

**ABORDAGEM INTEGRADA DA SEGURANÇA OPERACIONAL: ANÁLISE
ESTATÍSTICA DO ERRO HUMANO E DOS FATORES CONTRIBUINTES NAS
OCORRÊNCIAS AERONÁUTICAS BRASILEIRAS (2015–2024)**Reinaldo Moreira Del Fiacco¹Caio Borges da Silva Zara²Salmen Chaquip Bukzem³Roberto Márcio dos Santos⁴**RESUMO**

Este estudo analisa estatisticamente a influência do erro humano e dos fatores contribuintes nas ocorrências aeronáuticas registradas no Brasil entre 2015 e 2024, com base em dados públicos do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Foram examinadas 8.021 ocorrências (1.298 acidentes, 651 incidentes graves e 5.767 incidentes), 4.394 fatores contribuintes e 572 recomendações de segurança. A pesquisa, de natureza descritiva e quantitativa, aplicou estatística descritiva, o teste qui-quadrado de Pearson e o cálculo do V de Cramér para mensurar a associação entre o fator humano e variáveis aeronáuticas, como classificação da ocorrência, fase de operação, tipo de operação, nível de dano e taxonomia ICAO. Os resultados evidenciam que o fator humano está presente em 43,8% dos acidentes investigados e em 39,5% do total de fatores contribuintes registrados. As associações com classificação ($V = 0,58$), nível de dano ($V = 0,56$) e taxonomia ICAO ($V = 0,47$) revelaram-se fortes e estatisticamente significativas ($p < 0,001$). Os fatores humanos predominantes foram atitude, processo decisório, percepção e atenção, com maior incidência nas operações agrícola, especializada e policial. Discute-se a integração dos modelos *Crew Resource Management*, *Maintenance Resource Management*, SHELL e HFACS como instrumentos para fortalecer o Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional, propondo recomendações para o aprimoramento da cultura de segurança e direções para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Segurança operacional; Erro humano; Fatores contribuintes; CENIPA; Aviação civil.

¹ Doutor em Eng. de Defesa pelo Instituto Militar de Engenharia. Mestre em Eng. de Transportes pelo mesmo instituto. Bacharel em Ciências Aeronáuticas. Instituto Militar de Engenharia. E-mail: fiaco@ime.eb.br

² Pós-graduado em Segurança Operacional e Qualidade na Aviação pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás. PUC-GO. E-mail: caioborges.cbs@gmail.com

³ Mestre em Educação; Especialista em Docência do Ensino Superior e em Gestão de Segurança da Informação e Comunicações pela Universidade de Brasília; Graduado em Desenvolvimento de Sistemas de Informação. Militar da reserva da Força Aérea onde exerceu a função de Supervisor e Instrutor de órgãos de controle de tráfego aéreo, com atuação na Prevenção e Investigação de Acidentes Aeronáuticos, Gerenciamento de Sistemas de Segurança Operacional, Inspeção em Prestadores de Serviço de Navegação Aérea e instrução em diversos cursos do SISCEAB. Atualmente é Coordenador do Curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. PUC-GO. E-mail: salmen@pucgoias.edu.br

⁴ Professor Assistente na PUC GOIÁS. Professor do Curso de Ciências Aeronáuticas. Mestre em Engenharia pelo ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica- (2013) e Mestre em Psicologia pela UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2000). Especialista em Metodologia do Ensino da Educação Física, pela UFRGS (1994). Licenciatura Plena em Educação Física pela ESEFEGO - Escola Superior de Educação Física do Estado de Goiás (1987). Capitão RF Especialista em Aeronáutica - Controlador de Tráfego Aéreo - pela Força Aérea Brasileira (1981). Psicopedagogo, pela PUC-GOIÁS (2019). Professor nos cursos de Piloto de Avião na SKY - Escola de Aeronáutica (Goiânia - Goiás). PUC-GO. E-mail: rmarcio@pucgoias.edu.br

AN INTEGRATED OPERATIONAL SAFETY APPROACH: STATISTICAL ANALYSIS OF HUMAN ERROR AND CONTRIBUTING FACTORS IN BRAZILIAN AERONAUTICAL OCCURRENCES (2015–2024)

ABSTRACT

This study statistically analyzes the influence of human error and contributing factors in aeronautical occurrences recorded in Brazil between 2015 and 2024, based on public data from the Aeronautical Accidents Investigation and Prevention Center (CENIPA). A total of 8,021 occurrences (1,298 accidents, 651 serious incidents, and 5,767 incidents), 4,394 contributing factors, and 572 safety recommendations were examined. The research, of a descriptive and quantitative nature, applied descriptive statistics, Pearson's chi-square test, and Cramér's V coefficient to measure the association between the human factor and aeronautical variables, such as occurrence classification, phase of operation, type of operation, level of damage, and ICAO taxonomy. The results show that the human factor is present in 43.8% of the investigated accidents and in 39.5% of all recorded contributing factors. Associations with classification ($V = 0.58$), level of damage ($V = 0.56$), and ICAO taxonomy ($V = 0.47$) were strong and statistically significant ($p < 0.001$). Predominant human factors were attitude, decision-making, perception, and attention, with higher incidence in agricultural, specialized, and police operations. The integration of the Crew Resource Management, Maintenance Resource Management, SHELL, and HFACS models is discussed as a means to strengthen the Safety Management System, proposing recommendations to improve safety culture and directions for future research.

Keywords: Operational safety; Human error; Contributing factors; CENIPA; Civil aviation.

1 INTRODUÇÃO

A aviação civil é reconhecida como um dos modais de transporte mais seguros do mundo, condição alcançada pelo desenvolvimento tecnológico, pelo rigor regulatório e pela maturidade dos sistemas de gestão da segurança operacional (International Civil Aviation Organization [ICAO], 2018). Apesar disso, o erro humano permanece como o principal vetor de causalidade dos acidentes aeronáuticos. Estudos clássicos da *Federal Aviation Administration* (FAA) e revisões publicadas na literatura especializada estimam que entre 70% e 80% das ocorrências aeronáuticas civis e militares envolvem fatores humanos (Wiegmann; Shappell, 2003; Shappell; Wiegmann, 2007).

Esse cenário tem motivado a aplicação sistemática de modelos teóricos consolidados — como o modelo do Queijo Suíço de Reason (1990, 1997), o SHELL difundido pela ICAO (2018) e o *Human Factors Analysis and Classification System* (HFACS) de Wiegmann e Shappell (2003), em programas de prevenção, em treinamentos de *Crew Resource Management* (CRM) e em iniciativas de *Maintenance Resource Management* (MRM), além da consolidação do conceito de cultura justa proposto por Dekker (2017).

No contexto brasileiro, o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) mantém o repositório oficial de ocorrências e disponibiliza, por meio do Painel SIPAER, dados detalhados sobre fatores contribuintes, recomendações de segurança e relatórios finais (CENIPA, 2025). Trabalhos como Goes (2011), publicado na Revista de Saúde Pública, evidenciaram limitações na classificação de fatores organizacionais nas investigações nacionais, ao passo que Salvetti, Bergiante e Silva (2021) demonstraram que a manutenção foi fator contribuinte em 19,8% dos acidentes com avião e 14,9% dos acidentes com helicóptero entre 2007 e 2018.

A análise integrada das interfaces entre a tripulação técnica e a manutenção aeronáutica é especialmente relevante porque o erro humano não se restringe à atividade do piloto: estende-se aos mecânicos, despachantes, controladores e à própria estrutura organizacional, conforme demonstrado por Dupont (1997) e SKYbrary (2024), e pelos protocolos da Boeing *Maintenance Error Decision Aid* (Boeing, 2014). A literatura tem mostrado que falhas de comunicação, complacência,

fadiga, pressão temporal e ausência de assertividade são os preditores mais frequentes de erros de manutenção e de deficiências de coordenação na cabine.

Este artigo busca preencher uma lacuna na literatura nacional sobre a quantificação estatística da associação entre o fator humano e variáveis aeronáuticas, com base em dados oficiais e atualizados. O objetivo geral é analisar, descritiva e inferencialmente, a contribuição do erro humano nas ocorrências aeronáuticas brasileiras de 2015 a 2024 e avaliar quais variáveis se correlacionam com sua presença. Como objetivos específicos, propõe-se: (i) caracterizar quantitativamente as ocorrências, os fatores contribuintes e as recomendações registradas no período; (ii) mensurar, por meio dos testes do qui-quadrado de Pearson e do coeficiente V de Cramér, a força das associações entre o fator humano e as variáveis aeronáuticas; (iii) discutir os resultados à luz dos modelos teóricos de fatores humanos; e (iv) sugerir caminhos para pesquisas futuras.

O presente estudo justifica-se pela relevância do tema para a sustentabilidade do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO) e pela escassez de análises quantitativas na literatura brasileira recente que articulem o conjunto completo dos dados públicos do CENIPA com inferência estatística. O artigo está organizado em cinco seções, além desta introdução: revisão teórica, metodologia, resultados e discussão, considerações finais e referências.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 MODELOS TEÓRICOS DO ERRO HUMANO NA AVIAÇÃO

A pesquisa contemporânea sobre erro humano em sistemas complexos foi profundamente influenciada por Reason (1990, 1997), cuja taxonomia distingue erros de execução (deslizes e lapsos) e erros de planejamento (falhas baseadas em regras e em conhecimento). O autor consolidou o modelo do Queijo Suíço, no qual cada camada de defesa de um sistema possui falhas latentes que, quando alinhadas, permitem a propagação de erros ativos até o evento adverso (Reason, 1997). O modelo foi adotado pela ICAO no início dos anos 1990 como referência conceitual para a investigação de acidentes (ICAO, 2018; SKYbrary, 2024).

O modelo SHELL (*Software, Hardware, Environment, Liveware*) foi formalizado por Edwards (1972) e desenvolvido por Hawkins (1987) tornou-se a estrutura preferencial dos textos da ICAO (Doc 9859) para descrever as interfaces entre o ser humano e os demais elementos do sistema aeronáutico. O modelo destaca que o componente Liveware (humano) é o elemento central e mais variável; suas interações com o *Software* (procedimentos), *Hardware* (equipamentos), *Environment* (ambiente) e outros *Livewares* (equipes) determinam o desempenho operacional (ICAO, 2018).

O *Human Factors Analysis and Classification System* (HFACS), desenvolvido por Wiegmann e Shappell (2003), operacionaliza o modelo do Queijo Suíço em quatro camadas: atos inseguros, pré-condições para atos inseguros, supervisão insegura e influências organizacionais. Pesquisas baseadas em HFACS têm sido aplicadas a milhares de acidentes — Shappell e Wiegmann (2007) examinaram 1.020 acidentes da aviação comercial norte-americana, e Pacheco, Silva e Yousefi (2024) replicaram a metodologia em contexto eslovaco, com 77% dos fatores causais atribuídos ao componente humano.

No domínio da manutenção aeronáutica, Dupont (1997), no âmbito da Transport Canada, sintetizou os doze fatores humanos mais frequentes — comunicação, distração, falta de recursos, estresse, complacência, ausência de trabalho em equipe, pressão, falta de consciência, falta de conhecimento, fadiga, ausência de assertividade e normas inadequadas — em uma estrutura mnemônica conhecida como Dirty Dozen (SKYbrary, 2024). A FAA estima que 80% dos erros de manutenção envolvem fatores humanos (Federal Aviation Administration, 2018).

2.2 CREW RESOURCE MANAGEMENT (CRM) E MAINTENANCE RESOURCE MANAGEMENT (MRM)

O *Crew Resource Management* surgiu na década de 1980 como resposta a acidentes catastróficos atribuídos à coordenação deficiente da cabine (Helmreich; Merritt; Wilhelm, 1999). Suas seis gerações evoluíram do foco no comportamento individual para a integração entre cabine, cabine de passageiros, despacho, controle de tráfego aéreo e manutenção, incluindo o gerenciamento de ameaças e erros (*Threat and Error Management*) (Kanki; Helmreich; Anca, 2019). A meta-análise de Salas et al. (2006) e a revisão sistemática de O'Connor et al., (2008), com 93

estudos, indicaram que o treinamento em CRM produz efeitos médios significativos sobre o conhecimento, as atitudes e o comportamento das equipes técnicas.

O *Maintenance Resource Management* adapta os princípios do CRM ao contexto da manutenção, incorporando a comunicação assíncrona, a documentação técnica, o trabalho em turnos e a complexidade do ambiente de hangar. O *Advisory Circular AC 120-72 da Federal Aviation Administration* (2000) estabelece os requisitos para programas de treinamento em MRM, e o manual da Sian, Robertson e Watson (2000) detalha sua aplicação em organizações de manutenção certificadas. Estudos posteriores, como o de Patankar e Taylor (2004), associam a implementação do MRM à redução substancial de erros de manutenção e a melhorias na cultura organizacional.

2.3 CULTURA DE SEGURANÇA E CULTURA JUSTA

O conceito de cultura justa, desenvolvido a partir das contribuições de Reason (1997) e expandido por Dekker (2017), sustenta que a aprendizagem organizacional depende da capacidade de distinguir comportamentos honestos de violações intencionais. Sob a perspectiva da cultura justa, o erro humano é tratado como sintoma de fragilidades sistêmicas, e não como causa final, sendo condição necessária para o reporte voluntário de eventos e para o amadurecimento do SGSO (Dekker, 2017; Eurocontrol, 2017).

2.4 FADIGA, ATENÇÃO E COGNIÇÃO

A fadiga é apontada como fator contribuinte em 15% a 20% dos acidentes da aviação comercial (Caldwell, 2005; Cabon *et al.*, 2012). Estudos cognitivos demonstram que o desempenho em tarefas executivas decresce após cerca de sete horas de voo e que a probabilidade de erros aumenta substancialmente após treze horas de jornada (Goode, 2003). A regulação contemporânea — RBAC 117 no Brasil, EASA Flight Time Limitations na Europa e FAR Part 117 nos Estados Unidos — busca mitigar esse risco com base em modelos biomatemáticos de alerta humano.

2.5 ESTUDOS BRASILEIROS RECENTES

Goes *et al.*, (2011), em estudo publicado na Revista de Saúde Pública, compararam 36 investigações do CENIPA conduzidas no estado de São Paulo entre 2000 e 2005 com a aplicação direta do HFACS: identificaram 163 fatores contribuintes nos relatórios oficiais e 370 quando a metodologia internacional foi aplicada, sugerindo subdimensionamento, especialmente nas camadas organizacionais. Salvetti, Bergiante e Silva (2021) analisaram a manutenção como fator contribuinte e destacaram a necessidade de fortalecer a interface entre a tripulação técnica e a oficina. Henkes (2021) e os demais autores publicados na Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas têm consolidado a discussão sobre cultura organizacional, segurança operacional e formação aeronáutica nacional.

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA E FONTE DE DADOS

Trata-se de pesquisa aplicada, descritiva e quantitativa, com delineamento de estudo transversal retrospectivo, baseada em dados secundários públicos do CENIPA, disponibilizados no Painel SIPAER (CENIPA, 2025) e no portal Dados Abertos do Governo Federal. A coleta original foi realizada em maio de 2026 e abrange ocorrências registradas no território nacional entre 1º de janeiro de 2015 e 31 de dezembro de 2024.

3.2 ESTRUTURA DO BANCO DE DADOS

Foram utilizados cinco arquivos relacionados — Ocorrência, Aeronave, Tipo de Ocorrência, Fator Contribuinte e Recomendação — vinculados pelas chaves `codigo_ocorrencia`, `codigo_ocorrencia 1`, `codigo_ocorrencia 2`, `codigo_ocorrencia 3` e `codigo_ocorrencia 4`. A modelagem relacional preserva as cardinalidades 1:N entre ocorrência e aeronaves envolvidas, ocorrência e tipos taxonômicos ICAO, ocorrência e fatores contribuintes, e ocorrência e recomendações de segurança.

3.3 VARIÁVEIS ANALISADAS

A variável-resposta é a presença do fator humano (fator_area = "FATOR HUMANO") associada à ocorrência, codificada em binário (1 = presente; 0 = ausente). As variáveis explicativas foram: classificação da ocorrência (acidente, incidente grave, incidente); tipo de aeronave (avião, helicóptero, ultraleve, anfíbio, planador, balão); tipo de operação (regular, privada, táxi-aéreo, agrícola, instrução, policial, especializada, não regular, experimental); fase de operação (decolagem, subida, cruzeiro, aproximação, pouso, manobra, táxi, etc.); tipo de motor; quantidade de motores; nível de dano (nenhum, leve, substancial, destruída); taxonomia de ocorrência da ICAO (LOC-I, LALT, RE, FUEL, CTOL, BIRD, SCF-NP etc.); ocorrência de saída de pista; e Unidade da Federação. Foram analisados, ainda, os atributos do fator humano: aspectos (psicológico, médico, ergonômico) e condicionantes (individual, organizacional, psicossocial).

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

O tratamento foi realizado em Python 3.12, utilizando as bibliotecas pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib e Seaborn. Foram excluídos os registros com data inconsistente, padronizados os campos textuais (caixa e acentuação) e tratados os valores ausentes, codificados como "****" e "NULL". Para a análise inferencial, foram considerados apenas os processos com investigação finalizada (n = 7.716 ocorrências), assegurando que os fatores contribuintes refletem o resultado conclusivo da investigação CENIPA.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise descritiva contemplou frequências absolutas, percentuais e razões entre subgrupos. Para a análise inferencial, aplicou-se o teste de qui-quadrado de Pearson para verificar associações entre o fator humano e cada variável categórica, com nível de significância de 5%. A força das associações foi medida pelo coeficiente V de Cramér com correção de viés proposta por Bergsma (2013), interpretado segundo Cohen (1988): valores de 0,10 indicam associação fraca; 0,30 moderada; 0,50 forte. As tabelas de contingência foram restringidas às quinze

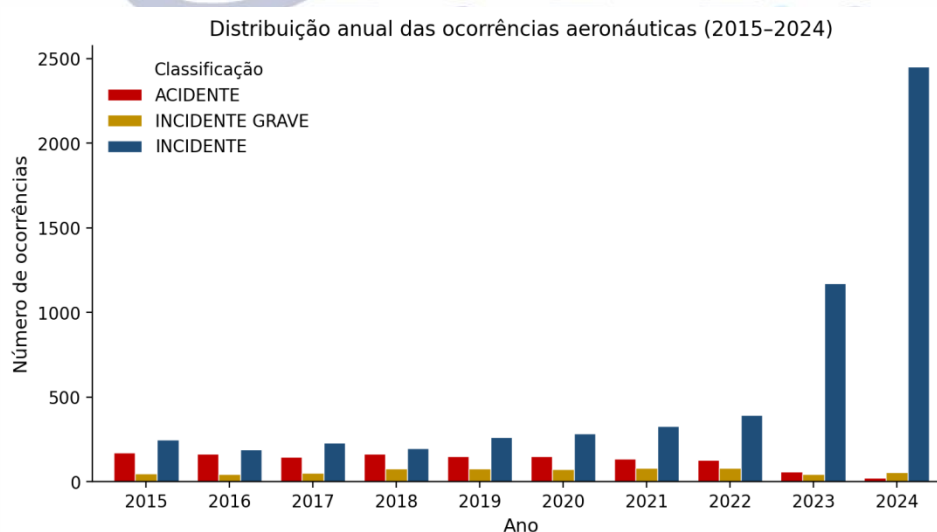
categorias mais frequentes para variáveis com elevada cardinalidade. As recomendações de segurança foram analisadas por status de adoção e por destinatário, e cruzadas com a presença ou ausência de fator humano na ocorrência associada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS

No período de 2015 a 2024 foram identificadas 8.021 ocorrências em território brasileiro, das quais 7.716 estavam com investigação finalizada na data de coleta. Entre as ocorrências finalizadas, 1.298 (16,8%) foram classificadas como acidentes, 651 (8,4%) como incidentes graves e 5.767 (74,7%) como incidentes. A Figura 1 apresenta a distribuição anual por classificação.

Figura 1 – Distribuição anual das ocorrências aeronáuticas por classificação (2015–2024)



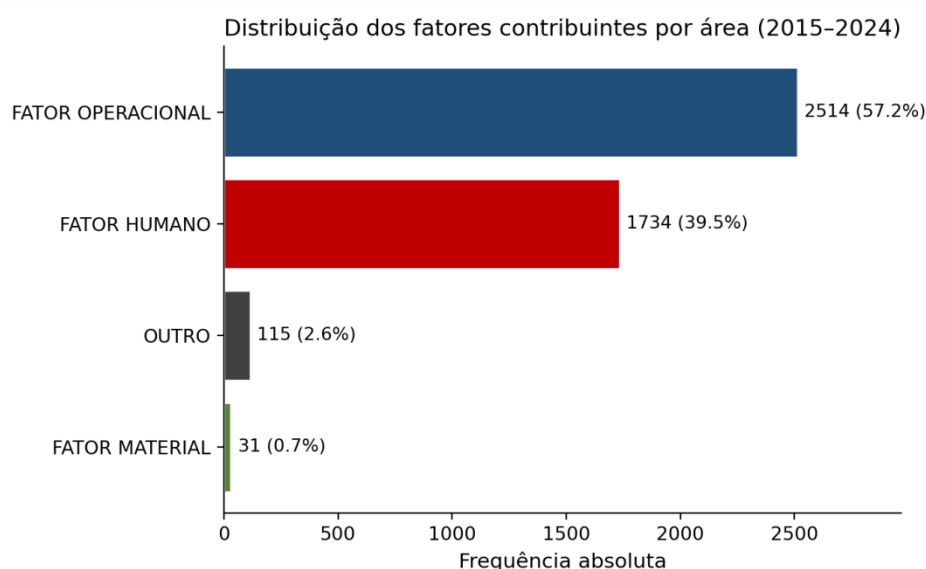
Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

Observa-se um patamar relativamente estável entre 2015 e 2022 (médias entre 400 e 615 ocorrências/ano), seguido de um aumento expressivo de incidentes em 2023 e 2024, atribuível à ampliação do escopo de reporte do SGSO e a melhoria do registro nas plataformas digitais do CENIPA.

4.2 FATORES CONTRIBUENTES: PANORAMA GERAL

Foram registrados 4.394 fatores contribuintes nas ocorrências do período. A área "FATOR OPERACIONAL" concentrou 57,2% dos registros, seguida por "FATOR HUMANO" (39,5%), "OUTRO" (2,6%) e "FATOR MATERIAL" (0,7%) (Figura 2). É importante notar, entretanto, que os fatores operacionais — que englobam, por exemplo, o julgamento de pilotagem e a aplicação de comandos — também derivam, em última instância, da atuação humana, conforme observado por Goes *et al.*, (2011) e por Wiegmann e Shappell (2003) nas categorias de "atos inseguros" do HFACS.

Figura 2 – Distribuição dos fatores contribuintes por área (2015–2024)

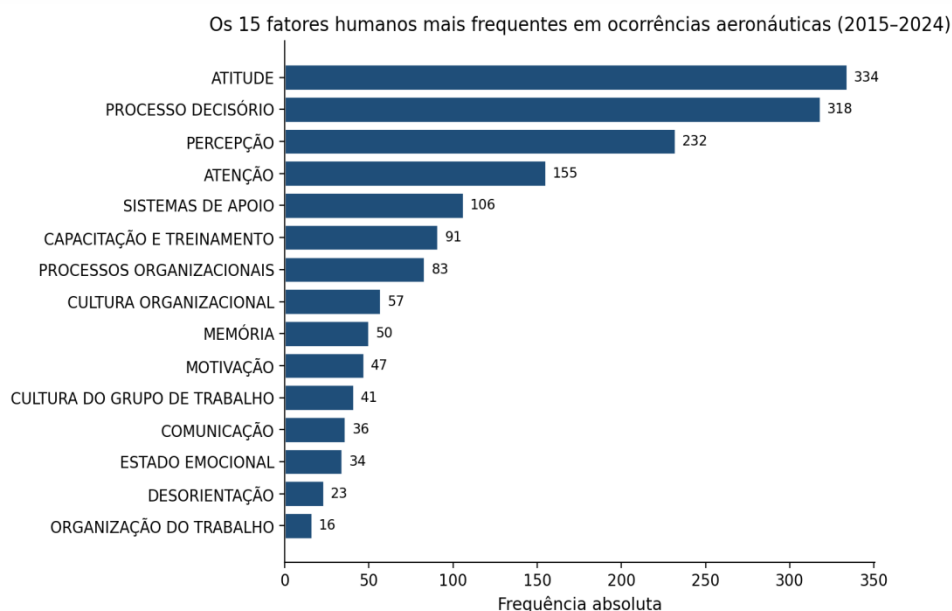


Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

Restringindo a análise aos 1.734 fatores classificados como humanos, observa-se que 94,8% dizem respeito ao aspecto psicológico, 4,7% ao aspecto médico e 0,6% à ergonomia. Os dez fatores nominais mais frequentes (Figura 3) são atitude ($n = 334$), processo decisório ($n = 318$), percepção ($n = 232$), atenção ($n = 155$), sistemas de apoio ($n = 106$), capacitação e treinamento ($n = 91$), processos organizacionais ($n = 83$), cultura organizacional ($n = 57$), memória ($n = 50$) e motivação ($n = 47$). Esses resultados são coerentes com a taxonomia de Reason (1990), segundo a qual falhas de atenção e de percepção configuram deslizos e

lapsos, bem como com os estudos de Helmreich, Merritt e Wilhelm (1999) sobre o papel central da tomada de decisão na coordenação de cabine.

Figura 3 – Os 15 fatores humanos mais frequentes nas ocorrências aeronáuticas (2015–2024)

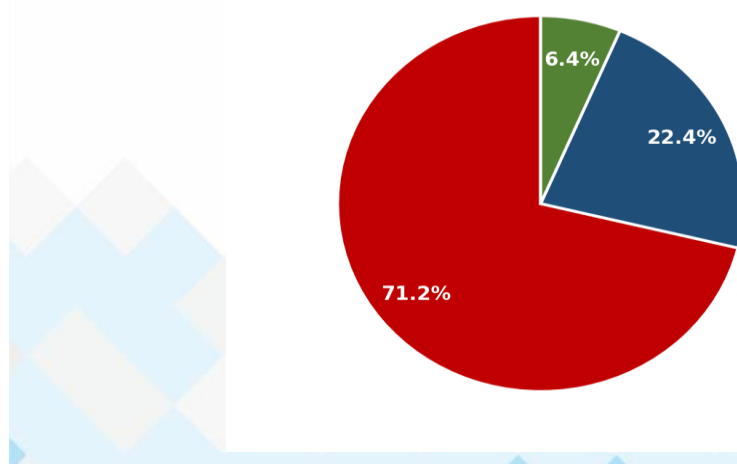


Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

A distribuição dos condicionantes (Figura 4) revela predominância do condicionante individual (76,1%), seguido pelo condicionante organizacional (23,9%) e pelo condicionante psicossocial (6,8%).

Figura 4 – Condicionante dos fatores humanos identificados (2015–2024)

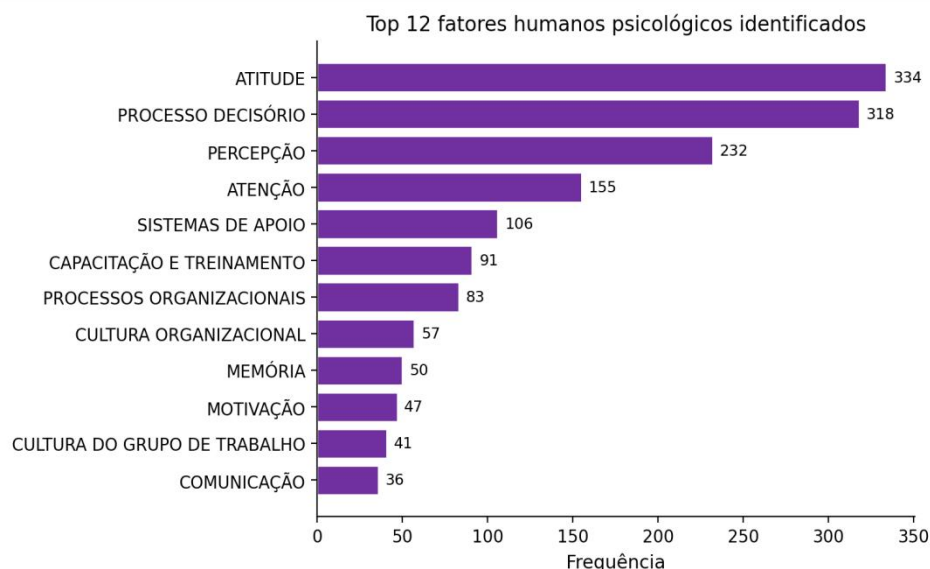
Condicionante dos fatores humanos identificados



Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

Tal padrão dialoga diretamente com o achado de Goes *et al.*, (2011) sobre o subdimensionamento dos fatores organizacionais nos relatórios brasileiros: quando comparado a aplicações estritas do HFACS, é provável que a participação organizacional seja sistematicamente maior do que a explicitada nas investigações.

Figura 5 – Top fatores humanos sob aspecto psicológico (2015–2024)



Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA (2025).

Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

4.3 ASSOCIAÇÃO ENTRE FATOR HUMANO E VARIÁVEIS AERONÁUTICAS

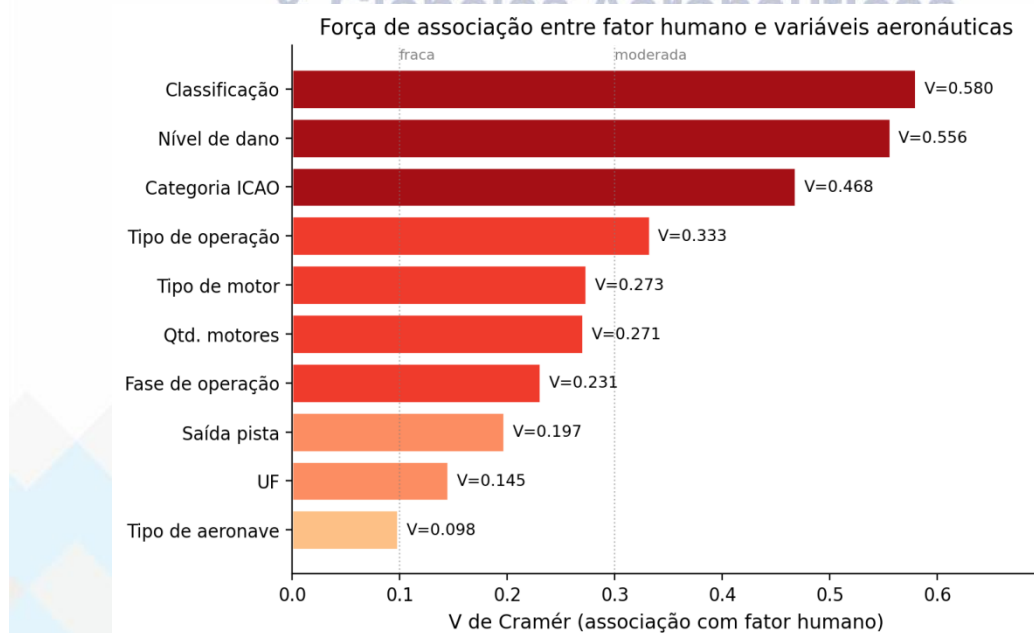
A Tabela 1 sintetiza as associações entre o fator humano e as variáveis aeronáuticas selecionadas. Todas as associações testadas apresentaram $p < 0,001$, indicando que as diferenças observadas não são compatíveis com a hipótese de independência. A força das associações, mensurada pelo V de Cramér, foi forte para classificação ($V = 0,580$) e nível de dano ($V = 0,556$), e moderada para taxonomia ICAO ($V = 0,468$), tipo de operação ($V = 0,333$), tipo de motor ($V = 0,273$), quantidade de motores ($V = 0,271$) e fase de operação ($V = 0,231$).

Tabela 1 – Associação entre fator humano e variáveis aeronáuticas
(qui-quadrado e V de Cramér)

Variável aeronáutica	N	χ^2	gl	p-valor	V de Cramér	Interpretação
Classificação	7.716	2.598,06	2	< 0,001	0,580	forte
Nível de dano	7.716	2.390,41	4	< 0,001	0,556	forte
Categoria ICAO	7.379	1.632,18	14	< 0,001	0,468	moderada
Tipo de operação	6.917	774,65	10	< 0,001	0,333	moderada
Tipo de motor	7.716	582,51	6	< 0,001	0,273	moderada
Qtd. de motores	7.377	544,78	5	< 0,001	0,271	moderada
Fase de operação	7.440	410,30	14	< 0,001	0,231	fraca
Saída de pista	7.716	301,65	1	< 0,001	0,197	fraca
UF	7.019	162,05	14	< 0,001	0,145	fraca
Tipo de aeronave	7.649	84,85	11	< 0,001	0,098	desprezível

Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA (2025). Notas: N = total de pares válidos; gl = graus de liberdade; classificação de força segundo Cohen (1988).

Figura 6 – Força de associação entre fator humano e variáveis aeronáuticas



Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA (2025).

4.3.1 Classificação da ocorrência

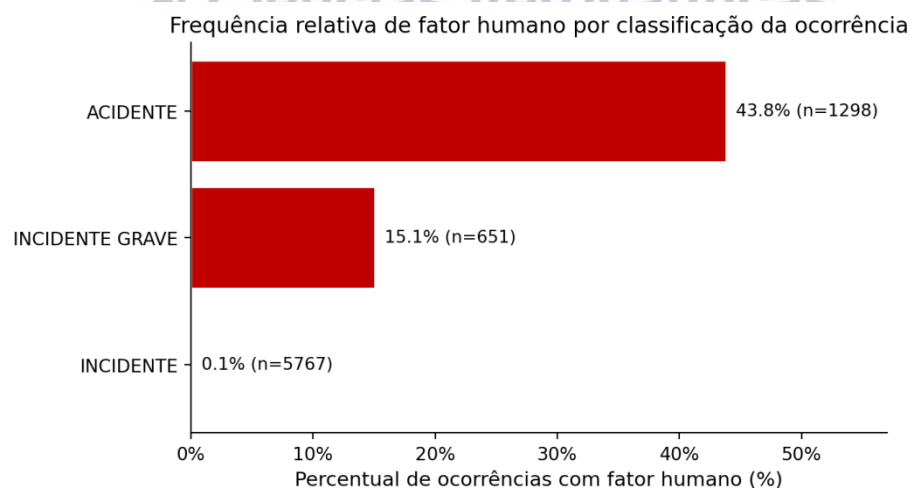
Como mostra a Tabela 2 e a Figura 7, o fator humano foi identificado em 569 dos 1.298 acidentes (43,8%), em 98 dos 651 incidentes graves (15,1%) e em apenas 3 dos 5.767 incidentes (0,1%). Esse padrão é coerente com a hipótese de Reason (1997) de que os eventos mais graves resultam de combinações de falhas latentes e ativas que percorrem múltiplas camadas de defesa, escalando a partir de erros humanos não interceptados pelos controles operacionais.

Tabela 2 – Presença de fator humano por classificação da ocorrência

Classificação	Sem FH	Com FH	Total	% com FH
Acidente	729	569	1.298	43,8%
Incidente grave	553	98	651	15,1%
Incidente	5.764	3	5.767	0,1%
Total	7.046	670	7.716	8,7%

Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA (2025).

Figura 7 – Frequência relativa de fator humano por classificação

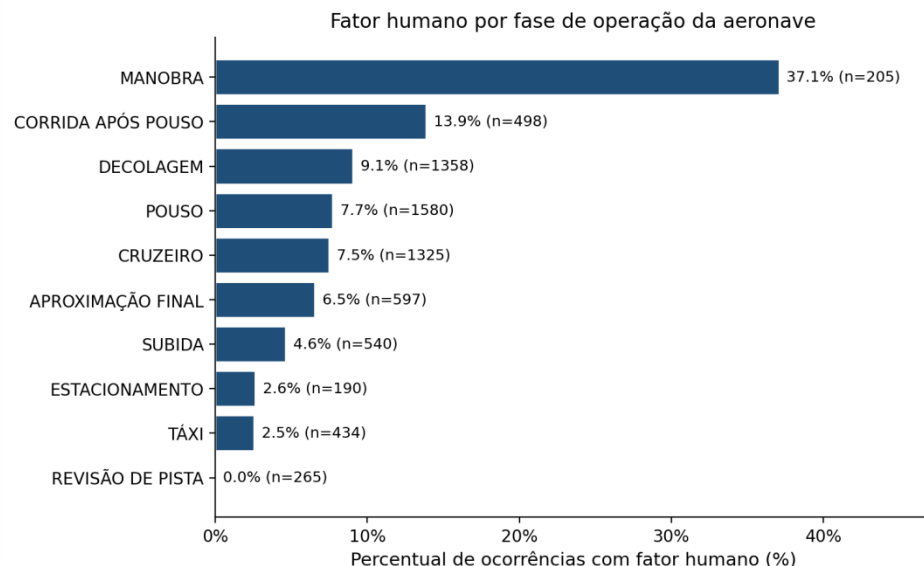


Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

4.3.2 Fase de operação

A Figura 8 demonstra **que** as fases mais críticas em termos de proporção do fator humano são a manobra (37,1%), a corrida após o pouso (13,9%) e a decolagem (9,1%). O resultado é coerente com a literatura de aviação agrícola (Pacheco *et al.*, 2024), que identifica, em manobras de baixa altura, incluídas na taxonomia ICAO LALT, o segmento de maior risco. Pousos e decolagens, somados, respondem por 245 ocorrências com fator humano, evidenciando o papel das janelas críticas de transição operacional, conforme a literatura sobre *Loss of Control In-flight* (LOC-I).

Figura 8 – Percentual de ocorrências com fator humano por fase de operação



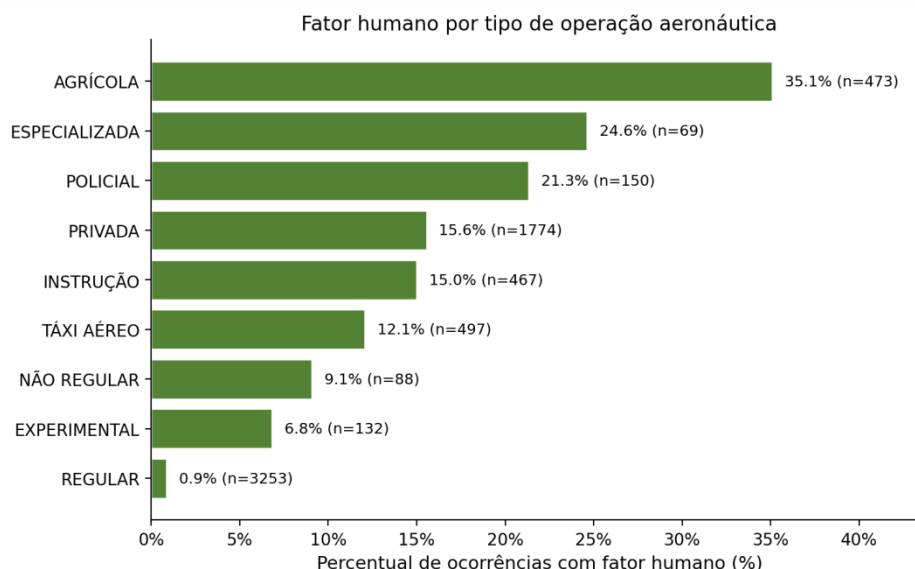
Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

4.3.3 Tipo de operação

A análise por segmento operacional (Figura 9) revela disparidades expressivas: a aviação agrícola apresenta a maior proporção de ocorrências com fator humano (35,1%), seguida pela aviação especializada (24,6%), pela aviação policial (21,3%), pela aviação privada (15,6%), pela instrução (15,0%) e pelo táxi aéreo (12,1%). Em contraste, a aviação regular registra apenas 0,9%, valor que reflete tanto a maturidade de seus sistemas de gerenciamento de risco quanto o fato de que uma parte significativa das ocorrências dessa categoria é composta por incidentes operacionais menores. Esses resultados convergem com Pacheco e

colaboradores (2024) e com publicações da Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas que destacam a aviação agrícola como segmento prioritário para programas de segurança operacional.

Figura 9 – Percentual de ocorrências com fator humano por tipo de operação



Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

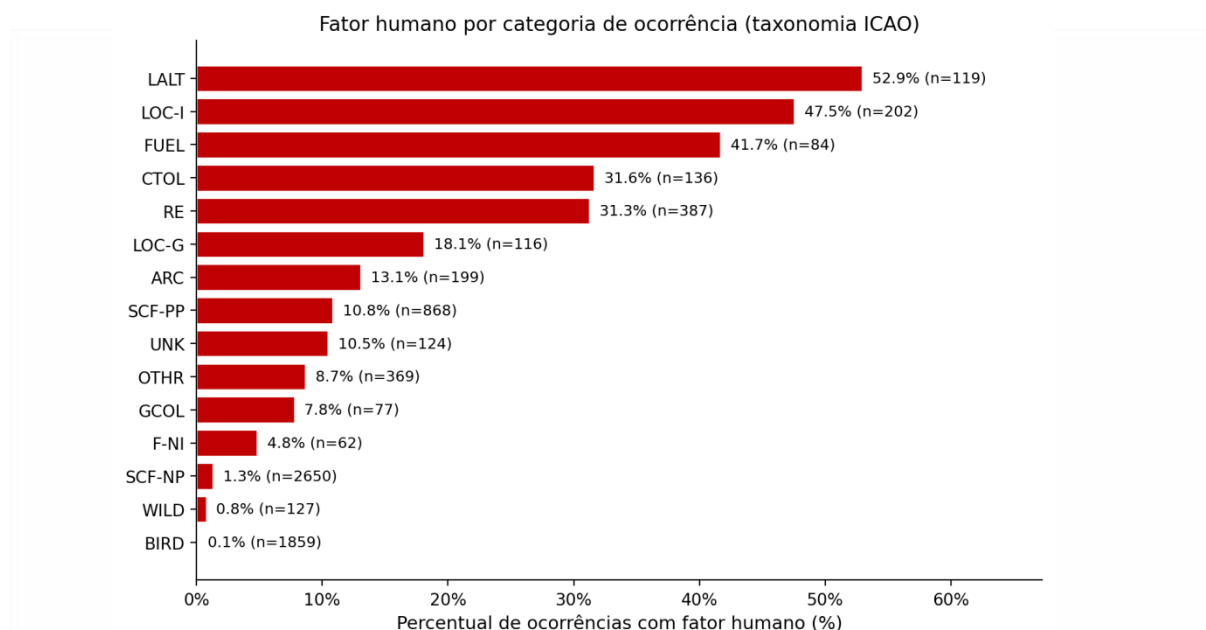
4.3.4 Nível de dano

O cruzamento com o nível de dano evidencia que 46,3% das aeronaves destruídas e 43,0% das aeronaves com dano substancial estiveram associadas ao fator humano, em comparação com 3,2% das aeronaves com dano leve e 1,0% das sem danos. O elevado V de Cramér (0,556) sustenta a interpretação de que o fator humano não apenas precipita ocorrências, mas também amplifica a gravidade do desfecho. Em termos absolutos, as 670 ocorrências com fator humano somaram 323 fatalidades, o que representa 58,1% do total de 556 vítimas fatais identificadas no período (CENIPA, 2025).

4.3.5 Taxonomia ICAO

A Figura 10 apresenta a participação do fator humano nas categorias da taxonomia da ICAO. As categorias com maior proporção foram LALT (operação a baixa altura, 52,9%), LOC-I (perda de controle em voo, 47,5%), FUEL (suprimento de combustível, 41,7%), CTOL (colisão com objeto durante a decolagem ou pouso, 31,6%) e RE (excursão de pista, 31,3%).

Figura 10 – Percentual de ocorrências com fator humano por categoria ICAO



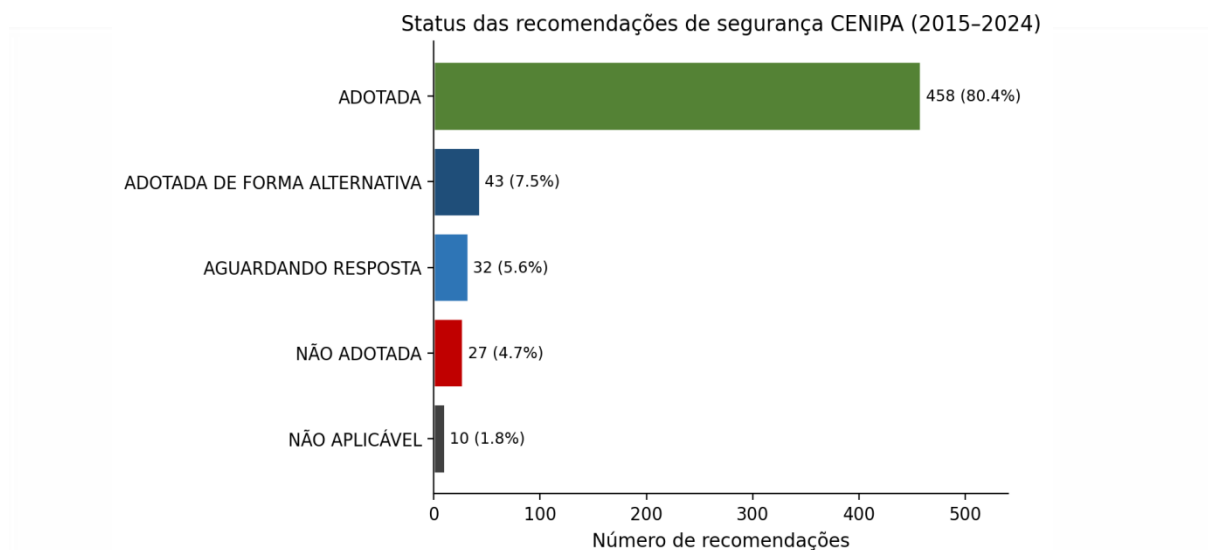
Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

As categorias predominantemente associadas a falhas técnicas — SCF-NP (falha de sistema/componente não relacionado ao motor, 1,3%) e BIRD (colisão com aves, 0,1%) — apresentam, naturalmente, baixa participação humana, reforçando a validade discriminante da análise.

4.4 RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA E CICLO DE APRENDIZAGEM

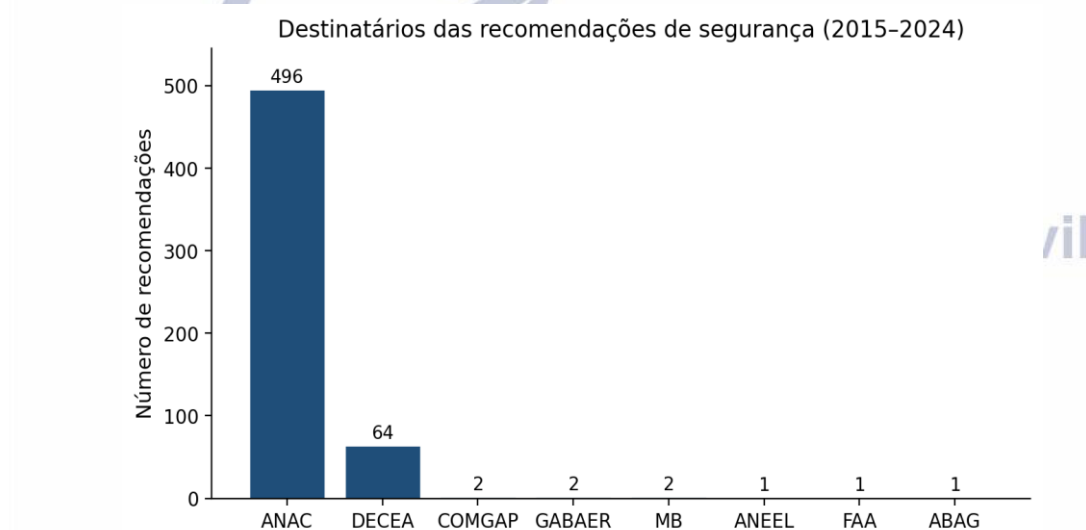
Foram emitidas 572 recomendações de segurança vinculadas a ocorrências do período, das quais 458 (80,1%) constam como adotadas, 43 (7,5%) como adotadas de forma alternativa, 32 (5,6%) aguardando resposta, 27 (4,7%) não adotadas e 10 (1,7%) não aplicáveis (Figura 11). A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) é destinatária de 86,7% das recomendações (n = 496), seguida pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, n = 64), o que confirma o papel central dos órgãos reguladores e provedores de serviços de tráfego aéreo na efetivação das medidas mitigadoras (Figura 12).

Figura 11 – Status das recomendações de segurança CENIPA (2015–2024)



Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

Figura 12 – Destinatários das recomendações de segurança (2015–2024)



Fonte: elaborada pelos autores a partir de CENIPA, 2025.

Cabe destacar que 75,0% das recomendações estão vinculadas a ocorrências em que o fator humano foi identificado, evidenciando o protagonismo das ações corretivas voltadas ao treinamento, à padronização de procedimentos, à supervisão e à cultura de segurança. O estoque de recomendações classificadas como "não adotadas" ($n = 27$), embora pequeno, foi gerado em 88,9% pelas ocorrências com fator humano e demanda monitoramento, uma vez que a não adoção representa risco residual e oportunidade de aperfeiçoamento dialógico entre o CENIPA e a ANAC.

4.5 DISCUSSÃO INTEGRADA

Os resultados convergem para uma narrativa coerente: o fator humano permanece como o vetor mais relevante na causalidade dos acidentes aeronáuticos brasileiros, com presença majoritária nas operações de maior exposição (agrícola, policial e especializada), nas fases de transição (manobra, decolagem e pouso) e nas categorias ICAO classicamente associadas a comportamentos de cabine (LOC-I, LALT, FUEL, CTOL, RE). A predominância dos condicionantes individuais nos relatórios sugere a oportunidade de aperfeiçoamento do processo investigativo nacional para incorporar, de forma mais sistemática, as influências organizacionais, conforme a estrutura HFACS de Wiegmann e Shappell (2003) e o achado seminal de Goes *et al.*, (2011).

Sob a perspectiva do CRM e do MRM, a alta frequência de fatores como atitude, processo decisório, percepção e atenção indica que os programas de treinamento devem priorizar competências não-técnicas (comunicação, liderança, gerenciamento de carga de trabalho e tomada de decisão) em vez de focarem exclusivamente em proficiência operacional. A integração dos princípios do Dirty Dozen ao currículo de *Maintenance Resource Management*, conforme preconizado por Sian, Robertson e Watson (2000) e por Patankar e Taylor (2004), responde ao cenário em que a interface entre a tripulação técnica e a manutenção continua exposta a falhas de comunicação e de documentação.

No plano regulatório, o elevado percentual de recomendações adotadas (80,1%) demonstra a maturidade do ciclo investigação–recomendação–ação no Brasil, em linha com a Norma de Sistema do Comando da Aeronáutica (NSCA) 3-13 e com os requisitos do Anexo 13 da Convenção de Chicago (ICAO, 2018). Persistem, entretanto, oportunidades para reduzir o intervalo entre a publicação do relatório final e a verificação de adoção, especialmente em situações em que múltiplos órgãos compartilham responsabilidades de implementação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou estatisticamente a contribuição do fator humano e dos fatores associados nas ocorrências aeronáuticas brasileiras registradas pelo CENIPA entre 2015 e 2024, com base em 8.021 ocorrências, 4.394 fatores contribuintes e 572 recomendações de segurança. Os principais achados podem ser

sintetizados em quatro pontos. Primeiro, o fator humano está presente em 43,8% dos acidentes investigados e em 39,5% do total de fatores registrados, com forte concentração nos aspectos psicológicos individuais (atitude, processo decisório, percepção e atenção).

Em segundo lugar, as associações entre o fator humano e as variáveis aeronáuticas são estatisticamente significativas em todas as dimensões testadas, com força particularmente elevada na classificação da ocorrência ($V = 0,580$) e no nível de dano ($V = 0,556$). Terceiro, segmentos como aviação agrícola, especializada e policial, e fases como manobra, decolagem e pouso, demandam atenção prioritária dos programas de prevenção. Quarto, o ciclo de recomendações apresenta desempenho satisfatório (80,1% adotadas), mas a concentração de recomendações em ocorrências com fator humano (75,0%) ratifica a centralidade dos programas de CRM, MRM e cultura de segurança.

Como contribuições, o estudo oferece uma análise quantitativa atualizada, baseada em dados oficiais e integralmente reproduzível, e propõe uma síntese teórica que articula os modelos de Reason (1990, 1997), o HFACS de Wiegmann e Shappell (2003), o SHELL da ICAO (2018), o Dirty Dozen de Dupont e os princípios do CRM e do MRM. Reconhecem-se, contudo, limitações: (i) a análise restringe-se a investigações finalizadas, podendo subestimar fatores em processos ainda em andamento, especialmente nos anos mais recentes; (ii) o registro dos fatores organizacionais reflete a granularidade do CENIPA, que tende a privilegiar condicionantes individuais; e (iii) a análise é descritiva e associativa, sem inferência causal direta.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados encontrados, recomenda-se que pesquisas futuras avancem nas seguintes direções:

(i) reaplicação sistemática do HFACS aos relatórios finais brasileiros do período, com o objetivo de explicitar as camadas de supervisão insegura e influências organizacionais subdimensionadas nos registros oficiais, atualizando o estudo seminal de Goes *et al.*, (2011);

(ii) modelagem de regressão logística multinomial e de modelos lineares generalizados para identificar preditores ajustados do fator humano, controlando potenciais confundidores como tipo de aeronave, ano e geografia;

(iii) análise temporal e de séries com técnicas de Joinpoint e Joinpoint-Bayesian regression, a fim de detectar pontos de inflexão no perfil de fatores contribuintes e avaliar o impacto de marcos regulatórios — como a publicação do RBAC 117 — na taxa de ocorrências com fator humano;

(iv) estudos qualitativos complementares, com entrevistas em profundidade junto a tripulantes e mecânicos, para investigar percepções de cultura justa e barreiras ao reporte voluntário de eventos;

(v) pesquisa-ação envolvendo operadores da aviação agrícola, policial e especializada, para desenvolver programas adaptados de CRM e MRM com avaliação pré e pós-intervenção;

(vi) integração de dados do CENIPA com bases internacionais, como o Aviation Safety Network e os relatórios do NTSB, para benchmarking de fatores contribuintes em escala global;

(vii) emprego de técnicas de processamento de linguagem natural sobre o corpus textual das recomendações, a fim de identificar padrões temáticos e medir o tempo médio de adoção em função da natureza da recomendação;

(viii) avaliação dos efeitos da fadiga e da ergonomia em segmentos com alta carga operacional, especialmente no helicóptero policial e em aeronaves agrícolas, com aplicação de modelos biomatemáticos de alerta humano (FAID, SAFTE-FAST).

Conclui-se que a redução do erro humano nas operações aeronáuticas no Brasil depende menos de avanços tecnológicos isolados e mais da consolidação de uma abordagem sistêmica, na qual a integração entre tripulação técnica e manutenção, o fortalecimento da cultura justa, a aplicação rigorosa do CRM e do MRM e o aproveitamento integral dos dados do Painel SIPAER convergem para um Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional cada vez mais preditivo, baseado em evidências e centrado no ser humano.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). RBAC 117 – Limitações de tempo de voo, jornadas e descanso para tripulantes. Brasília: ANAC, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br>. Acesso em: 1 maio 2026.

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Programa de treinamento em gerenciamento de recursos de equipes (PCRM). Brasília: ANAC, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Evite os Dirty Dozen na aviação. Brasília: ANAC, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 31000: Gestão de riscos – Diretrizes. São Paulo: ABNT, 2018.
- BERGSMA, W. A bias-correction for Cramér's V and Tschuprow's T. *Journal of the Korean Statistical Society*, v. 42, n. 3, p. 323–328, 2013. DOI: 10.1016/j.jkss.2012.10.002.
- BOEING. Maintenance Error Decision Aid (MEDA) User's Guide. Seattle: Boeing Commercial Airplanes, 2014.
- CABON, P.; DEHARVENGT, S.; GRAU, J. Y.; MAILLE, N.; BERECHET, I.; MOLLARD, R. Research and guidelines for implementing Fatigue Risk Management Systems for the French regional airlines. *Accident Analysis & Prevention*, v. 45, p. 41–44, 2012.
- CALDWELL, J. A. Fatigue in aviation. *Travel Medicine and Infectious Disease*, v. 3, n. 2, p. 85–96, 2005.
- CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Painel SIPAER: ocorrências aeronáuticas, fatores contribuintes e recomendações. Brasília: CENIPA, 2025. Disponível em: <https://painelsipaer.cenipa.fab.mil.br>. Acesso em: 1 maio 2026.
- CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Relatórios finais de investigação de ocorrências aeronáuticas. Brasília: CENIPA, 2025. Disponível em: <https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/relatorios.php>. Acesso em: 1 maio 2026.
- COHEN, J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- DEKKER, S. Just Culture: Restoring Trust and Accountability in Your Organization. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- DUPONT, G. The Dirty Dozen errors in aviation maintenance. In: PROCEEDINGS OF THE 11TH FAA MEETING ON HUMAN FACTORS ISSUES IN AIRCRAFT MAINTENANCE AND INSPECTION. Washington: FAA, 1997.
- EDWARDS, E. Man and machine: systems for safety. In: BRITISH AIRLINE PILOTS ASSOCIATION (Ed.). Proceedings of the BALPA Technical Symposium. London: BALPA, 1972. p. 21–36.
- EUROCONTROL. Just Culture: just culture in aviation. Brussels: Eurocontrol, 2017. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int>. Acesso em: 1 maio 2026.
- EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). Annual Safety Review 2022. Cologne: EASA, 2022.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Advisory Circular AC 120-72: Maintenance Resource Management Training. Washington: FAA, 2000.

- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Aviation Maintenance Technician Handbook – General. Washington: FAA, 2018.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge. Washington: FAA, 2021.
- GOES, R. F.; PALMA, J. M.; CASTRO, M. P. P.; MENDES, J. G.; OKADA, R. P. Fatores contribuintes aos acidentes aeronáuticos. *Revista de Saúde Pública*, v. 45, n. 2, p. 432–434, 2011. DOI: 10.1590/S0034-89102011005000003.
- GOODE, J. H. Are pilots at risk of accidents due to fatigue? *Journal of Safety Research*, v. 34, n. 3, p. 309–313, 2003.
- HAWKINS, F. H. *Human Factors in Flight*. Aldershot: Gower Technical Press, 1987.
- HELMREICH, R. L.; MERRITT, A. C.; WILHELM, J. A. The evolution of Crew Resource Management training in commercial aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, v. 9, n. 1, p. 19–32, 1999.
- HENKES, J. A. (Org.). *Anais da Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas*. Florianópolis: RBACCIA, 2021.
- INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). Maintenance Steering Group-3 (MSG-3): Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development. Montreal: IATA, 2020.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Doc 9859 – Safety Management Manual. 4. ed. Montreal: ICAO, 2018.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Annex 13 – Aircraft Accident and Incident Investigation. 12. ed. Montreal: ICAO, 2022.
- KANKI, B. G.; HELMREICH, R. L.; ANCA, J. *Crew Resource Management*. 3. ed. London: Academic Press, 2019.
- MOUBRAY, J. *Reliability-Centred Maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997.
- O'CONNOR, P.; CAMPBELL, J.; NEWON, J.; MELTON, J.; SALAS, E.; WILSON, K. A. Crew Resource Management training effectiveness: a meta-analysis and some critical needs. *The International Journal of Aviation Psychology*, v. 18, n. 4, p. 353–368, 2008.
- PACHECO, R.; SILVA, A.; YOUSEFI, A. The influence of human factor on aviation accidents in Slovakia through HFACS framework: a comprehensive study. *Transportation Research Procedia*, v. 75, p. 1–9, 2024.
- PATANKAR, M. S.; TAYLOR, J. C. *Risk Management and Error Reduction in Aviation Maintenance*. Aldershot: Ashgate, 2004.
- REASON, J. *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- REASON, J. *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Aldershot: Ashgate, 1997.
- SALAS, E.; WILSON, K. A.; BURKE, C. S.; WIGHTMAN, D. C. Does Crew Resource Management training work? An update, an extension and some critical needs. *Human Factors*, v. 48, n. 2, p. 392–412, 2006.

SALVETTI, F. R.; BERGIANTE, N. C. R.; SILVA, J. L. F. A manutenção como fator contribuinte em acidentes aeronáuticos: análise do período 2007–2018 na aviação civil brasileira. LAJBM – Latin American Journal of Business Management, v. 12, n. 2, p. 1–18, 2021.

SHAPPELL, S. A.; WIEGMANN, D. A. Human error and commercial aviation accidents: an analysis using the Human Factors Analysis and Classification System. Human Factors, v. 49, n. 2, p. 227–242, 2007.

SIAN, B.; ROBERTSON, M.; WATSON, J. Maintenance Resource Management Handbook. Washington: FAA, 2000.

SKYBRARY AVIATION SAFETY. James Reason HF Model. SKYbrary, 2024. Disponível em: <https://skybrary.aero/articles/james-reason-hf-model>. Acesso em: 1 maio 2026.

SKYBRARY AVIATION SAFETY. The Human Factors "Dirty Dozen". SKYbrary, 2024. Disponível em: <https://skybrary.aero/articles/human-factors-dirty-dozen>. Acesso em: 1 maio 2026.

WIEGMANN, D. A.; SHAPPELL, S. A. A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System. Aldershot: Ashgate, 2003.

