



# **Investigação de Acidentes e a Segurança na Aviação**

**O impacto dos acidentes de aviação na melhoria da segurança das aeronaves**



## **Projeto FEUP 2024/25 - L.AERO**

### **Coordenação**

Geral: Manuel Firmino e Sara Ferreira

De curso: Carolina Furtado

### **Equipa LAERO1\_5**

Supervisor: Carolina Furtado

Monitor: Tiago Cardoso

### **Estudantes & Autores**

André Azevedo <up202407572@up.pt>

Constança Gaspar <up202309524@up.pt>

Daniel Azeredo <up202405744@up.pt>

David Moura <up202406451@up.pt>

Maria Leonor Novo <up202406038@up.pt>

16 de janeiro de 2025

## **Resumo**

Este relatório foi elaborado no âmbito da unidade curricular "Projeto FEUP", e consiste numa abordagem técnica e estatística dos acidentes de aviação ocorridos ao longo do tempo, considerando a evolução da aviação, com base na otimização dos aviões como resultado dos mesmos. Primeiro, serão apresentados todos os sistemas de segurança mais atualizados, em funcionamento nos dias de hoje e, de seguida, será discutido o que aconteceu num passado próximo: acidentes fatais de aeronaves, as suas repercussões e as formas críticas como os engenheiros solucionaram os problemas que lhes deram origem.

**Palavras-chave:** Sistemas, Segurança, Aviação, Acidentes, Falhas, Tráfego Aéreo

## **Agradecimentos**

Para a realização deste trabalho foi crucial todo o apoio e infraestrutura da Universidade do Porto, em particular da Faculdade de Engenharia, de modo que queremos expressar os nossos agradecimentos a toda a comunidade FEUP.

Gostaríamos de destacar a importância do professor Albertino Arteiro e do professor António Pedro Aguiar, que coordenam o curso do qual fazemos parte e toda a comunidade educativa responsável pelo bom funcionamento do curso de Engenharia Aeroespacial.

Em adição, consideramos louvável todo o trabalho desenvolvido no âmbito da unidade curricular Projeto FEUP, logo, estamos gratos por toda a equipa que coordena e trabalha nesta UC, especialmente a professora Carolina Furtado e o monitor Tiago Cardoso.

# Conteúdo

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Lista de figuras</b>                                                              | <b>iv</b>  |
| <b>Lista de tabelas</b>                                                              | <b>v</b>   |
| <b>Lista de acrónimos/ abreviaturas</b>                                              | <b>vi</b>  |
| <b>Glossário</b>                                                                     | <b>vii</b> |
| <b>1 Introdução</b>                                                                  | <b>1</b>   |
| <b>2 Sistemas de segurança na aviação atual</b>                                      | <b>2</b>   |
| 2.1 Caixa Preta . . . . .                                                            | 2          |
| 2.2 Processos de certificação de aeronaves . . . . .                                 | 2          |
| 2.3 Sistemas eletrónicos nas aeronaves . . . . .                                     | 4          |
| 2.4 Estrutura . . . . .                                                              | 7          |
| 2.5 Controlo de Tráfego Aéreo . . . . .                                              | 11         |
| 2.6 Treino de Pessoal . . . . .                                                      | 11         |
| <b>3 Acidentes na aviação</b>                                                        | <b>13</b>  |
| 3.1 Estudo compreensivo sobre as principais causas de acidentes na aviação . . . . . | 13         |
| 3.1.1 Falhas humanas . . . . .                                                       | 15         |
| 3.1.2 Falhas de Equipamento . . . . .                                                | 16         |
| 3.1.3 Fatores ambientais . . . . .                                                   | 21         |
| <b>4 Conclusões</b>                                                                  | <b>22</b>  |
| <b>Referências</b>                                                                   | <b>24</b>  |
| <b>A Apêndice</b>                                                                    | <b>25</b>  |

## Lista de Figuras

|    |                                                                                                                                                            |    |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | (a) FDR; (b)CVR (Vidović, Franjić, and Štimac 2022). . . . .                                                                                               | 2  |
| 2  | Fluxo de trabalho de desenvolvimento de produtos (Ducoffe, Gabreau, and Ober 2024). .                                                                      | 3  |
| 3  | Distribuição do uso das 82 tecnologias ao longo do processo de desenvolvimento de<br><i>software</i> (Sun, Edwards, and Connelly 2021). . . . .            | 4  |
| 4  | O cockpit de uma aeronave (Jenie and Budiyono 2006) . . . . .                                                                                              | 5  |
| 5  | Principais sensores nos aviões (Hangar 2016). . . . .                                                                                                      | 6  |
| 6  | Esquema de sistemas de distribuição de energia em aeronaves convencionais (Yang, Gao,<br>and Bozhko 2018). . . . .                                         | 7  |
| 7  | Situação no início e no fim do processo de toque (Sforza 2014) . . . . .                                                                                   | 9  |
| 8  | Diagrama esquemático do arranjo geral dos componentes do trem de aterragem nas<br>posições abaixada e retraída (linhas tracejadas) (Sforza 2014) . . . . . | 10 |
| 9  | Simulador de voo SSJ100 (Zhukovsky 2011) . . . . .                                                                                                         | 12 |
| 10 | Número de acidentes de aviação fatais, dos 700 considerados, ordenados por causa (Oster,<br>Strong, and Zorn 2010) . . . . .                               | 14 |
| 11 | Causas das fatalidades de passageiros nos acidentes de aviação considerados (Oster,<br>Strong, and Zorn 2010) . . . . .                                    | 15 |
| 12 | Número de acidentes e de fatalidades associados aos diferentes tipos de falhas de equi-<br>pamento (Oster, Strong, and Zorn 2010) . . . . .                | 17 |
| 13 | Visão geral dos altímetros ligados aos controlos do piloto automático e do acelerador<br>automático (Wilcutt and Harkins 2012) . . . . .                   | 17 |
| 14 | Locais de superfície de controle de voo do Boeing 737 (BOARD 1994) . . . . .                                                                               | 19 |
| 15 | Ângulo de inclinação derivado para o voo 427 da USAir usando a análise cinemática da<br>Boeing (BOARD 1994) . . . . .                                      | 20 |
| 16 | Dados de fator de carga normal para o voo 585 da United (BOARD 2001) . . . . .                                                                             | 20 |
| 17 | Imagem do acidente do voo 123 da Japan Airlines (Cloudberg 2021) . . . . .                                                                                 | 21 |

## Lista de Tabelas

|   |                                                                                                                                     |    |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Principais causas das fatalidades relacionadas com o setor dos transportes, nos E.U.A. (Robinson, Nguyen, and Moore 2023) . . . . . | 1  |
| 2 | Acidentes e fatalidades de passageiros por tipo de voo (Oster, Strong, and Zorn 2010) . .                                           | 13 |
| 3 | Diferentes tipos de erros de piloto (Oster, Strong, and Zorn 2010). . . . .                                                         | 16 |
| 4 | Falhas de altímetros segundo registros da Boeing (Hecht 2011) . . . . .                                                             | 18 |

## **Lista de acrónimos/ abreviaturas**

|         |                                                    |
|---------|----------------------------------------------------|
| ADS-B   | Automatic Dependent Surveillance–Broadcast         |
| AMI     | Aviation Maintenance Inspection                    |
| AFCS    | Automatic Flight Control System                    |
| CDR     | Cockpit Data Recorder                              |
| CFIT    | Controlled Flight Into Terrain                     |
| CS      | Certification Specifications                       |
| CVR     | Cockpit Voice Recorder                             |
| EASA    | European Aviation Safety Agency                    |
| EUROCAE | European Organisation for Civil Aviation Equipment |
| FAA     | Federal Aviation Administration                    |
| FDR     | Flight Data Recorder                               |
| GNSS    | Global Navigation Satellite System                 |
| MIT     | Massachusetts Institute of Technology              |
| NTSB    | National Transportation Safety Board               |
| SDLC    | Software Development Lifecycle                     |
| SESAR   | Single European Sky ATM Research                   |
| SSFDR   | Solid State Flight Data Recorder                   |
| RTCA    | Radio Technical Commission for Aeronautics         |
| TCAS    | Traffic Collision Avoidance System                 |
| VHF     | Very high frequency                                |
| UHF     | Ultra high frequency                               |
| VOR     | Very high frequency Omnidirectional Range          |
| USDOT   | United States Department of Transportation         |
| WAAS    | World Aircraft Accident Summary                    |

## Glossário

**Ailerons** - Os ailerons são uma superfície de controlo de voo primária que controla o movimento em torno do eixo longitudinal de uma aeronave. Este movimento é chamado de "roll". Os ailerons são fixados na borda de fuga externa de cada asa e, quando uma entrada de controlo manual ou do piloto automático é feita, movem-se em direções opostas uma da outra.

**Autothrottle** - Sistema que permite ao piloto controlar a configuração da potência dos motores.

**Bug Tracker** - Sistema que serve para registar e controlar bugs ou erros durante os testes de software.

**Configuration Management Repository** - Qualquer tipo de prática que rastreie e monitorize alterações ao código-fonte.

**Gearbox** - Dispositivo que transmite potência normalmente de um motor a um sistema que utiliza essa potência, como hélices ou turbinas.

**Stall** - Perda de sustentação do avião devido ao insuficiente fluxo de ar nas asas.

# 1 Introdução

A aviação é, atualmente, o modo de transporte mais seguro. Se se observar os dados do Transportation Statistics Annual Report 2023, nos Estados Unidos, em 2021, ocorreram 371 fatalidades provocadas pelo transporte aéreo, cerca de 116 vezes menos do que as 42 939 associadas a acidentes de viação em autoestradas (Tabela 1) (Robinson, Nguyen, and Moore 2023). Isto é especialmente impressionante se considerarmos que, nesse mesmo ano, as viagens aéreas nos E.U.A. foram responsáveis por levar cerca de 674 milhões de passageiros ao seu destino (of Transportation Statistics 2022).

Tabela 1: Principais causas das fatalidades relacionadas com o setor dos transportes, nos E.U.A. (Robinson, Nguyen, and Moore 2023) .

|                    | 2016   | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   | 2021   |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fatalidades Totais | 39 753 | 39 364 | 38 755 | 38 424 | 41 041 | 44 959 |
| Ar                 | 413    | 347    | 396    | 455    | 358    | 371    |
| Autoestrada        | 37 806 | 37 473 | 36 835 | 36 355 | 39 007 | 42 939 |
| Caminho de Ferro   | 631    | 677    | 661    | 723    | 632    | 724    |
| Água               | 737    | 709    | 682    | 707    | 853    | 715    |

De facto, de acordo com um estudo realizado pelo MIT em 2024, desde os anos 60, a aviação comercial tem ficado cerca de duas vezes mais segura em cada década, fenómeno que foi apelidado de “A Lei de Moore da aviação”, por analogia à Lei de Moore na informática. Na verdade, nos dias de hoje, o número de fatalidades por passageiro embarcado ronda 1 em cada 13.7 milhões, muito menor do que o valor 1 em 350 mil, que se estima ser representativo do período de 1968 a 1977 (Dizikes 2024) .

No entanto, e aliás como os dados do MIT sugerem, nem sempre a aviação foi o método de transporte seguro com o qual hoje estamos familiarizados. É inquestionável que, desde os aviões primitivos construídos com madeira utilizados na Primeira Guerra Mundial, se deu uma evolução a ritmo estonteante do transporte aéreo. O método de análise, investigação e correção das falhas ao longo do tempo foi responsável por dar origem a todos os mecanismos que tornam a aviação tão confiável na atualidade.

Efetivamente, apesar de toda a perda e desgraça que a esmagadora maioria dos acidentes na aviação acarreta, é de notar que estes também têm o seu lado benéfico: contribuem para a evolução da segurança do espaço aéreo. Deste modo este trabalho pretende não só averiguar quais os sistemas de segurança atualmente existentes na aviação, mas também investigar quais as principais causas dos acidentes aéreos e algumas melhorias que estes trouxeram ao mundo da aviação.

## 2 Sistemas de segurança na aviação atual

Atualmente, os programas de segurança e proteção das companhias aéreas incorporam processos sofisticados de identificação de perigos e de atenuação de riscos, tirando partido de milhões de dados cuidadosamente analisados para detetar indícios de problemas.

A segurança na aviação envolve diversos elementos essenciais: software que controla sistemas críticos, gestão do tráfego aéreo que coordena operações de voos, treino rigoroso dos pilotos para situações de emergência e estruturas aeronáuticas com materiais e dispositivos com propriedades específicas para garantir a segurança do avião. Apesar de todas estas medidas, ainda ocorrem alguns acidentes de aviação e, nestes casos, as caixas pretas, que registam dados cruciais durante o voo, desempenham um papel fundamental na investigação e na descoberta do que provoca os acidentes.

### 2.1 Caixa Preta

A qualidade da investigação dos acidentes de aeronaves contribui para a redução contínua da frequência dos acidentes. A probabilidade de preservação dos dados em caso de acidente aéreo aumentou a partir de meados da década de 1980, quando ocorreu o desenvolvimento dos chamados gravadores de dados de voo de estado sólido (SSFDR) (Vidović, Franjić, and Štimac 2022).

Os gravadores de voo, conhecidos como “Caixas Pretas”, permitem recolher dados importantes de sensores da aeronave para que investigadores possam determinar, em caso de acidente, as possíveis causas. Existem diferentes tipos de dispositivos que são utilizados, sendo os mais relevantes o FDR (*Flight Data Recorder*) e o CVR (*Cockpit Voice Recorder*), que se encontram representados na figura 1, e que são instalados na cauda do avião. O FDR regista os parâmetros de voo da aeronave. De acordo com a análise de dados do Airbus Flight (2014), os seguintes parâmetros básicos devem ser armazenados: rumo, altitude, velocidade no ar, aceleração vertical e tempo.

Em relação ao CVR, uma das razões para instalar este dispositivo num avião prende-se com o facto de o erro humano ter sido documentado como um fator primário na maioria dos acidentes. O material apropriado de construção destes aparelhos deve proporcionar uma proteção térmica adequada durante um certo período de exposição a temperaturas elevadas. Em eventual situação de desastre, se for identificada informação relevante para o processo de investigação através dos gravadores de voo, cria-se uma equipa de investigação para coletar e analisar os dados.

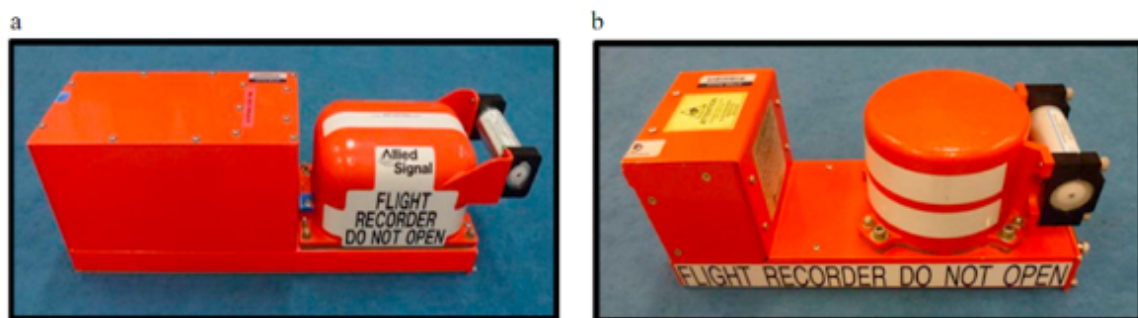


Figura 1: (a) FDR; (b)CVR (Vidović, Franjić, and Štimac 2022).

### 2.2 Processos de certificação de aeronaves

A EASA, na Europa, e a FAA, nos E.U.A., são responsáveis por realizar tarefas executivas relacionadas com a segurança da aviação, tais como a certificação de produtos aeronáuticos e de organizações envol-

vidas na sua concepção, fabrico e manutenção. Estas atividades de certificação contribuem para assegurar a conformidade com as normas de aeronavegabilidade e de proteção ambiental vigentes (Ronell 2020).

O fluxo de trabalho para o desenvolvimento de qualquer produto, incluindo uma aeronave, necessita de pré-requisitos para que se possa proceder à modelagem e à implementação. No entanto, todos estes processos tem de ser testados, sendo estes testes normalizados pela FAA e pela EASA. Os principais processos de desenvolvimento de produtos, que se aplicam, também, às aeronaves, encontram-se explícitos na figura 2.

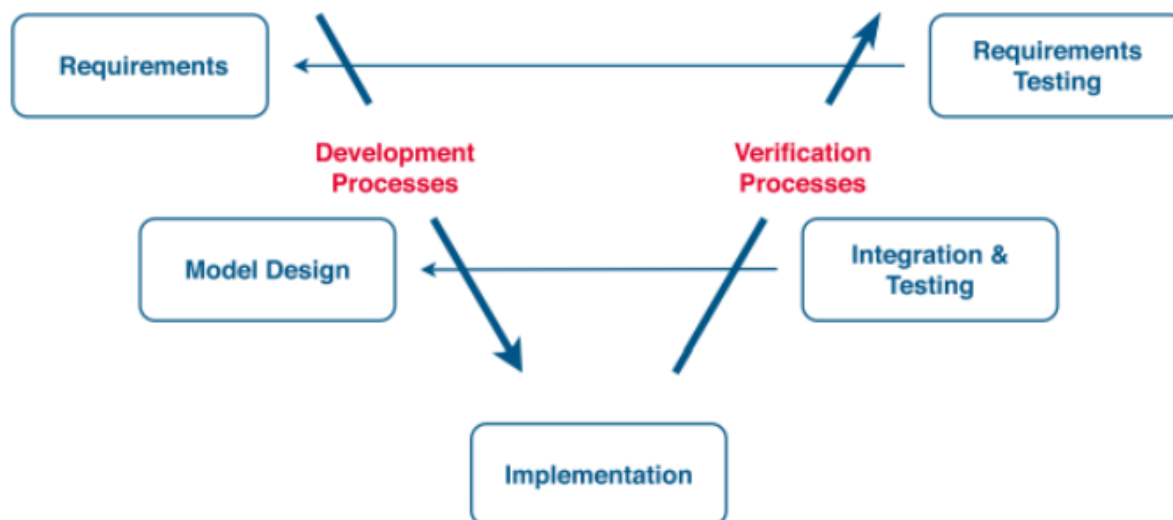


Figura 2: Fluxo de trabalho de desenvolvimento de produtos (Ducoffe, Gabreau, and Ober 2024).

**FAA (E.U.A.)** - O DO-160 é uma norma desenvolvida pela RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) que estabelece requisitos de teste para equipamentos eletrónicos usados em aeronaves. O DO-160 é necessário para vários componentes de um sistema de aviação para determinar a capacidade de desempenho conforme detalhado pela especificação do produto definida pelo comprador, fabricante, ou agência governamental. O propósito destes testes é fornecer a um laboratório os meios para determinar as características da performance do equipamento aéreo em condições ambientais que a aeronave poderá atravessar (Spitzer, Ferrell, and Ferrell 2017).

**EASA (Europa)** - O documento AMI (Aviation Maintenance Inspection) estabelece diretrizes para a realização de inspeções de manutenção, garantindo que as aeronaves estejam em conformidade com os padrões de segurança e manutenção estabelecidos pela EASA (ChatGPT, 22 de outubro, 2024).

### **Certificação de Software/Hardware**

O software de bordo é sempre uma das preocupações críticas no processo de certificação de aeronaves. (Sun, Edwards, and Connelly 2021)

A FAA e a EASA certificam todo o *software*: piloto automático, sistema de gestão de frota, computadores de controlo de voo, controlo de motores.

Para isso, nos EUA, a FAA segue o documento DO-178C, assim como toda a comunidade internacional da aviação para certificação do software na indústria aeronáutica. A RTCA, em colaboração com parceiros europeus, desenvolveu uma norma para o desenvolvimento de sistemas de *software* no domínio da aviação. Esta norma está documentada no DO-178C “Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification” (Grant 2024), e estabelece um conjunto rigoroso de requisitos para cada fase do ciclo de vida do desenvolvimento de software (SDLC) e define os requisitos em termos de objetivos (o código fonte estar em conformidade com os requisitos de baixo nível), atividades (por exemplo, revisão do código) e provas (por exemplo, documento que resume os resultados da revisão do código) (Ducoffe, Gabreau, and Ober 2024). O *standard* que é utilizado para tratar da certificação e dos perigos de segurança

acerca dos sistemas da aeronave relacionados com hardware eletrónico é o DO-254 (Spitzer, Ferrell, and Ferrell 2017).

Já a Europa, apesar de também aderir ao DO-178C, os requisitos regulamentares da EASA para os elementos de *software/hardware* integrados nos sistemas aeronáuticos de segurança são descritos nos documentos de especificação de certificação (CS 2x.1301 e CS 2x.1309).

Em todos os *standards*, é necessário incluir *Bug Tracker* e *Configuration Management Repository* no *software* para controlar e detetar erros no código-fonte (Ronell 2020). Durante o seu desenvolvimento, o *software* é avaliado em quatro processos de desenvolvimento (requisitos, conceção, codificação, integração) e quatro processos integrais (verificação, gestão da configuração, garantia da qualidade e interface de certificação) (Ducoffe, Gabreau, and Ober 2024). O artigo *Airborne software development processes certification review strategy based on RTCA/DO-178C* identificou um total de 82 tecnologias usadas no referencial de garantia de *software* DO-178C, tal como se verifica na figura 3. A mesma tecnologia pode ser utilizada em diferentes processos ao longo do desenvolvimento de *software*, mas o foco será em perspetivas distintas, como está descrito na figura 3.

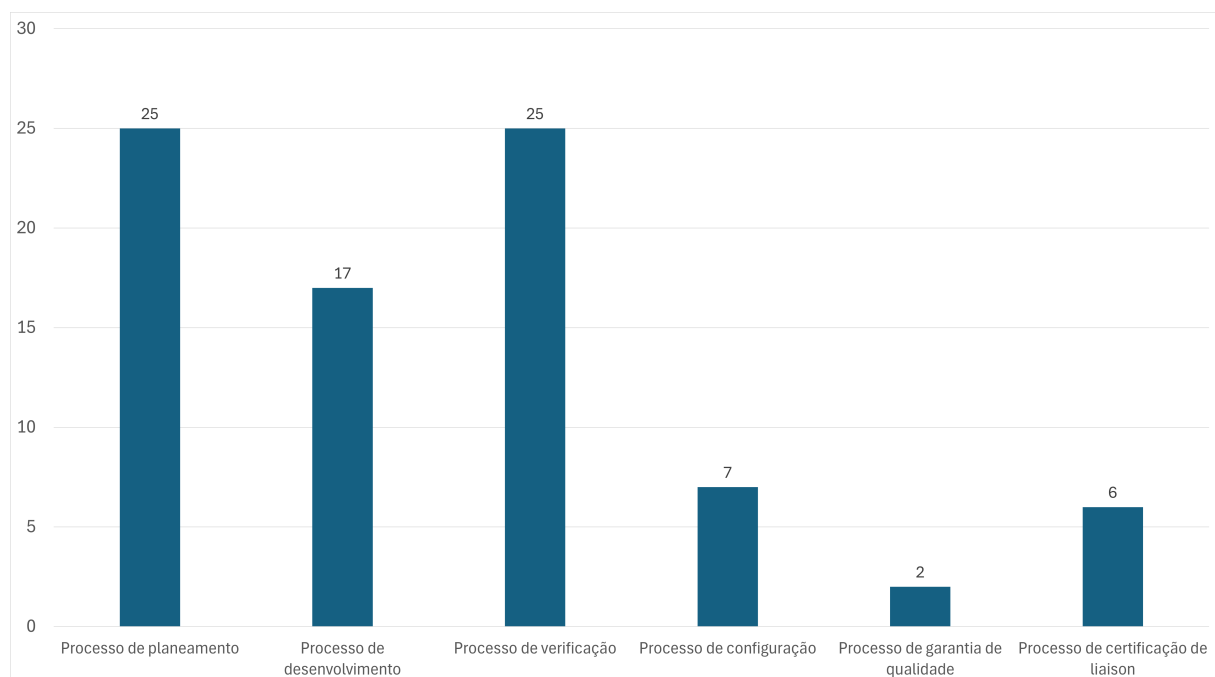


Figura 3: Distribuição do uso das 82 tecnologias ao longo do processo de desenvolvimento de *software* (Sun, Edwards, and Connelly 2021).

As autoridades responsáveis por garantir o cumprimento do regulamento da FAA ou da EASA são nomeadas pelas próprias instituições para assegurar o bom procedimento, assegurado por engenheiros aeronáuticos certificados pela entidade e inspetores com formação técnica em aviação.

## 2.3 Sistemas eletrónicos nas aeronaves

O *cockpit* de um avião oferece muitas funções complexas: controlos de voo, navegação, vigilância, comunicação, ecrãs, entre outros, tal como se observa na figura 4. (Ducoffe, Gabreau, and Ober 2024)

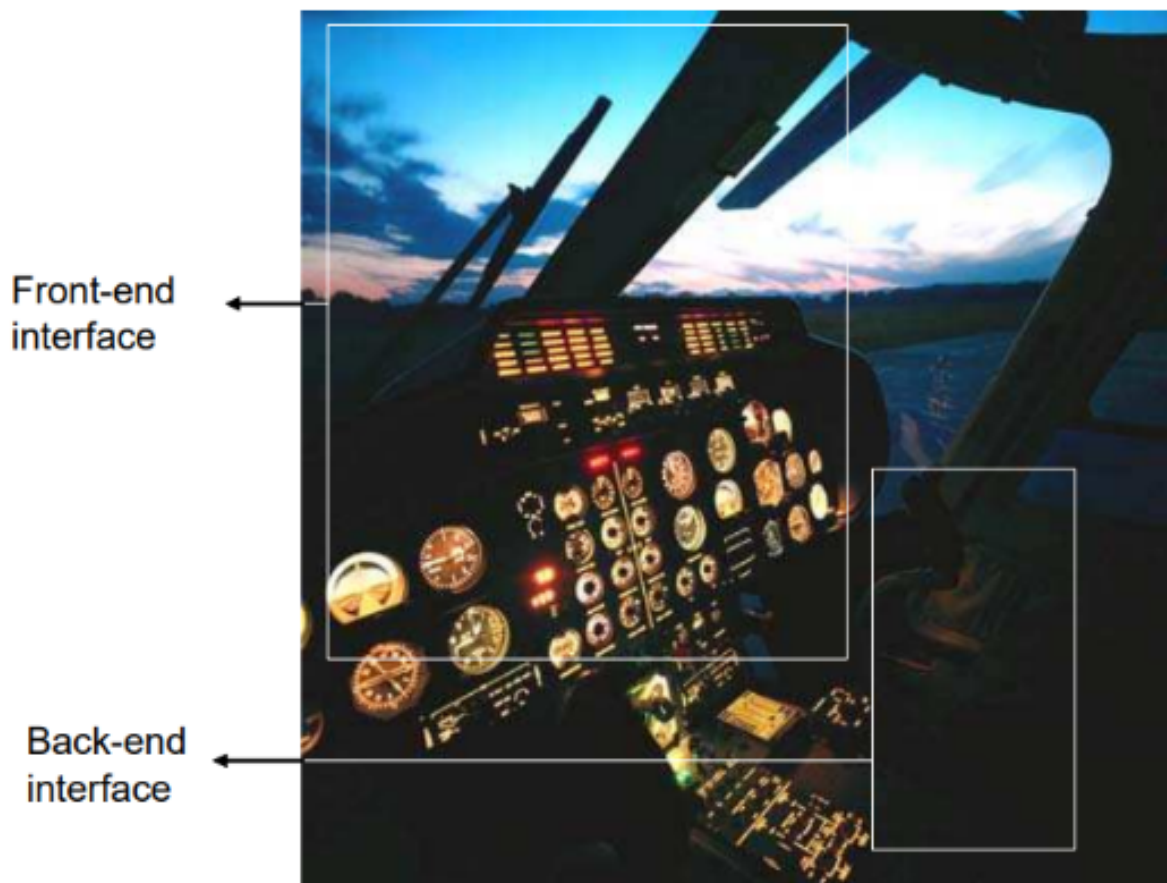


Figura 4: O cockpit de uma aeronave (Jenie and Budiyo 2006)

### Sensores:

Os sensores eletrônicos desempenham um papel importante nas aeronaves. Permitem um *feedback* eficaz de uma variedade de condições de voo e ajudam a medir variáveis como o controle e a navegação. Na figura 5 estão representados os principais sensores presentes nos aviões atuais.

Eis alguns exemplos:

- Sensores de temperatura - ajudam a observar a temperatura de uma série de peças do motor da aeronave.
- Sensores de pressão - monitorizam a pressão na subida e descida do trem de aterragem, nos tanques de oxigénio, nos sistemas hidráulicos e nos fluidos de travagem, aquecimento e arrefecimento.
- Sensores de posição - ajudam a fornecer referências de posição, responsáveis pelas medições e movimentos angulares e rotativos de uma aeronave.
- Altímetros - monitorizam a altitude de uma aeronave através da medição da pressão estática do ar. Medem a altura de um avião acima de um nível fixo (Bayanat Engineering 2024).

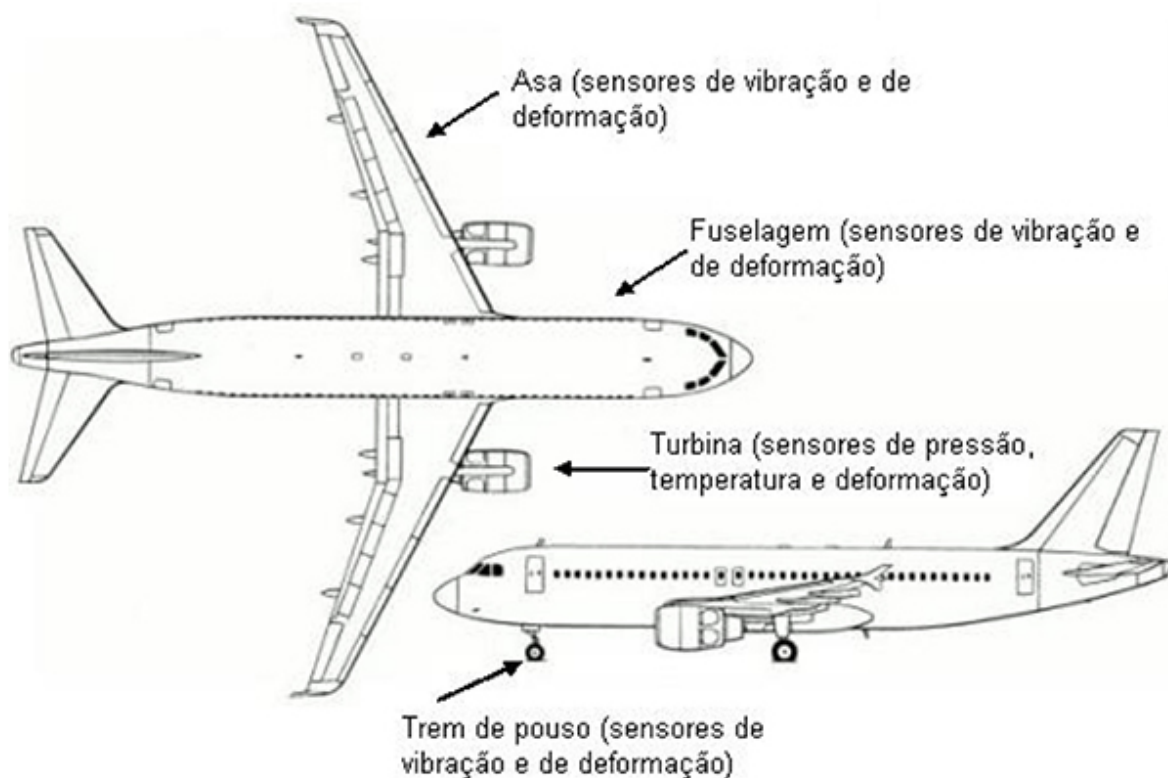


Figura 5: Principais sensores nos aviões (Hangar 2016).

### Controlo de voo:

Os AFCS (Automatic Flight Control Systems) são utilizados para melhorar as qualidades básicas de voo da aeronave (por exemplo, para proporcionar estabilidade dinâmica) ou para melhorar o desempenho básico da aeronave em determinadas condições atmosféricas. Cada aeronave contém sensores de movimento que fornecem medições das alterações ocorridas nas variáveis de movimento da aeronave quando esta responde aos comandos do piloto ou quando encontra uma perturbação atmosférica. Os sinais desses sensores podem ser utilizados como entradas para os instrumentos da aeronave para fornecer aos pilotos um ecrã adequado no *cockpit*, ou alguns podem ser utilizados como sinais de *feedback* para um AFCS (McLean D. 2003). Um componente do AFCS é o *Electronic SAS (Stability Augmentation System)*, o qual utiliza sensores eletrónicos e computadores para fazer ajustes em tempo real com base nos dados de voo, efetuando automaticamente pequenos ajustes nas superfícies de controlo (ChatGPT, 22 de outubro, 2024)

### Piloto automático:

Um piloto automático é um sistema de manutenção da condição/atitude de voo de uma aeronave. Os sistemas de piloto automático em aeronaves de transporte convencionais são divididos em modos longitudinais e laterais. No modo longitudinal, algumas funções incluem a manutenção da atitude de inclinação (*pitch attitude hold*), a manutenção da velocidade (*speed/Mach number hold*), a manutenção da altitude (*altitude hold*) e a manutenção do ângulo de descida para a aterragem (*glideslope*).

No modo lateral, temos funções como a manutenção da direção (*heading hold*), a manutenção do ângulo de inclinação (*bank angle hold*) o nivelador de asa (*wing leveler*), a manutenção do VOR (Very high frequency Omnidirectional Range) (*VOR-hold*) e o coordenador de curvas (*turn coordinator*). (Jenie and Budiyo 2006)

O sistema de piloto automático tem vários servos, dispositivos que controlam automaticamente a posição da superfície de controlo de uma aeronave, como os *aileron*s. Funcionam como atuadores que respondem a um sistema de piloto automático, ajudando a manter ou a ajustar a atitude e a trajetória de voo da aeronave.

## 2.4 Estrutura

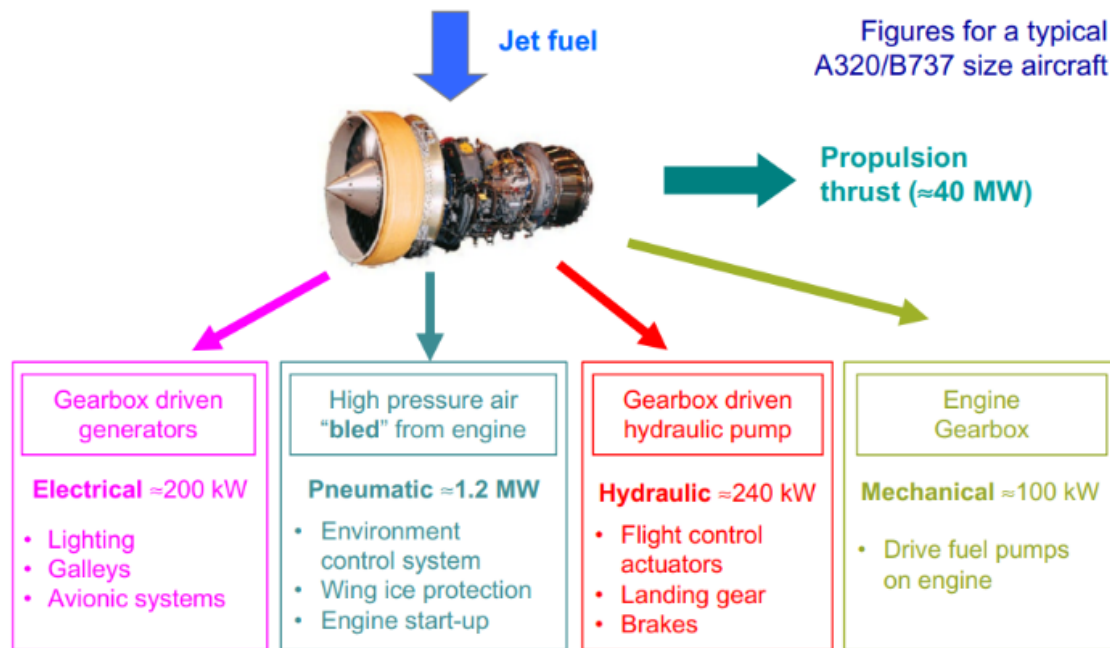


Figura 6: Esquema de sistemas de distribuição de energia em aeronaves convencionais (Yang, Gao, and Bozhko 2018).

Numa arquitetura convencional de um avião, o combustível é convertido em potência pelo motor. A maior parte da potência é utilizada como potência propulsora para manter a aeronave no céu e a restante é convertida em quatro formas principais de potência não propulsora: potência pneumática, potência mecânica, potência hidráulica e potência elétrica (figura 6).

A potência pneumática é obtida sob a forma de ar comprimido que é retirado do interior do motor. As principais utilizações da energia pneumática são o controlo ambiental e a proteção contra o gelo.

O sistema hidráulico é a principal fonte de energia para os comandos de voo primários e secundários, para a abertura dos trens de aterragem, para a retração e a travagem, para o acionamento dos motores e para numerosos dispositivos auxiliares.

A energia mecânica na aeronave é transferida, através de *gearboxes* mecânicas, do motor para as bombas hidráulicas centrais, do motor para as bombas locais do equipamento do motor e outros subsistemas acionados mecanicamente, e também do motor para o gerador elétrico principal.

A energia elétrica é produzida por geradores elétricos acionados por *gearboxes* que são ativadas pelo motor da aeronave. (Yang, Gao, and Bozhko 2018)

O sistema de energia de um avião admite funções essenciais como geração de energia, armazenamento, transmissão e apoio ao funcionamento da carga. Elementos como geradores, inversores e conectores são os que falham mais frequentemente. Como equipamento primário de fornecimento de energia, a falha de um gerador pode levar à falha de todo o sistema de energia. Por isso, a aeronave contém a unidade de potência auxiliar (APU), que é um pequeno motor de turbina a gás usado para fornecer energia elétrica e

mecânica, sendo isto possível apenas quando o avião está em repouso, para situações em que os motores principais deixam de funcionar. (Ahmed, Ali, and Jennions 2021)

Por outro lado, os inversores são responsáveis pela conversão de energia CC em energia CA, que é crucial para fornecer energia a cargas críticas de voo. Por conseguinte, a sua falha pode também afetar significativamente a fiabilidade do sistema. Os conectores fazem as ligações elétricas entre os componentes e, devido a fatores como a vibração e as mudanças de temperatura, podem ficar soltos ou danificados, afetando o funcionamento normal do sistema. A falha destes dispositivos pode ser causada por falhas de conceção, problemas de qualidade de fabrico, condições de funcionamento instáveis ou manutenção inadequada.

Os trens de aterragem, apesar de representarem uma pequena fração da massa total da aeronave, possuem um papel extremamente importante. Estes são responsáveis por sustentar o peso do avião quando este está em repouso, fornecer estabilidade e manobrabilidade durante a descolagem e em operações terrestres e absorver o impacto da aeronave com o solo.

Para conseguir absorver o impacto da aterragem, o avião é equipado com várias rodas em cada um dos seus três suportes (dois atrás e um à frente), podendo variar entre 2 a 3 rodas consoante a dimensão e a carga pretendida, para distribuir o peso do avião uniformemente e reduzir a pressão em cada roda individualmente. Além disso, a presença de amortecedores pneumáticos ou hidráulicos permitem que o trem de aterragem se deforme. Os amortecedores combinam “compressão de gás, queda de pressão e turbulência que atendem ao forçamento do óleo hidráulico através de um pequeno orifício e a deflexão do pneu para absorver a energia do processo de queda.” (Sforza 2014), ou seja, ao forçarem o óleo hidráulico para uma câmara de gás, obrigam o gás a comprimir-se, ocupando um volume menor, o que suaviza o movimento e ajuda a controlar as vibrações. Na figura 7, são demonstradas as posições dos dispositivos de aterragem nos aviões antes e após o impacto da aeronave com o solo, configurações também explícitas na figura 8.

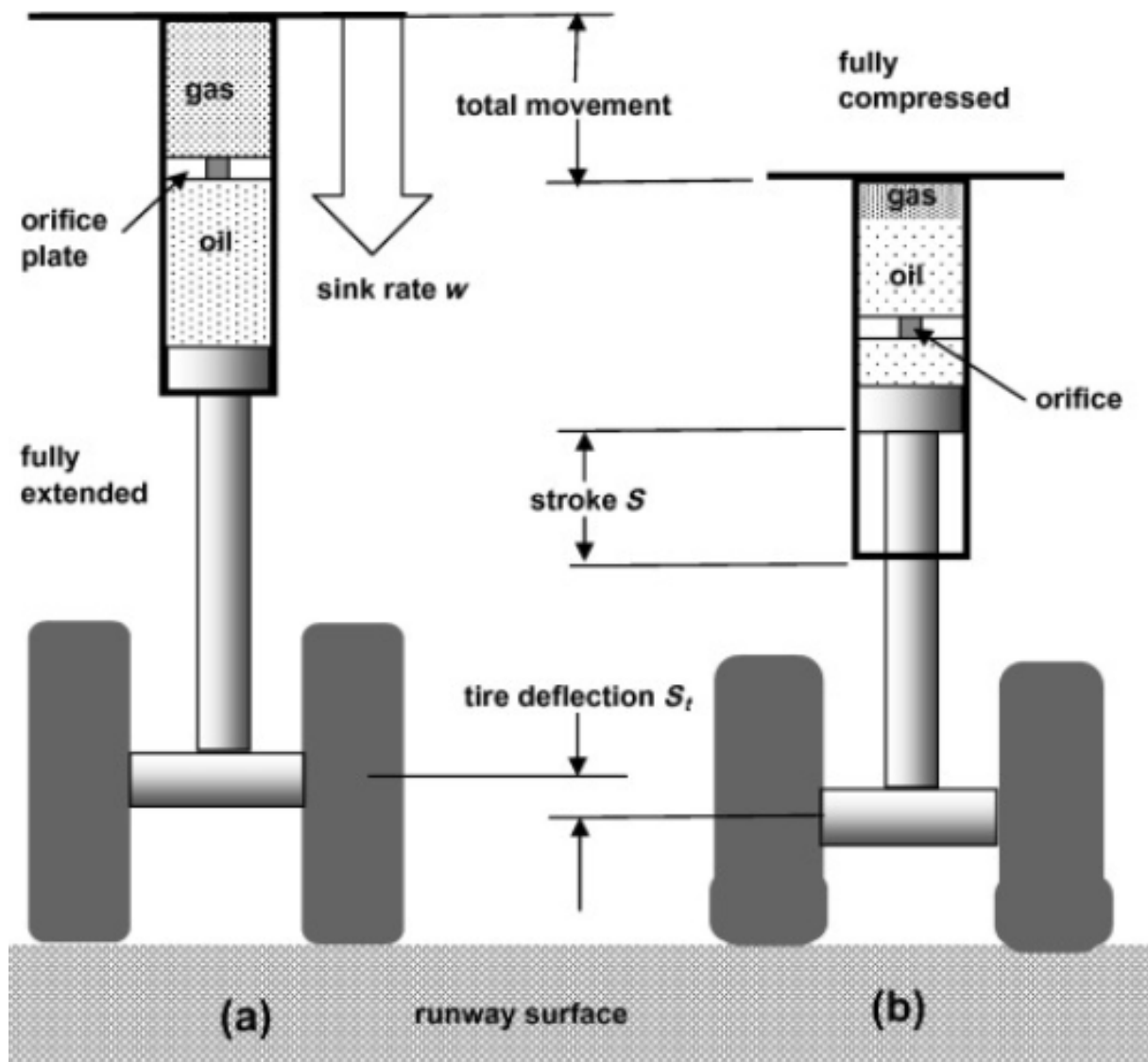


Figura 7: Situação no início e no fim do processo de toque (Sforza 2014)

Além disso, o trem de aterragem também é fundamental na desaceleração da aeronave após esta aterrar. De um modo sucinto, “quando os pilotos pressionam o travão, um sinal elétrico é enviado para a unidade de travagem na roda. Aqui, atuadores elétricos são usados para pressionar o disco de carbono contra a roda” (Page 2020), isto cria fricção que transforma energia cinética (associado ao movimento) em calor, que é dissipado. No entanto, o trem de aterragem, salvo pequenas exceções, não é fixo, retraindo para a “barriga” da fuselagem durante o voo. Este sistema, que diminui o arrasto aerodinâmico e maximiza a eficiência do combustível, pode possuir diferentes configurações, mas todos eles necessitam de um sistema de retração. Este pode ser elétrico ou hidráulico, sendo o último mais utilizado. No sistema hidráulico, as aeronaves utilizam fluido pressurizado, também conhecido como hidráulico, para levantar e baixar as rodas. “O piloto pode acionar um interruptor para direcionar o fluido hidráulico para o trem de aterragem do avião. Conforme o fluido hidráulico se move pelo trem de aterragem, as rodas estendem-se para baixo numa posição travada” (figura 8) (Onemonroe 2024).

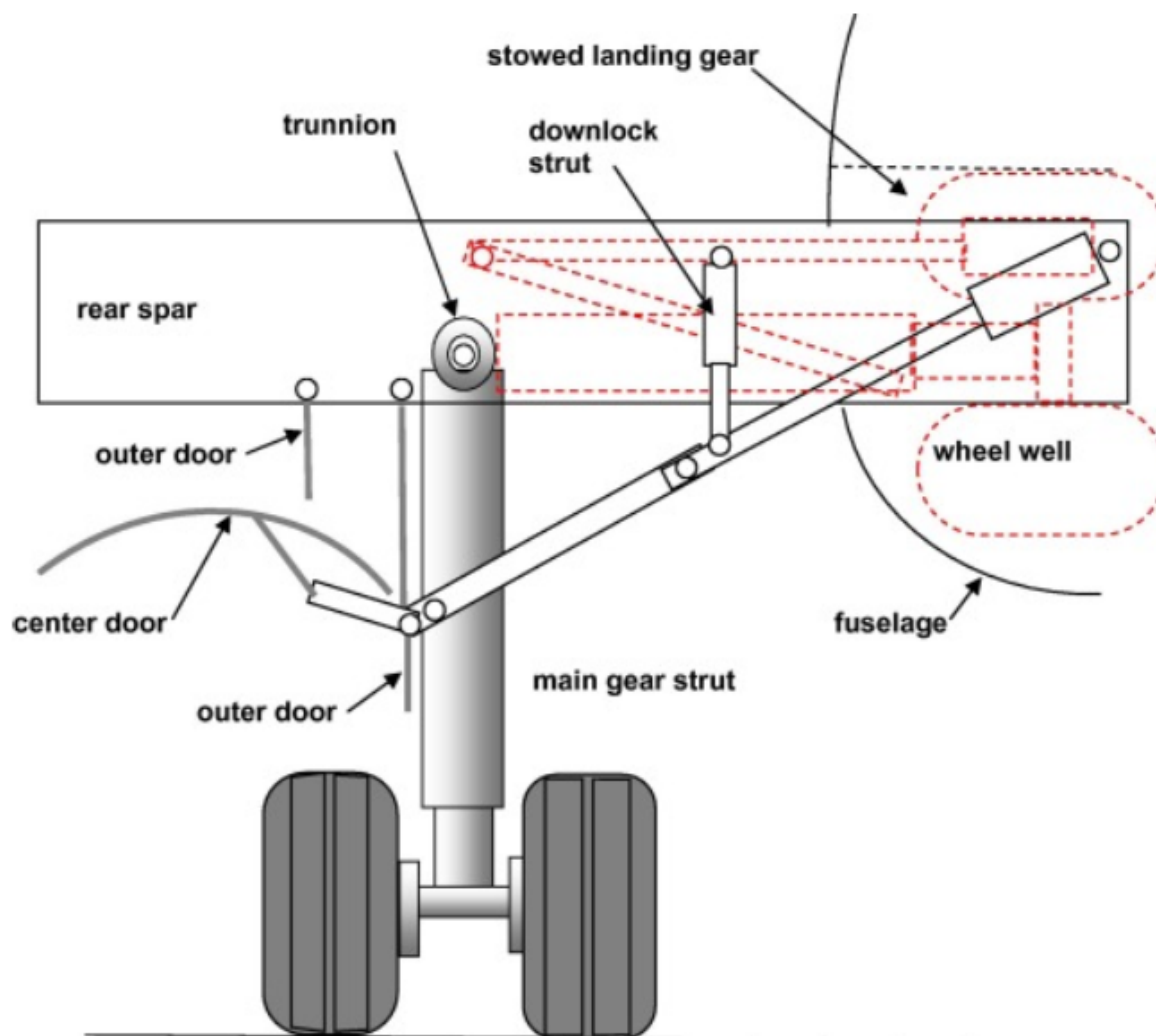


Figura 8: Diagrama esquemático do arranjo geral dos componentes do trem de aterragem nas posições abaixada e retraída (linhas tracejadas) (Sforza 2014)

Para além disto, para o design de uma aeronave é necessário pensar na proteção de certos componentes críticos tal como o compartimento do piloto/passageiro de algumas aeronaves com elementos estruturais mais espessos para os proteger de impactos de alta velocidade. Estas peças estruturais podem também ser fabricadas num material com maior dureza: aço ou ligas de titânio, por exemplo. (Ivančević, Smojver, and Leko 2018)

Para mais, em caso de incêndio, as zonas designadas como zonas de incêndio devem estar equipadas com equipamento de deteção e extinção de incêndios. As zonas de incêndio designadas são: compartimento da central elétrica, compartimento da unidade de potência auxiliar (APU), câmara do aquecedor de combustão. (Scholz 2006)

Por fim, a certificação de aeronavegabilidade de materiais e dos processos de fabrico para aeronaves implica que estes sejam qualificados através de ensaios e testes de fabrico suficientes para demonstrar um projeto reproduzível e fiável. Eis alguns aspetos da certificação de aeronavegabilidade sobre o desempenho do material: análise térmica de parâmetros como a taxa de absorção de calor, refletividade e coeficiente de condução de calor do revestimento; análise de absorção de humidade (Jian and Yao 2011).

## 2.5 Controlo de Tráfego Aéreo

O estímulo inicial para o desenvolvimento da tecnologia de controlo do tráfego aéreo, baseada em radar, começou nos EUA por causa de uma série de acidentes divulgados em grande escala, sendo o primeiro uma colisão em pleno ar sobre o Grand Canyon a 30 de junho de 1956.

À medida que o volume de tráfego começou a aumentar nos anos 70, a procura de espaço aéreo disponível nas proximidades das principais cidades durante as horas de ponta excedia frequentemente a capacidade. O desfasamento entre a procura e a capacidade tornou-se ainda mais grave na presença de condições meteorológicas adversas. As iniciativas de gestão do fluxo de tráfego tentaram resolver este desequilíbrio entre a procura e a capacidade. (Menon and Park 2016)

Atualmente, o sistema de gestão do tráfego aéreo é centrado no ser humano, no qual os controladores monitorizam o tráfego aéreo através de vigilância baseada no *radar-transponder*, o qual fornece informações sobre a identificação da aeronave e a altitude barométrica (Bakker and Drozdowski 2014), e nas comunicações rádio VHF/UHF com os pilotos para garantir a compatibilidade com os planos de voo registados e aprovar quaisquer alterações aos mesmos. O espaço aéreo está segmentado em centros e setores de controlo do tráfego aéreo, sendo que cada controlador de setor assegura a separação das aeronaves e alinha os objetivos do fluxo de tráfego com os coordenadores de tráfego a nível central.

Algumas tecnologias mais recentes são: Comunicações de Dados entre Controlador e Piloto, Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e Transmissão de Vigilância Dependente Automática (ADS-B). (Hawley, Gotz, and Hird 2014)

Um exemplo de um projeto europeu de gestão de tráfego aéreo é a SESAR (Single European Sky ATM Research).

## 2.6 Treino de Pessoal

A FAA e a EASA estão encarregadas de estabelecer normas para a certificação dos pilotos da aviação civil. Para cumprir esta tarefa, atribuem grande valor aos simuladores para a formação dos pilotos e defendem a evolução dos mesmos a fim de se tornarem mais realistas.

De facto, no final da década de 1970, a formação em simuladores realistas com sistemas visuais, de movimento e de som elaborados começou a ser aceite como um substituto parcial da formação em aeronaves. Consequentemente, em 1980, a FAA publicou um Plano de Simulação Avançada que definia as especificações dos simuladores a utilizar para a formação total, tornando assim o conceito de simulação total uma realidade operacional (Caro 1988).

Atualmente, o treino em simuladores de baixo realismo faz com que os pilotos não tenham um desempenho tão bom nos aviões como os pilotos treinados em simuladores de elevado realismo, o que comprova a eficácia do uso destas tecnologias (Prophet and Boyd 1970).

Assim, atualmente a FAA e a EASA partilham os simuladores Flight Training Device (FTD), que são dispositivos concebidos para representar uma configuração específica de um avião e, dependendo do nível de qualidade do simulador, podem incluir uma cabine de pilotagem próxima e uma situação visual real. São usados para fornecer o treino necessário a um piloto para a obtenção do certificado para aviação comercial e de transporte aéreo, assim como outras avaliações. Existem outros simuladores de voo FTD mais avançados como o Full Motion Flight Simulator (FFS). Estes simuladores avançados de treino de voo estão presentes tanto no “esqueleto” da FAA como na da EASA. São utilizados de seis em seis meses para manter todos os pilotos comerciais qualificados para voar no tráfego aéreo. (Lazić, Grujić, and Tanasković 2020)

Na figura 9, é possível encontrar uma fotografia do FTD *Type V*, um dispositivo de treino que recria um SSJ100 com painéis de cockpit em tamanho real e demonstrações e sistemas visuais. A dinâmica de voo e modelos de software de sistemas de aeronave implementados neste FTD permitem a simulação de

diversas condições de voo habitualmente encontradas durante voos reais. (Zhukovsky 2011)



Figura 9: Simulador de voo SSJ100 (Zhukovsky 2011)

### 3 Acidentes na aviação

#### 3.1 Estudo compreensivo sobre as principais causas de acidentes na aviação

O principal obstáculo na análise estatística das principais causas dos acidentes aéreos jaz em determinar um único motivo para um acidente quando, na realidade, a grande maioria resulta da combinação de vários fatores. Desta forma, consideraremos como principal a causa responsável por dar origem à sequência de eventos que culminou no acidente. Assim, quando um acidente é classificado como tendo sido resultado de erro humano, então este pode ser considerado um erro humano "não forçado", já que não corresponde a uma falha em responder adequadamente a uma circunstância alheia, mas sim a uma situação que resulta totalmente de erros na conduta do(s) piloto(s). (Oster, Strong, and Zorn 2010)

Os dados que se seguem, da AgEcon Search, resultam desta análise aplicada a 700 acidentes, ocorridos entre 1990 e 2006, usando como fonte da informação sobre os acidentes a World Aircraft Accident Summary (WAAS), publicada pela Ascend, uma divisão da Airclaims. A análise da AgEcon Search foi restringida a acidentes que envolvam fatalidades de passageiros, em aeronaves de asa fixa que operassem nas seguintes categorias: Doméstico não programado de passageiros; Doméstico programado de passageiros; Internacional não programado de passageiros; Internacional programado de passageiros; Doméstico não programado de carga; Doméstico programado de carga; Internacional não programado de carga; Internacional programado de carga. Como o próprio artigo da AgEcon admite, apesar de a WAAS ser a fonte de dados de acidentes de aviação mais compreensiva do mundo, apresenta algumas limitações, explicitadas pela própria WAAS: "Os detalhes de acidentes aqui apresentados foram derivados de várias fontes, oficiais e não oficiais (incluindo relatórios de imprensa). Eles podem, por isso, estar incompletos ou incorretos. De maneira semelhante, a necessidade de condensar as descrições de acidentes pode resultar em mudanças de ênfase não intencionais."

Cada um dos acidentes analisados envolveu pelo menos uma fatalidade, sendo que, no total, considerando os 700 acidentes, foram registadas 17 486 fatalidades de passageiros e 2 284 fatalidades de tripulação, sendo contabilizada a perda de 274 vidas no solo causada por estes acidentes, para além das muitas que resultaram do atentado terrorista nos E.U.A. no dia 11 de setembro de 2001.

Realizando uma análise pelo tipo de voo, e juntando os voos de transporte de carga e de passageiros, é possível concluir que, apesar de representarem apenas 9% dos acidentes, os voos internacionais programados foram responsáveis por 5018 fatalidades, cerca de 29% do total, enquanto que os serviços domésticos programados deram origem a 38% dos acidentes considerados e 7873 fatalidades, o maior valor registado. De uma forma geral, os voos domésticos são representativos da grande maioria dos acidentes, o que é explicado pela sua maior frequência. A maioria dos acidentes deu-se em serviços domésticos não programados, apesar de estes só terem dado origem a 14% das fatalidades totais, fenómeno que pode ser explicado pela menor dimensão e, consequentemente menor número de passageiros, nestes voos (Tabela 2). (Oster, Strong, and Zorn 2010)

Tabela 2: Acidentes e fatalidades de passageiros por tipo de voo (Oster, Strong, and Zorn 2010)

| Tipo de Serviço              | Fatalidades de passageiros |        | Acidentes Fatais |        | Fração de passageiros mortos |
|------------------------------|----------------------------|--------|------------------|--------|------------------------------|
|                              | Número                     | Fração | Número           | Fração |                              |
| Desconhecido                 | 199                        | 1%     | 9                | 1%     | 96%                          |
| Doméstico não programado     | 2474                       | 14%    | 291              | 42%    | 73%                          |
| Doméstico programado         | 7873                       | 45%    | 265              | 38%    | 71%                          |
| Internacional não programado | 1922                       | 11%    | 72               | 10%    | 77%                          |
| Internacional Programado     | 5018                       | 29%    | 63               | 9%     | 65%                          |

Esta análise permitiu também concluir que em 40% dos 700 acidentes analisados, a causa iniciadora da sequência de eventos que levou ao acidente foi o erro humano e que, em 23% dos casos, o acidente

deveu-se a uma falha de equipamento, sendo estes dois fatores de longe os responsáveis pela maioria dos acidentes fatais de aviação de passageiros. É também notável o facto de que a terceira principal causa dos acidentes enquadra-se na categoria de "outros", constituída quase completamente por acidentes que não deixaram informações suficientes para determinar a causa ou nos quais a aeronave nunca foi encontrada ou recuperada, impossibilitando qualquer investigação. De resto, causas ambientais, quase todas relacionadas com o clima e algumas com embates com animais, foram responsáveis por 10% dos acidentes considerados (Figura 10) (Oster, Strong, and Zorn 2010).

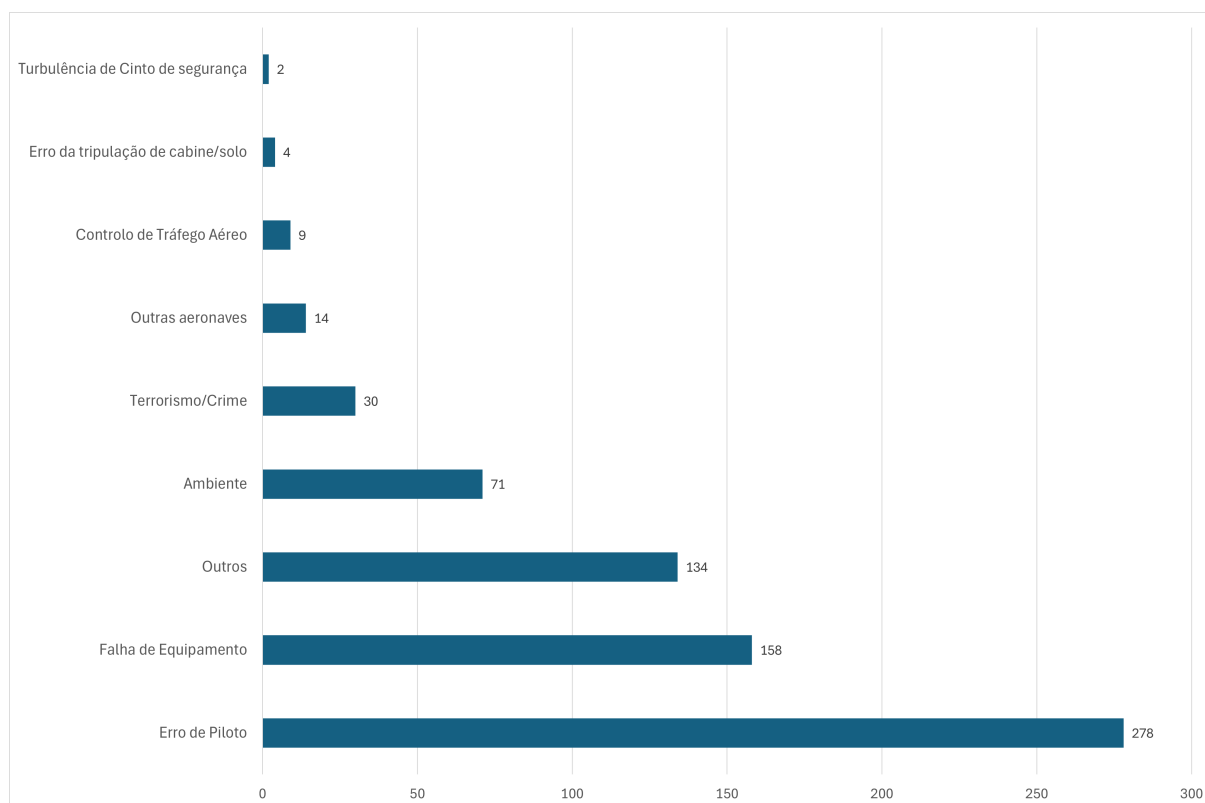


Figura 10: Número de acidentes de aviação fatais, dos 700 considerados, ordenados por causa (Oster, Strong, and Zorn 2010)

Se, ao invés de termos em consideração o número de acidentes, nos focarmos nas mortes causadas por esses acidentes, os resultados variam ligeiramente. A ordem global mantém-se, mas as fatalidades ligadas aos acidentes causados por erro de piloto representam uma proporção menor do que quando fazemos a análise por acidente. De modo contrário, as falhas de equipamento dão, proporcionalmente, origem a mais fatalidades do que acidentes. Estes dados de fatalidades encontram-se representados na Figura 11, com a omissão das duas mortes causadas por turbulência de cinto de segurança.

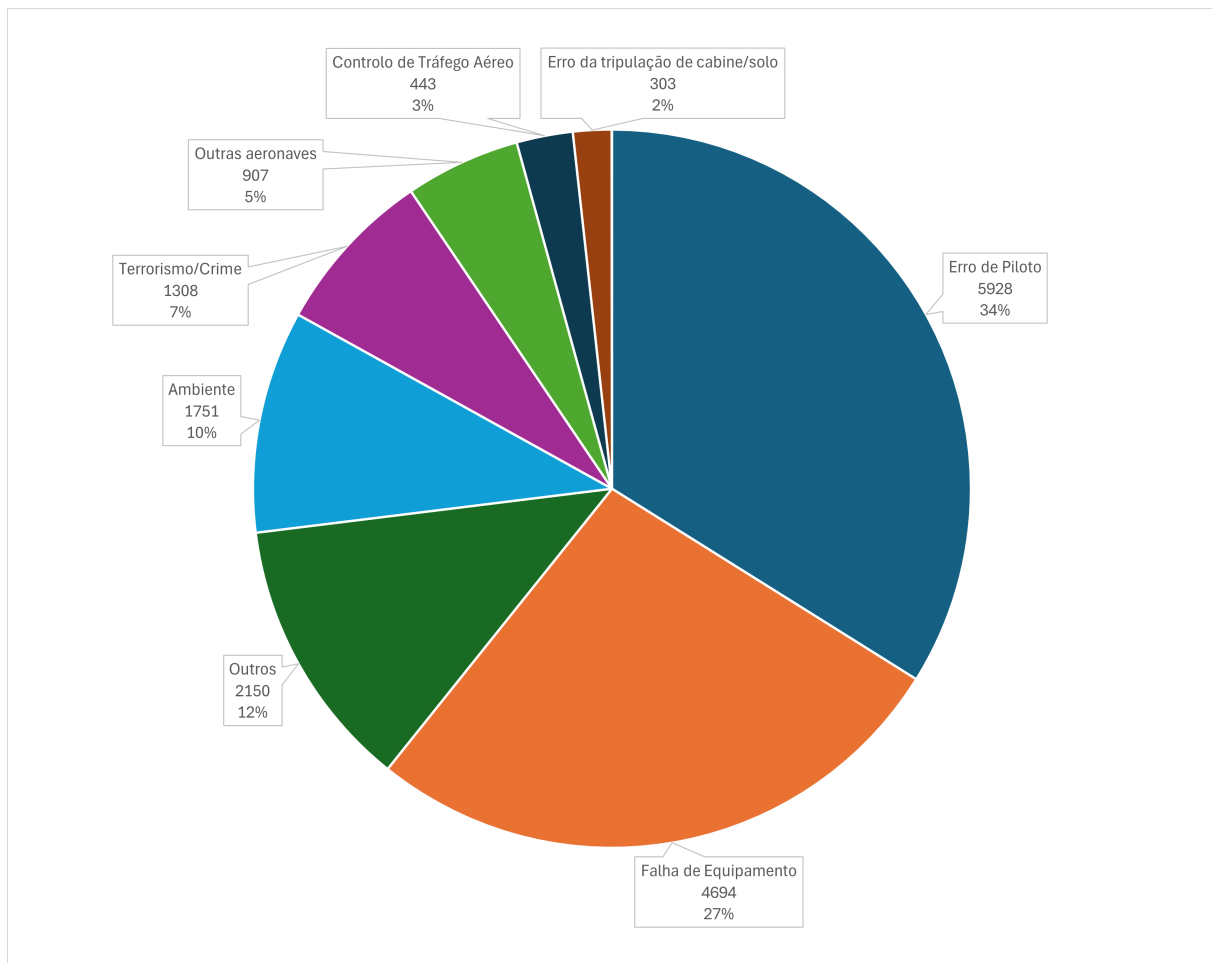


Figura 11: Causas das fatalidades de passageiros nos acidentes de aviação considerados (Oster, Strong, and Zorn 2010)

### 3.1.1 Falhas humanas

Como vimos, dentro dos fatores que contribuem para os acidentes, as causas humanas destacam-se.

Os acidentes de aviação associados ao fator humano devem-se a dificuldades relativas à gestão e à capacidade de reconhecer e interpretar estímulos sensoriais externos à aeronave. Estes comportamentos humanos, altamente individuais e subjetivos, incluem falhas de comunicação, decisões inadequadas e a pressão do tempo, podendo comprometer a segurança de uma operação aérea.

A partir da análise dos diferentes tipos de falhas de piloto - tabela 3 - (devido à falta de informações, especialmente em acidentes que não foram investigados em tanto detalhe, e nos quais os acontecimentos exatos são mais ambíguos, determinar o tipo de erro de piloto que levou ao acidente é muitas vezes difícil), concluímos que mais de metade dos acidentes por estas causadas resultam não do piloto perder controlo da aeronave, mas sim de erros de julgamento, ou em voo (36%) ou no solo (15%). Estes englobam situações como pilotar visualmente em condições meteorológicas que exigiriam o auxílio de instrumentos, não seguir a rota planeada em terreno montanhoso, voar intencionalmente abaixo da temperatura mínima recomendada, não seguir as listas de verificação pré-voo e não verificar o peso e equilíbrio da aeronave antes da decolagem. Para além destes erros, as falhas de *flying skills*, ou seja, a incapacidade de controlar fisicamente a aeronave, são responsáveis por 30% dos acidentes e 20% das fatalidades de passageiros. No entanto, apesar de, globalmente, representarem apenas 9% de todas as mortes derivadas de erros de

piloto, os voos controlados contra o terreno (CFIT) apresentam a menor taxa de sobrevivência, já que nestes acidentes, há a morte de cerca de 93% dos passageiros. Estes desastres ocorrem quando, por distração ou falta de consciência da situação, os pilotos permitem o voo do avião contra o solo, o que tipicamente ocorre em voos horizontais contra terreno que está em ascensão, como uma montanha. Os grandes jatos apresentam agora sistemas de aviso de proximidade ao solo, instrumentos que eliminaram quase totalmente este tipo de acidentes. No entanto, há aeronaves, especialmente as mais pequenas, ou que operam em países de terceiro mundo, que não têm incorporado este sistema e, por isso, este tipo de acidentes é ainda existente (Oster, Strong, and Zorn 2010).

Tabela 3: Diferentes tipos de erros de piloto (Oster, Strong, and Zorn 2010).

| Tipo de Erro de Piloto          | Fatalidades de Passageiros |        | Acidentes Fatais |        | Fração de passageiros mortos |
|---------------------------------|----------------------------|--------|------------------|--------|------------------------------|
|                                 | Número                     | Fração | Número           | Fração |                              |
| <i>Flying Skills</i>            | 1169                       | 20%    | 83               | 30%    | 36%                          |
| Aproximação desestabilizada     | 269                        | 5%     | 8                | 3%     | 56%                          |
| Voo controlado contra o terreno | 527                        | 9%     | 34               | 12%    | 93%                          |
| Julgamento em voo               | 2891                       | 49%    | 100              | 36%    | 87%                          |
| Julgamento no solo              | 916                        | 15%    | 41               | 15%    | 77%                          |
| Gestão de combustível           | 156                        | 3%     | 12               | 4%     | 45%                          |

Efetivamente, mais de 2000 pessoas foram vítimas de acidentes de avião causados por falhas de comunicação (Casagrande 2020). Entre os casos, destaca-se o acidente aéreo relativo a uma aeronave B 707 de uma empresa de origem colombiana que caiu nos arredores do aeroporto de Nova York, em 1990. Entre as causas do acidente, predomina a falta de comunicação entre os órgãos de controlo e a tripulação que não conseguiu devidamente explicar que se encontram com falta de combustível, uma vez que não dominavam a língua inglesa (Kalazans 2013).

Para além disso, uma incompreensão ou má leitura dos instrumentos eletrónicos pode igualmente gerar grandes desastres. Este é o caso da colisão envolvendo um Boeing 757 e um Tupolev Tu-154, cujos passageiros eram maioritariamente crianças com objetivo de passar férias em Barcelona. Este desastre aéreo foi causado por falhas no controlo do tráfego inclusive uma confusão entre as instruções dos órgãos de controlo e as sugestões da TCAS.

### 3.1.2 Falhas de Equipamento

As falhas técnicas/falhas de equipamento são, para nós, de especial relevância investigar, já que, apesar de serem apenas os segundos maiores responsáveis por acidentes na aviação, estão diretamente associadas com o trabalho dos engenheiros, que contribuem, de uma forma ou de outra, para possibilitar o voo. Nesta categoria, quase dois terços dos acidentes tiveram como causa principal as falhas de motor, causando estas 41% das mortes associadas às falhas de equipamento. Depois destas, destacam-se as falhas de instrumentos, que causaram cerca de um quarto das mortes e 12% dos acidentes nesta categoria e, logo a seguir, os problemas estruturais, que deram origem a 11% dos acidentes considerados e 23% das fatalidades de passageiros (Figura 12) (Oster, Strong, and Zorn 2010).

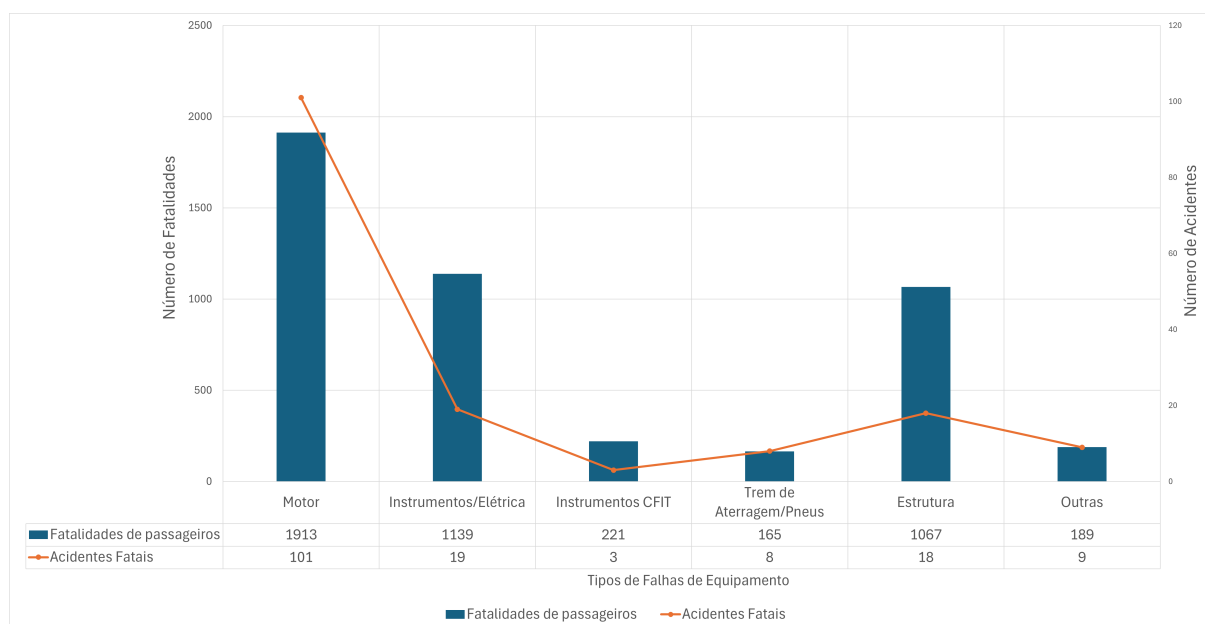


Figura 12: Número de acidentes e de fatalidades associados aos diferentes tipos de falhas de equipamento (Oster, Strong, and Zorn 2010)

## Exemplos de acidentes causados por falhas técnicas

### Turkish Airlines Flight 1951

A queda do voo 1951 da Turkish Airlines ocorreu em fevereiro de 2009 a cerca de 1.5 quilómetros do aeroporto de Schiphol, em Amesterdão (Países Baixos). Este acidente, que causou 9 mortes e 177 feridos e que destruiu completamente a aeronave envolvida, um Boeing 737-800, foi causado por múltiplos acontecimentos que individualmente não levariam a um desastre desta magnitude. No entanto, o que o despoletou foi uma avaria no sistema de rádio altímetro.

O voo estava a correr como esperado até entrar em espaço aéreo holandês e obter a autorização para pousar na pista Schiphol 18R.

O Boeing é equipado com sistemas redundantes de rádio altímetro de baixo alcance, que tal como o nome indica, calcula a altura aproximada do avião através da medição do atraso entre a emissão de um sinal de rádio e a sua receção. De um modo reduzido, este sistema possui uma antena de transmissão que emite ondas de rádio. Quando estas ondas encontram um obstáculo, como o solo, são refletidas e captadas pela antena de receção. Depois, este sistema, através do tempo decorrido, calcula a distância ao solo e fornece esta informação a vários sistemas automatizados, como o *autothrottle*. (Wilcutt and Harkins 2012)

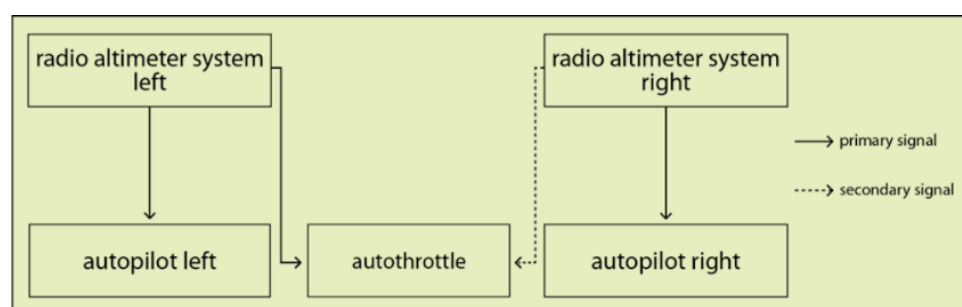


Figura 13: Visão geral dos altímetros ligados aos controlos do piloto automático e do acelerador automático (Wilcutt and Harkins 2012)

Contudo, no voo 1951, o altímetro esquerdo apresentava um defeito, relatando a altura do avião como 8 pés negativos. Esta leitura defeituosa, que foi indicada no visor do capitão e através de um aviso sonoro (detetado no gravador de voz da cabine), mas que não foi notada pela tripulação, fez com que o sistema *autothrottle* entrasse no modo *retard flare*, reduzindo a potência dos motores para marcha lenta (sistema acionado pouco antes da aterragem). Isto foi indicado nos instrumentos de voo, mas passou novamente despercebido. Neste momento, o piloto automático direito, utilizando dados corretos do altímetro direito, lutou para manter a aeronave na rota planeada, levantando o nariz do avião. No entanto, o avião continuou a perder velocidade, e a uma altitude de 460 pés, o *stick-shaker* do primeiro oficial foi ativado, indicando uma situação de *stall* (perda de sustentação do avião devido ao insuficiente fluxo de ar nas asas).

Os pilotos, que finalmente entenderam o que estava a acontecer, tentaram recuperar do *stall*, empurrando o nariz da aeronave para baixo, e aumentaram manualmente a velocidade do avião, numa tentativa de restabelecer controlo, mas, quando o primeiro oficial relaxou o impulso nas alavancas, o *autothrottle* reverteu de volta para o modo *retard*. O capitão tentou novamente aumentar a impulsão e desligou o *autothrottle*, mas era já tarde demais: o avião já se encontrava abaixo da altura mínima segura para aproximação.

A posterior investigação revelou que este problema já tinha ocorrido 148 vezes num período de 10 meses, com apenas alguns pilotos relatando-o como um problema técnico menor.

Tabela 4: Falhas de altímetros segundo registros da Boeing (Hecht 2011)

| Year | Horas de voo Boeing 737 NG | Efeito no sistema de voo automático | Ativação do modo "retard flare" |
|------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1999 | 890000                     | 0                                   | 0                               |
| 2000 | 1763000                    | 0                                   | 0                               |
| 2001 | 2498000                    | 0                                   | 0                               |
| 2002 | 3269000                    | 5                                   | 0                               |
| 2003 | 3931000                    | 8                                   | 5                               |
| 2004 | 4757000                    | 4                                   | 0                               |
| 2005 | 546000                     | 4                                   | 0                               |
| 2006 | 6284000                    | 2                                   | 0                               |
| 2007 | 7282000                    | 8                                   | 0                               |
| 2008 | 7980000                    | 15                                  | 2                               |
| 2009 | indisponível               | 9                                   | 5                               |

Este acidente levantou questões sobre a excessiva dependência dos pilotos em sistemas automatizados e realçou a importância de uma boa colaboração homem-máquina. Para além disso, serviu para a implementação de mudanças significativas. A Turkish Airlines melhorou o seu programa de treino e a Boeing respondeu melhorando os altímetros através de uma redundância aumentada e uma maior capacidade de verificar erros para leituras erradas. Além disso, atualizou o sistema de automatização várias vezes, incluindo, por exemplo, uma função que impede o modo *retard* se a diferença entre os 2 altímetros for superior a 6 metros.

### United Airlines Flight 585 (1991) e USAir Flight 427 (1994)

Outro acidente que foi aproveitado para melhorar a segurança na aviação ocorreu a 3 de março de 1991.

O voo 585, operado pela United Airlines num Boeing 737- 291, era um voo doméstico regular com a rota a começar no Aeroporto Internacional General Wayne A. Downing Peoria, em Peoria, Illinois, para Colorado Springs, fazendo escalas no Aeroporto Internacional Quad City, em Moline, Illinois e no agora desativado Aeroporto Internacional Stapleton, em Denver, no Colorado.

O voo decorreu sem incidentes até se aproximar da sua paragem final. Ao entrar na aproximação final

para o aeroporto de Colorado Springs, a tripulação perdeu o controle do avião quando este sofreu um movimento repentino do leme que o virou para o lado direito com o nariz para baixo. A tripulação, altamente experiente, tentou evitar a rápida queda da aeronave, recolhendo os *ailerons* (parte móvel da asa de um avião) por 15°, no entanto, a aeronave continuou a descer e caiu a 6 quilômetros da pista em Widefield Park. Todos os 25 passageiros e tripulantes morreram. (BOARD 1994)

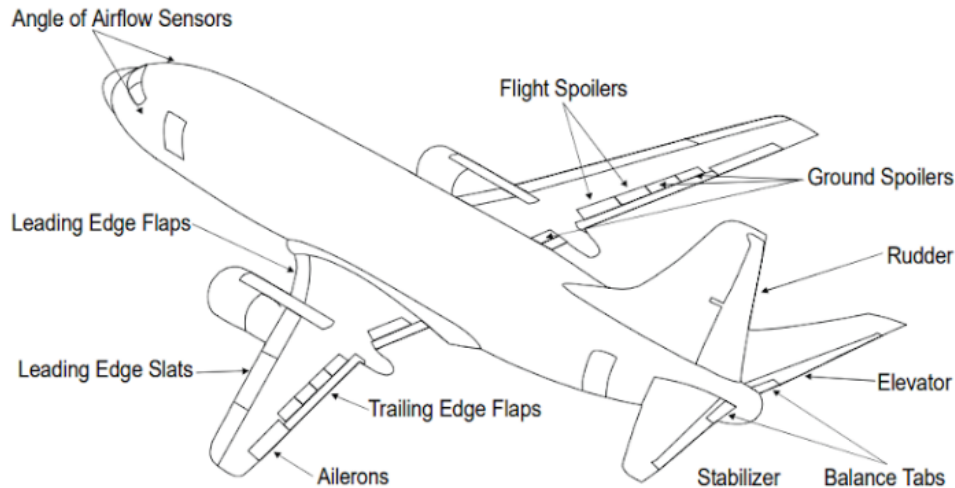


Figura 14: Locais de superfície de controle de voo do Boeing 737 (BOARD 1994)

Logo após os acidentes, o NTSB iniciou uma longa investigação que durou 21 meses. Os investigadores analisaram os destroços e os dados recuperados mas não encontraram nenhuma evidência definitiva que pudesse indicar o porquê do avião ter entrado num mergulho fatal, emitindo assim, pela quarta vez na história, um relatório sem uma causa determinada.

Este caso continuou sem resolução até que, três anos depois, no dia 8 de setembro de 1994, ocorreu um acidente com as mesmas características em Pittsburgh. O voo 427 da USAir na fase de chegada ao Aeroporto de Pittsburgh, enquanto sofria por turbulência da esteira (perturbação na atmosfera causada na parte de trás de uma aeronave) por estar a voar atrás de um Delta 727, sofreu uma rotação repentina para a esquerda. Os pilotos tentaram ainda restabelecer o controle do avião, através de manobras para diminuir o ângulo de ataque e a crescente inclinação para a esquerda, no entanto, este continuou o seu trajeto descendente, sujeitando todas as pessoas a bordo a uma aceleração de 4G. Segundos depois, a aeronave, que agora se deslocava a aproximadamente 300 milhas por hora (483 km/h), com o nariz inclinado 60° para a esquerda e 80° para baixo, explodiu quando bateu contra o chão, matando todos os 132 passageiros.

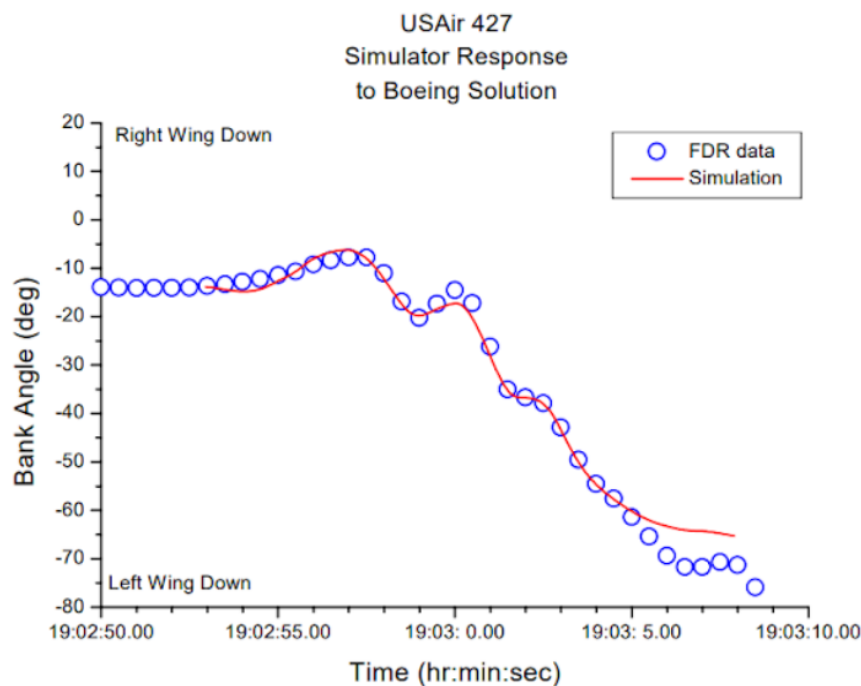


Figura 15: Ângulo de inclinação derivado para o voo 427 da USAir usando a análise cinemática da Boeing (BOARD 1994)

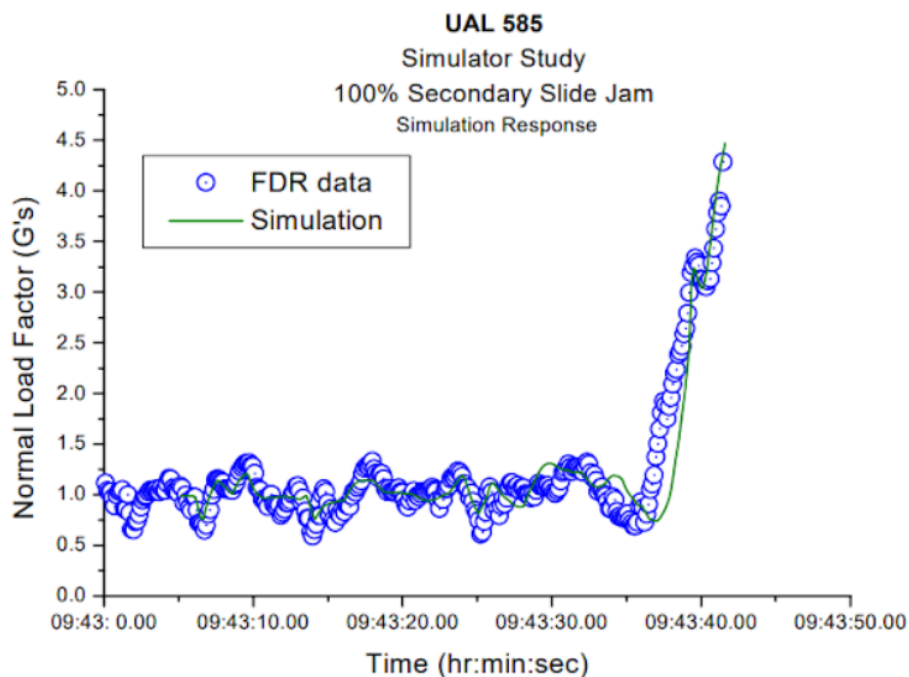


Figura 16: Dados de fator de carga normal para o voo 585 da United (BOARD 2001)

Este acidente levou a NTSB a realizar a investigação mais longa da história desta organização, que demorou 4 anos e meio para finalmente chegar a uma resposta conclusiva. No entanto, para chegar a esta conclusão, foi ainda preciso ocorrer outro acidente, neste caso com o voo Eastwind Airlines 517, onde

os pilotos foram capazes de recuperar o controlo e aterrar o avião.

Os investigadores descobriram que todos estes acidentes foram causados por uma falha mecânica, mais especificamente, numa servo válvula defeituosa. Esta válvula, presente no leme do avião (encontra-se na traseira do avião e tem como principal objetivo manobrá-lo), foi submetida “a um teste, que consistia em injetar nitrogénio líquido provocando o congelamento do dispositivo e de seguida deitar um líquido hidráulico quente”. Este teste mostrou que a válvula bloqueava sem qualquer explicação (apesar de só ocorrer em menos de 1% das experiências) e que, segundo um engenheiro da Boeing, podia até levá-la a mover-se na direção oposta à pretendida. (BOARD 1994) A Boeing, apesar de rejeitar as descobertas, culpando o copiloto por ter sido ele a desviar o leme com força para o lado errado devido ao pânico, concordou em “redesenhar o sistema de controlo do leme”, incluindo um backup redundante, e pagou pela modernização de todos os 737 existentes no mundo. Desde então, não foi registado mais nenhum acidente semelhante.

### 3.1.3 Fatores ambientais

Por outro lado, fatores ambientais, como condições meteorológicas adversas e obstruções geográficas, também desempenham um papel crucial na dinâmica dos acidentes. Embora os avanços na tecnologia de aviação tenham melhorado significativamente a capacidade de prever e evitar condições meteorológicas perigosas, elas ainda representam um desafio significativo para a segurança dos voos.

Este é o caso do voo 123 da Japan Airlines em 1985. O acidente ocorreu em condições meteorológicas adversas, incluindo turbulência severa. O impacto foi agravado por uma falha estrutural da aeronave, que não foi adequadamente avaliada devido às condições ambientais. Este foi um dos piores acidentes aéreos da história, resultando na morte de 520 pessoas (T. Editors 2024).



Figura 17: Imagem do acidente do voo 123 da Japan Airlines (Cloudberg 2021)

Ora, em outubro de 2001, deu-se uma colisão entre duas aeronaves no aeroporto de Milão. Uma das aeronaves foi instruída a preparar-se para a decolagem, no entanto acabou por colidir com outra que já lá se encontrava, devido a falta de visibilidade (Kalazans 2013).

## 4 Conclusões

As informações e estatísticas apresentadas neste relatório permitem concluir, inquestionavelmente, que o transporte aéreo, especialmente o comercial, é, presentemente, o meio de transporte mais seguro, sendo resultado de uma longa evolução que se tem dado desde o nascimento da aviação.

Esta fiabilidade é garantida pelos diversos e complexos sistemas de segurança que são atualmente empregues em quase todas as aeronaves. Apesar destes, acontecem ainda acidentes fatais na aviação, sendo principalmente causados por erros humanos. Na verdade, estes causam, em média, 40% de todos os acidentes fatais, consideravelmente mais do que os 23% cuja causa foi atribuída a falhas de equipamento, de vários tipos, entre as quais se destacam as falhas de motor, responsáveis pela grande maioria dos acidentes relacionados com mal-funcionamentos técnicos. A nossa análise permitiu também concluir que, no ramo dos erros de origem humana, a maioria dos acidentes foram fruto de um mau julgamento por parte de pilotos, ou no solo, ou em voo.

É, no entanto, devido à ocorrência de acidentes e a sua devida e minuciosa investigação que a segurança nos aviões evoluiu até ao ponto em que está hoje. Falhas detetadas como causa de um acidente são identificadas e, através de engenharia, processos de legislação, ou um melhor treino de procedimento dos pilotos e de todos os outros profissionais que tornam a aviação possível, são, dentro do possível, eliminadas. A queda do voo 1951 da Turkish Airlines, abordada neste relatório, foi essencial para questionar a dependência excessiva do piloto em sistemas eletrónicos e, também, para melhorar o funcionamento de altímetros e dos sistemas automáticos relacionados com o modo *retard*, que já antes haviam mal-funcionado. Estas mudanças deveram-se totalmente a uma boa investigação do acidente. O mesmo aconteceu com os voos United Airlines Flight 585 e USAir Flight 427. Como foi referido anteriormente, apesar da Boeing não ter assumido a responsabilidade pelos acidentes, implementaram mudanças de *design* que corrigiram completamente este problema recorrente.

Em suma, os sistemas elétricos, aspetos estruturais, programas de treino, regulamentações e procedimentos que tornam os aviões tão seguros como são atualmente foram, em grande parte, fruto da investigação dos acidentes aéreos cujas causas foram, precisamente, a falta destes mesmos elementos. Assim, podemos inferir que, apesar de serem eventos extremamente infelizes, os acidentes aéreos garantem, indubitavelmente, a evolução da segurança no transporte aéreo.

## Referências

- Ahmed, U., F. Ali, and I. Jennions (2021). A review of aircraft auxiliary power unit faults, diagnostics and acoustic measurements. *Progress in Aerospace Sciences*.
- Bakker, B. and S. Drozdowski (2014). Transponders in aviation.
- Bayanat Engineering, Q. (2024).
- BOARD, N. T. S. (1994). Aircraft accident report uncontrolled descent and collision with terrain usair flight 427 boeing 737-300, n513au near aliquippa, pennsylvania september 8, 1994. Available at <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAR9901.pdf>.
- BOARD, N. T. S. (2001). Aircraft accident report uncontrolled descent and collision with terrain united airlines flight 585 boeing 737-200, n999ua 4 miles south of colorado springs municipal airport colorado springs, coloradomarch 3, 1991. Available at [https://asn.flightsafety.org/reports/1991/19910303\\_B732\\_N999UA.pdf](https://asn.flightsafety.org/reports/1991/19910303_B732_N999UA.pdf).
- Caro, P. W. (1988). Human factors in aviation. *Academic Press*.
- Casagrande, V. (2020). "inglês e comunicação ruins causaram os piores acidentes aéreos da história". *UOL, São Paulo*.
- Cloudberg, A. (2021). Japan airlines flight 123.
- Dizikes, P. (2024). "flying keeps getting safer". Technical report, MIT, Estados Unidos da América.
- Ducoffe, M., C. Gabreau, and I. Ober (2024). Certification of avionics software based on machine learning: the case for formal monotony analysis. *Int J Softw Tools Technol Transfer* 26, 189–205 (2024).
- Grant, E. S. (2024). Defining model-driven safety-critical software engineering, with international standard. In *2024 7th International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)*, pp. 27–33.
- Hangar, . (2016). Conheça os principais stresses estruturais das aeronaves.
- Hawley, M., K. Gotz, and J. Hird (2014). Design-in security for air traffic control. *IEEE*.
- Hecht, H. (2011). So much to learn from one accident crash of 737 on 25 february 2009. In *2011 IEEE 13th International Symposium on High-Assurance Systems Engineering*, pp. 348–351.
- Ivančević, D., I. Smojver, and M. Leko (2018). Numerical approach in the evaluation of aeronautical structures ballistic protection. *Transportation Research Procedia*.
- Jenie, S. D. and A. Budiyono (2006). The aircraft cockpit as the interface between controller and controlled systems.
- Jian, X. and L. Yao (2011). Study on airworthiness requirements of composite aircraft structure for transport category aircraft in faa. *Procedia Engineering*.
- Kalazans, D. (2013). *Acidentes Aéreos: Os bastidores das investigações de acidentes aeronáuticos*. editora Bianch.
- Lazić, D. A., V. Grujić, and M. Tanasković (2020). The role of flight simulation in flight training of pilots for crisis management.
- McLean D., A. F. C. S. (2003). Measurement and control.
- Menon, P. and S. Park (2016). Dynamics and control technologies in air traffic management. *Annual Reviews in Control*.
- of Transportation Statistics, B. (2022).
- Onemonroe, A. (2024). How retractable landing gear works.
- Oster, C. V., J. S. Strong, and K. Zorn (2010). Why airplanes crash: Causes of accidents worldwide. Available at <https://ageconsearch.umn.edu/record/207282>.

- Page, C. (2020). How do aircraft brakes work? Available at <https://thepointsguy.com/airline/how-do-aircraft-brakes-work/>.
- Prophet, W. W. and H. A. Boyd (1970). *Device-task Fidelity and Transfer of Training: Aircraft Cockpit Procedures Training*. HumRRO Division No. 6 (Aviation).
- Robinson, R., L. Nguyen, and W. H. Moore (2023). Transportation statistics annual report 2023.
- Ronell, M. (2020). Discussion of aviation software oversight improvement. In *Proceedings of the 2020 ACM SIGPLAN International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software*, Onward! 2020, New York, NY, USA, pp. 122–133. Association for Computing Machinery.
- Scholz, D. (2006). Aircraft fire protection.
- Sforza, P. (2014). Commercial airplane design principles. *Butterworth-Heinemann*.
- Spitzer, C., U. Ferrell, and T. Ferrell (2017). *Digital Avionics Handbook*. CRC Press.
- Sun, J., S. Edwards, and A. Z. L. Connelly, Nic; Bridge (2021). Airborne software development processes certification review strategy based on rtca/do-178c.
- T. Editors, o. E. (2024). Japan airlines flight 123. Available at <https://www.britannica.com/event/Mount-Osutaka-airline-disaster>.
- Vidović, A., A. Franjić, and M. O. Štimac, Igor; Ban (2022). The importance of flight recorders in the aircraft accident investigation. *Transportation Research Procedia*.
- Wilcutt, T. and W. B. Harkins (2012). The poldercrash: Turkish airlines flight 1951. Available at [https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2012-04-02-turkishairlinesflight1951-vits.pdf?sfvrsn=94ae1ef8\\_4](https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2012-04-02-turkishairlinesflight1951-vits.pdf?sfvrsn=94ae1ef8_4).
- Yang, T., F. Gao, and P. Bozhko, Serhiy; Wheeler (2018). Control of power electronic converters and systems. *Academic Press*.
- Zhukovsky (2011). Ssj100 simulators.

## A Apêndice

Ao longo do relatório, foram referidos diversas entidades cujo fim ou significado não foi explícito, por motivos de coesão textual. Desta forma, resolvemos colocar neste apêndice estas informações, de modo a complementarem a leitura do trabalho.

RTCA - associação privada, sem fins lucrativos, fundada em 1935 como a Comissão Técnica de Rádio para a Aeronáutica. É a principal Parceria Público-Privada para desenvolver consensos entre interesses diversos e concorrentes sobre questões críticas de modernização da aviação.

FAA - A Federal Aviation Administration (FAA) é a agência do Departamento de Transportes dos Estados Unidos responsável pela regulamentação e supervisão da aviação civil nos EUA, bem como pela operação e desenvolvimento do Sistema Nacional de Espaço Aéreo. A sua principal missão é garantir a segurança da aviação civil.

EASA - autoridade responsável pela segurança da aviação civil na União Europeia, encarregada de estabelecer normas e regulamentos para garantir a segurança e a eficiência do setor aeronáutico.

EUROCAE - A Organização Europeia para o Equipamento da Aviação Civil é uma organização internacional sem fins lucrativos que reúne peritos de todo o sector da aviação para desenvolver e promover normas consensuais de alta qualidade para sistemas e equipamentos da aviação civil.

AFCS (Automatic Flight Control System) - sistema que ajuda a controlar a trajetória de voo de uma aeronave sem a necessidade de intervenção constante do piloto.

CS (Certification Specifications) - são especificações técnicas desenvolvidas pela EASA que estabelecem os requisitos necessários para a certificação de produtos aeronáuticos, incluindo aeronaves, motores e equipamentos. As CS fornecem orientações claras sobre os critérios de conformidade que os fabricantes e operadores devem atender para obter a certificação e garantir a segurança e a eficácia dos produtos.

CDR (Cockpit Data Recorder) - dispositivo usado em aeronaves para gravar dados da cabine de comando.

SSFDR (Solid State Flight Data Recorder) - dispositivo que utiliza memória de estado sólido para registar dados de voo de uma aeronave - tipo de FDR.