

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES



**SEGURANÇA OPERACIONAL E INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES
AERONÁUTICOS**

Victor Hugo Mendanha Machado de Freitas

Goiânia

2025

SEGURANÇA OPERACIONAL E INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS

Victor Hugo Mendanha Machado de Freitas¹, Roberto Márcio dos Santos²

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, yhmmf2002@gmail.com

²Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, rob.marcio@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho visou apresentar uma análise ampla sobre a segurança operacional e a investigação de acidentes aeronáuticos, destacando a importância desse campo para a aviação civil moderna, com base no estudo de acidentes significativos ao longo da história da aviação. Teve como propósito compreender como a investigação de fatores técnicos, humanos e organizacionais se integrou na construção de um sistema voltado à prevenção e à redução de riscos. A metodologia consistiu em pesquisa bibliográfica e na análise de estudos de caso desses acidentes marcantes, permitindo observar transformações nas práticas e nas políticas do setor ao longo do tempo. De modo geral, o trabalho evidenciou que a segurança operacional resultou de um processo contínuo de aprendizado, no qual cada ocorrência investigada contribuiu para o aprimoramento das normas, da cultura organizacional e das tecnologias aplicadas à aviação. As conclusões reforçaram a relevância do processo de investigação de acidentes aeronáuticos e como isso representa um dos alicerces para o desenvolvimento seguro da aviação na esfera global.

Palavras-chave: *Aviação, Segurança Operacional, Investigação, Prevenção, Lições.*

ABSTRACT: This study aimed to present a broad analysis of safety and aircraft accident investigation, highlighting the importance of this field for modern civil aviation, based on the study of significant accidents throughout aviation history. Its purpose was to understand how the investigation of technical, human, and organizational factors was integrated into the construction of a system focused on prevention and risk reduction. The methodology consisted of bibliographic research and the analysis of case studies of these major accidents, allowing the observation of transformations in the sector's practices and policies over time. In general, the study showed that operational safety resulted from a continuous learning process in which each investigated occurrence contributed to the improvement of regulations, organizational culture, and technologies applied to aviation. The conclusions reinforced the relevance of the aircraft accident investigation process and how it represents one of the foundations for the safe development of aviation on a global scale.

Keywords: *Aviation, Safety, Investigation, Prevention, Lessons.*

1. Introdução

A segurança operacional representa um dos pilares fundamentais da aviação civil moderna. Trata-se de um campo interdisciplinar que abrange aspectos técnicos, humanos, organizacionais e regulatórios com o objetivo de reduzir riscos e garantir a integridade das operações aéreas. Embora a aviação seja, estatisticamente, o meio de transporte mais seguro do mundo, o

potencial de severidade dos acidentes e a complexidade dos sistemas aeronáuticos exigem uma abordagem de prevenção contínua e sistematizada.

A evolução da aviação, marcada pelo avanço tecnológico e pela crescente automação das aeronaves, trouxe ganhos significativos em eficiência e confiabilidade. Entretanto, também introduziu novos desafios relacionados à interação homem-máquina, à dependência de sistemas automatizados e à necessidade de treinamentos mais abrangentes e realistas. A segurança operacional, nesse contexto, não pode ser entendida apenas como o cumprimento de normas, mas como um compromisso organizacional e cultural com a prevenção de acidentes aeronáuticos.

Os acidentes aeronáuticos, apesar de trágicos, têm historicamente contribuído para o aprimoramento da segurança por meio da análise detalhada de suas causas e da implementação de medidas corretivas. Cada investigação representa uma oportunidade de aprendizado sobre as vulnerabilidades do sistema e reforça a importância de uma cultura de segurança robusta, onde falhas são compreendidas como fontes de conhecimento, e não de punição.

Dessa forma, o artigo tem como objetivo discutir os fundamentos teóricos e normativos da segurança operacional, destacando a importância da cultura organizacional e do aprendizado contínuo. Portanto, este trabalho se justifica através da análise da relevância das investigações de alguns acidentes aeronáuticos específicos como instrumentos de aprimoramento da segurança operacional global.

2. Contexto da Segurança Operacional

A segurança operacional (Safety) é o resultado de um processo histórico de aprendizado construído ao longo de mais de um século de operações aeronáuticas. Desde os primeiros voos, a aviação tem buscado compreender e mitigar riscos associados à atividade aeronáutica, desenvolvendo normas, tecnologias e práticas que permitiram reduzir de forma significativa o número de acidentes fatais.

O conceito de segurança operacional evoluiu em paralelo ao avanço da própria aviação. No início, a ênfase recaía sobre a confiabilidade mecânica das aeronaves, já que falhas estruturais e limitações técnicas eram as principais causas de acidentes. Com o passar das décadas e o aumento da automação, as investigações passaram a evidenciar o papel dos fatores humanos, destacando erros de decisão, comunicação deficiente e falhas de coordenação entre tripulantes, o que pode ser evidenciado na obra de James Reason (1997).

A partir dos anos 1980, com o desenvolvimento de modelos teóricos como o do próprio Reason, o conhecido modelo do “Queijo Suíço”, a segurança passou a ser compreendida como o resultado de múltiplas camadas de defesa organizacional. Esse modelo demonstrou que os acidentes não decorrem de uma única falha isolada, mas do alinhamento de vulnerabilidades em diferentes níveis: humano, técnico, organizacional e regulatório. Essa abordagem consolidou o entendimento de que a segurança é uma responsabilidade compartilhada entre indivíduos, empresas e autoridades.

Atualmente, a segurança operacional é estruturada sobre três pilares fundamentais:

1. Gestão de riscos: identificação, avaliação e mitigação de perigos (*hazards*) antes que causem danos;

2. Cultura de segurança: comprometimento coletivo com comportamentos seguros, comunicação aberta e aprendizado contínuo;
3. Governança normativa: implementação de sistemas padronizados e regulamentos internacionais, como o Anexo 19 da Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), que define a estrutura global do gerenciamento da segurança operacional.

Nesse contexto, a segurança aeronáutica moderna é reconhecida como uma disciplina interdisciplinar, que une engenharia, psicologia, gestão e regulação. Ela depende de uma estrutura institucional sólida, de uma cultura organizacional voltada à prevenção e, sobretudo, da disposição permanente em aprender com as falhas passadas.

3. Estrutura Normativa da Segurança Operacional

A estrutura normativa da segurança operacional é o alicerce que sustenta a gestão dos riscos na aviação civil. Essa estrutura é regida por princípios estabelecidos pela OACI, órgão responsável pela padronização global das práticas aeronáuticas desde a Convenção de Chicago de 1944. Entre os 19 anexos técnicos à Convenção, o Anexo 19 “Safety Management” (Gerenciamento da Segurança Operacional), publicado em 2013, consolidou as diretrizes para o desenvolvimento e a implementação de Sistemas de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO) em todos os Estados signatários.

O Anexo 19 representa um marco no conceito moderno de segurança. Ele introduz a ideia de que o gerenciamento da segurança deve ser proativo, preditivo e sistêmico, abandonando a visão reativa de que apenas o cumprimento de normas seria suficiente para evitar acidentes. O documento define que cada organização aeronáutica (operadores aéreos, empresas de manutenção, provedores de serviços de navegação aérea e autoridades reguladoras) deve estabelecer um SGSO próprio, capaz de identificar perigos, avaliar riscos e implementar medidas preventivas de forma contínua.

Além disso, o Anexo 19 enfatiza a importância da “Just Culture”, ou cultura justa, que promove a comunicação aberta, o aprendizado coletivo e a confiança entre os níveis hierárquicos. Essa abordagem reconhece que o erro humano é inevitável, mas que as falhas individuais geralmente refletem deficiências organizacionais ou sistêmicas.

No Brasil, essas diretrizes internacionais foram incorporadas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), por meio do Programa Brasileiro para a Segurança Operacional da Aviação Civil (PSO-BR). Esse programa estabelece as responsabilidades do Estado na supervisão da segurança operacional, definindo metas, indicadores e mecanismos de coordenação entre os participantes do sistema. Ele atua de forma integrada com o Plano Nacional de Segurança Operacional (PNSO), que operacionaliza as metas e indicadores do PSO-BR, alinhando o país ao Global Aviation Safety Plan (GASP) da OACI.

Outro marco é a Política Nacional de Aviação Civil (PNAC), instituída pelo Decreto nº 6.780/2009, que define a segurança operacional como um dos eixos estruturantes da política aeronáutica brasileira, reforçando a coordenação entre ANAC, DECEA e o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA).

Complementarmente, o Manual do Comando da Aeronáutica MCA 63-19, que trata da cultura de segurança operacional no Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro

(SISCEAB), publicado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), estabelece diretrizes específicas para o fortalecimento da cultura de segurança nas instituições ligadas ao SISCEAB. O documento propõe a criação de um ambiente de confiança e aprendizado contínuo, no qual erros sejam relatados e analisados sem punição injusta, desde que não envolvam negligência ou dolo.

Por fim, a ANAC mantém o PSOE-ANAC (Programa de Segurança Operacional Específico da ANAC), que aplica internamente os princípios do SGSO dentro da própria agência, garantindo que o órgão regulador adote práticas coerentes com as que exige dos operadores.

A convergência entre Anexo 19, PSO-BR, PNSO, PNAC, PSOE-ANAC e MCA 63-19 reflete uma evolução conceitual significativa: a segurança operacional deixou de ser uma responsabilidade exclusiva das autoridades reguladoras ou dos pilotos e passou a ser um compromisso coletivo, fundamentado em aprendizado organizacional, análise de dados e comportamento ético. Essa integração entre norma e cultura forma a base sobre a qual se constrói uma aviação mais resiliente, segura e sustentável.

4. Cultura de Segurança Operacional e Aprendizado Organizacional

A cultura de segurança operacional é o componente humano e ético que sustenta a eficácia de qualquer sistema de gerenciamento de riscos. Pode ser entendida como o conjunto de valores, atitudes e comportamentos compartilhados por todos os membros de uma organização, que determinam a prioridade atribuída à segurança em relação a outros objetivos, como eficiência, produtividade ou lucro.

De acordo com o MCA 63-19 do DECEA, uma cultura de segurança madura é caracterizada por comunicação aberta, confiança mútua, aprendizado contínuo e responsabilidade compartilhada. Isso significa que erros e falhas devem ser analisados de forma construtiva, buscando compreender suas causas sistêmicas e promover melhorias, e não punir indivíduos. Esse modelo está diretamente alinhado com a “just culture” preconizada pela OACI e reforçada pela ANAC, que equilibra justiça e aprendizado, incentivando o relato voluntário de ocorrências.

No contexto da aviação, o fortalecimento da cultura de segurança é essencial para lidar com a crescente complexidade tecnológica e operacional do setor. A automação, embora reduza a carga de trabalho e minimize certos tipos de erro humano, também pode gerar dependência excessiva e redução da consciência situacional em situações críticas. Assim, a cultura de segurança funciona como uma defesa organizacional, garantindo que o ser humano permaneça no centro das decisões, mesmo em sistemas altamente automatizados.

Além disso, o desenvolvimento de uma cultura sólida requer liderança comprometida, educação continuada e engajamento de todos os níveis hierárquicos. A segurança não pode ser imposta por regulamentos, mas deve ser incorporada como um valor intrínseco à prática profissional. Somente por meio desse alinhamento entre comportamento humano, gestão e estrutura organizacional é possível transformar o conhecimento adquirido com erros passados em aprendizado permanente, consolidando uma verdadeira cultura de segurança operacional.

5. Importância do Relatório Final na Investigação de Acidentes Aeronáuticos

A análise de acidentes é um dos instrumentos mais poderosos para o aprimoramento da segurança operacional, pois transforma tragédias em conhecimento técnico e organizacional. Cada investigação busca identificar não apenas o que aconteceu, mas porque aconteceu, isto é, quais fatores humanos, tecnológicos e institucionais contribuíram para o evento.

De acordo com o Anexo 13 da OACI, a investigação de acidentes e incidentes deve ter caráter preventivo, não punitivo e educativo, voltado à compreensão das causas subjacentes e à emissão de recomendações de segurança. Essa filosofia é reforçada pelo Anexo 19, que integra a investigação de acidentes ao ciclo de gestão da segurança, garantindo que os resultados obtidos retroalimentem o sistema de prevenção.

Órgãos como o CENIPA no Brasil, o *National Transportation Safety Board* (NTSB, Estados Unidos da América), o *Bureau d'Enquêtes et d'Analyses* (BEA, França) e o *Komite Nasional Keselamatan Transportasi* (KNKT, Indonésia) têm papel essencial nesse processo, produzindo relatórios técnicos que se tornam referências mundiais. Esses documentos analisam falhas humanas, deficiências técnicas e fatores organizacionais, apresentando recomendações que frequentemente resultam em mudanças em regulamentos, treinamentos e projetos de aeronaves.

A cada acidente investigado, novos aprendizados são incorporados aos sistemas de segurança e às práticas de operação, reforçando a cultura de prevenção. Assim, compreender a importância da investigação de acidentes é compreender o próprio processo de evolução da aviação, uma atividade que transforma eventos adversos em avanços sistêmicos.

6. Estudos de Casos

6.1. Acidente Air France 447 (2009)

6.1.1. Contexto do acidente

Conforme o relatório da BEA, o voo AF447 da Air France, operado por um Airbus A330-203 (matrícula F-GZCP), partiu do Aeroporto do Galeão (Rio de Janeiro) em 31 de maio de 2009 com destino a Paris-Charles de Gaulle, transportando 216 passageiros e 12 tripulantes. O voo prosseguiu normalmente até as 02h10 (UTC), quando a aeronave entrou em uma área de instabilidade meteorológica intensa sobre o Atlântico, associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Poucos minutos depois, o sistema de medição de velocidade (tubos de Pitot) apresentou bloqueio por cristalização de gelo, ocasionando a perda de informações confiáveis de velocidade e a consequente desconexão do piloto automático.

A partir desse momento, a tripulação passou a operar manualmente a aeronave em condições adversas, sem referências precisas de velocidade e altitude. A falta de entendimento situacional, combinada com inputs incorretos no sidestick e uma comunicação ineficiente entre os pilotos, resultou na entrada da aeronave em estol aerodinâmico prolongado, do qual não se recuperou. O impacto com o oceano ocorreu às 02h14 UTC, resultando na perda total de vidas a bordo.

O Relatório Final da BEA destacou que não houve falha estrutural prévia ou explosão; o acidente foi decorrente de uma cadeia de eventos humanos e técnicos, revelando vulnerabilidades na interação entre o homem e sistemas automatizados em condições de falha múltipla.

6.1.2. Fatores humanos

A investigação da BEA (2012) apontou que o fator humano teve papel central no desfecho do voo AF447. Entre os elementos identificados estão a perda de consciência situacional, a falta de coordenação de cabine (CRM - Crew Resource Management) e lacunas no treinamento para recuperação de estol em voo manual de alta altitude.

Durante a sequência do acidente, o piloto no controle manteve uma atitude de nariz elevado, interpretando incorretamente os alarmes de estol e acreditando que a aeronave estava em descida excessiva. Esse erro cognitivo foi agravado pelo stress situacional e pela ausência de referência visual externa, típica de voos noturnos em ambiente oceânico.

A análise comportamental mostra que a automação havia reduzido a exposição dos pilotos a situações manuais críticas, resultando em diminuição da proficiência operacional em modos de voo degradados, conforme a visão de Daniel Maurino e demais autores na obra *Beyond Aviation Human Factors: Safety in High-Technology Systems*, de 1995. O BEA recomendou, entre outras medidas, a revisão dos programas de treinamento de pilotos da Airbus e da Air France, priorizando práticas de voo manual e recuperação de estol, bem como aprimoramento no gerenciamento de ameaças e erros (TEM) e na comunicação entre tripulantes.

A literatura de fatores humanos reforça que a falha não decorreu de negligência individual, mas de um sistema complexo que não preparava adequadamente os operadores para falhas inesperadas da automação, de acordo com Sidney Dekker (2001) e Raja Parasuraman, Thomas Sheridan e Christopher Wickens (2000). Assim, o AF447 tornou-se um marco paradigmático na reavaliação do papel do piloto em sistemas altamente automatizados.

6.1.3. Fatores tecnológicos (automação e sistemas)

O Airbus A330 é uma aeronave com alto grau de automação, operando sob o conceito de fly-by-wire, em que os comandos do piloto são processados eletronicamente e interpretados por computadores de controle de voo. Essa tecnologia, embora incremente a estabilidade e reduza a carga de trabalho, pode gerar desconexão cognitiva entre o operador e o comportamento físico da aeronave, segundo Parasuraman, Sheridan e Wickens, em 2000.

No caso do AF447, a falha simultânea dos três tubos de Pitot provocou a perda de dados de velocidade e fez com que o sistema de controle de voo alternasse para o modo degradado “Alternate Law”, reduzindo proteções automáticas contra estol, conforme mencionado pela BEA. A transição súbita entre modos automáticos e manuais não foi devidamente compreendida pelos pilotos, que continuaram a aplicar comandos inadequados.

Segundo a BEA, adicionalmente, o projeto dos sistemas não fornecia feedback tátil nem visual suficiente para indicar ao piloto a situação aerodinâmica real. A ausência de aviso de estol consistente e a confusão gerada por alarmes intermitentes contribuíram para a manutenção da atitude incorreta. Essa falha de interface homem-máquina evidenciou um dos limites da automação moderna: a dependência excessiva e a dificuldade de retomada manual em situações inesperadas.

O relatório também destacou que o treinamento e a certificação das tripulações não contemplavam cenários de perda de velocidade em cruzeiro noturno. Como consequência, após o acidente, a OACI e ANAC revisaram as recomendações de treinamento de estol e perda de consciência situacional, incorporando essas lições ao PSO-BR e às diretrizes de gerenciamento da segurança (Anexo 19).

A partir desse caso, a indústria aeronáutica passou a revisar seus conceitos de automação e supervisão humana, reconhecendo que sistemas altamente complexos exigem operadores mentalmente engajados, capazes de intervir de forma assertiva quando os automatismos falham, segundo Stolzer, Halford, Goglia, em 2017. O acidente AF447, portanto, tornou-se um símbolo do equilíbrio necessário entre confiança tecnológica e competência humana no gerenciamento da segurança operacional.

6.2. Acidente Lion Air 610 (2018)

6.2.1. Contexto do acidente

De acordo com o KNKT, o voo Lion Air JT610, operado por um Boeing 737 MAX 8 (matrícula PK-LQP), decolou de Jacarta (Indonésia) em 29 de outubro de 2018 com destino a Pangkal Pinang, transportando 181 passageiros e 8 tripulantes. Doze minutos após a decolagem, a aeronave mergulhou abruptamente no mar de Java, causando a morte de todos os ocupantes.

O relatório final do KNKT identificou que o sistema MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System), introduzido na nova série 737 MAX, desempenhou papel central na sequência de falhas. O sensor de ângulo de ataque (AoA) forneceu dados incorretos, levando o MCAS a comandar repetidamente o nariz da aeronave para baixo, interpretando erroneamente uma situação de estol.

Os pilotos lutaram contra o sistema por cerca de 11 minutos, sem compreender plenamente o comportamento automático, o que resultou na perda de controle em voo (LOC-I). A investigação revelou falhas combinadas de projeto, certificação e treinamento, mostrando como a introdução de uma nova tecnologia sem adequada divulgação e treinamento pode comprometer a segurança operacional.

6.2.2. Fatores humanos

Os fatores humanos foram determinantes na tragédia do voo JT610. O relatório do KNKT (2019) apontou deficiências significativas no treinamento de familiarização com o sistema MCAS, que havia sido apenas brevemente mencionado nos manuais de voo. A tripulação desconhecia a extensão das intervenções automáticas do sistema e suas condições de ativação, o que limitou sua capacidade de resposta.

Segundo Dekker, a interação inadequada entre operador e automação reflete uma falha de projeto organizacional, e não um erro individual. Nesse caso, os pilotos foram colocados em um sistema que não oferecia transparência suficiente sobre suas funções internas, um exemplo do que Reason define como “falhas latentes”, isto é, erros embutidos no próprio sistema que emergem apenas em situações de estresse operacional.

Além disso, o relatório apontou pressões organizacionais e culturais dentro da Lion Air, incluindo voos anteriores da mesma aeronave com registros de falha semelhantes, mas sem reporte adequado aos órgãos de manutenção. Esse aspecto reflete uma cultura de segurança deficiente, onde eventos anômalos não eram tratados como oportunidades de aprendizado, contrariando os princípios da “just culture” estabelecidos pela OACI e pelo PSO-BR.

Portanto, o fator humano no voo JT610 não se limita à ação dos pilotos, mas engloba uma cadeia de decisões institucionais e organizacionais que fragilizaram as barreiras de segurança e impediram uma resposta eficaz.

6.2.3. Fatores tecnológicos (automação e sistemas)

O MCAS foi projetado para compensar características aerodinâmicas alteradas pelo redesenho dos motores do 737 MAX, mas operava a partir de um único sensor de AoA, sem redundância, o que configurou uma vulnerabilidade crítica, analogicamente à visão pautada nas obras de Rollenhagen e Reiman. Quando esse sensor apresentou valores incorretos, o sistema passou a comandar sucessivamente o estabilizador horizontal, forçando o nariz da aeronave para baixo, sem que os pilotos tivessem clara indicação do motivo.

A automação excessiva e a falta de interface transparente tornaram o comportamento do sistema imprevisível aos operadores. Conforme Parasuraman, Sheridan e Wickens (2000), o nível de automação deve sempre garantir que o operador mantenha “consciência da situação” e capacidade de intervenção. No caso do 737 MAX, essa relação foi rompida.

Além disso, a investigação do Congresso dos EUA revelou que a certificação do MCAS pela *Federal Aviation Administration* (FAA) foi baseada em documentação incompleta fornecida pela Boeing, e que o sistema não foi devidamente avaliado quanto ao risco de falha de sensor único. Essas descobertas geraram uma revisão global das práticas de certificação aeronáutica e levaram a Boeing a reformular o MCAS, incorporando redundância e melhor treinamento de tripulantes, de acordo com a FAA, em 2021.

O acidente Lion Air 610 expôs os riscos da confiança cega na automação e a necessidade de gestão de risco integrada entre fabricantes, operadores e autoridades reguladoras, reforçando a importância da cultura de segurança e da comunicação organizacional, conforme a visão de Stolzer, Halford e Goglia.

6.3. Acidente Concorde 4590 (2000)

6.3.1. Contexto do acidente

De acordo com o relatório da BEA de 2002 voo Air France 4590, operado por um Concorde F-BTSC, decolou do Aeroporto Charles de Gaulle (Paris) em 25 de julho de 2000 com destino a Nova Iorque. Poucos segundos após a decolagem, a aeronave atingiu uma lâmina metálica caída na pista, proveniente de um DC-10 da Continental Airlines, o que causou estouro de pneu e o consequente rompimento do tanque de combustível, gerando incêndio e perda de potência em dois motores.

A aeronave, já sobrecarregada e com pista curta, não conseguiu ganhar altitude suficiente e colidiu com um hotel próximo, matando 113 pessoas. Esse acidente foi o primeiro e único da história do Concorde e levou à suspensão temporária de toda a frota supersônica mundial.

6.3.2. Fatores humanos e operacionais

A investigação do BEA (2002) apontou que a tripulação agiu de acordo com os procedimentos existentes e demonstrou elevado nível técnico, mas foi surpreendida por uma cadeia de eventos excepcionais e súbitos, sem margem de recuperação. No entanto, verificou-se que a aeronave estava acima do peso máximo de decolagem e com deslocamento lateral na pista, o que agravou os efeitos do impacto inicial com o objeto metálico.

Sob a ótica da gestão de risco operacional, o acidente ilustra uma deficiência na prevenção de perigos no ambiente aeroportuário, pois a detecção da lâmina metálica na pista poderia ter

evitado o desastre. O evento levou à revisão dos protocolos de inspeção de pistas e à adoção de materiais mais resistentes nos pneus e tanques do Concorde.

O fator humano também se manifestou no nível organizacional e regulatório. O relatório indicou que, embora o risco de estouro de pneus fosse conhecido, as medidas corretivas foram lentas, revelando falhas de comunicação entre o fabricante, a Air France e as autoridades de certificação, conforme especificado pela BEA em 2002. Após o acidente, a OACI reforçou a importância da avaliação contínua de perigos latentes dentro dos Sistemas de Gerenciamento da Segurança Operacional.

6.3.3. Fatores técnicos e estruturais

A BEA identificou como causa principal a perfuração do tanque de combustível nº 5 pelo impacto de fragmentos do pneu, levando à ignição do combustível e falha subsequente de propulsão. Essa vulnerabilidade estrutural estava associada à ausência de revestimento resistente nos tanques, o que se tornou foco de melhorias após o acidente.

O caso Concorde evidenciou a importância de projetar sistemas com redundância física e estrutural, conforme os princípios de segurança estabelecidos pelo Anexo 19 da OACI e pelas normas europeias de certificação após o acidente. Além disso, destacou-se a necessidade de integrar as lições aprendidas ao ciclo de gestão da segurança operacional, promovendo o aprendizado organizacional e a prevenção contínua, segundo as filosofias de Stolzer, Halford e Goglia.

7. Análise Comparativa dos Acidentes

7.1 Padrões comuns identificados

A análise dos acidentes Air France 447 (2009), Lion Air 610 (2018) e Concorde 4590 (2000) evidencia padrões recorrentes que refletem a natureza sistêmica da segurança operacional. O primeiro padrão diz respeito à presença simultânea de falhas humanas, tecnológicas e organizacionais, demonstrando que os acidentes aeronáuticos raramente são causados por um único fator isolado, de acordo com Reason e Dekker.

Segundo os relatórios individuais de cada acidente, em todos os casos, observou-se deficiência na interação homem-máquina, seja pela perda de consciência situacional (AF447), pela automação excessiva e insuficiente transparência do sistema (JT610) ou pela dependência de respostas humanas a eventos rápidos e imprevistos (Concorde 4590).

Outro ponto comum foi a insuficiência dos treinamentos frente a cenários não convencionais, o que comprometeu a capacidade das tripulações de reconhecer e corrigir as anomalias, de acordo com a literatura de Maurino, e demais autores, e a literatura de Stolzer, Halford e Goglia. Além disso, verificou-se a presença de falhas latentes em todos os níveis, organizacional, regulatório e de projeto, as quais, quando alinhadas, possibilitaram a materialização do evento, conforme Reason, Rollenhagen e Reiman evidenciaram, também.

Esses padrões reafirmam a importância de uma abordagem sistêmica e preventiva da segurança operacional, sustentada por cultura justa, gestão de riscos proativa e aprendizado contínuo, visão presente no anexo 13 da OACI.

7.2 Diferenças específicas entre os casos

Apesar dos elementos comuns, cada acidente apresentou características únicas que contribuíram para o avanço do conhecimento em segurança aérea.

O caso Air France 447 destacou vulnerabilidades associadas à automação em voo de cruzeiro e à perda de habilidades manuais em situações de falha múltipla. Já o Lion Air 610 revelou uma falha de projeto sistêmico no sistema MCAS, agravada por deficiências de certificação e treinamento, apontando para problemas de governança e comunicação entre fabricante, reguladores e operadores.

O Concorde 4590, por sua vez, representou uma crise de segurança estrutural e operacional, mostrando a necessidade de integração entre manutenção, infraestrutura aeroportuária e projeto de aeronaves. Ao contrário dos outros dois casos, o fator tecnológico aqui estava relacionado a vulnerabilidades físicas, e não à automação.

Essas diferenças ilustram como a evolução temporal e tecnológica da aviação influencia o tipo de risco predominante: enquanto o Concorde simboliza falhas de engenharia clássica, os acidentes AF447 e JT610 refletem desafios da era digital da aviação, centrados na interface homem-automação, segundo Parasuraman, Sheridan e Wickens.

7.3 Impactos na evolução da segurança operacional

Cada um desses eventos teve repercussões significativas no desenvolvimento de políticas, regulamentos e práticas de segurança. O acidente AF447 impulsionou a revisão global dos programas de treinamento de recuperação de estol e voo manual, enquanto o JT610 levou à reformulação de processos de certificação aeronáutica e à reavaliação do papel da automação e da transparência dos sistemas críticos.

Já o Concorde 4590 resultou em melhorias de projeto estrutural, reforço nas inspeções de pista e revisão dos protocolos de segurança aeroportuária.

De forma mais ampla, esses acidentes contribuíram para a consolidação do SGSO e para o fortalecimento da cultura justa e do aprendizado organizacional como pilares do Anexo 19 da OACI. Assim, o impacto dessas investigações ultrapassou a esfera técnica, moldando a filosofia moderna de segurança aeronáutica baseada em dados, prevenção e cultura institucional.

8. Lições Aprendidas e Aplicações Futuras

8.1 Contribuições para treinamento de pilotos

As investigações reforçaram a necessidade de treinamentos mais realistas e voltados à tomada de decisão sob pressão, incluindo cenários de falhas múltiplas e perda de automação. O enfoque atual dos programas de instrução passou a contemplar o gerenciamento de ameaças e erros (TEM) e a recuperação de estol em altitudes elevadas, alinhando-se às recomendações da OACI e da ANAC.

A incorporação de simuladores avançados e treinamentos baseados em evidências (*EBT - Evidence Based Training*) tornou-se uma tendência global, permitindo que as tripulações enfrentem situações complexas de forma segura e controlada, conforme Stolzer, Halford, Goglia.

8.2 Melhorias no design e na automação de aeronaves

Os acidentes analisados estimularam uma nova visão sobre engenharia centrada no ser humano (*Human-Centered Design*). A partir do AF447 e do JT610, os fabricantes passaram a priorizar interfaces mais intuitivas, redundância de sensores e transparência funcional nos sistemas automatizados, segundo a FAA em 2021.

O conceito de *automation resilience*, ou resiliência da automação, passou a orientar o desenvolvimento de aeronaves, equilibrando a eficiência tecnológica com a capacidade humana de intervenção, o que foi evidenciado por Reiman e Rollenhagen.

8.3 Reforço de protocolos organizacionais e de manutenção

A análise dos três acidentes evidenciou a importância de sistemas organizacionais proativos, capazes de identificar e corrigir perigos antes que se transformem em falhas operacionais, segundo Reason. A implementação de programas de relato voluntário e confidencial, como parte do SGSO, fortaleceu a comunicação interna e a cultura justa nas companhias aéreas.

No campo da manutenção e infraestrutura, reforçaram-se as inspeções preventivas de pista e estruturas (caso Concorde) e os processos de análise de confiabilidade de componentes críticos, mitigando riscos latentes, conforme o relatório final da BEA sobre o Concorde em 2002.

8.4 Perspectivas com novas tecnologias (IA, Big Data, SMS)

O futuro da segurança operacional está sendo moldado pela incorporação de inteligência artificial (IA), análise de big data e integração total com o Sistema de Gerenciamento da Segurança (SMS). Essas tecnologias permitem monitoramento preditivo em tempo real, identificação de padrões de risco e otimização de processos de decisão.

A aplicação de IA em manutenção preditiva e análise de dados de voo (*Flight Data Monitoring*) já está transformando o modo como as organizações antecipam falhas e previnem acidentes, segundo as análises de Stoltzer, Halford e Goglia. No entanto, tais avanços exigem nova abordagem ética e regulatória, garantindo que a automação inteligente complemente, e não substitua, o julgamento humano, princípio essencial da segurança operacional moderna, de acordo com Dekker, Rollenhagen e Reiman.

9. Conclusão

O estudo sobre segurança operacional e investigação de acidentes aeronáuticos permitiu compreender como a aviação civil evoluiu a partir de um processo contínuo de aprendizado, no qual cada ocorrência investigada contribuiu para o aprimoramento das práticas, das normas e da cultura organizacional do setor. Observou-se que a segurança operacional não se restringe ao cumprimento de regulamentos, mas resulta da integração entre fatores humanos, tecnológicos e institucionais, sustentada por uma cultura de prevenção e responsabilidade compartilhada.

A análise dos casos históricos demonstrou que os acidentes desempenharam papel essencial no avanço da segurança aeronáutica, impulsionando melhorias em treinamento, design de aeronaves, automação e governança. Evidenciou-se também que o fortalecimento da “cultura justa”, o gerenciamento proativo de riscos e o investimento em aprendizado organizacional são pilares fundamentais para evitar a repetição de falhas e promover um ambiente seguro e resiliente.

Por fim, conclui-se que a investigação de acidentes aeronáuticos é uma ferramenta indispensável para a sustentabilidade e a confiabilidade da aviação global. Ao transformar erros e eventos adversos em conhecimento, a investigação consolida a segurança operacional como um compromisso ético e coletivo, garantindo que o transporte aéreo continue a evoluir com base na experiência, na transparência e na busca constante pela excelência.

10. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Programa Brasileiro para a Segurança Operacional da Aviação Civil (PSO-BR). Brasília: ANAC, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/programas-de-seguranca-operacional/psb-br>. Acesso em: 13 out. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Programa de Segurança Operacional Específico – PSOE-ANAC. Brasília: ANAC, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/gerenciamento-da-seguranca-operacional/arquivos/psoe_anac.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

BRASIL. Programa Nacional de Aviação Civil (PNAC). Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6780.htm. Acesso em: 13 out. 2025.

BUREAU D'ENQUÊTES ET D'ANALYSES (BEA). Rapport – Accident du 25 juillet 2000 au Concorde immatriculé F-BTSC exploité par Air France vol 4590. Paris: BEA, 2002. Disponível em: https://bea.aero/fileadmin/uploads/tx_elydrapports/f-sc000725.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

BUREAU D'ENQUÊTES ET D'ANALYSES POUR LA SÉCURITÉ DE L'AVIATION CIVILE (BEA). Final Report – Accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France Flight AF447. Paris: BEA, 2012. Disponível em: <https://bea.aero/fileadmin/documents/docspa/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Relatórios Finais de Investigação de Ocorrências Aeronáuticas. Brasília: CENIPA, 2024. Disponível em: <https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/relatorios.php>. Acesso em: 13 out. 2025.

DEKKER, S. The Field Guide to Human Error Investigations, 2001. Disponível em: https://www.humanfactors.lth.se/fileadmin/lusa/Sidney_Dekker/books/DekkersFieldGuide.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). FAA Updates on Boeing 737 MAX. Washington, D.C.: FAA, 2021. Disponível em: <https://www.faa.gov/newsroom/faa-updates-boeing-737-max-0>. Acesso em: 13 out. 2025.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION (FSF). Boeing Issues Bulletin to 737 MAX Operators in Wake of Lion Air Crash Findings, 2018 Disponível em: <https://flightsafety.org/boeing-737-max-omb-lion-air-findings>. Acesso em: 13 out. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation – Aircraft Accident and Incident Investigation. 11th ed. Montréal: ICAO, 2016. Disponível em: <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/10/ICAO-Annex-13-Aircraft-Accident-and-Incident-Investigation.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Safety Management Manual (Doc 9859). 4th ed. Montréal: ICAO, 2018. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/safety/SafetyManagement/SMM-4th-edition-highlights.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025.

KOMITE NASIONAL KESELAMATAN TRANSPORTASI (KNKT). Final Aircraft Accident Investigation Report – Lion Air Boeing 737 MAX 8 PK-LQP. Jakarta: KNKT, 2019. Disponível em:

<https://www.aaiu.ie/sites/default/files/FRA/2018%20-%20035%20-%20PK-LQP%20Final%20Report.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025.

MANUAL DE CULTURA DE SEGURANÇA OPERACIONAL – MCA 63-19 (DECEA). 1. ed. Brasília: DECEA, 2017. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/MCA-63-19>. Acesso em: 13 out. 2025.

MAURINO, D.; REASON, J.; JOHNSTON, N.; LEE, R. Beyond Aviation Human Factors: Safety in High-Technology Systems. Ashgate, 1995.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation – Safety Management. 2nd ed. Montréal: ICAO, 2016. Disponível em: <https://www.icao.int/safety-management>. Acesso em: 13 out. 2025.

ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL (OACI). Convenção sobre Aviação Civil Internacional (Convenção de Chicago – 1944). Tradução oficial. Brasília: ANAC, 1946. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/decretos/decreto-no-21-713-de-27-08-1946/@@display-file/arquivo_norma/convencaoChicago.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

PARASURAMAN, R.; SHERIDAN, T. B.; WICKENS, C. D. A model for types and levels of human interaction with automation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans, v. 30, n. 3, p. 286-297, 2000.

REASON, J. Managing the Risks of Organizational Accidents. Ashgate, 1997.

ROLLENHAGEN, C.; REIMAN, T. Human and organizational biases affecting the management of safety. Elsevier, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236597701_Human_and_organizational_biases_affecting_the_management_of_safety. Acesso em: 13 de out. 2025.

SKYBRARY AVIATION SAFETY. Air France Flight 447; Air France Concorde 4590; Lion Air 610. Disponível em: <https://skybrary.aero>. Acesso em: 13 out. 2025.

STOLZER, A. J.; HALFORD, C. D.; GOGLIA, J. T. Safety Management Systems in Aviation. 3rd ed. Boca Raton, CRC Press, 2023.

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante VICTOR HUGO MENDANHA MACHADO DE FREITAS do Curso de CIÊNCIAS AERONÁUTICAS matrícula 2021.2.0047.0003-7, telefone: (62)98280-2817 e-mail vhmmf2002@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado SEGURANÇA OPERACIONAL DE VOO E ANÁLISE DE ACIDENTES, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 30 de Setembro de 2025.

 Documento assinado digitalmente
VICTOR HUGO MENDANHA MACHADO DE FREITAS
Data: 01/10/2025 16:52:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor: VICTOR HUGO

Nome completo do autor: VICTOR HUGO MENDANHA MACHADO DE FREITAS

Assinatura do professor-orientador: ROBERTO MÁRCIO DOS SANTOS
Nome completo do professor-orientador:

Escola Politécnica e de Artes - Outubro de 2025