

Sommario

Negli ultimi decenni, grazie alla crescente globalizzazione, l'utilizzo dell'aereo come mezzo di trasporto è fortemente aumentato; risultando quindi sempre più necessario lo sviluppo di protezioni adeguate per la prevenzione dei danni alla struttura ed ai sistemi interni di un aeromobile.

In questo lavoro verrà analizzata una linea guida per le protezioni che devono essere installate su un aereo e dei requisiti che deve soddisfare in modo da garantire la sicurezza del volo e, soprattutto, dei passeggeri.

Per comprendere meglio le varie tecniche, nella prima parte vengono analizzate le caratteristiche geografiche e ambientali che influiscono maggiormente lo sviluppo di un temporale e sull'intensità del campo elettrostatico che si genera al suo interno; vengono poi analizzate le condizioni che incrementano la probabilità che un aereo venga colpito da un fulmine ed i vari effetti che può causare.

Nei capitoli 5 e 6 vengono poi esplicitate le regolazioni fondamentali che devono essere soddisfatte in fase di progetto ed alcuni esempi di tecniche di protezione che ne derivano. Infine viene discussa la recente scoperta dello sviluppo di radiazioni gamma anche all'interno dell'atmosfera terrestre, detti Terrestrial Gamma-Ray Flashes, e le conseguenze che il flusso di radiazioni prodotto può avere sui passeggeri e sui sistemi elettronici di bordo.

Indice

1	Introduzione	5
2	Ambiente dei fulmini	7
2.1	Condizioni necessarie per la tempesta	8
2.2	Origine dei fulmini	8
2.3	Variabilità delle nubi temporalesche	10
2.4	Tempeste tropicali	14
2.5	Formazione dei fulmini	15
2.6	Forma d'onda delle correnti dei fulmini	16
3	Interazione dei fulmini con gli aerei	19
3.1	Innesco di un fulmine da un aereo	21
3.2	Fenomeno dello spostamento del fulmine	23

<i>INDICE</i>	3
4 Effetti dei fulmini sugli aerei	25
4.1 Effetti Diretti	25
4.1.1 Danni alla struttura esterna	26
4.1.2 Effetti diretti sulle strutture non metalliche	28
4.1.3 Effetti diretti sul sistema di carburazione	29
4.1.4 Effetti diretti sul sistema elettrico	29
4.2 Effetti indiretti	30
5 Processo di certificazione	31
5.1 FAR per gli effetti diretti dei fulmini	31
5.2 Federal Aviation Regulation	32
5.3 FAA Advisory Circulars	32
6 Protezione dai fulmini	34
6.1 Idealizzazione della forma d'onda della corrente prodotta dal fulmine	37
6.2 Modelli di protezione	40

<i>INDICE</i>	4
7 Terrestrial Gamma-Ray Flashes	44
7.1 Origine dei raggi gamma	44
7.2 TGFs sugli aerei	48
8 Conclusioni	51
9 Bibliografia	53

Capitolo 1

Introduzione

Nel corso degli ultimi anni si è registrato un forte aumento della globalizzazione, che corrisponde ad un fenomeno di crescita progressiva delle relazioni e degli scambi a livello mondiale in diversi ambiti.

Questo ha portato allo sviluppo dei mezzi di trasporto per tratti di medie/lunghe distanze, incrementando quindi l'utilizzo dell'aereo come mezzo di trasporto.

Questo è stato possibile, oltre per la riduzione dei costi dei biglietti, grazie ai criteri di protezione sempre più severi che gli aeromobili devono soddisfare.

La causa che influenza maggiormente la probabilità che si verifichino danni strutturali sull'aereo, compromettendo la sicurezza del volo, è l'evento di un fulmine che colpisce un aereo. La probabilità che si verifichi questo evento, secondo i dati raccolti ed analizzati dalla Lightning Technologies Inc., è di circa 1 colpo/3000 ore di volo, che per un aereo di linea corrisponde all'incirca ad una volta all'anno.

Considerando che la quota di crociera di un aereo è ben oltre l'altezza della cima delle nuvole, che i piloti sono addestrati ad evitare l'attraversamento

del centro di una nube ed infine che in caso di forte maltempo il volo viene ritardato la probabilità che un aereo venga colpito da un fulmine almeno una volta all'anno risulta molto elevata.

Per questo motivo la ricerca e lo sviluppo delle protezioni necessarie a garantire la sicurezza del volo sicuro è sempre attuale.

Per sviluppare tali protezioni bisogna considerare diversi fattori, i più importanti sono:

- Capire in quali regioni geografiche e sotto quali condizioni climatiche è più probabile che si verifichi un fulmine;
- Valutare in quali condizioni la probabilità che un aereo venga colpito da un fulmine risulta più elevata;
- Studiare i fattori critici introdotti da un fulmine;

Una trattazione di questi fattori viene discussa e introdotta nei seguenti capitoli, insieme alle tecniche più utilizzate che garantiscono la sicurezza del volo sia proteggendo la struttura esterna che i sistemi elettronici dell'aereo.

Capitolo 2

Ambiente dei fulmini

Le nuvole presenti nell'atmosfera terrestre sono composte da goccioline d'acqua e cristalli di ghiaccio. A causa dell'abbondanza dei nuclei delle nuvole di condensazione, le nuvole compaiono ogni volta che l'area diventa localmente satura di vapore acqueo. Questa condizione di saturazione è spesso detta processo di sollevamento ed è solitamente causato dal riscaldamento dell'aria vicino alla superficie della terra, che a sua volta è riscaldata dai raggi solari.

Un altro motivo per la forza idrostatica delle particelle d'acqua dipende dalla forza ascendente dell'aria rispetto al gradiente di forza orizzontale della pressione. L'altitudine a cui viene raggiunta la condizione di saturazione nelle masse d'aria che salgono e le nuvole cominciano a formarsi è detto livello di sollevamento della condensa (Lifting Condensation Level).

Tipicamente questo livello si trova a 1000m, molto più in basso rispetto all'isoterma di 0°C che si trova tipicamente a 4000-5000 metri rispetto al suolo.

2.1 Condizioni necessarie per la tempesta

Le nuvole che permettono lo sviluppo dei fulmine, dette anche nubi temporalesche, hanno una larghezza maggiore e moti convettivi più forti rispetto alle nuvole solitamente presenti nell'atmosfera. Numerose osservazioni effettuate in località geografiche diverse mostrano che, un cumulonembo deve estendersi almeno per 2-3 km nella parte di atmosfera con temperature al di sotto dello zero affinché un fulmine venga osservato.

Questi dati favoriscono la teoria principale sviluppata per la formazione delle cariche elettriche: collisione tra particelle graupel e cristalli di ghiaccio o altre particelle di graupel più piccole.

La presenza di queste particelle richiede una particolare condizione detta *mixed-phase*, ovvero la presenza simultanea di acqua nei tre stati: solido liquido e vapore.

Le particelle di graupel si formano quando goccioline d'acqua super fredda sono maturate da cristalli di ghiaccio di larghe dimensioni e successivamente congelate. La continua crescita può condurre queste particelle ad assumere dimensioni di millimetri, in casi estremi di un elevata concentrazione di acqua superfredda possono raggiungere anche le dimensioni di centimetri, prendendo il nome di grandine.

Il trasferimento selettivo dell'elettricità negativa sulle particelle graupel, ottenute dalla collisione con le piccole particelle di ghiaccio, avviene tramite una separazione gravitazionale delle particelle con cariche opposte.

Il fenomeno della separazione delle cariche si verifica fino a quando il campo elettrico sviluppato risulta sufficiente alto per il breakdown del dielettrico e di conseguenza lo sviluppo dei fulmini.

La presenza di un forte moto convettivo senza però un sufficiente moto ascensionale dell'aria e una forte *mixed-phase* non permette lo sviluppo dei fulmini.

2.2 Origine dei fulmini

La struttura elettrostatica presente all'interno di una nuvola è stato argomento di dibattito per tutto il corso del 20-esimo secolo. Le più recenti

misure combinate con lo sviluppo delle tecnologie per la rilevazione dei campi elettromagnetici supportano le basi della struttura tripolare in una nube isolata. Secondo questa struttura, la parte principale delle cariche negative si sviluppa nella parte fredda e centrale della nuvola, dove la temperatura è compresa tra -10°C e -20°C con un leggero aumento della concentrazione (e diminuzione delle temperature) verso l'interno.

La maggioranza delle cariche negative è frequentemente confinata verticalmente, solitamente lungo un'estensione verticale pari ad 1km o meno.

Le regioni delle cariche positive, invece, si sviluppa nella parte superiore della nuvola. Le cariche di questa regione sono più diffuse e possono estendersi fino alla cima della nuvola.

Le due regioni, la parte superiore con la carica positiva e quella centrale con la carica negativa, sono solitamente separate da una zona quasi neutrale nella regione centrale della mixed-phase, all'interno della quale si ha il moto convettivo che permette la separazione delle cariche tramite collisione.

Una regione di carica positiva può svilupparsi anche nella parte inferiore della nuvola, tipicamente ha una forza magnetica minore di quella della carica principale negativa, e può estendersi anche al di sotto dell'isoterma di 0°C . Questa struttura a tripolo è sostanzialmente in linea anche con le principali categorie di fulmini che vengono riscontrati nelle nuvole isolate.

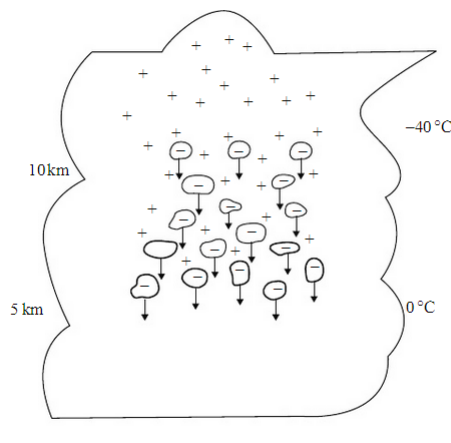


Figura 2.1: Illustrazione della separazione delle cariche dalla collisione delle particelle e il differente movimento sotto la gravità.

Le tipologie principali dei fulmine sono:

- Fulmine intra/inter-nuvola: si verifica tra le di carica positiva superiore e negativa centrale all'interno della stessa nuvola o fra regioni di carica opposta adiacenti
- Scarica in aria: scarica tra la parte negativa principale e la regione di carica positiva inferiore della stessa nuvola, non entra in contatto con il terreno
- Fulmine nuvola-terreno: quelli più comuni hanno polarità negativa e trasferiscono la carica dalla regione di carica negativa centrale verso il terreno, anche se la scarica iniziale che innesca il fulmine può avvenire tra la parte negativa centrale e la parte positiva inferiore. La scarica positiva verso terra si verifica con una frequenza dieci volte inferiore rispetto a quella negativa. Non si è ancora stabilito se questa tipologia di fulmini è dovuta alla scarica della parte positiva superiore o inferiore, o addirittura da un ulteriore riserva di cariche positive.

2.3 Variabilità delle nubi temporalesche

La forma, la dimensione e la frequenza delle nubi che possono generare un temporale sono tutte caratteristiche che subiscono variazioni a seconda della zona geografica. Capire in anticipo dove si verifica un temporale è molto

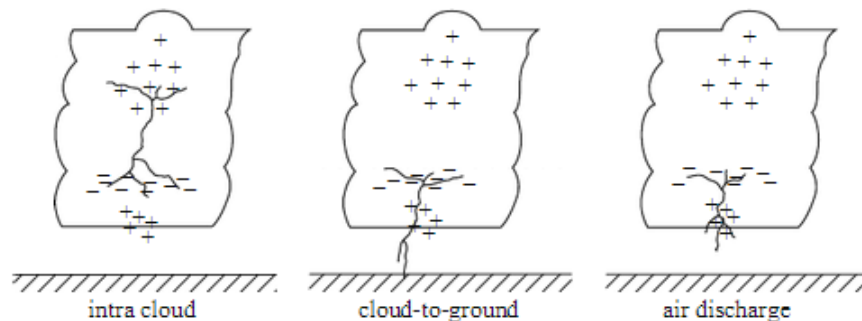


Figura 2.2: Illustrazione schematica delle morfologie dei fulmini più frequenti

difficile, in base ai dati raccolti sulla frequenza dei temporali è possibile determinare i fattori che ne influenzano maggiormente la comparsa. I fattori principali sono i seguenti:

Disponibilità di vapore acqueo: La quantità di energia resa disponibile, all'interno delle nuvole, durante le tempeste è fondamentalmente dovuta al calore latente rilasciato durante la trasformazione del vapore acqueo quando passa dallo stato liquido a quello solido attraverso i processi di condensazione, deposito di vapore acqueo e infine congelamento. Uno dei fattori dal quale dipendono maggiormente la variabilità stagionale e geografica è la legge fisica che governa la dipendenza della concentrazione di saturazione del vapore acqueo in funzione della temperatura, conosciuta come legge di Clausius-Clapeyron. Secondo un'approssimazione empirica di questa legge si ha circa un raddoppio della concentrazione di vapore acqueo ad ogni aumento di 10°C della temperatura.

Siccome tra poli e l'equatore c'è una differenza di temperatura di circa 50°C , applicando la legge appena citata, la concentrazione di vapore all'equatore risulta $2^5 = 32$ volte quella che si può misurare ai poli.

Instabilità atmosferica: Il movimento verticale dell'aria all'interno delle nuvole è dovuto principalmente alla spinta idrostatica presente in esse. Il valore di tale forza dipende dalla differenza di temperatura, la concentrazione del vapore acqueo e la condensa tra le particelle ascendenti e discendenti e il loro ambiente. Spesso come misura della forza idrostatica si usa una grandezza detta CAPE (convective available potential energy), la forza idrostatica integrata tale grandezza è ottenuta dalla termodinamica negli ambienti di sviluppo delle tempeste.

Un punto dell'atmosfera caratterizzato un elevato valore di CAPE produce più facilmente una forte corrente ascensionale permettendo quindi lo sviluppo di una tempesta più vigorosa e con una maggiore attività elettrica al suo interno. A sua volta, la corrente ascensionale influenza lo sviluppo verticale delle precipitazioni nella mixed-phase della nuvola, dove l'impatto nella separazione delle cariche risulta maggiore. Anche la natura della superficie influisce sulla forza convettiva, agendo sul valore di CAPE; infatti il suolo quando è esposto alla luce del

sole si scalda più rapidamente rispetto all'acqua, questo a causa della rigidità, opacità e una minore capacità termica del terreno. Il terreno riscalda quindi più velocemente l'aria sopra di esso inducendo quindi una maggiore forza ascensionale sulla massa d'aria.

Estensione verticale della forza idrostatica: I blocchi d'aria che subiscono una forza ascensionale lungo un'elevata estensione verticale possono raggiungere una grande velocità verticale, contribuendo quindi a rendere più violento il temporale. La quota alla quale questa la forza idrostatica svanisce è detta livello di galleggiamento neutrale (LNB). Considerando la struttura verticale formata dalle isoterme dell'atmosfera, la LNB si trova generalmente al di sotto della tropopausa locale, oltre la quale la temperatura nella stratosfera inizia ad aumentare. L'altitudine a cui si trova la tropopausa varia considerevolmente a seconda della latitudine geografica e delle stagioni, 17 km ai tropici, 12-13 km nelle medie latitudini estive e 6-7 km nelle medie latitudini durante l'inverno.

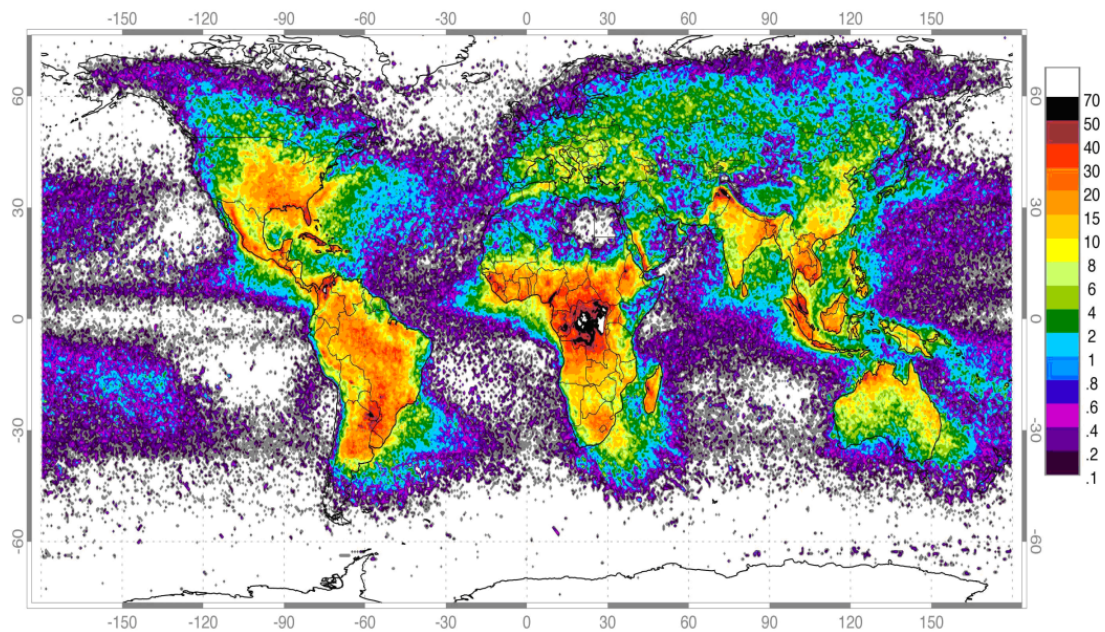


Figura 2.3: Distribuzione annuale dell'attività totale dei fulmini (espressa in $\text{flash}/\text{km}^2/\text{anno}$)

Altezza della mixed-phase: La mixed-phase risulta essere essenziale per la separazione delle cariche e di conseguenza per la potenza dei fulmini. Questa regione è compresa tra le isoterme di 0°C e di -40°C , corrispondono ad un'estensione verticale nell'atmosfera di 5-6 km. In estate, la zona inferiore di questa regione, si trova tipicamente a 4-5 km sopra la superficie, in inverno invece inizia ad estendersi direttamente dal terreno verso l'alto. Anche questo fattore contribuisce in modo significativo sia alla variabilità stagionale che a quella geografica delle tempeste.

Strato sostanze nebulizzate L'atmosfera terrestre è inquinata con sub-microscopiche particelle la cui concentrazione non è uniforme, anzi varia molto a seconda della zona. Siccome le sorgenti di molte di queste particelle sono sulla terra, la concentrazione continentale di queste sostanze nebulizzate è maggiore rispetto a quella oceanica. Un sottinsieme di queste particelle costituiscono il nucleo di concentrazione delle nuvole, tale nucleo è fortemente influenzato dallo spettro delle goccioline della nuvola (ovvero dalla concentrazione e delle dimensioni) durante lo sviluppo della forza convettiva della massa d'aria di umidità. Per questo motivo possono influenzare le precipitazioni dalle nuvole. Tramite recenti studi si è stabilito che queste sostanze possono influenzare sia l'attività dei fulmini che la polarità del fulmine nuvola-terra.

Influenza del suolo e del terreno: Come è possibile notare anche osservando la mappa dei fulmini, sopra la terra si verifica con maggiore frequenza i fulmini rispetto a quella che si ha sopra l'oceano. La spiegazione classica è basata sul forte calore presente sopra la superficie, induce un largo valore di CAPE, una forte corrente ascendente e un buon rinvigorimento della mixed-phase. In realtà, questo ampio contrasto tra terra/oceano è evidente anche a mezzanotte, ovvero quando la superficie della terra non è fortemente riscaldata dal sole. Inoltre anche quando il valore di CAPE è maggiore grazie al calore dell'acqua dell'oceano, l'attività dei fulmini risulta comunque modesta. I recenti studi mettono in evidenza l'importanza dell'altezza delle nuvole classiche (minore sull'oceano e maggiore sulla terra) nell'influenza della conversione del CAPE in energia cinetica verso l'alto.

Un'ulteriore spiegazione di questa differenza è basata sulla differenza di concentrazione dei materiali nebulizzati sopra la terra rispetto a quella sopra l'oceano. A causa del maggiore inquinamento sopra la terra, il vapore acqueo disponibile può essere diviso in un elevato numero di goccioline, rendendo la loro taglia più piccola. Il processo di formazione della pioggia si ferma in presenza di goccioline di piccole dimensioni, questo rende disponibile più vapore acqueo che entra nella regione di mixed-phase dove può partecipare al processo di congelamento, aumentando quindi le cariche prodotte durante il processo di separazione. Un'ulteriore spiegazione del contrasto può essere quella della teoria convettiva per l'elettrificazione, secondo la quale la differenza del numero dei punti di scarica del fulmine aspettati è minore sulla superficie liscia e piatta dell'oceano, a differenza di quella irregolare della terra che attira maggiormente le cariche.

Pressione atmosferica: Un'atmosfera dove la temperatura è lateralmente uniforme è detta, in campo meteorologico, come barotropica. Le tempeste in atmosfere puramente barotropiche crescono verticalmente e frequentemente collassano su se stesse per terminare il loro ciclo di vita. Nelle zone barocliniche si ha un'interazione delle masse di aria calda con quelle di aria fredda sulla scala sinottica (~ 1000 km), si può quindi sviluppare una misura del CAPE estremamente grande.

2.4 Tempeste tropicali

Le profonde nubi tropicali dominano la categoria globale delle tempeste, questo per la dipendenza della saturazione di vapore acqueo dalla temperatura secondo la legge di Clausius-Clapeyron. Secondo le osservazioni fatte dal satellite di Orviell and Henderson ed una stima sul totale di fulmini registrati in un anno, di tre fulmini due sono situati nella zona tropicale. Nella fascia tropicale nubi le temporalesche si sviluppano quasi tutti i giorni a differenza delle latitudini maggiori. A causa dell'elevata altitudine della tropopausa di queste zone, la nuvola è solitamente distribuita su un grande range di altezze. Negli ambienti barotropici tipici delle regioni tropicali, la tempesta cresce verticalmente per grande profondità ma la modesta forza

idrostatica della nuvola solitamente limita lo sviluppo della mixed-phase e di conseguenza il tasso dei fulmini. Un'elevata e stretta regione principale di carica negativa può non promuovere lampi verso la terra come una tempesta alle medie latitudini, favorendo invece lo sviluppo dei fulmini tra due regioni di carica opposta adiacenti. L'elevato valore di CAPE, l'alto livello di fusione e, in particolare, la mancanza di baroclinicità, contribuiscono tutti allo sviluppo di un forte temporale nell'ambiente tropicale.

2.5 Formazione dei fulmini

I fulmini corrispondono alla dissipazione dell'energia statica immagazzinata all'interno di una nuvola.

La formazione delle regioni polarizzate all'interno della nuvola innesca una separazione delle cariche anche nel terreno sottostante, dando origine a una regione con polarizzazione opposta a quella della regione che innesca la separazione, sviluppando un campo elettrico tra le regioni interessate.

Quando il campo elettrico che si instaura supera la rigidità dielettrica dell'aria, tipicamente circa 30kV/cm quando l'aria è secca altrimenti cala drasticamente, si ha la perforazione del dielettrico rendendo quindi possibile il passaggio di corrente.

Questo rende possibile lo sviluppo di una scarica debole ed invisibile composta da particelle cariche negativamente, detta step leader, che si muove verso la regione di carica opposta ionizzando l'aria percorsa, predisponendo il canale necessario per la scarica.

Quando la scarica pilota si avvicina al suolo, da quest'ultima parte una scarica di ritorno diretta verso l'alto e composta da un flusso di cariche positive presenti sulla superficie terrestre. Quando le due scariche si incontrano, esse segnano nell'aria una specie di scia di congiunzione tra cielo e terra; lungo tale traccia risale verso la nube una fortissima corrente elettrica ad una velocità stimata in circa un terzo di quella della luce.

La scarica di ritorno, detta return stroke può avere una durata compresa tra qualche decina e qualche centinaia di microsecondi e liberando una quantità enorme di energia di tipo termico, ottico (lampo), acustico (tuono) ed elettromagnetico. Lo shock acustico è il risultato della rapida espansione

dell'aria riscaldata dalla corrente attraverso il canale.

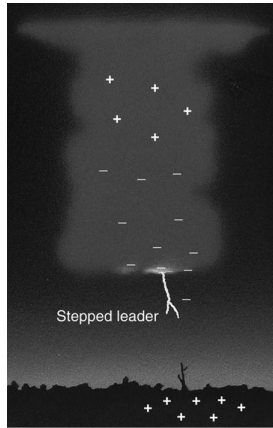


Figura 2.4:
Scarica step leader

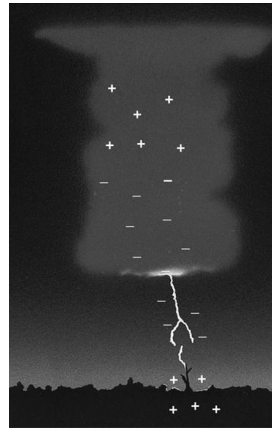


Figura 2.5: Congiungimento delle due scariche

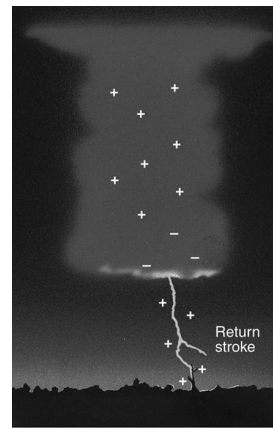


Figura 2.6: Return stroke

2.6 Forma d'onda delle correnti dei fulmini

Grazie agli studi condotti è stato possibile modellizzare le forme d'onda della corrente prodotta dal fulmine. Le modellizzazioni delle tipologie più frequenti dei fulmini sono esplicitate successivamente.

Fulmine negativo verso il terreno: In figura è rappresentato un esempio della corrente del colpo di ritorno. Il numero di impulsi di corrente presenti in un fulmine negativo è solitamente compreso tra 1 e 24, con un valore medio di 3; sono veramente pochi i fulmini che contengono 24 colpi. La durata totale del fulmine è compresa tra i 20 ms e 1s, con un valore medio 0.2 s. Il primo impulso è caratterizzato da un tempo di salita di circa $6\mu\text{s}$, un tempo di decadimento, ovvero quanto impiega a raggiungere la metà del valore di picco, di circa $70\mu\text{s}$, con un ampiezza del picco di circa 200 kA, valore massimo raggiunto su tutto l'evento. Gli impulsi successivi tendono ad avere un tasso di crescita maggiore contrastato con una bassa corrente di picco, circa di 100 kA. Possono essere comunque significativi per la tensione indotta sui cavi, dove le tensioni induttive di accoppiamento sono proporzionali al tasso di variazione della corrente del fulmine.

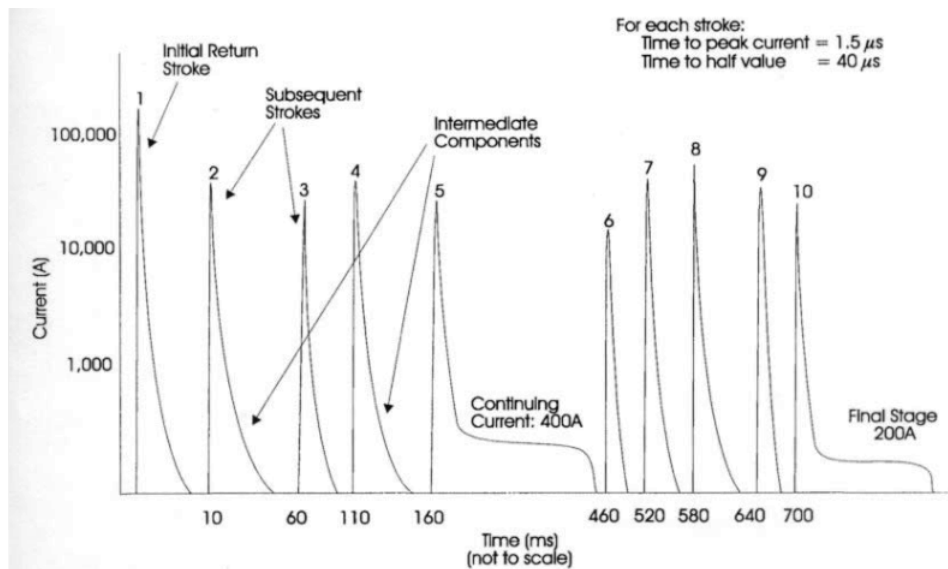


Figura 2.7: Modello della forma d'onda della corrente di un tipico fulmine nuvola-terreno con polarità negativa

Verso la fine del fulmine negativo, vi è spesso un basso livello di corrente di pochi kA persistente per diversi secondi, detta corrente intermedia. Il valore che tale corrente assume è compresa tra i 100 e i 400 A, è però caratterizzata una durata compresa tra i 100 e gli 800 ms, si ha quindi un sostanziale trasferimento di carica anche durante questa fase.

Fulmini intra-nuvola e inter-nuvola: Durante i fulmini intra nuvole possono essere osservati brevi impulsi con una bassa ampiezza ma un elevata velocità di crescita. Questi impulsi, dovuti alla redistribuzione della carica all'interno della nuvola. Tipicamente sono formati da picchi di ampiezza di 20-30 kA, anche se sono stati registrate delle scariche intra-nuvola con picchi di corrente superiori ai 60 kA.

Fulmine positivo verso il terreno: Questo tipo di fulmine generalmente si verifica meno frequentemente rispetto al fulmine negativo, anche se dipende della regione geografica. Secondo recenti studi circa il 10% dei fulmini che si scaricano verso il terreno sono polarizzati positivamente. Questi fulmini sono solitamente attivati da un movimento principale di cariche negative verso l'alto e si verificano più frequentemente sopra le montagne che sopra un terreno pianeggiante. Com'è possibile notare dal modello della

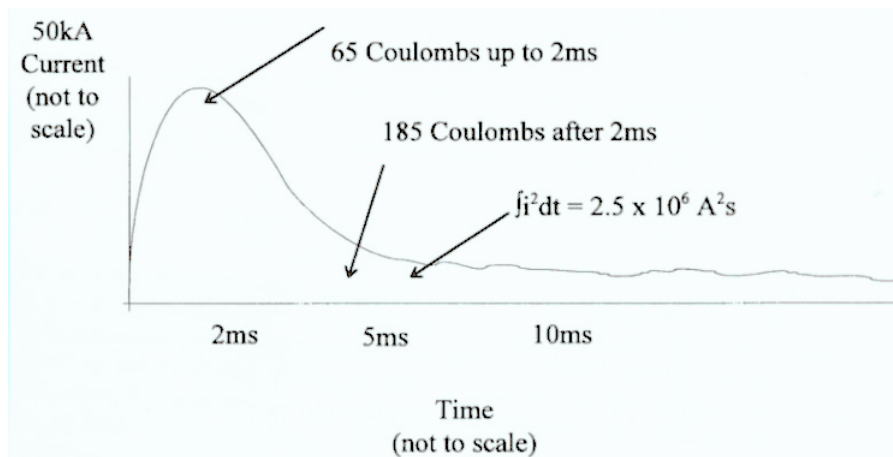


Figura 2.8: Modello della forma d'onda della corrente di un tipico fulmine nuvola-terreno con polarità positiva

corrente, sono composti da un solo picco di corrente seguito da una componente praticamente continua. Rispetto a quelli negativi hanno un tempo di salita inferiore, circa $20\mu\text{s}$, hanno però una durata molto superiore trasferendo comunque un'elevata quantità di carica.

Capitolo 3

Interazione dei fulmini con gli aerei

Per capire come difendere l'aereo contro potenziali effetti dovuti dai fulmini bisogna capire quali sono le zone con una maggiore probabilità di essere colpite e valutare quali sono le condizioni meteorologiche e le caratteristiche fisiche del volo e dell'aereo che favoriscono l'innesco, o l'attrazione, della scarica del fulmine.

Conoscere queste condizioni può aiutare i piloti a ridurre possibili incidenti dovuti dai fulmini.

La probabilità che un aereo venga colpito da un fulmine è fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche e dalle fasi di volo. I fattori che influenzano maggiormente questa probabilità sono:

- **Presenza e tipologia delle precipitazioni:** il più delle volte i colpi da parte di un fulmine vengono registrati durante la presenza di pioggia, rappresentano il 70% rispetto a tutti i casi di un aereo colpito da un fulmine.
- **Fase di volo dell'aereo:** le probabilità aumentano durante la fase di salita o di discesa rispetto all'altitudine di crociera.

- **Temperatura:** è più probabile che si venga colpiti da un fulmine quando si attraversano regioni caratterizzate da una temperatura di circa 0°C
- **Altezza di volo:** l'altitudine critica è intorno ai 12000 piedi.

Tutte questi fattori possono essere legati tra loro considerando la relazione tra l'altezza a cui si trova l'aereo e la probabilità che venga colpito da un fulmine. La maggior parte dei colpi avvengono ad una bassa quota, ovvero quando la traiettoria di volo dell'aereo passa nella parte inferiore, o subito al di sotto della nuvola. Tipicamente, queste parti della nuvola corrispondono ad un'altezza di circa 12'000 piedi (3660 metri) alla quale è presente una temperatura di circa 0°C, inoltre l'aereo attraversa questa zona durante le fasi di decollo e atterraggio.

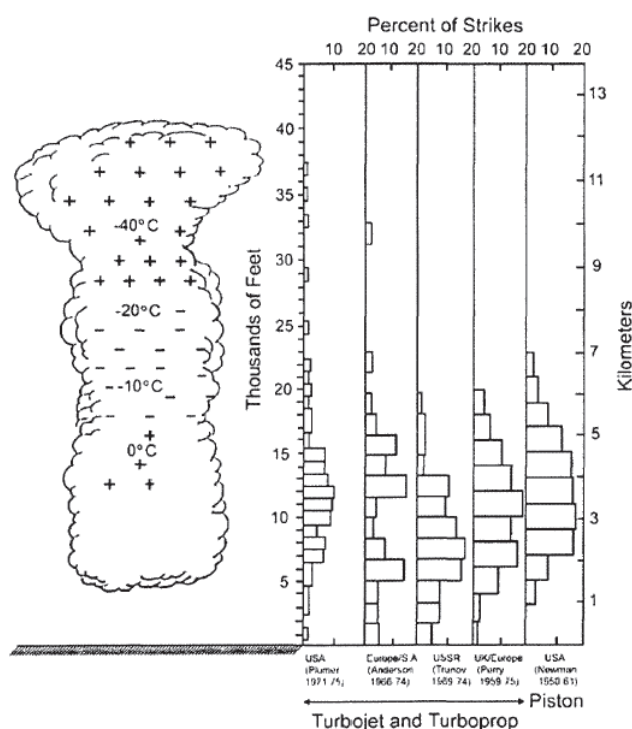


Figura 3.1: Incidenza dei fulmini sugli aerei in base alla quota di volo

Le osservazioni fatte derivano dai dati raccolti della flotta Lufthansa durante l'anno 2006. Includono quindi aerei che hanno solo alcune parti realizzate in fibra di vetro e carbonio, non includono ancora un aereo CFRP

come il 787 (ovvero aerei con tutta la struttura composta da fibra di carbonio) .

Gli incidenti avvengono meno frequentemente al di sopra dei 20'000 piedi perché gli aerei a queste altitudini possono essere deviati più facilmente attorno all'area delle precipitazioni di quanto non possa un aereo che vola ad altezze inferiori.

3.1 Innesco di un fulmine da un aereo

Anche se, la maggioranza delle volte, è molto difficile anticipare o evitare le condizioni che permettono l'innesco di un fulmine, è importante capire il punto di collegamento sull'aereo per valutare correttamente i vari effetti prodotti da questo evento.

Come discusso in precedenza, un fulmine viene innescato da una scarica step-leader che si propaga dal centro di carica della nuvola verso un centro di carica opposta, la regione opposta può trovarsi sempre all'interno della nuvola o all'interno di una nuvola adiacente o sul terreno. La differenza di potenziale che esiste tra la scarica step leader e la regione di carica opposta permette lo sviluppo di un campo elettrostatico tra di essi, rappresentabile con superfici equipotenziali. L'intensità del campo, comunemente espressa in kilovolt per metro, è inversamente proporzionale alla distanza tra due superfici equipotenziali adiacenti, ovvero il campo elettrico risulta maggiore dove le superfici equipotenziali sono vicine tra loro. Quando un aereo si trova in una regione dove è presente un campo elettrostatico assume lo stesso potenziale elettrico dell'ambiente; dal momento che la superficie dell'aereo è tipicamente un buon conduttore, ovvero la superficie è tutta allo stesso potenziale, devierà e comprimerà le superfici equipotenziali adiacenti, aumentando quindi il campo elettrico sulle estremità dell'aereo e specialmente tra di esso e altre sorgenti di carica. Per questo la forma della struttura di un aereo, oltre ad essere fondamentale per la stabilità, è uno dei fattori più importanti per determinare l'aumento del campo elettrico locale, può quindi modificare l'intensità e il verificarsi dei fulmini. Se l'aereo è lontano

dal leader, il suo effetto sul campo vicino al leader è trascurabile; se l'aereo si trova ad una distanza compresa tra diverse decine o centinaia di metri dal leader, l'aumento del campo elettrico che la sua presenza produce può essere sufficiente ad attrarre la scarica del leader attraverso l'aereo.

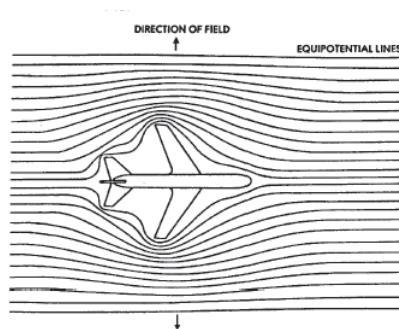
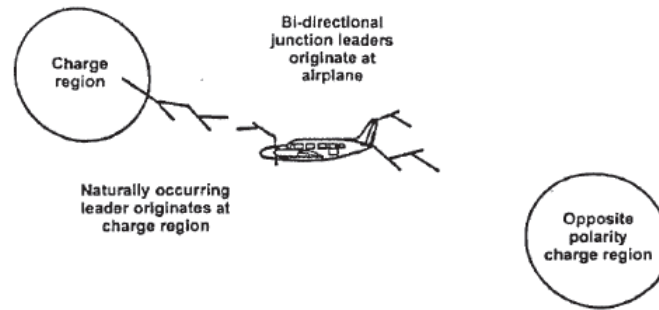


Figura 3.2: Compressione di un campo elettrico provocata dalla presenza di un aereo

Le zone dell'aereo con un campo elettrico maggiore sono le estremità, tipicamente la punta dell'aereo, i margini principali, la coda e la punta delle ali. Quando il leader avanza verso il punto dove il campo adiacente all'estremità dell'aereo è aumentato di circa 30 kV/cm , l'aria viene ionizzata si formano quindi scintille elettriche all'estremità dell'aereo, estendendosi nella direzione dell'imminente leader. Il fulmine può entrare e uscire in diverse zone dell'aereo, ad esempio da ala ad ala, da ala al timone, dalla punta a cono all'ala, ecc. come è illustrato in figura. Quando il leader ha raggiunto la sua destinazione e quando si è formato un canale continuo ionizzato tra i centri di carica, la ricombinazione tra elettroni e ioni positivi costituisce il ritorno della scarica leader sul canale, che forma il picco di corrente del colpo di ritorno (return stroke). Questa corrente e qualsiasi componente che segue scorrono attraverso l'aereo che è diventato parte del canale conduttivo.

Nella pratica, l'intercettazione dei fulmini da parte di un aereo può essere divisa in due gruppi a seconda dell'iniziazione del fulmine: fulmine iniziato dall'aereo e fulmine naturalmente intercettato dall'aereo. Come implica il nome, il primo avviene quando un fulmine che colpisce l'aereo viene attivato dalla presenza dell'aereo stesso, immerso nel forte campo elettrico, mentre



(a) Fulmine che ha origine naturalmente



(b) Fulmine che viene innescato dall'aereo

Figura 3.3: Meccanismo di innesco di un fulmine in maniera naturale e intercettato da un aereo

la seconda avviene come un risultato di un aereo che incontra una scarica leader naturale originariamente generata altrove.

L'estremità dell'aereo è la caratteristica fondamentale nell'iniziazione e nell'attacco della scarica di un fulmine.

Il punto di contatto con cui il fulmine si connette all'aereo è detto punto di attacco, corrisponde al momento in cui l'aereo diventa parte del canale conduttivo della corrente del fulmine tra nuvola e la terra o tra nuvola e nuvola.

3.2 Fenomeno dello spostamento del fulmine

Dopo che il veicolo è diventato una parte del canale del fulmine, la corrente può scorrere attraverso il canale per qualche secondo o più. Durante questo

periodo, il canale rimane nel punto di origine, mentre l'aereo percorre una distanza significativa durante il flusso della corrente del fulmine. Per questo motivo possono esserci altri punti di ingresso nella superficie dell'aereo, determinati proprio dallo spostamento percorso dall'aereo all'interno di un canale praticamente stazionario.

Quando si verifica il fenomeno dello spostamento, il tipo di superficie può causare il collegamento e il prolungamento del canale del fulmine per diversi periodi di tempo.

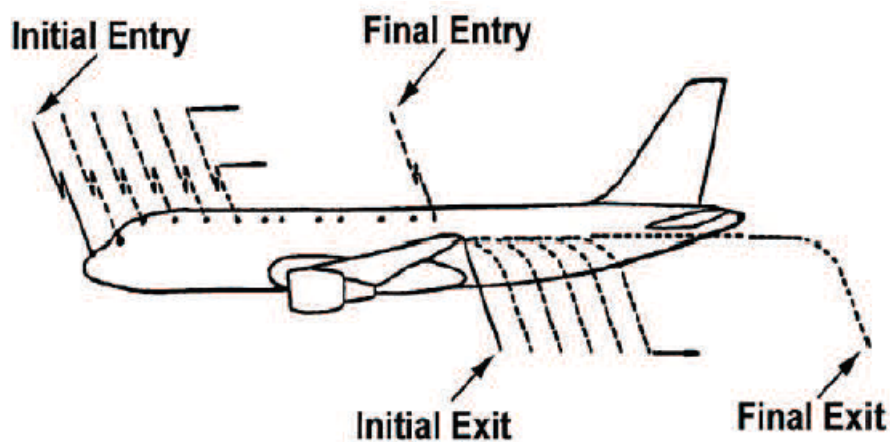


Figura 3.4: Punti di ingresso e di uscita di un fulmine dall'aereo

L'aereo una volta innescato il canale non può volarne fuori, o lontano. Questo perché l'elevata differenza di potenziale tra i centri di carica mantiene il canale fino a quando le cariche non si sono ricombinate.

Capitolo 4

Effetti dei fulmini sugli aerei

Quando un aereo viene colpito da un fulmine possono avere origine diversi problemi e danni.

Gli effetti che un fulmine produce su un aereo possono essere divisi in due categorie effetti diretti ed effetti indiretti, questa divisione viene effettuata a seconda della natura dei danni.

In particolare, gli **effetti diretti** includono tutti gli effetti e i danni fisici sull'aereo e sull'equipaggiamento dovuti al contatto diretto tra il fulmine e la superficie dell'aereo e alla conduzione della corrente elettrica.

Gli **effetti indiretti** includono, invece, gli effetti causati dal transitorio elettrico indotto dal fulmine sui cavi e i sistemi elettronici e avionici.

4.1 Effetti Diretti

Gli effetti diretti sono studiati a seconda dell'area e del materiale che compone la zona colpita dal fulmine, questo per le diverse tipologie di danni che possono verificarsi.

4.1.1 Danni alla struttura esterna

I danni più comuni che si verificano sulla struttura esterna sono:

- Danni superficiali e interferenze strutturali
- Danni causati dalla forza magnetica
- Danni superficiali e fusioni
- Calore resistivo
- Onda d'urto e sovrappressione

Danni causati dalla forza magnetica: Due conduttori paralleli percorsi da una corrente che viaggia nella stessa direzione sono mutuamente attratti tra loro. Se la struttura vicino al punto di impatto è vista elettricamente come costituita da un grande numero di conduttori paralleli convergenti nel punto di ingresso (o uscita) le forze magnetiche indotte cercano di attrarre conduttori adiacenti. Il numero di danni causati è proporzionale al quadrato dell'ampiezza della corrente del fulmine, è inoltre proporzionale al periodo di tempo in cui la corrente scorre. L'alta ampiezza della corrente del fulmine è la maggior responsabile per i danni dovuti alla forza magnetica. Oltre alle estremità dell'aereo, ogni altro oggetto che può condurre la corrente del fulmine può essere danneggiato.

Danni superficiali e fusioni: Se il canale di un fulmine tocca la superficie del metallo, il materiale nel punto di collegamento viene fuso. Comuni evidenze di questo sono i fori presenti sulla superficie, visibili lungo tutta la fusoliera. I fori prodotti hanno solitamente larghezze di 1mm. Per la fusione del materiale la corrente deve scorrere per un elevato lasso di tempo, per questo motivo è la componente continua della corrente quella che produce maggiori danni superficiali e bruciature. I fori sulla struttura esterna non creano problemi alla sicurezza del volo, a differenza di quelli che si verificano nel serbatoio che possono causare gravi danni.

Danni superficiali e interferenze strutturali: Dove esiste un cattivo contatto elettrico tra due superfici adiacenti possono essere riscontrati la bruciatura e danni di questa superficie. Possono causare archi sull'interfaccia strutturale, questi archi possono provocare danni per la conversione chimica del rivestimento sull'interfaccia, ovvero inducendo una corrosione accelerata della regione interessata.

Calore resistivo: Un altro tipo di effetto diretto è il calore resistivo sviluppato da un conduttore esposto al passaggio di corrente di un fulmine. Quando la resistività di un conduttore è troppo alta o l'area della sezione trasversale risulta troppo bassa rispetto alla conduttanza di corrente adeguata, la corrente del fulmine potrebbe depositare un valore apprezzabile di energia nel conduttore e causarne quindi un eccessivo aumento della temperatura.

Siccome la resistività della maggior parte dei conduttori aumenta con l'aumento della temperatura, una data corrente nel conduttore riscaldato può depositare più energia di quella che lascerebbe in uno non riscaldato; questo processo aumenta ulteriormente la temperatura del conduttore. Molti elementi che contengono il metallo come elemento strutturale possono tollerare la corrente del fulmine senza surriscaldarsi, ad esempio conduttori di alluminio o di rame con un area della sezione trasversale maggiore di 0.5cm^2 possono condurre diverse correnti dei fulmini senza surriscaldarsi.

L'energia resistiva depositata è proporzionale all'azione integrale della corrente ed ogni conduttore è caratterizzato da un valore limite dell'azione integrale oltre il quale si ha la fusione e la vaporizzazione del materiale.

I danni prodotti dall'esplosiva vaporizzazione dei conduttori è solitamente molto grave quando il conduttore interessato si trova all'interno della struttura, come può essere l'interno della punta di un ala, perché l'esplosione è contenuta fino a quando la pressione raggiunge un livello sufficiente per la rottura del container. I danni sono dovuti, in parte, all'energia meccanica di combustione rilasciata dal filo mentre bruciando, si aggiunge inoltre l'energia depositata dalla corrente. Nella maggior parte dei casi, i fili sono installati all'interno di una cellula conduttiva e quindi non sono esposti ad un flusso elevato di corrente prodotta dal fulmine. Quindi le protezioni devono minimizzare la probabilità che si sviluppi una sorgente conduttiva della

corrente durante la distribuzione di potenza nel sistema avionico.

Onda d'urto e sovrappressione: Quando la corrente di un fulmine scorre in un canale principale ionizzato, come quando si verifica il primo colpo di ritorno, una grande quantità di energia viene liberata nel canale in un periodo di 5 o 10 microsecondi, causando l'espansione del canale ad una velocità supersonica. Questa espansione provoca la propagazione di un'onda d'urto cilindrica, che si propaga radialmente dal centro del canale e se intercetta una superficie solida, l'energia cinetica si trasforma in una crescita della pressione su tale superficie provocandone la possibile rottura. A seconda della distanza tra il canale e la superficie dell'aereo, la pressione sulla superficie può aumentare di diverse centinaia di atmosfere, provocando un danno da implosione.

4.1.2 Effetti diretti sulle strutture non metalliche

I materiali non metallici utilizzati nell'aereo includono fibre composte rinforzate e altri materiali plastici come una resina di policarbonato. Il policarbonato viene utilizzato per le finestre e alcune carenature. La fibra di vetro rinforzata è un materiale non elettricamente conduttivo, per cui si comporta in maniera differente dalla fibra di carbonio, che risulta invece elettricamente conduttiva.

Composti in fibra di vetro: Alcuni di questi materiali hanno rimpiazzato l'alluminio nelle strutture secondarie, come nella punta, nelle ali, nella coda a cono, nella carenatura delle ali e superfici di controllo; in alcuni casi l'intera struttura viene realizzata in composti di vetri rinforzati.

Solitamente i materiali non metallici sono usati per rivestire oggetti metallici che non devono risultare schermati, come l'antenna di un radar. Se il materiale di copertura è non-conduttore, come nel caso della fibra di vetro o Kevlar, il campo elettrico può penetrare all'interno e raggiungere gli oggetti metallici interni. Questo collegamento può forare il materiale, ad esempio quando si propaga verso l'esterno per combinarsi con una scarica step leader imminente.

Composto in fibra di carbonio: La fibra di carbonio è contrassegnata dalla presenza di alcune caratteristiche elettriche, come la conducibilità; per

questo motivo il comportamento rispetto al fulmine differisce non solo dai materiali non conduttivi ma anche dall'alluminio.

I composti in fibra di carbonio (CFC) sono largamente utilizzati nelle produzione delle strutture primarie, questo a caratteristiche come il peso contenuto a la conducibilità elettrica. Uno svantaggio risulta evidente appena la temperatura inizia a crescere, la resina che fissa la fibra di carbonio inizia a rompersi come risultato di una bruciatura o pirolisi. Se i gas prodotti dalla combustione della resina sono racchiusi in un substrato si può verificare un aumento di pressione ed un rilascio esplosivo, provocando danni alla struttura.

A differenza della maggior parte delle leghe di alluminio, che sono duttili e possono essere deformate, ma non rotte, i materiali CFC sono rigidi e possono rompersi con facilità. Questi danni solitamente sono limitati alla superficie vicino al punto di ingresso del fulmine.

4.1.3 Effetti diretti sul sistema di carburazione

I fulmini presentano un potenziale rischio anche per i sistemi di carburazione installati sugli aerei. Un solo arco elettrico o una sola scintilla sono sufficienti per accendere i vapori altamente infiammabili del carburante.

Sebbene non sia ancora del tutto chiaro come possa avvenire l'accensione dei carburanti, la spiegazione più probabile è che un arco elettrico o una scintilla si verifichi su una giuntura o su un dispositivo non progettato per condurre corrente elettrica.

Il fulmine può anche forare il serbatoio di carburante integrato sulla superficie, provocando l'accensione immediata dei vapori all'interno.

4.1.4 Effetti diretti sul sistema elettrico

Se un apparecchiatura elettrica montata esternamente, come una lampada di navigazione o un antenna, diventa punto di collegamento, i globi di protezione o le carenature possono rompersi e permettere ad una parte della corrente di entrare direttamente nella rete di cavi associata. La sovratensione indotta

può causare il breakdown dell'isolante o danneggiare altri equipaggiamenti elettrici alimentati dalla stessa sorgente. Componenti sensibili solitamente includono luci di navigazione, antenne, sonda per verificare la temperatura dell'aria e pale o parabrezza.

4.2 Effetti indiretti

I danni dovuti agli effetti indiretti che il fulmine può provocare sull'aereo sono meno rispetto ai danni diretti. Secondo la definizione di effetti indiretti, sono i danni dovuti ai transitori elettrici indotti dai fulmini nei sistemi e nei cavi elettronici o avionici. Questi transitori possono causare:

- Apertura delle giunture, causata dal flusso magnetico generato dal risultato della rapida variazione di corrente
- Caduta di tensione sulle strutture, una tensione resistiva cresce lungo la struttura a causa della corrente che ci scorre attraverso. Questo si verifica prevalentemente nelle strutture di materiale misto e nei giunti resistivi

Un esempio di un danno indotto dalla differenza di potenziale che si instaura sull'aereo è quello che si verifica sul serbatoio del carburante. Infatti, si ritiene che la tensione indotta dal fulmine sulla rete elettrica dei cavi possa dar luogo a delle scintille che causerebbero l'accensione dei vapori infiammabili prodotti dal carburante.

Le scintille causate dalla differenza di potenziale avvengono prevalentemente negli aerei composti da materiali misti, a causa della maggior resistenza, e tra i giunti e le cerniere resistive.

Capitolo 5

Processo di certificazione

I vari requisiti che le protezioni di un aereo devono rispettare sono gestite dall'associazione Federal Aviation Administration (FAA) ed esplicitate nel Federal Aviation Regulations (FAR's). Le regolazioni non considerano però problemi come archi interni e scintille oltre agli effetti indiretti sul sistema elettrico ed avionico.

5.1 FAR per gli effetti diretti dei fulmini

I punti principali per la protezione dai fulmini degli aerei servono per prevenire incidenti catastrofici, e per permettere all'aereo di continuare il volo in sicurezza e poter atterrare.

I requisiti che i sistemi di protezione devono soddisfare sono inclusi nella collezione delle regolazioni della federal aviation e Advisory Circulars (AC's). Queste regolazioni trattano l'aeromobile nel suo complesso, e più nello specifico con i sistemi di carburazione e altri sistemi che gestiscono la criticità del volo e le funzioni essenziali.

La maggior parte di queste regolazioni, indicano i requisiti che devono essere soddisfatti, ma non includono delle linee guida per le conformità o specifiche tecniche di progetto. In questa maniera le regolazioni lasciano assoluta flessibilità ai progettisti.

5.2 Federal Aviation Regulation

Le regolazioni che determinano la base per la protezione contro i fulmini per le celle della struttura dell'aereo sono le stesse per tutte le categorie dei veicoli, e sono esplicitate nella FAR's per gli aeromobili per l'aviazione generali come FAR 23.867. Regolazioni identiche sono applicabili alle altre categorie dell'aereo:

Parte 29.610-Protezione della struttura contro i fulmini: definisce la protezione base della cella della struttura, richiede che l'aereo sia in grado di sostenere un colpo di un fulmine senza riportare danni irreparabili.

Parte 29.954-Protezione del sistema di carburazione contro i fulmini: questa regolazione richiede che i serbatoi per il carburante e i sistemi di alimentazione siano liberi da sorgenti di accensione, come un arco elettrico o una scintilla dovuti al fulmine diretto o spazzato sull'impianto di carburazione montato esternamente. Protezione contro fonti di accensione indirette come un serbatoio di carburante cablato è solitamente applicato.

Parte 29.1309-Equipaggiamento, sistemi e installazione: Questa regolazione richiede che il volo critico e il sistema, l'equipaggiamento, e le funzioni essenziali siano progettate ed installate in modo tale da continuare a svolgere la loro funzione sotto qualsiasi condizione di operazione prevedibile, e richiede, specificatamente, che gli effetti diretti e indiretti del fulmine siano considerati in conformità con queste regolazioni.

5.3 FAA Advisory Circulars

I requisiti principali che un aereo deve soddisfare che sono espressi nell' AC's sono i seguenti:

AC 20-53A: definisce le protezioni del sistema di alimentazione. Questo AC presenta un metodo per mostrare le conformità con FAR 29.954 ed include una serie di passi procedurali compresi la locazione delle zone con una probabilità maggiore di essere colpite da un fulmine, identificazione dei fulmini potenzialmente pericolosi, e verifica dell'adeguatezza delle protezioni. Questo AC definisce inoltre l'ambiente del fulmine per il progetto e per la certificazione richiesta. Questa circolare è frequentemente seguita, anche se in linea di massima, per la protezione contro gli effetti diretti sulla superficie, sulla struttura, e la superficie di controllo di volo.

AC 20-136: Protezione del volo critico e dei sistemi elettronici ed elettrici essenziali contro gli effetti diretti dei fulmini. Questa circolare fornisce un mezzo in conformità con le regolazioni FAR 29.1309 e condizioni particolari che mirano alla protezione dell'avionica contro gli effetti indiretti dei fulmini, e una definizione dell'ambiente del fulmine per questo scopo. È la circolare più recente rilasciata dalla FAA a riguardo della protezione dai fulmini.

Capitolo 6

Protezione dai fulmini

L'aeromobile deve sopportare gli effetti diretti e indiretti della corrente prodotta dal fulmine che può raggiungere picchi di 20000 A, sia che si colleghi direttamente alla superficie o che si verifichi nelle vicinanze. Nello specifico l'aereo e il suo sottosistema devono:

1. Prevenire pericolosi disturbi temporanei e danni permanenti al sottosistema elettrico ed elettronico che garantiscono la sicurezza del volo
2. Prevenire disastrosi danni alla struttura dell'aereo e all'equipaggiamento associato alla sicurezza del volo, che potrebbero precludere un ritorno ed un atterraggio sicuri.
3. Prevenire disturbi e danni permanenti per l'equipaggiamento della missione critica, che potrebbero precludere un ritorno ed un atterraggio sicuri.
4. Prevenire l'accensione dei vapori di carburante

I Passaggi specifici per lo sviluppo del progetto della protezione degli aerei e l'ordine di esecuzione possono variare da un programma ad un altro, anche se la maggior parte prevede i seguenti passaggi base:

Passo a - Stabilire la locazione delle zone maggiormente colpite dai fulmini

Determinare le zone con una probabilità maggiore di essere colpite da un fulmine è un passo utile per dimostrare che la protezione dell'aereo sia adeguata sia per gli effetti diretti che per quelli indiretti del fulmine.

La superficie dell'aereo può essere divisa in diverse regioni, a seconda della probabilità che una determinata zona ha di essere colpita da un fulmine.

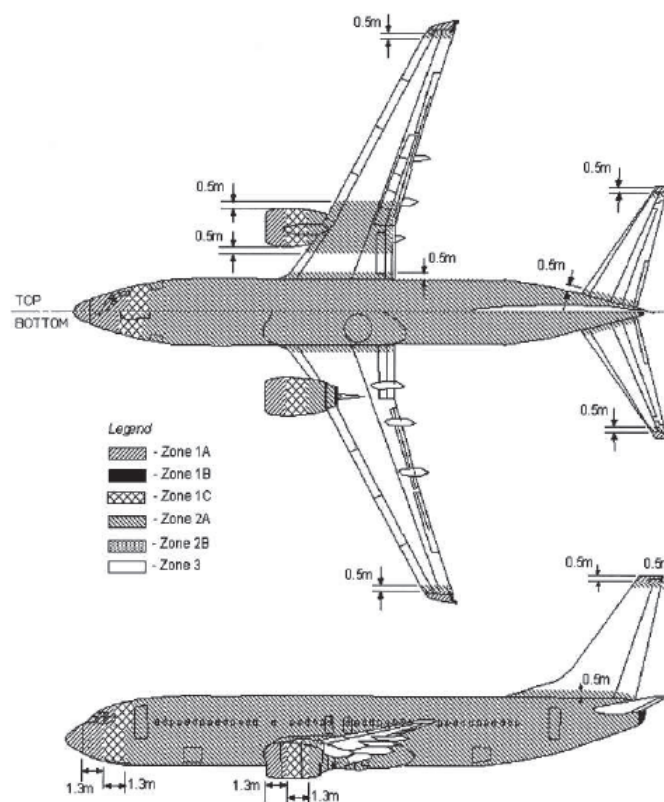


Figura 6.1: Divisione delle varie zone in base alla probabilità che siano colpite da un fulmine

La suddivisione delle zone è la seguente:

- **Zona 1A** Prima zona del colpo di ritorno
- **Zona 1B** Prima zona del colpo di ritorno con un lungo percorso
- **Zona 1C** Zona di transizione per il primo colpo di ritorno

- **Zona 2A** Zona di spostamento del colpo, un primo colpo di ritorno con un'ampiezza ridotta è probabile durante la fase di canale del fulmine
- **Zona 2B** Zona di spostamento con un lungo ritorno
- **Zona 3** Zone che non rientrano nelle altre categorie, ogni attacco di fulmini è improbabile

Il primo colpo di ritorno di un fulmine sull'aereo si ha quando il punto di attacco iniziale sulla superficie dell'aereo crea un circuito chiuso tra il centro di carica nella nuvola e un centro di cariche di segno opposto, tipicamente il terreno.

Passo b- Identificare il sistema e le componenti essenziali/critiche per il volo

Questo passo comprende l'identificazione del sistema dell'aereo e/o delle componenti che potrebbero essere suscettibili agli effetti diretti e indiretti del fulmine, e la cui funzione risulta critica o essenziale per la sicurezza del volo.

Passo c- Stabilire i criteri di protezione

Specifica i criteri per ogni zona della struttura e dei sistemi che hanno bisogno di protezione. Per gli effetti diretti, include la definizione del grado dei danni fisici che devono essere tollerati dalle strutture critiche/essenziali per il volo, e la definizione dei criteri che garantiscono l'assenza di accensione dei vapori di carburante all'interno dei serbatoi.

Per quelli indiretti invece comprende i criteri che garantiscono l'isolamento dei componenti e della rete di cavi che possono subire danni critici causati dalla forte differenza di potenziale.

Passo d- Progetto delle protezioni

In questo passo, oltre alla progettazione specifica, vengono sviluppati cambiamenti o modifiche alla struttura del volo critico/essenziale, ai sistemi e ai componenti in modo tale da soddisfare i criteri di protezione stabiliti nel passo precedente. Per gli effetti diretti, comporta una serie di tecniche di

progetto, che vanno dalla scelta dei materiali per la struttura e le tecniche di fabbricazione all'aggiunta di trattamenti o dispositivi in grado di migliorare la conducibilità elettrica, la soppressione di un arco o una scintilla. Per gli effetti indiretti prevede, invece, la schermatura dei sistemi elettrici e elettronici.

Passo e- Verifica dell'adeguatezza delle protezioni La verifica della protezione può essere compiuta tramite l'analisi, la somiglianza con dei progetti precedentemente approvati, o tramite dei test effettuati direttamente sui componenti. Può essere usato qualsiasi di questi tre metodi, o anche una combinazione di essi. Principalmente si sfruttano il criterio di analisi e quello di somiglianza, per verificare le protezioni effettuate tramite test sono necessarie delle prove di verifica, queste non possono essere eseguite fino a che la componente l'hardware non sia stata progettata, costruita e messa quindi a disposizione. Per questo motivo lo sviluppo di modelli che rappresentino in modo più esatto possibile il comportamento dei fulmini sono essenziali.

6.1 Idealizzazione della forma d'onda della corrente prodotta dal fulmine

Le caratteristiche specifiche del fulmine vengono descritte attraverso i parametri critici della forma d'onda, tali parametri sono cruciali per lo sviluppo dei metodi di protezione dai fulmini. Per testare le varie protezioni da installare su un aereo viene considerato un modello idealizzato della corrente tipica di un fulmine. La procedura più semplice per studiare tale corrente è quella di calcolarla considerando la misura della differenza di potenziale effettuata ai capi di un derivatore resistivo, debitamente posto sulla cima di un'alta costruzione. Dopo l'acquisizione dei dati, il tempo di reazione della corrente ottenuto subisce un processo di riduzione appropriato in modo tale da ottenere i parametri della forma d'onda critica come un picco di corrente e un'azione di integrale. Il metodo appena illustrato non risulta valido per la misurazione del campo elettromagnetico a cui è soggetto un aereo

in volo, la misurazione è molto più impegnativa. Diverse organizzazioni di ricerca hanno studiato gli effetti di alcuni aerei, con installati particolari strumenti di misurazione, mentre attraversano nubi temporalesche. Un equipaggiamento generico di questi aerei è costituito da strumenti in grado di registrare la corrente, la derivata rispetto al tempo del campo elettrico sulla superficie, intensità del campo magnetico sulla superficie (rapporto di conversione della densità di corrente sulla superficie) e con installata anche una telecamera ottica. Dai dati ottenuti è possibile ricavare misure statistiche, le quali vengono successivamente usate per definire una forma d'onda idealizzata della tensione e della corrente e di conseguenza i parametri per eseguire analisi e test. Le forme d'onda idealizzate della tensione e della corrente prodotte dal fulmine possono essere suddivise in diverse componenti, ognuna delle quali rappresenta il caso peggiore che si potrebbe verificare rispetto ai danni fisici o all'interferenza sull'equipaggiamento avionico. La SAE, Society of Automotive Engineers, ha definito attraverso una pratica aerospaziale raccomandata (ARP) una serie di forme d'onda per i test in laboratorio sugli effetti diretti e indiretti dei fulmini sugli aerei. Questa forma d'onda è largamente usata per la ricerca sia in campo militare che in campo commerciale.

La forma d'onda idealizzata della tensione è utilizzata per rappresentare il campo elettrico, fattore importante per la valutazione del punto di collegamento del fulmine sull'aereo. All'aumentare della tensione il campo elettrico aumenta, questo fino ad arrivare al valore di rottura di breakdown del dielettrico che può causare la foratura di un isolante solido, di una superficie di fibra di vetro, o il flashover lungo una superficie isolante. In genere, la forma d'onda della tensione è appropriata per la valutazione del breakdown del dielettrico mentre, quella della corrente è richiesta per valutare i fenomeni indotti della corrente dominante come il riscaldamento resistivo. Poiché è considerevolmente difficile simulare contemporaneamente sia la componente di tensione che quella di corrente di un fulmine naturale, vengono applicate singolarmente ai componenti a seconda del test che si deve effettuare. Solitamente, per uno studio sui danni fisici sui materiali metallici e composti, durante i test sono applicate principalmente le forme d'onda della corrente, questo per l'importanza del calore resistivo indotto durante il flusso. È possibile suddividere la forma d'onda idealizzata della corrente in quattro

componenti, chiamate A,B,C e D, le quali vengono usate durante lo studio degli effetti diretti causati dai fulmini. I parametri utilizzati per descrivere le varie componenti della forma d'onda nella figura sono i seguenti:

- *Peak amplitude/Picco di ampiezza*: picco di ampiezza, valore di picco della forma d'onda in esame
- *Action Integral/Azione integrale*: Integrazione temporale del quadrato della corrente elettrica, rappresenta il valore dell'energia dissipata attraverso la corrente di percorso sotto forma di calore resistivo.
- *Charge transfer/Trasferimento di carica*: Integrazione temporale della corrente elettrica, valuta gli effetti di bruciatura nei buoni conduttori, come i metalli.

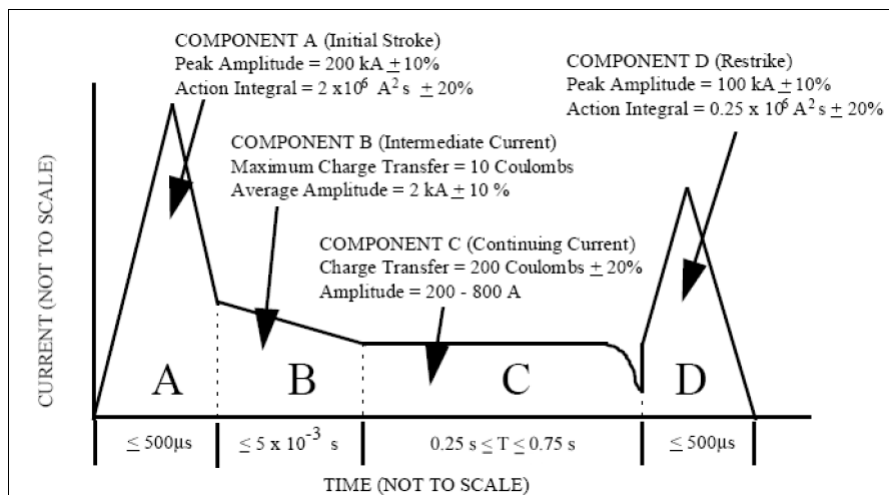


Figura 6.2: Forma d'onda della corrente del fulmine

La *componente A* è un impulso di corrente elevato, è un transitori di corrente diretta, tipicamente dell'ordine di 200 kA che per un periodo di $50 \mu\text{s}$ ha un tasso di crescita pari a $3 \times 10^{10} \text{ A/s}$. Questa componente ha un azione integrale che di $2 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ e si verifica più frequentemente quando l'aereo si

trova a bassa quota.

La *componente B* è una fase di transizione dove la corrente assume generalmente il valori di 2kA, segue il colpo di ritorno iniziale e/o un re-strike.

La *componente C* è una corrente continua di approssimativamente 200 ÷ 800 A ed ha una durata non superiore ai 0.75 s, rappresenta una grande quantità di carica trasferita.

Infine, la *componente D* è un restrike che tipicamente raggiunge un picco che vale la metà dell'ampiezza della componente A in un dato colpo ed ha la stessa durata della componente A. In media si hanno 3 o 4 restrike durante l'evento del fulmine, il massimo numero osservato è di 26 restrike in un singolo evento.

L'intensità e la frequenza dell'avvenimento del fulmine dipendono ampiamente da dove questo colpisce la superficie dell'aereo

6.2 Modelli di protezione

Le protezioni contro i fulmini mirano a mitigare i danni fisici diretti, prodotti dal collegamento del fulmine con l'aereo, prevenendo la formazione di archi elettrici lungo le giunture e proteggendo i dispositivi sensibili dal forte campo elettromagnetico che si instaura.

Effetti diretti

La strategia base per la protezione dell'aereo, sia dagli effetti diretti che da quelli indiretti, è quindi quella di fornire un ulteriore percorso conduttivo lungo la sua superficie esterna in modo tale che la corrente del fulmine fluisca e si espanda solo sulla superficie e non abbia quindi la possibilità di localizzarsi in punti dell'aereo. In questo modo la corrente non si concentra solo su un punto e non può instaurare una differenza di potenziale sufficiente a causare la rottura del dielettrico (effetto diretto) inoltre i componenti situati all'interno dell'aereo risultano schermati, grazie al principio della gabbia di faraday (effetto indiretto). Questo tipo di protezione diventa sempre più valida, soprattutto sugli aerei moderni che non sono realizzati con superfici in alluminio (la quale produrrebbe già un percorso altamente conduttivo) ma con materiali composti, i quali sono significativamente meno conduttivi dell'alluminio alle basse frequenze del fulmine. Un modo tradizionale di

realizzare un percorso conduttivo consiste nello sfruttare lamine metalliche incorporate alla superficie esterna, una rete metallica incollata alla superficie o incorporata nello strato esterno del materiale composto e cavi conduttivi incorporati nella superficie (del materiale composto). Questi percorsi super conduttivi sono quindi collegati al resto della struttura dell'aereo in modo tale che la corrente possa essere trasportata o divisa attraverso strade multiple e che esca senza danneggiare l'aereo.

Oltre a prevenire i danni fisici diretti, la protezione dai fulmini è necessaria in altri punti dell'aereo.

Altri tipi di protezione installati su un aereo sono i seguenti:

- Foglio di alluminio espanso: usato per proteggere la struttura dell'aereo dagli effetti diretti dei fulmini
- Isolante per i fulmini: usati per aiutare la rotta del fulmine attraverso delle aree sicure della struttura dell'aereo. Sono tipicamente usati all'interno delle convenzionali linee di distribuzione del carburante e condotti e consistono in isolanti non metallici collegati o direttamente sui tubi o su un giunto separatore.
- Deviatori di fulmini: usati per deviare i fulmini da zone di penetrazione casuali
- Schermo di fili di metallo conduttore: incorporati in strati di composti preimpregnati per la dispersione del fulmine
- Scaricatore del fulmine: usato per eliminare scintille sulle valvole del limite del serbatoio del carburante
- Cinghie di legame e punti di terra lungo l'impianto

Effetti indiretti

I moderni jet di linea hanno installati chilometri di filo e decine di computer e altri strumenti che controllano qualsiasi cosa, dai motori agli auricolari per la musica dei passeggeri. Questi computer, come tutti i computer, possono essere suscettibili agli sbalzi di tensione. Oltre al progetto della superficie esterna dell'aereo, durante lo sviluppo dei sistemi di protezione devono essere considerati anche i sistemi necessari per prevenire sbalzi di tensione

e le sovratensioni che possono essere indotte sull'equipaggiamento interno. Questi dispositivi, combinati con un attenta schermatura e messa a terra, evitano i problemi causati dagli effetti indiretti del fulmine sui nei cavi e sull'equipaggiamento. Ogni circuito o equipaggiamento che è critico o essenziale per la sicurezza del volo e dell'atterraggio di un aereo devono essere verificati dai produttori di essere protetti contro i fulmini in accordo con la regolazione della FAA o un autorità simile nello stato di origine dell'aereo.

Sistema di carburazione

Un'altra area di attenta progettazione corrisponde al sistema di distribuzione del carburante ed il relativo serbatoio dove anche la più piccola scintilla potrebbe essere disastrosa. Per questo motivo vengono adottate precauzioni estreme per assicurare che la corrente del fulmine non causi scintille in tutte le porzioni critiche di questo sistema. La superficie del serbatoio dell'aereo deve essere abbastanza spessa in modo tale da non venire distrutta a causa di un incendio. Tutte le giunture della struttura e i ganci devono essere ben progettati per prevenire scintille come quelle che si hanno con il passaggio della corrente del fulmine da una sezione all'altra. Ulteriori punti, come le porte di accesso, il tappo del carburante ed eventuali aperture devono essere progettate e testate per resistere ai fulmini. Tutti i tubi e tutte le linee che trasportano il carburante al motore, e il motore stesso, devono soddisfare i parametri di protezione contro i fulmini. Inoltre, nuove ricerche sono intente a trovare nuovi carburanti in grado di produrre una minore quantità di vapori esplosivi, diminuendo quindi i pericoli indotti dalle esplosioni del carburante.

Altri problemi, il radome

Il radome corrisponde alla punta a cono dell'aereo all'interno della quale è contenuto il radar e altri strumenti di volo. Corrisponde ad un'area di particolare interesse durante la progettazione delle protezioni contro i fulmini. Per funzionare, i radar non possono essere contenuti all'interno di un involucro conduttivo, per questo motivo non è possibile realizzarlo con i soliti materiali conduttori ma è realizzato con materiali isolanti. La protezione di questa zona è offerta dall'applicazione di nastri separatori per il fulmine lungo tutta la sua superficie esterna. Queste strisce possono essere formate da solide barre di metallo o da una serie di bottoni di materiale conduttivo, disposti in maniera ravvicinata tra loro, e fissati su una striscia di plastica



Figura 6.3: Simulazione di un fulmine che colpisce il radome protetto dalle strisce di deviazione

legata in modo adesivo al radome.

Il principio di funzionamento di queste strisce di deviazione è analogo a quello dei parafulmini sugli edifici, ovvero grazie alla bassa resistività offerta la corrente scorre lungo di esse e non provoca danni strutturali al dielettrico.

Un'altra tipologia di problema è quella introdotta da un arco elettrico che può svilupparsi tra le cerniere e diventare fonte di un danno strutturale. Per questo motivo, un'ulteriore protezione consiste nel posizionare a cavallo di tutte le cerniere delle fasce di connessione (o fili) prevenendo in questo modo interferenze elettromagnetiche, oltre a ridurre lo sviluppo di scintille. Un rilevante danno può essere introdotto dai bulloni o ganci metallici o i bordi delle pareti dei materiali composti, i quali possono indurre una crescita del potenziale di bordo, che anche in questo caso risulta pericoloso per l'accensione dei vapori di carburante. Per far fronte a questo problema vengono inseriti coperchi di dielettrico e guarnizioni di bordo, in questo modo si previene la diffusione all'interno dell'aereo di archi di plasma elettrico.

Capitolo 7

Terrestrial Gamma-Ray Flashes

Molti processi che si verificano all'interno dell'atmosfera terrestre non sono ancora del tutto chiari. Grazie a recenti studi è stato dimostrato l'interno delle nubi temporalesche, caratterizzati da regioni di carica fortemente polarizzate, possono diventare sorgenti di raggi gamma. Questi fenomeni vengono chiamati Terrestrial Gamma-Rays Flashes (TGFs) e corrispondono a scoppi molto brevi, della durata massima di pochi millisecondi, di fotoni ad alta energia, circa 100 keV.

7.1 Origine dei raggi gamma

Le iniziali teorie sviluppate dai ricercatori per spiegare la formazione dei raggi gamma venivano confutate dai successivi rilevamenti, effettuati con tecnologie più avanzate, dell'energia che si sviluppa.

I primi modelli associavano i TGFs a fenomeni che avvenivano nell'alta atmosfera ovvero agli sprite. Dato che gli sprite raggiungono quasi il limite dello spazio sembrava possibile che fossero le sorgenti dei raggi gamma osservabili da sonde in orbita. Gli sprite corrispondono a brevi lampi di luce

rossa, larghi vari chilometri. La teoria più recente suppone che siano generati da normali fulmini che si sprigionano all'interno delle nuvole.

Il fulmine trasporta una violenta valanga di elettroni tra diverse zone dell'atmosfera, questo flusso di cariche ripristina parzialmente l'equilibrio elettrostatico. Spesso però la scarica provoca la comparsa del campo in un altro punto dell'atmosfera, che può trovarsi fra il terreno, producendo quindi un fulmine ascendente, e l'esterno della ionosfera, dove il campo elettrico si manifesta come sprite. Nel 1992 un gruppo di ricercatori dell'Istituto di fisica di Lebedev, a Mosca, calcolarono che un simile campo elettrico posto vicino alla ionosfera potrebbe produrre una valanga di elettroni molto energetici, i quali, urtando contro gli atomi dell'aria, rilascerebbero fotoni ad elevata energia oltre alla caratteristica luminescenza rossa tipica degli spr-

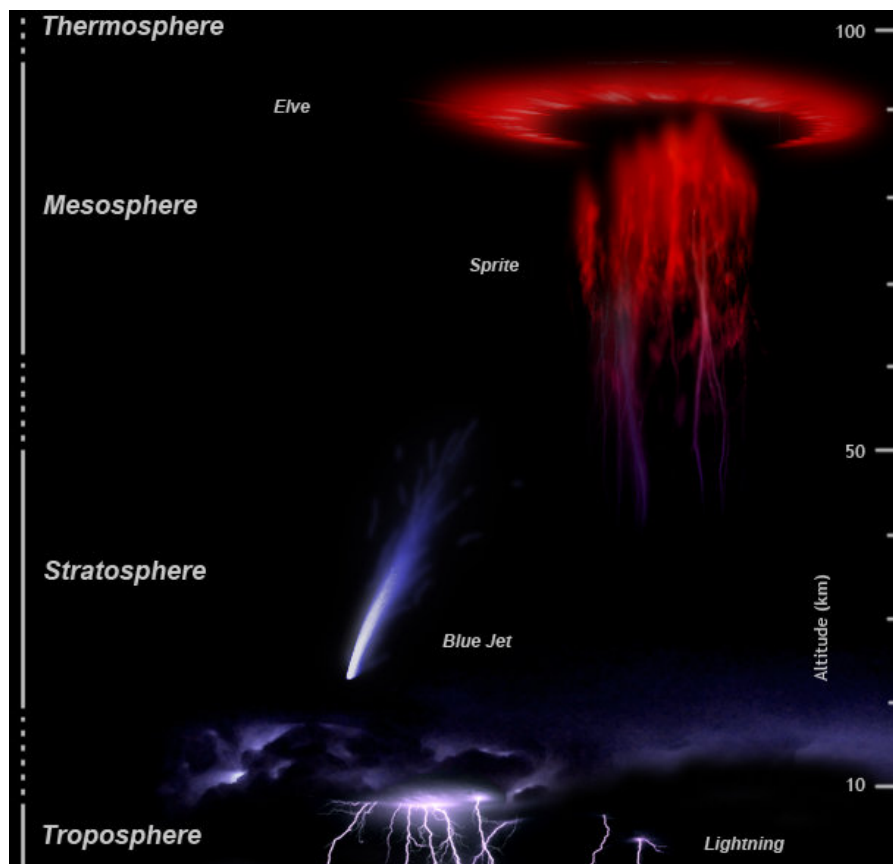


Figura 7.1: Rappresentazione dei vari eventi che possono verificarsi nell'atmosfera

te. A bassa energia gli elettroni spinti da un campo elettrico collidono tra molecola a molecola perdendo energia a ogni collisione e deviando il proprio percorso. Invece, a energie più elevate gli elettroni viaggiano percorrono traiettorie quasi rettilinee ricevendo sempre più energia dal campo elettrico e rendendo ogni collisione sempre meno capace di modificarne il percorso. Quando avviene un elettrone ad elevata energia collide con una molecola di gas dell'aria potrebbe rilasciare un elettrone, il quale a sua volta verrebbe accelerato dal campo elettrico. Questa produzione degli elettroni dall'effetto a valanga sembrava spiegare la formazione dei raggi gamma, viene invece confutata dai successivi dati raccolti. Nel 2003, in un centro di ricerca in Florida, viene rilevato un lampo di raggi gamma molto brillante emanato dalla nube temporalesca. Questo lampo appariva come i lampi terrestri dei raggi gamma che si supponeva nascessero più in alto. Tramite le energie dei fotoni gamma misurate dal RHESSI, Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, confrontate con le simulazioni si è potuto stabilire che i raggi gamma dovevano aver attraversato una notevole quantità d'aria, e quindi dovevano aver avuto origine a quote tra 11 e 21 chilometri, tipiche altezze della cime delle nubi temporalesche ma molto più basse dell'altezza a cui hanno origine gli sprite. La confutazione definitiva della teoria che i raggi gamma fossero causati dagli sprite si ebbe quando i ricercatori capirono che l'intensità dei raggi gamma misurata dal CGRO erano inferiori all'intensità effettiva, questo a causa della saturazione degli strumenti. Considerando quindi i nuovi valori di intensità rilevati dalle sonde la teoria delle sorgenti dei raggi gamma a bassa quota è sempre più accreditata.

Si è scoperto che il modello a valanga modellato dal gruppo di ricercatori di Mosca è troppo energetico per avere a che fare con gli sprite, ma non abbastanza per generare l'intensa luminosità gamma rilevata dalle sonde.

Se il campo elettrico all'interno di una nube temporalesca fosse forte abbastanza gli elettroni in fuga riuscirebbero ad accelerare fino a raggiungere velocità prossime a quella della luce e, urtando contro i nuclei atomici della molecola dell'aria, rilasciare fotoni gamma. A loro volta i fotoni dei raggi gamma interagendo con altri nuclei atomici possono produrre coppie di particelle elettroni-positroni. Anche i positroni, sempre accelerati dal campo elettrico, acquisterebbero un'accelerazione verso il basso, i quali, raggiunta

la parte inferiore della regione del campo elettrico, si scontrerebbero con le molecole dell'aria, dando origine a nuovi elettroni liberi che ritornerebbero verso la sommità della nuvola. In questo modo gli elettroni che salgono produrrebbero positroni che scendono, i quali a loro volta producono elettroni che salgono. Questo modello, detto **modello di scarica con feedback relativistico**, spiegherebbe l'origine dei raggi gamma sia come intensità dei raggi prodotti che come durata e spettro di energia. Anche questa teoria viene messa in discussione da ulteriori dati raccolti. Infatti, alla fine del 2011 l'osservatorio orbitale AGILE, dell'agenzia spaziale italiana, ha scoperto che lo spettro di energia dei lampi gamma terrestri si estende fino a 100 MeV, risultato sorprendente anche se le radiazioni venissero da brillamenti solari. Se i dati fossero corretti farebbero dubitare del modello sviluppato, infatti sembra altamente improbabile che il meccanismo della fuga elettronica possa generare da solo energie così elevate.

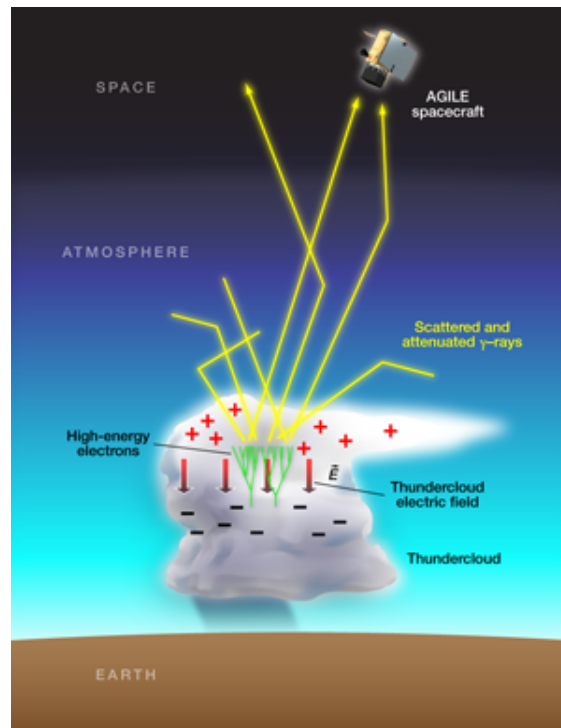


Figura 7.2: Simulazione dei raggi gamma prodotti all'interno di una nuvola osservati dal satellite AGILE

7.2 TGFs sugli aerei

I lampi gamma terrestri risultano pericolosi per la sicurezza del volo degli aerei. I possibili danni indotti dai raggi gamma si verificano quando l'aereo attraversa o vola all'interno del canale radioattivo dei TGFs. Gli effetti principali che possono essere riscontrati sono quelli causati ai passeggeri dell'aereo e i danni provocati alla struttura elettronica. Per studiare meglio gli effetti prodotti dai raggi gamma è possibile suddividere l'interazione delle particelle in due flussi.

Il **flusso primario** ha origine dall'interazione tra la coppia elettrone/positrone e il raggio gamma con la struttura avionica, i danni causati sono parzialmente attenuati e ritrattati dall'alluminio, dal carbonio, e da altri materiali pesanti presenti nella struttura.

Un **flusso secondario** di particelle e raggi gamma è invece capace di propagarsi all'interno dell'ambiente aereo. Per questo flusso possono essere distinte due componenti:

- **componente elettromagnetica:** risultante dall'interazione del campo elettromagnetico con la struttura (data dalla penetrazione primaria dei raggi gamma e delle coppie elettrone/positrone, combinata con la produzione dei raggi gamma e delle coppie elettrone/positrone secondarie)
- **componente neutroni** prodotta dall'interazione dei raggi gamma con la struttura dell'aereo, in particolare dal processo di fotoproduzione

Principalmente, queste categorie danno origine a 4 categorie di effetti di radiazioni:

1. *effetto della totale ionizzazione (Total Ionizing Dose TID):* dovuto all'effetto cumulativo delle particelle ionizzanti, che causa l'intrappolamento delle cariche e stati di interfaccia generati negli strati di die-

lettrico. TID portano eventualmente al fallimento parametrico dei circuiti integrati.

2. *effetti dei danni di spostamento (Displacement Dose)*: dovuti all'effetto cumulativo di particelle ionizzanti e non ionizzanti spostando gli atomi dei semiconduttori del reticolo, causando variazioni parametriche.
3. *effetto dose rate (DR)*: prodotto da un intenso scoppio di radiazioni ionizzate entro poche decine di microsecondi, che fanno nascere una grande fotocorrente. Può portare a un blocco, uno spegnimento o sconvolgere i sistemi.
4. *effetti evento singolo (Single Event Effects)*: dovuti a singole particelle ionizzate colpiscono una regione sensibile di un dispositivo.

Un TGF produce un flusso primario di elettroni e raggi gamma all'interno del canale di scarica di un fulmine; un aereo colpito da un fulmine TGFs si presume che faccia parte di una porzione del complesso canale del fulmine. Per lo studio degli effetti che può indurre su un aereo si considera una media degli spettri di elettroni principali rilevati dal satellite AGILE. In particolare, nelle recenti valutazioni la componente dello spettro ad alta energia compresa tra i 10MeV e i 100MeV è inclusa nel calcolo per la prima volta; i conti precedenti consideravano una componente abbastanza ridotta, circa 10 MeV per il cutoff della distribuzione esponenziale dei degli elettroni con un cutoff dell'energia $E_c \simeq 7$ MeV, come ci si aspetta dalla fuga a valanga relativistica degli elettroni (RREA) .

Dalla modellizzazione e dai calcoli effettuati, per bassi/moderati valori di intensità, ovvero per una dose relativamente bassa di radiazioni e della fluensa dei neutroni, i danni strutturali e dose di ionizzazione totale non sono elementi cruciali per il fallimento dei sistemi elettronici e la sicurezza delle persone a bordo dell'aereo. Tuttavia questi danni possono essere riscontrati per elevati valori di radiazioni, in particolare se la combinazione dei parametri principali supera un determinato valore critico di soglia possono essere riscontrati danni indotti dagli effetti di dose rate e dal effetto di un singolo evento. Gli effetti dose rate possono causare il blocco, lo spegnimento o la presenza di disturbi sui sistemi elettronici di bordo, mentre

i single event effects fanno aumentare la probabilità che si verifichino disturbi sull'equipaggiamento elettrico portando al malfunzionamento di tali componenti.

Tutte le considerazioni fatte e i possibili danni trovati sono sviluppi teorici, infatti le metodologie di protezione per questi effetti sono ancora in fase di investigazione.

Capitolo 8

Conclusioni

I voli degli aerei commerciali ricoprono un ruolo sempre più importante nel settore dei trasporti. Questo è stato possibile grazie soprattutto per la notevole riduzione dei tempi di percorrenza su lunghi tratti ed alla sicurezza introdotta negli ultimi anni.

Infatti, nonostante ogni aereo venga colpito mediamente da un fulmine una volta all'anno l'ultimo incidente aereo che ha causato, in particolare dovuto allo scoppio del serbatoio del carburante innescato da una scintilla, è stato registrato nel 1967.

Questo è stato reso possibile grazie al notevole della tecnologia, in particolare dei sistemi di rilevazione dei fulmini e degli strumenti di calcolo utilizzati per la modellizzazione delle caratteristiche dei fulmini.

I diversi metodi di protezione illustrati sono delle linee guida delle protezioni applicate in ambito commerciale o militare. Questi approcci di protezione sono delle linee guida dei metodi utilizzati sui moderni aerei, infatti con l'utilizzo di materiali composti, come la fibra di vetro e la fibra di carbonio, sempre più in larga scala i metodi proposti non risultano del tutto efficienti. Per questo motivo le ricerche per garantire una maggiore protezione durante il volo sono tuttora in corso.

Un ulteriore problema che deve essere affrontato durante la progettazione degli aeromobili è quello della presenza di sorgenti di raggi gamma anche

nell'atmosfera terrestre, in particolare vicino all'altezza tipica a cui volano degli aerei.

I problemi introdotti dai TGFs sono ancora in fase di investigazione e non sono stati sviluppati sistemi in grado di non essere danneggiati dalla presenza di queste radiazioni.

La ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie e materiali permette di garantire una sempre maggiore sicurezza durante il volo, rendendo comunque accessibile il costo dei voli di linea.

Capitolo 9

Bibliografia

- [1] V.Cooray, *The Lightning Flash*, The Institution of Engineering and Technology, 2008, pp. 1-11.
- [2] R.Majkner *Overview-Lightning protection of aircraft and avionics* ,Sikorsky, Ottobre 2003.
- [3] D.Fitzgerald, *Probable Aircraft triggering of lightning in certain thunderstorms*, Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Massachusetts, Dicembre 1967.
- [4] A.McKeeman Brown, *Aircraft structural assembly with electromagnetic protection*, Th boeing compan, Aprile 2011.
- [5] Q.Xiushu, Z.Yijun, Z.Qilin, *Characteristics of Lightning Discharges and Electric Structure of Thunderstorm*, Chinese Academy of Science, Lanzhou, Aprile 2006, pp. 244-257
- [6] E.Rupke, *Integrated Design and Manufacturing*,Lightning Technologies Inc., Pittsfield, MA, Marzo 2002.
- [7] M.Aprà, M.D'Amore, *Lightning Indirect Effects Certification of a Transport Aircraft by Numerical Simulation* , IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 50, NO. 3, AUGUST 2008

- [8] H.Kawakami, *Lightning Strike Induced Damage Mechanisms of Carbon Fiber Composites*, ProQuest LLC, 2011, pp. 27-38
- [9] G.James Sweers, *Methodology for the design assurance of aircraft lightning protection systems continued airworthiness*, Aerospace Engineering Group, Settembre 2010, pp.7-53
- [10] M.Meyer, F.Flourens, J.A.Rouquette, A.Delnevo, *Modeling of lightning indirect effects in CFRP Aircraft*, EADS Innovation Works, Airbus France.
- [11] C.A.Featherston, M.Eaton, S.L.Evans, K.M.Holford, R.Pullin, M.Cole, *Development of a Methodology to Assess Mechanical Impulse Effects Resulting from Lightning Attachment to Lightweight Aircraft Structures*, Applied Mechanism and Materials Volss. 24-25, 2010, pp 129-134.
- [12] L.U. Hansen, P.Horst, *Multilevel optimization in aircraft structural desing evaluation*, Institute of Aircraft Design and Lightweight Structures (IFL), Germany, Marzo 2007
- [13] Z.Tianchun, W.Jin, M.Keyi, F.Zhenyu, *Simulation of lightning protection for composite civil aircrafts*, The 2nd International Symposium on Aircraft Airworthiness (ISAA 2011), pp. 328-334
- [14] A. Le Louarn, F. Labal, *System for dissipating a lightning current generated by a thunderstorm discharge on an aircraft*, Airbus operations, Giugno 2011
- [15] <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=thunderclouds-make-gamma-rays-shout-out-matter>, consultato il 20 ottobre 2012
- [16] J.R.Dwyer, D.M. Smith , *Raggi gamma dalle nuvole*, Le Scienze, No. 530, 2012
- [17] D.Coulter, *Are TGFs hazardous to ari travelers?*, space science news, Febbraio 2010.
- [18] [http://en.wikipedia.org/wiki/Sprite_\(lightning\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Sprite_(lightning)), consultato il 15 Novembre 2012.

- [19] M.Tavani, A.Argan, A.Paccagnella et al. , *Radiation and Particle Effects on Avionics Induced by Terrestrial Gamma-Ray Flashes*, journal of L^AT_EXclass files, Luglio 2012
- [20] J.R.Dwyer, *Chance of thunder and gamma-ray flashes*, in physical review letters, Gennaio 2011
- [21] J.Dacey, *Thunderstorm radiation amazes physicists*, physicsword.com, Gennaio 2011
- [22] M.Marisaldi, C.Labanti, M.Galli et al. , *Detection of Terrestrial Gamma-Ray Flashes up to 40 MeV by the AGILE satellite*, Journal of geophysical research, doi:10.1029/, Ottobre 2009 .