaios e critérios para garantir imunidade eletromagnética. Essas normas partem do princípio de que a ausência de dano físico não implica ausência de falhas funcionais.

Tais normas são amplamente adotadas pela indústria aeronáutica mundial e constituem requisitos fundamentais para certificação. No Brasil, a Embraer S.A. também adota essas diretrizes nos processos de certificação de novas aeronaves.

Durante o desenvolvimento de aeronaves, são realizados ensaios específicos destinados à avaliação dos efeitos provocados pelo impacto de raios. Entre esses ensaios, destaca-se o *Lightning Test*, também conhecido como ensaio de efeitos diretos e indiretos de descargas atmosféricas. Esses testes têm como objetivo verificar a capacidade da estrutura e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dos sistemas embarcados de suportar e conduzir correntes elétricas sem ocorrência de falhas funcionais.

Para a realização desses ensaios, são aplicadas descargas elétricas controladas sobre a estrutura da aeronave, simulando condições reais de incidência de raios em voo. As correntes elétricas são conduzidas ao longo da fuselagem e medidas em pontos estratégicos de entrada e saída, permitindo avaliar o comportamento da estrutura diante dessas solicitações elétricas.

Além disso, são analisados os efeitos de indução eletromagnética nos sistemas elétricos e eletrônicos, com o objetivo de verificar a integridade dos circuitos e a continuidade de operação dos sistemas críticos, assegurando o atendimento aos requisitos de segurança e confiabilidade exigidos pelas normas de certificação.

As Figuras 2 e 3 mostram um ensaio de descarga elétrica, conhecido como *Lightning Test*. Esse tipo de teste é obrigatório no processo de certificação, sendo utilizado para avaliar os efeitos diretos e indiretos do impacto de raios na estrutura e nos sistemas da aeronave.

Figura 2. Ensaio de descarga elétrica no radome e na cabine de pilotagem



Fonte**:** Vinholes (2016).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Ensaio de descarga elétrica no motor, na semi-asa esquerda e na deriva



Fonte: Vinholes (2016).

Análise comparativa de aeronaves

Aeronaves metálicas, como o A320, apresentam maior proteção estrutural e menor exposição interna. Por funcionarem como uma gaiola de Faraday e possuírem alta condutividade elétrica, a corrente produzida pela descarga do raio flui pela superfície externa da fuselagem, de modo que o campo eletromagnético interno é bastante atenuado. Com isso, observa-se menor indução em cabos internos, menor sensibilidade à interferência eletromagnética (EMI) e predomínio de efeitos conduzidos.

Aeronaves compósitas, como B787 e A350, apresentam maior suscetibilidade aos efeitos indiretos das descargas atmosféricas, especialmente nas zonas 2B e 3, onde os campos eletromagnéticos gerados pela passagem da corrente elétrica podem induzir tensões e correntes transitórias nos sistemas embarcados. Diferentemente das aeronaves metálicas, cujas estruturas atuam de forma eficiente como uma gaiola de Faraday, os materiais compósitos apresentam menor condutividade elétrica, reduzindo a capacidade natural de blindagem eletromagnética e dificultando a distribuição uniforme da corrente ao longo da estrutura.

Estudos comparativos demonstram que estruturas compósitas estão mais sujeitas aos fenômenos de acoplamento eletromagnético, principalmente em regiões que apresentam interfaces metal-compósito, descontinuidades estruturais e elevada concentração de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

cabeamento elétrico. Nessas condições, parte da energia associada à descarga atmosférica pode penetrar com maior facilidade na aeronave e acoplar-se aos sistemas internos, aumentando a probabilidade de sobretensões, interferências eletromagnéticas e falhas funcionais em equipamentos aviônicos (MOUPFOUMA; KLIM; SKOREK, 2013).

Ensaios experimentais e estudos recentes também indicam que a utilização de malhas metálicas condutivas, blindagens de cabos, técnicas adequadas de bonding e sistemas de equipotencialização são fundamentais para reduzir as tensões induzidas e aumentar a imunidade dos sistemas eletrônicos aos efeitos indiretos dos raios (PARMANTIER; ISSAC; GOBIN, 2012; YANG; WEI; SHI, 2024).

A crescente utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica moderna reflete a busca por redução de peso e aumento de eficiência estrutural. No entanto, também evidencia os desafios relacionados à baixa condutividade elétrica desses materiais, o que impacta diretamente nas estratégias de proteção contra descargas atmosféricas e na mitigação dos efeitos eletromagnéticos induzidos na aeronave.

Quando um raio atinge uma aeronave, do ponto de vista físico ocorre que:

Em estruturas metálicas, a corrente percorre a superfície até sair e ocorre um pequeno campo magnético interno.

Em estruturas compósitas, a corrente elétrica não se distribui uniformemente ao longo da superfície. Parte dessa corrente percorre caminhos preferenciais, encontrando diferentes impedâncias e gerando campos eletromagnéticos mais intensos. Como consequência, podem ocorrer tensões induzidas em cabos, correntes parasitas e falhas em sistemas aviônicos.

Algumas interfaces estruturais apresentam maior criticidade sob a ação de descargas atmosféricas, especialmente junções metal–compósito, conexões estruturais e elementos de fixação. Nessas regiões, as descontinuidades elétricas favorecem a concentração do fluxo de corrente, resultando em aquecimento localizado e possível formação de arcos elétricos. Esses fenômenos podem gerar fontes de ignição, representando um risco significativo para a integridade estrutural e para a segurança dos sistemas aeronáuticos (DU *et al.*, 2025).

Estratégias empregadas pela indústria aeronáutica para mitigação dos efeitos das descargas atmosféricas

Em função da menor condutividade elétrica dos materiais compósitos, a indústria aeronáutica adota diversas estratégias para garantir a condução segura das correntes de descarga atmosférica e a redução dos efeitos eletromagnéticos induzidos nos sistemas embarcados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Dentre as principais soluções empregadas em aeronaves compósitas, destacam-se:

- malha metálica (*copper mesh*) incorporada ao revestimento externo da estrutura;
- tiras condutoras (*lightning diverter strips*), utilizadas para direcionar o fluxo da corrente elétrica ao longo da superfície da aeronave;
- sistemas de *bonding* elétrico entre estruturas, assegurando continuidade elétrica entre diferentes partes da fuselagem;
- dispositivos de proteção contra interferência eletromagnética (EMI) aplicados em cabos e equipamentos;
- blindagem de chicotes elétricos, reduzindo o acoplamento eletromagnético e a indução de correntes indesejadas;
- pontos de captação de descargas (*lightning receptors*), utilizados para controlar os locais de incidência do raio;
- revestimentos condutivos e tratamentos superficiais, visando melhorar a dissipação de corrente elétrica na estrutura;
- proteção e tratamento de interfaces estruturais, como juntas e conexões entre materiais diferentes;
- sistemas de bonding e equipotencialização, responsáveis por garantir caminhos controlados de condução elétrica;
- dispositivos de supressão de surtos e filtragem, aplicados na proteção de sistemas eletrônicos sensíveis;
- estratégias de roteamento e segregação de cabos, minimizando o acoplamento eletromagnético;
- emprego de redundâncias em sistemas críticos, aumentando a tolerância a falhas.

Com o objetivo de sintetizar as principais diferenças entre aeronaves metálicas e aeronaves compósitas sob o ponto de vista da proteção contra descargas atmosféricas, a Tabela 2 apresenta uma comparação das características que influenciam a propagação da corrente elétrica e a suscetibilidade aos efeitos indiretos dos raios.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Comparação entre aeronaves com estruturas metálicas e com estruturas compósitas quanto aos efeitos de descargas atmosféricas

Características	**Estrutura Metálica**	**Estrutura Compósita**
Condutividade Elétrica	Alta	Baixa
Blindagem eletromagnética (EMI)	Elevada	Menor
Campo eletromagnético interno	Reduzido	Mais intenso
Acoplamento eletromagnético em cabos	Menor	Maior
Suscetibilidade aos efeitos indiretos	Menor	Maior

Fonte: Adaptado de MOUPFOUMA; KLIM; SKOREK (2013) e YANG; WEI; SHI (2024).

Conforme apresentado na Tabela 2, as aeronaves compósitas apresentam menor condutividade elétrica e menor capacidade de blindagem eletromagnética quando comparadas às aeronaves metálicas. Como consequência, os campos eletromagnéticos gerados pela passagem da corrente do raio tendem a penetrar com maior facilidade na estrutura, aumentando os fenômenos de acoplamento eletromagnético e a indução de tensões em cabos e equipamentos eletrônicos embarcados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos a partir da revisão bibliográfica demonstraram que as descargas atmosféricas continuam representando um importante desafio para a engenharia aeronáutica, especialmente em relação aos efeitos indiretos sobre sistemas elétricos e eletrônicos embarcados.

Observou-se que, embora aeronaves modernas possuam elevada capacidade de suportar impactos diretos de raios sem comprometimento estrutural significativo, a crescente dependência de sistemas eletrônicos e de controle digital aumenta a vulnerabilidade aos surtos eletromagnéticos induzidos.

Verificou-se, ainda, que a crescente adoção de materiais compósitos nas estruturas aeronáuticas, apesar dos ganhos expressivos em redução de peso e desempenho estrutural, passou a requerer medidas complementares de proteção contra descargas atmosféricas, tais como malhas metálicas condutivas, sistemas de *bonding* e equipotencialização, blindagem eletromagnética de cabos e equipamentos, além de dispositivos de supressão de surtos destinados à mitigação dos efeitos eletromagnéticos induzidos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As normas SAE ARP 5412, SAE ARP 5414 e RTCA DO-160 desempenham papel fundamental na certificação aeronáutica, assegurando que os sistemas embarcados mantenham níveis adequados de segurança e confiabilidade frente aos efeitos das descargas atmosféricas.

Como limitação, destaca-se que os resultados desta pesquisa decorrem exclusivamente de revisão bibliográfica qualitativa, não incluindo ensaios experimentais próprios. Estudos futuros poderão realizar avaliações experimentais dos efeitos indiretos de descargas atmosféricas em sistemas aeronáuticos modernos, especialmente em aeronaves com elevada utilização de materiais compósitos.

Conclui-se que a mitigação dos efeitos indiretos dos raios constitui atualmente um dos principais desafios da proteção aeronáutica, demandando constante evolução tecnológica e aperfeiçoamento dos métodos de proteção empregados pela indústria.

REFERÊNCIAS

DU, K.; KANG, R.; LIU, Y.; LI, S.; SUN, J.; YAO, X. Thermoelectric and Ignition Effects of Lightning Strikes on Composite-Metal Lap Joints. Aerospace, Basel, v. 12, n. 11, p. 964, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/aerospace12110964. Disponível em: https://www.mdpi.com/2226-4310/12/11/964. Acesso em: 31 maio 2026.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Aircraft electrical and electronic system lightning protection. Advisory Circular AC 20-136B. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2011. Disponível em: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentid/1019488. Acesso em: 20 abr. 2026.

LIBRANTZ, H.; LIBRANTZ, A. F. H. Descargas elétricas atmosféricas e suas interações com aeronaves. Exacta, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 247-258, 2006. DOI: https://doi.org/10.5585/exacta.v4i2.753.

MAINBLADES. The direct effects of lightning strikes on an aircraft by zones. Mainblades, 2023. Disponível em: https://www.mainblades.com/blog-posts/the-direct-effects-of-lightning-strikes-on-an-aircraft-by-zones. Acesso em: 31 maio 2026.

MOUPFOUMA, F.; KLIM, Z.; SKOREK, A. Electromagnetic protection hazards on composite versus metallic aircraft. SAE International Journal of Aerospace, Warrendale, v. 6, n. 2, p. 441-446, 2013. DOI: https://doi.org/10.4271/2013-01-2157. Disponível em: https://saemobilus.sae.org/articles/electromagnetic-protection-hazards-composite-versus-metallic-aircraft-2013-01-2157. Acesso em: 31 maio 2026.

MOURA, L. H. de. Estudo de interferências e danos causados por descargas atmosféricas em aeronaves. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NASA. Lightning Strikes on Composite Aircraft. NASA Research, 2020. Disponível em: https://c3.ndc.nasa.gov/dashlink/projects/25/quick_view/. Acesso em: 31 maio 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

PARMANTIER, J.-P.; ISSAC, F.; GOBIN, V. Indirect effects of lightning on aircraft and rotorcraft. AerospaceLab Journal, [s. l.], n. 5, p. 1-23, 2012. Disponível em: https://aerospacelab.onera.fr/sites/default/files/2024-01/AL05-10.pdf. Acesso em: 31 maio 2026.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

RTCA. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. DO-160. Washington, DC: RTCA, 2010.

SAE INTERNATIONAL. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. ARP 5412. Warrendale, PA: SAE International, 2013.

SAE INTERNATIONAL. Aircraft Lightning Zoning. ARP 5414. Warrendale, PA: SAE International, 2018.

VINHOLES, T. Embraer testa resistência do E190-E2 contra raios. Airway, 2016. Disponível em: https://www.airway.com.br/embraer-testa-resistencia-do-e190-e2-contra-raios/. Acesso em: 31 maio 2026.

YANG, Z.; WEI, Y.; SHI, X. Analysis of Cable Shielding and Influencing Factors for Indirect Effects of Lightning on Aircraft. Aerospace, Basel, v. 11, n. 8, p. 674, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/aerospace11080674. Disponível em: https://www.mdpi.com/2226-4310/11/8/674. Acesso em: 31 maio 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.