

Descargas elétricas atmosféricas e suas interações com aeronaves

Helio Librantz¹, André Felipe Henriques Librantz²

¹Embraer. São José dos Campos – SP [Brasil]; ²Ipen; Uninove. São Paulo – SP [Brasil]
librantz@embraer.com.br

O impacto dos raios nas aeronaves é um dos incidentes ambientais mais reportados por pilotos. Os relatórios, a análise dos efeitos em aeronaves e os estudos realizados por várias entidades, laboratórios e universidades permitem que, hoje, a indústria disponha de uma vasta gama de informações sobre o fenômeno e sobre os métodos e as técnicas que agregam soluções para minimização dos danos, permitindo um voo seguro, mesmo após sofrer impacto de elevada intensidade de corrente. Neste artigo, abordam-se alguns conceitos relacionados às descargas elétricas atmosféricas, suas interações com aeronaves e alguns cuidados já tomados por diferentes fabricantes de aviões, no intuito de entender como amenizar os efeitos dessas interações.

Palavras-chave: Aeronaves.
Descargas elétricas atmosféricas. Raios.



1 Introdução

A proteção de aeronaves contra os efeitos do impacto de raios, desde o início da aviação, tornou-se objeto de pesquisas – e mais estudos surgiram após acidentes com transporte de passageiros. O advento de aeronaves com estruturas metálicas permitiu evitar a maioria dos eventos catastróficos, mas a ocorrência de tempestades continuou a ser motivo de preocupação.

Como alguns acidentes atribuídos ao impacto de raios continuaram a acontecer, em 1938, fundou-se o Subcomitê de Segurança de Aeronaves, composto de especialistas em Clima e Raios formados pelo National Advisory Committee for Aeronautics (Naca), para estudar os efeitos de raios em aeronaves e determinar as medidas protetoras adicionais que se faziam necessárias. Num período de 12 anos, os primeiros testes de efeitos de raios em partes de aeronaves foram executados. Durante e em seqüência a esse período, outras organizações, como o National Bureau of Standards (NBS)¹, a University of Minnesota e o Lightning and Transients Research Institute (Latri), também começaram a conduzir pesquisas sobre os efeitos dos raios em aeronaves. Essas pesquisas permitiram incorporar, ao projeto de aeronaves, meios de minimizar os danos causados tanto pelos efeitos diretos (perfuração em revestimentos metálicos, perfuração e rompimento de estruturas não-metálicas e soldagem ou enrijecimento de rolamentos e dobradiças) quanto pelos efeitos indiretos (eletromagnéticos) do impacto dos raios.

A estrutura primária metálica, devido à boa condutividade elétrica do alumínio, material de uso mais abrangente, permitiu o aprimoramento de técnicas bastante eficientes de minimização dos efeitos de raios, especialmente no que diz respeito à segurança de vôo. As superfícies de comando primárias e os tanques de combustível

foram os principais focos de desenvolvimento de testes e técnicas de proteção, em razão dos potenciais efeitos na segurança de vôo. O uso crescente de sistemas eletrônicos de controle e a alta integração entre sistemas representaram desafios mais recentes, amplamente pesquisados, que exigiram o aprimoramento de técnicas de testes e de proteção dos equipamentos e cabos elétricos, sempre utilizando as vantagens da blindagem inerente à estrutura metálica. A substituição da estrutura primária por materiais compósitos em lugar dos metálicos representa um desafio que requer o investimento em novas técnicas de proteção. Neste artigo, enfocam-se alguns princípios básicos da formação de descargas elétricas atmosféricas, sua interação com aeronaves e os principais meios de acoplamento elétrico e eletromagnético dos efeitos do raio aos sistemas embarcados em aeronaves.

2 Raios e sua interação com as aeronaves

O impacto dos raios em aeronaves é um dos incidentes ambientais mais reportados por pilotos. Os relatórios, a análise dos seus efeitos em aeronaves e os estudos realizados por entidades, laboratórios e universidades permitem que, atualmente, a indústria disponha de uma vasta gama de informações sobre o fenômeno e os métodos que agregam soluções que minimizem os danos, permitindo um vôo seguro, mesmo após sofrer impacto de elevada intensidade de corrente.

No século passado, diversos estudos buscaram entender os mecanismos da formação de descargas atmosféricas e sua interação com aeronaves. No entanto, por se tratar de evento de comportamento aleatório, em termos de intensidade, número de descargas e modos de acoplamento, o assunto ainda oferece vasto campo de

pesquisa, especialmente ao se considerar que as soluções de projeto na área aeronáutica exigem uma busca dinâmica por novas tecnologias e materiais, devido à elevada competitividade que o mercado requer da indústria.

2.1 O fenômeno

O exato mecanismo pelo qual cargas elétricas se desenvolvem em nuvens ainda é assunto que provoca debate, mas há poucas dúvidas de que a energia que produz descargas atmosféricas, ou raios, é provida de ar quente ascendente em nuvens em desenvolvimento. À medida que o ar sobe, sofre resfriamento e, no ponto de congelamento, o excesso de vapor d'água condensa-se em gotículas de água, formando a nuvem. Quando o ar sobe o suficiente para a temperatura cair a -40° Celsius (C), o vapor d'água torna-se gelo. A menores altitudes, há muitas gotas super-resfriadas de água não-congelada, apesar da temperatura abaixo do ponto de congelamento. Nessa região super-resfriada, cristais de gelo e granizo se formam.

De acordo com uma das teorias (SCHONLAND, 1962) sobre o mecanismo de eletrificação das nuvens, ela se torna eletricamente carregada pelo seguinte processo: alguns dos cristais de gelo formados se agregam e se transformam em pedras de granizo, que, por sua vez, caem por meio da nuvem, acumulando gotas d'água super-resfriadas. À medida que as gotículas congelam junto ao granizo, pequenas lascas de gelo se desprendem. Aparentemente, essas lascas carregam consigo cargas elétricas positivas, deixando as pedras de granizo com um saldo de carga negativa. As correntes de vento vertical na nuvem carregam as lascas de gelo para a parte superior da nuvem, enquanto as pedras de granizo, de maior peso, caem até atingir regiões de ar menos frias, onde uma porção derrete e o restante segue em direção ao solo. Assim, na parte superior

da nuvem, há predomínio de cargas positivas, e nas regiões inferiores, apresentam predomínio de cargas negativas.

Outras teorias (SIMPSON; SCRASE, 1937; WILSON, 1920) têm sido propostas para justificar a eletrificação de nuvens. Todas são baseadas em evidências, observadas experimentalmente, de que a carga no topo da nuvem é positiva, ao passo que as porções inferiores contêm carga negativa. A maior parte das pesquisas antigas na distribuição de cargas em nuvens (SIMPSON; SCRASE, 1937; WILSON, 1920) foi fundamentada em evidências indiretas a partir de mudanças de campo elétrico ao nível do solo, enquanto o evento de descarga ocorria. Tais medições podem fornecer resultados ambíguos, particularmente se as mudanças de campo elétrico são observadas em somente um local. Medições diretas de cargas por aeronaves ou balões são mais confiáveis. Todas as observações, no entanto, indicam que o topo da nuvem apresenta carga positiva; as regiões de meia altitude, negativa, e próximo de sua base, bolsões de carga positiva. Algumas observações sugerem que a carga negativa se distribui por uma camada com espessura da ordem de mil pés (330 metros [m]), em vez de estar harmonicamente distribuída nas partes inferiores da nuvem. A Figura 1 mostra como as cargas numa nuvem típica tendem a se distribuir.

As correntes de ar e as cargas elétricas tendem a estar contidas em células localizadas, e a nuvem como um todo é composta de um conjunto de células. A carga elétrica contida em uma célula pode aparecer como descrito na Figura 2. A temperatura no centro principal de carga negativa estará em torno de -5° C, enquanto, nos bolsões auxiliares de carga positiva, chegará próximo de 0° C. O centro principal de carga positiva, na parte superior da nuvem, estará, aproximadamente, 15° C mais frio que o negativo.

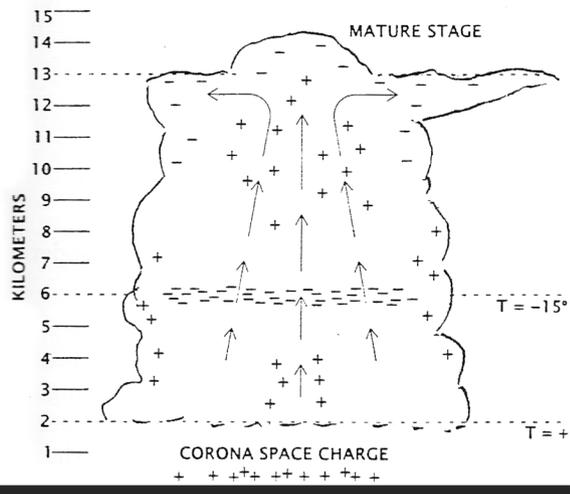


Figura 1: Diagrama generalizado mostrando distribuição de correntes de ar e cargas elétricas numa típica nuvem cúmulo-nimbo

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

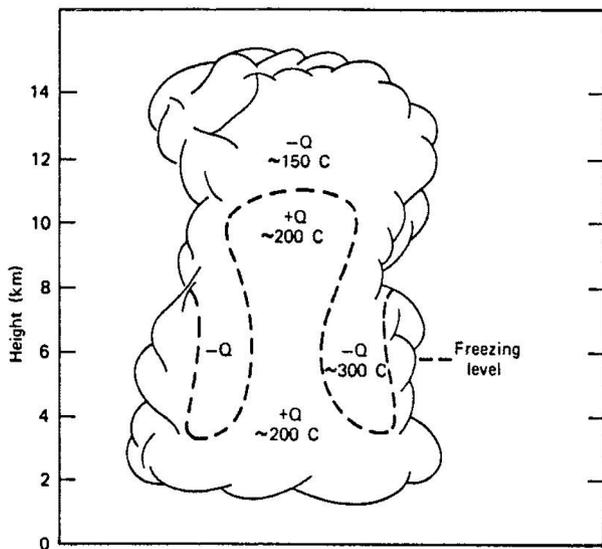


Figura 2: Distribuição estimada de carga numa nuvem de tempestade madura

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

O tempo de vida de uma célula típica é de, aproximadamente, 30 minutos. Em seu estado maduro, a célula como um todo terá um potencial, com relação ao solo, de 10^8 a 10^9 volts (V). Terá também uma carga elétrica armazenada de

várias centenas de coulombs (C), com diferenças de potencial entre bolsões de carga negativa e positiva também da ordem de 10^8 a 10^9 V. A célula como um todo terá carga negativa. A interação entre bolsões de carga promove a formação de descargas elétricas, do tipo corona, até que esses caminhos originados nos bolsões de carga positiva e negativa se encontrem, formando um canal de baixa impedância, de modo que o fluxo de corrente de algumas dezenas de amperes (A) passe a valores extremamente elevados, a temperatura do ar no canal de condução cresce abruptamente, seu diâmetro se expande e seu gradiente longitudinal decresce, tornando-o um ótimo condutor, o que permite um fluxo ainda maior de corrente no arco formado.

Caso se imagine esse sistema ocorrendo entre nuvem e solo, esse processo de crescimento abrupto de carga elétrica se propaga do solo para cima, ao longo do canal de condução a, aproximadamente, 10^8 metros por segundo (m/s) – um terço da velocidade da luz –, até atingir a base da nuvem. A região de elevada condutividade, denominada descarga de retorno, produz o brilho intenso normalmente associado ao raio, devido ao crescimento abrupto da temperatura no canal de condução, produzindo temperaturas da ordem de 15.000 a 20.000°C. A expansão momentânea e intensa do ar em torno do canal provoca o ruído característico do trovão. Descargas subsequentes por meio do canal recém-criado ocorrem usualmente à medida que outras células de carga na nuvem aproveitam o canal formado. Essas descargas subsequentes são, geralmente, de menor intensidade que a inicial. Esse processo pode ocorrer tanto entre nuvens e solo quanto entre nuvem e nuvem, ou internamente a uma mesma nuvem de tempestade. O modelo hoje utilizado para simulação da descarga de raio em laboratório está ilustrado na Figura 3.

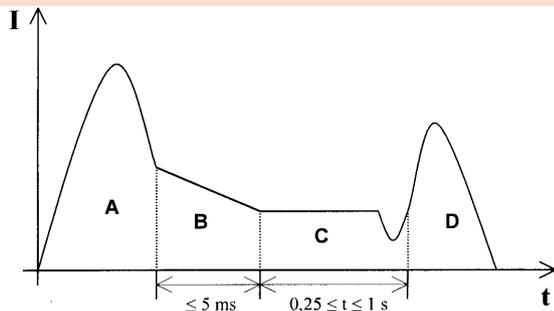


Figura 3: Componentes da corrente de raio

Componente A: pico de corrente inicial
 Dados de norma: $I = 200 \text{ kA} \pm 10\%$
 Tempo de duração $\leq 500 \mu\text{s}$ (não exceder $500 \mu\text{s}$)
 Integral de ação = $2,00 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$

Componente B: corrente intermediária
 Dados de norma: $I_{\text{médio}} = 2 \text{ kA} \pm 10\%$
 Tempo de duração máxima 5 ms
 Carga de transferência máxima = 10 C

Componente C: corrente de continuidade
 Dados de norma: $I = 200 \text{ a } 800 \text{ A}$
 Tempo de duração entre 0,25 a 1 s
 Carga de transferência máxima = $200 \text{ C} \pm 20\%$

Componente D: corrente de retorno
 Dados de norma: $I = 100 \text{ kA} \pm 10\%$
 Tempo de duração $\leq 500 \mu\text{s}$ (não exceder $500 \mu\text{s}$)
 Integração de ação = $0,25 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$

Fonte: Society of Automobile Engineers (2005a).

2.2 A interação com aeronaves

Pouco tempo após o início da operação de vôos motorizados, houve casos de aeronaves atingidas por raios, algumas vezes com efeitos catastróficos. Antigas aeronaves de madeira com cabos de comando metálicos não tinham capacidade de condução da corrente de descarga de raios de vários milhares de amperes ou mais. Partes de madeira e mesmo os cabos de comando explodiam ou queimavam em razão do efeito Joule. Mesmo que danos estruturais não fossem observados, pilotos sofriam, freqüentemente, choques ou queimaduras causados pelas correntes de raio, que penetravam suas mãos ou pés, via pedais ou manete de controle. Algumas vezes, tanques de combustível incendiavam ou explodiam. Esses efeitos, em conjunto com a turbulência do ar e a precipitação, e associados a tempestades, logo induziram os pilotos a evitar climas de tempestade. Com o advento

de aeronaves totalmente metálicas, a maioria dos efeitos catastróficos foi eliminada, mas tempestades continuaram a ser vistas como uma ameaça, com grandes riscos para a segurança de vôo, pois alguns acidentes atribuídos ao impacto dos raios continuaram a acontecer.

Várias pesquisas procuraram entender os mecanismos de acoplamento do canal de descarga de raios à estrutura das aeronaves, buscando também responder se as aeronaves podem disparar o processo de descarga ou se elas, simplesmente, interceptam um canal de descarga de ocorrência natural. Métodos para identificar como o canal de descarga interage com as superfícies da aeronave e quais as zonas mais prováveis de impacto foram objeto dessas pesquisas. Nos Estados Unidos, no início de 1938, o Subcommittee on Meteorological Problems, do Naca, preparou e distribuiu um questionário sobre incidentes de raios para linhas aéreas e as forças armadas, que foi utilizado para a coleta de dados até 1950. Nas décadas de 1960 e 1970, muitos programas foram conduzidos pela Federal Aviation Administration (FAA; em português, Administração Federal de Aviação), por institutos de pesquisa e laboratórios, em conjunto com cinco linhas aéreas dos Estados Unidos. Programas paralelos também foram conduzidos no Reino Unido pelo Civil Aviation Authority (CAA) e, na União Soviética, pelo Instituto Nacional de Pesquisas para a Aviação Civil.

Dados mais recentes foram colhidos pela FAA e pela Lightning Technologies Incorporation (LTI), por meio do Airlines Lightning Strike Reporting Project. Os dados de incidência de raios em aeronaves, com base, principalmente, em aeronaves turbojato e turboélice, são freqüentemente sumarizados nas seguintes categorias:

- Altitude;
- Fase de vôo, isto é, subida, vôo nivelado e descida;



- Condições meteorológicas;
- Temperatura do ar externo;
- Efeitos de raio na aeronave.

O canal de descarga, inicialmente, se conecta ou entra por um ponto na aeronave e sai por outro. Em geral, esses pontos são extremidades da aeronave, como nariz ou ponta de asa. O ponto de “entrada” pode ser tanto um anodo quanto um catodo, isto é, um ponto pelo qual elétrons estão entrando ou saindo da aeronave. Por convenção, pontos de conexão dianteiros ou superiores costumam ser denominados pontos de entrada, e os traseiros ou inferiores, pontos de saída. Como a aeronave voa mais que o seu comprimento no tempo de duração da descarga, o ponto de entrada poderá mudar à medida que o canal de descarga do raio se for reconectando a outros pontos para trás do ponto de entrada inicial. O ponto de saída pode fazer o mesmo se a conexão inicial ocorrer numa região frontal da aeronave. Portanto, para um único raio, podem existir diversos pontos de “entrada” e “saída”.

No início da formação de um canal de descarga de raio, a ionização do ar se processa em saltos progressivos entre os centros de carga, que são o destino final do raio, em centros opostos de carga na nuvem ou no 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. Essas são mostradas como linhas no desenho bidimensional da Figura 4.

A intensidade de campo, normalmente expressa em quilovolts por metro (kV/m), é maior onde as linhas equipotenciais estão mais próximas entre si. Esse é o campo disponível para ionizar o ar e formar o caminho condutivo em progressão. Como a direção da força eletrostática é normal às linhas equipotenciais e maior

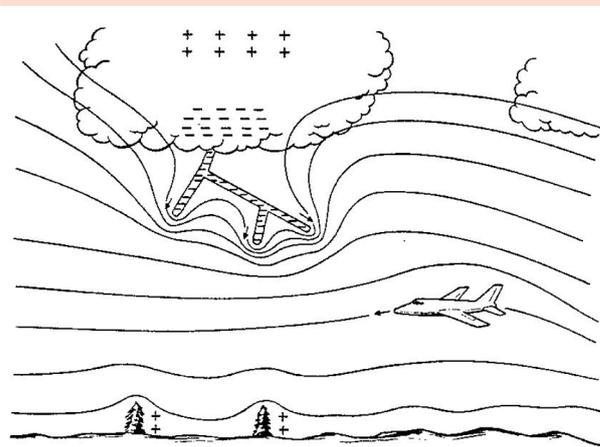


Figura 4: Descarga progressiva se aproximando de uma aeronave

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

onde estão mais próximas, o caminho de ionização tende a progredir, no sentido das regiões de campo mais intenso. Se uma aeronave estiver nas redondezas, ela assumirá o potencial elétrico de sua localização. Como a aeronave é um bom condutor e está toda no mesmo potencial, ela desviará e comprimirá equipotenciais adjacentes, aumentando a intensidade de campo elétrico em suas extremidades (Figura 5), e especialmente entre ela e outros objetos carregados, como, por exemplo, o canal progressivo de ionização do ar. Se a aeronave estiver a dezenas ou centenas de metros do canal em progressão, a crescente intensidade de campo poderá ser su-

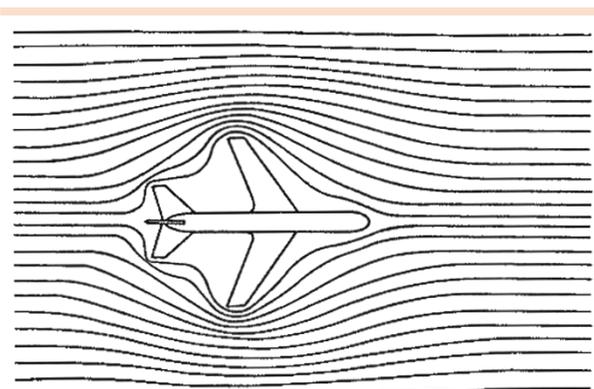


Figura 5: Compressão de campo elétrico em torno de uma aeronave

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

ficiente para atrair a subsequente progressão do canal em direção ao veículo. À medida que isso ocorre, o campo se torna ainda mais intenso e o canal avança mais diretamente em direção à aeronave.

Os mais intensos campos elétricos na aeronave ocorrerão em torno das extremidades, onde as linhas equipotenciais estão comprimidas (Figura 5). Tipicamente, esses pontos são nariz, pontas de asa e empenagens, e também protuberâncias menores, como antenas e tubos *pitot*. Quando o canal avançar de modo que o campo adjacente a uma das extremidades chegue próximo de 3.000 kV/m (à pressão do nível do mar), 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. Esses *streamers* continuarão a propagar-se enquanto o campo estiver acima de 500 a 700 kV/m. 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. 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 flui 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 (Figura 6).



Figura 6: Conexão da aeronave com o canal progressivo

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

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. Esse caso está ilustrado na parte (b) da Figura 7.

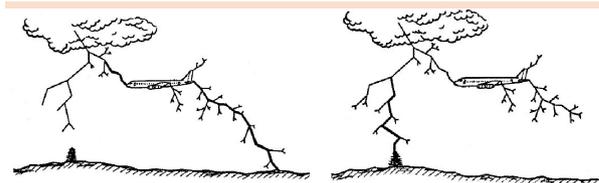


Figura 7: Caminho de retorno de corrente de raio: a) através do avião; b) por outro ramo

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).



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 conseqüência, 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 (Figura 8).

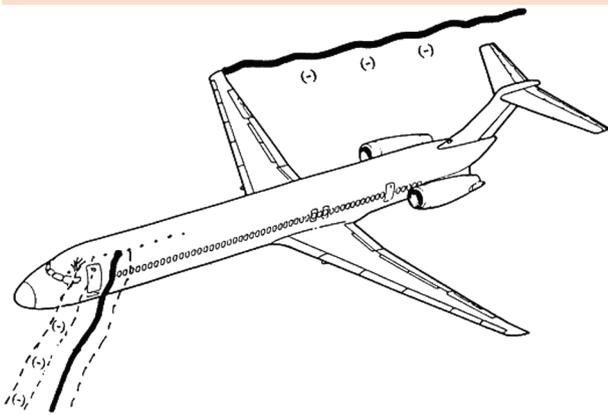


Figura 8: Exemplo típico de varredura de reconexão do raio com a estrutura

Fonte: Os autores.

2.3 Normalização e processo de certificação

Como em algumas regiões da aeronave, a probabilidade de conexão com o canal de descarga é muito baixa e, em outras, a exposição à conexão dá-se somente por uma pequena porção do tempo total de duração do raio, as zonas na superfície da aeronave estarão expostas a diferentes componentes da descarga e, assim, sofrerão tipos e intensidades distintos de efeitos. Com o propósito de permitir o projeto adequado de proteção contra raios em aeronaves, o FAA define, com base em *Aerospace Recommended Practices* (SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS, 2005c), as seguintes zonas:

- 1A: região inicial de conexão com o raio que se caracteriza pela baixa probabilidade de longa duração da conexão;
- 1B: região inicial de conexão com o raio que se caracteriza pela alta probabilidade de longa permanência;
- 1C: região inicial de conexão com o raio que se caracteriza pela amplitude reduzida com baixa probabilidade de longa permanência;
- 2A: região de varredura da descarga com baixa probabilidade de longa duração da conexão;
- 2B: região de varredura da descarga com alta probabilidade de longa duração da conexão;
- 3: porções da estrutura que estão entre as outras zonas, que podem conduzir porção considerável da corrente elétrica entre regiões de conexão direta ou de varredura.

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 (SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS, 2005b; 2005d) que orientam tanto o projeto quanto possíveis métodos de demonstração de cumprimento das normas.

2.3.1 Mecanismos de acoplamento básicos

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. De certa forma, isso é verdade: 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.

A Figura 9 ilustra esses três métodos básicos de acoplamento.

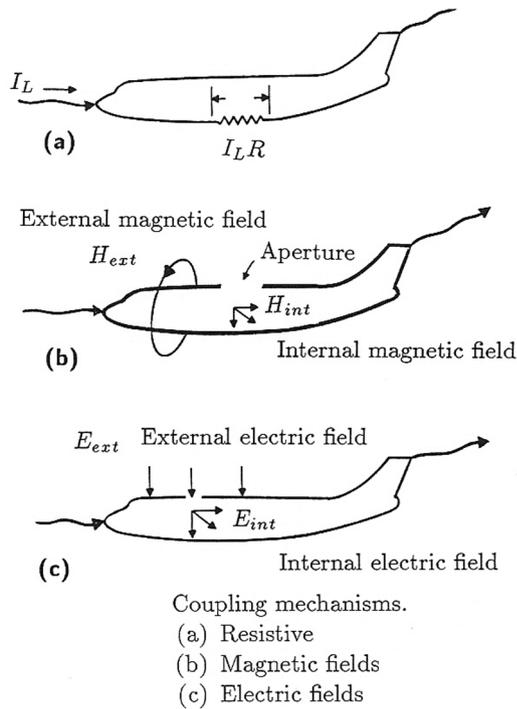


Figura 9: Mecanismos básicos de acoplamento

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

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. Caso se considere, por exemplo, que em uma aeronave metálica os valores típicos de resistência CC (corrente contínua) são da ordem de 2,5 miliohms ($m\Omega$), para uma corrente de raio de 200 quiloampere (kA), haveria uma tensão máxima, de extremo a extremo da ordem de 500 volts. A Figura 10 mostra diversas diferenças de potencial (ddp) geradas em função da resistência CC.

Essa resistência pode ser dada por:

$$R = \rho L/A$$

Em que R é a resistência; ρ , a resistividade do material; L, o comprimento e A, a área da se-

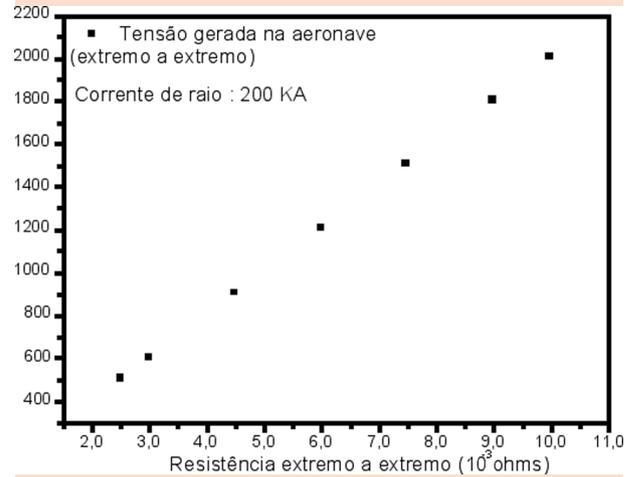


Figura 10: Tensão (ddp) gerada em função da resistência

Fonte: Os autores.

ção transversal do material. Numa aeronave com estrutura de material compósito de fibra de carbono (CFC), os valores típicos de resistência CC podem ser da ordem de 60 $m\Omega$. 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. O segundo mecanismo de acoplamento envolve campos magnéticos que invadem o interior da aeronave (Figura 11).

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

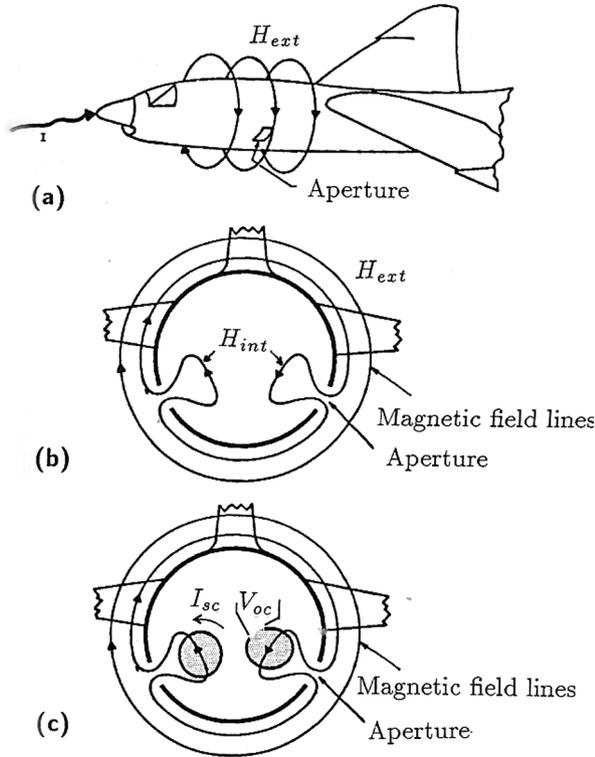
$$V_{oc} = 4\pi \times 10^{-7} A \, dH/dt$$

ou

$$V_{oc} = d\varphi / dt = \mu_0 A \, dH/dt$$

Em que:

H é a intensidade de campo magnético em A/m; e



Aperture-type magnetic field coupling.
 (a) External field patterns
 (b) Internal field patterns
 (c) Induced voltages and currents

Figura 11: Acoplamento por campo magnético

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

Φ , o fluxo magnético total em *webers*, passando através do *loop* de área A ;

$A = lh$, (Figura 12);

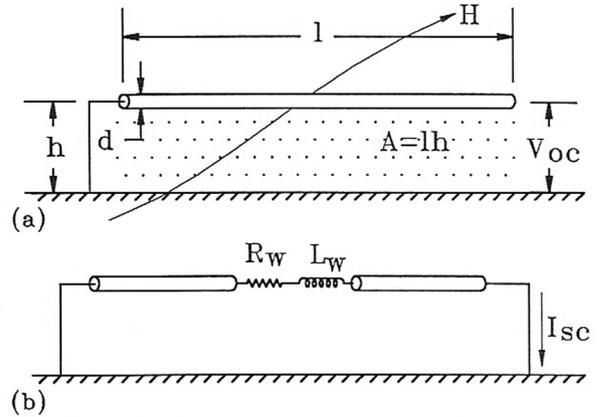
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$;

t = tempo em segundos.

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

$$I_{sc} = 1/L \int V_{oc} dt$$

Em que L é a auto-indutância do *loop*. A corrente no *loop* tende a apresentar forma de onda semelhante à do campo magnético indutor, dife-



Response to magnetic induction.

(a) V_{oc}

(b) I_{sc}

Figura 12: Resposta à indução magnética

Fonte: Fisher, Plumer e Perala (1990).

rentemente da tensão, que responde à razão de variação do campo magnético.

2.3.2 Retorno de corrente

As aeronaves metálicas têm suas estruturas desenvolvidas, visando à 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 à qualidade de sinal e ao alcance de transmissão ou de recepção de sinal.

2.3.3 Permeabilidade aos campos eletromagnéticos

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 à base de alumínio têm demonstrado níveis de atenuação de campos de radiofrequência (em inglês *radio frequency* [RF]) consideráveis, variando mais expressivamente em razão das aberturas (pára-brisas e janelas) ou outras descontinuidades elétricas da estrutura.

3 Considerações finais

Várias pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas por instituições como FAA, National Aeronautics and Space Administration (Nasa), Força Aérea dos Estados Unidos, Boeing, Society of Automobile Engineers (SAE) e por laboratórios nos Estados Unidos e na Europa permitiram o estabelecimento de métodos e técnicas de proteção e de testes bastante eficazes quando aplicados a aeronaves com estruturas metálicas. A boa condutividade das ligas de alumínio é amplamente explorada na otimização dessas proteções.

Ao se levar em conta o esforço existente da indústria no desenvolvimento de novos materiais para emprego em estruturas de aeronaves, especialmente pela utilização de materiais compósitos, deve-se considerar a necessidade de estudos que viabilizem a transferência e adaptação dessas técnicas já dominadas em estruturas metálicas e o desenvolvimento de novas técnicas para a proteção adequada dessas novas estruturas contra os efeitos indesejáveis do impacto dos raios.

Atmospheric electrical discharges and their interaction with aircraft

The occurrence of lightning strike to aircraft is among the most frequently incidents reported

by pilots. These reports, the analysis of their effects to aircraft and the research developed by several entities, laboratories and universities, provides to the industry a large amount of information about the phenomenon and about methods and techniques which allow the development of design solutions that minimize damage, adding to safe flight conditions, even in cases of high intensity lightning discharges incidents. This article presents some concepts related to atmospheric discharges and their interaction with aircraft, as well as some techniques already employed by several aircraft manufacturers with the intention of minimizing the effects of these interactions.

Key words: Aircraft. Atmospheric electrical discharges. Lightning.

Notas

- 1 N. Ed.: entre 1901 e 1988, esse foi o nome da organização. Depois disso, entretanto, passou a ser chamado de National Institute of Standards and Technology (Nist).

Referências

- FISHER, F. A.; PLUMER, J. A.; PERALA, R. A. *Lightning protection of aircraft*. 1. ed. Pittsfield: Lightning Technologies, 1990.
- SCHONLAND, B. F. J. Lightning and the long electric spark. *Advancement of Science*, v. 19, p. 306-313, 1962.
- SIMPSON, G.; SCRASE, F. J. The distribution of electricity in thunderclouds. *Proceedings of the Royal Society of London*, série A, v. 161, n. 906, p. 309-352, 1937.
- SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS. Aircraft lightning environment and related test waveforms. *SAE Aerospace Recommended Practices*, n. 5.412, rev. A, 2005a.
- SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS. Aircraft lightning test methods. *SAE Aerospace Recommended Practices*, n. 5416, 2005b.
- SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS. Aircraft lightning zoning. *SAE Aerospace Recommended Practices*, n. 5414, rev. A, 2005c.



SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS.
Certification of aircraft electrical/electronic systems
against the indirect effects of lightning. *SAE Aerospace
Recommended Practices*, n. 5.413, rev. A, 2005d.

WILSON, C. T. R. Investigation on lightning discharges
on the electrical field of thunderstorms. *Philosophical
Transactions of the Royal Society of London*, série A, v.
221, p. 73-115, 1920.

Recebido em 30 out. 2006 / aprovado em 2 dez. 2006

Para referenciar este texto

LIBRANTZ, H.; LIBRANTZ, A. F. L. Descargas
elétricas atmosféricas e suas interações com aeronaves.
Exacta, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 247-258, jul./dez. 2006.