

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**



ANÁLISE DE INCIDENTES NO TRÁFEGO AÉREO NO BRASIL

GUSTAVO MACHADO DA SILVA CARVALHO

GOIÂNIA
2025

GUSTAVO MACHADO DA SILVA CARVALHO

ANÁLISE DE INCIDENTES NO TRÁFEGO AÉREO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica e de Artes da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de computação.

Orientador:

Prof. Me André Luiz Alves

Banca examinadora:

Prof.^a Esp. Nágela Bitar Lôbo

Prof. Me. Salmen Chaquip Bukzem

GOIÂNIA

2025

GUSTAVO MACHADO DA SILVA CARVALHO

ANÁLISE DE INCIDENTES NO TRÁFEGO AÉREO NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua versão Escola Politécnica e de Artes da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de computação, em 13 de junho de 2025.

Orientador: Prof. Me André Luiz Alves

Prof.^a Esp. Nágela Bitar Lôbo

Prof. Me. Salmen Chaquip Bukzem

GOIÂNIA

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo da jornada acadêmica. Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em cada etapa, mesmo nas mais difíceis. À minha família, pelo carinho e incentivo constante. Ao meu orientador, professor André Luiz Alves, pela paciência, dedicação e orientações técnicas fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ainda aos colegas do curso de Engenharia da Computação, com quem compartilhei aprendizados, desafios e conquistas. Este trabalho é resultado de um esforço coletivo e sou imensamente grato a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para sua realização.

RESUMO

A segurança operacional da aviação civil brasileira é um tema de alta relevância diante do crescente número de voos e do aumento da complexidade das operações aéreas. Este trabalho tem como objetivo analisar dados de incidentes e incidentes graves envolvendo aeronaves monomotoras e bimotoras, ocorridos no Brasil entre os anos de 2020 e 2025. A pesquisa utiliza dados extraídos do Painel SIPAER, mantido pelo CENIPA e ANAC, sendo aplicados filtros para classificar e segmentar os dados. A análise foi realizada por meio de visualizações no Power BI®, permitindo identificar padrões temporais, geográficos, operacionais e técnicos. Os resultados apontam maior incidência em determinadas fases do voo, regiões específicas e tipos de operação, revelando tendências que auxiliam na compreensão dos riscos associados à aviação de pequeno porte. A partir dessas análises, busca-se contribuir com a cultura de segurança e com a gestão de riscos na aviação civil nacional.

Palavras-chave: Aviação civil. Segurança operacional. Incidentes aéreos. Análise de dados. SIPAER.

ABSTRACT

The operational safety of Brazilian civil aviation is a highly relevant issue in light of the growing number of flights and the increasing complexity of aerial operations. This study aims to analyze data on incidents and serious incidents involving single-engine and twin-engine aircraft in Brazil from 2020 to 2025. The research uses data extracted from the SIPAER Panel, maintained by CENIPA and ANAC, with applied filters for data classification and segmentation. The analysis was carried out using Power BI® visualizations, allowing the identification of temporal, geographic, operational, and technical patterns. The results indicate a higher incidence in specific flight phases, regions, and operation types, revealing trends that help in understanding the risks associated with small aircraft aviation. Through this analysis, the study contributes to strengthening the safety culture and risk management in Brazilian civil aviation

Keywords: Civil aviation. Operational safety. Air incidents. Data analysis. SIPAER.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do Processo	21
Figura 2 – Quantidade de incidentes e incidentes graves com aeronaves bimotoras no Brasil (2020–2025)	32
Figura 3 – Quantidade de incidentes e incidentes graves com aeronaves monomotoras no Brasil (2020–2025)	33
Figura 4 – Distribuição geográfica de incidentes e incidentes graves – aeronaves bimotoras (2020–2025)	36
Figura 5 – Distribuição geográfica de incidentes e incidentes graves – aeronaves monomotoras (2020–2025)	36
Figura 6 – Distribuição das ocorrências por tipo de operação – aeronaves monomotoras (2020–2025)	37
Figura 7 – Distribuição das ocorrências por tipo de operação – aeronaves bimotoras (2020–2025)	38
Figura 8 – Fatores contribuintes em ocorrências com aeronaves bimotoras (2020–2025)	41
Figura 9 – Fatores contribuintes em ocorrências com aeronaves monomotoras (2020–2025)	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIG – Relatórios de Investigação de Acidentes Aeronáuticos

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

CSV – *Comma-Separated Values* (Valores Separados por Vírgulas)

BI – *Business Intelligence*

CENIPA – Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

GPWS – *Ground Proximity Warning System* (Sistema de Alerta de Proximidade com o Solo)

ICAO – *International Civil Aviation Organization*

IFR – *Instrument Flight Rules* (Regras de Voo por Instrumentos)

IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)

KPI – *Key Performance Indicator*

MCA – Manual do Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

METAR – *Meteorological Aerodrome Report* (Relatório Meteorológico de Aeródromo)

PSO-BR – Programa Brasileiro para a Segurança Operacional da Aviação Civil

RAB – Registro Aeronáutico Brasileiro

SIPAER – Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

TCAS – *Traffic Collision Avoidance System* (Sistema Anticolisão)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 SEGURANÇA OPERACIONAL NA AVIAÇÃO CÍVIL	12
2.1 Características das aeronaves monomotoras e bimotoras	14
2.2 Limitações operacionais e vulnerabilidades	14
2.3 Investigação de ocorrências aeronáuticas no brasil	16
2.4 <i>Business Intelligence</i> e análise de dados na aviação	18
3 METODOLOGIA	21
3.1 Delineamento da pesquisa	22
3.2 Coleta e tratamento dos dados	23
3.3 Modelagem e Visualização com Power BI®	26
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
4.1 Panorama geral das ocorrências	30
4.2	33
4.3 Tipos de operação e contexto das ocorrências	37
5 CONCLUSÕES	44
5.1 Fases críticas do voo e tipos de operação	44
5.2 Distribuição geográfica e cenários regionais	45
5.3 Perfil das aeronaves envolvidas	46
5.4 Considerações finais	46

1 INTRODUÇÃO

A segurança da aviação civil constitui um dos pilares fundamentais para o funcionamento eficaz e confiável do transporte aéreo em qualquer nação, sendo considerada elemento essencial para garantir operações seguras, eficientes e sustentáveis no âmbito global, regional e nacional (*INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – ICAO, 2023*). No Brasil, os registros de incidentes e incidentes graves envolvendo aeronaves são monitorados de forma sistemática por órgãos especializados, como o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Ainda que esses eventos nem sempre resultem em danos materiais ou vítimas, eles apontam fragilidades nos sistemas operacionais e na cultura organizacional, que podem, se não forem corrigidas, culminar em acidentes mais graves.

Segundo a ICAO, o estudo sistemático de ocorrências menores é tão relevante quanto a investigação de acidentes fatais, uma vez que permite identificar padrões de risco e vulnerabilidades antes que evoluam para situações mais críticas. No contexto brasileiro, essa abordagem é essencial para orientar ações preventivas, políticas públicas e melhorias nos processos de manutenção, fiscalização, treinamento e operação. Nesse cenário, o presente estudo tem como objetivo principal realizar uma análise exploratória dos dados referentes a incidentes e incidentes graves registrados no Brasil entre os anos de 2020 e 2025, com foco específico em aeronaves monomotoras e bimotoras. Para isso, foram utilizados dados do Painel SIPAER, mantido pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, que consolida e disponibiliza informações públicas sobre ocorrências aeronáuticas no país. A análise foi realizada por meio de ferramentas computacionais e métodos de filtragem e categorização, com o intuito de extrair informações relevantes e facilitar a interpretação dos dados.

A escolha pelo recorte temporal e pelo tipo de aeronave foi definida em função da representatividade desses modelos na aviação geral brasileira, além de estarem mais expostos a cenários operacionais variados como voos particulares, instrução, táxi aéreo e pulverização agrícola, frequentemente realizados em regiões com infraestrutura limitada. Por serem operações mais numerosas e diversificadas, há uma

contribuição significativa para o volume de ocorrências registradas, o que justifica a necessidade de análises específicas voltadas à segurança operacional. A relevância do tema está associada à crescente necessidade de compreender as causas e os padrões por trás dos incidentes, visando aprimorar os mecanismos de prevenção, otimizar os processos regulatórios e promover a cultura de segurança. A análise de dados, nesse contexto, assume um papel estratégico: transformar dados públicos em conhecimento aplicado é uma forma eficiente de apoiar a tomada de decisão em setores críticos, como a aviação civil.

Além da contribuição prática para o setor, o presente trabalho também visa ampliar a discussão acadêmica sobre a importância da análise de dados no monitoramento da segurança operacional e na identificação de tendências. Embora ferramentas como o Power BI® tenham sido úteis para a visualização dos dados, o foco do estudo está na análise crítica e interpretativa das informações, buscando

A estrutura deste trabalho foca na apresentação dos procedimentos adotados, dos dados analisados e dos resultados obtidos sobre a segurança operacional da aviação civil no Brasil. Inicialmente, são descritos os procedimentos metodológicos, incluindo a coleta dos dados, os critérios de segmentação, o tratamento das informações e as ferramentas tecnológicas utilizadas na análise, assegurando a consistência dos processos e a confiabilidade dos resultados.

Na sequência, são exploradas as principais características dos dados, com ênfase nos aspectos temporais, geográficos e operacionais das ocorrências aeronáuticas registradas entre 2020 e 2025. A análise permite identificar padrões relevantes no contexto operacional, compreender a distribuição dos eventos e os cenários mais críticos relacionados às aeronaves monomotoras e bimotoras.

A apresentação dos resultados evidencia os padrões mais recorrentes, os fatores contribuintes e as tendências operacionais associadas às ocorrências analisadas, indicando os pontos que demandam maior atenção no contexto da segurança operacional.

Por fim, a discussão considera as limitações da pesquisa, os impactos dos achados sobre o setor e a importância da análise de dados para o fortalecimento da segurança operacional na aviação civil. Também são indicadas direções para estudos futuros que ampliem o entendimento dos riscos e contribuam para aprimorar os processos de prevenção no setor aeronáutico.

2 SEGURANÇA OPERACIONAL NA AVIAÇÃO CÍVIL

A segurança de voo sempre foi um tema central quando falamos em aviação, seja ela civil ou militar. Ela envolve um conjunto de práticas, normas, tecnologias e procedimentos que têm como principal objetivo reduzir ao máximo os riscos e proteger não só os passageiros e as tripulações, mas também as aeronaves e as pessoas em solo. Entender os fundamentos da segurança de voo é extremamente importante, especialmente porque boa parte dos sistemas embarcados e das ferramentas analíticas utilizadas hoje na aviação dependem diretamente de soluções computacionais robustas e confiáveis.

Essa área envolve diversos conceitos importantes, como a gestão de riscos operacionais, a análise de falhas humanas e técnicas, o monitoramento das condições meteorológicas e operacionais, além do cumprimento rigoroso das normas estabelecidas por órgãos como a OACI, a ANAC e o CENIPA. Também fazem parte da segurança de voo os estudos sobre fatores humanos, a manutenção preditiva e preventiva das aeronaves, o uso de checklists padronizados e o treinamento constante das tripulações. Sem falar na tecnologia embarcada — como o *GPWS* (sistema de alerta de proximidade com o solo), o *TCAS* (*sistema anticolisão*), e os softwares de monitoramento em tempo real, que têm se tornado cada vez mais sofisticados.

A coleta e a análise de dados relacionados a ocorrências, incidentes e acidentes desempenham um papel fundamental na identificação de padrões e no desenvolvimento de estratégias voltadas à prevenção de novos problemas. Nesse contexto, a ciência de dados e a engenharia da computação assumem uma relevância crescente, contribuindo significativamente para a melhoria da segurança operacional. Dessa forma, compreender os conceitos básicos de segurança de voo torna-se essencial para profissionais que desejam atuar de maneira responsável em um setor altamente técnico e rigorosamente regulamentado.

Além disso, é essencial entender como a legislação e as normativas funcionam no Brasil. Elas formam uma base jurídica e técnica fundamental para garantir a segurança, a regularidade e a eficiência das operações aéreas. No país, esses regulamentos são elaborados por órgãos como a ANAC, o CENIPA e também por instituições internacionais como a *ICAO*). A ANAC, por exemplo, é responsável

por criar normas, licenciar aeronaves e profissionais e fiscalizar o setor, sempre com base em padrões internacionais. Já o CENIPA tem um papel mais voltado para a prevenção e investigação de acidentes, buscando aprender com cada ocorrência para tornar a aviação mais segura. A ICAO, por sua vez, ajuda a padronizar normas entre os países, promovendo uma harmonia global em aspectos como tráfego aéreo, segurança operacional e até proteção ambiental.

Essas normativas também estão presentes em documentos como o Código Brasileiro de Aeronáutica (Lei nº 7.565/1986), e são complementadas por resoluções e instruções da ANAC. Para nós, estudantes e futuros profissionais de engenharia da computação, é fundamental conhecer essas regras. Afinal, qualquer solução tecnológica que for aplicada na aviação — seja um sistema de bordo, uma ferramenta de análise de dados ou algo ligado ao controle de tráfego aéreo — precisa estar de acordo com essas exigências legais e técnicas.

Por fim, destaca-se como tema relevante a classificação dos incidentes e dos acidentes graves na aviação. Essa distinção possui grande importância para a segurança operacional, uma vez que permite compreender o grau de risco associado a cada ocorrência. De maneira geral, um incidente é definido como qualquer situação que possa comprometer a segurança do voo, sem, contudo, resultar em um acidente. Exemplos incluem falhas em sistemas não críticos, aproximações instáveis ou problemas na comunicação com o controle de tráfego aéreo. Por outro lado, um acidente grave caracteriza-se por situações que apresentam alto potencial para evoluir para um acidente, como quase colisões, falhas severas durante o voo ou pousos realizados em condições inadequadas. Esses casos demandam atenção imediata e análises aprofundadas por parte dos órgãos competentes.

Saber diferenciar esses tipos de ocorrência é essencial para quem trabalha com sistemas de segurança, especialmente na área de engenharia da computação. Com esse conhecimento, é possível desenvolver bancos de dados, algoritmos de monitoramento e até sistemas inteligentes que ajudam a prever e evitar novos riscos. Com isso, a engenharia da computação acaba tendo um papel cada vez mais importante na construção de uma aviação mais segura.

2.1 Características das aeronaves monomotoras e bimotoras

A aviação civil no Brasil é bastante diversificada e engloba diferentes tipos de operações, cada uma com suas características, regras e finalidades específicas. Esses tipos de operação são fundamentais para atender às diversas necessidades do setor aéreo nacional, contribuindo de forma significativa para a mobilidade da população, o crescimento econômico e a integração territorial do país.

Entre os principais tipos, podemos destacar a aviação comercial regular, que é voltada ao transporte de passageiros e cargas em rotas fixas e autorizadas previamente. Além disso, existe a aviação geral, que abrange desde táxi-aéreo e voos particulares até instrução de voo, aerofotogrametria e transporte aeromédico. Outro segmento importante é a aviação experimental, usada principalmente em pesquisas, testes e desenvolvimento de novas aeronaves e tecnologias.

Todas essas atividades seguem normas específicas da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e utilizam diferentes estruturas aeroportuárias, desde grandes aeroportos até pistas em regiões de difícil acesso. Nesse cenário, a engenharia da computação tem um papel essencial, ajudando a desenvolver tecnologias como sistemas de navegação, controle de tráfego aéreo, rastreamento por ADS-B, manutenção preditiva, softwares embarcados e até interfaces inteligentes para análise de desempenho e segurança.

Mais recentemente, tecnologias como inteligência artificial, aprendizado de máquina e Internet das Coisas (*IoT*) também têm sido aplicadas para melhorar a eficiência em processos aeroportuários, gestão de frotas e na experiência dos usuários. Por isso, entender como funcionam os diferentes tipos de aviação é um passo importante para projetar soluções computacionais que realmente atendam às necessidades específicas de cada tipo de operação, contribuindo para mais eficiência, segurança e aderência às normas.

2.2 Limitações operacionais e vulnerabilidades

A aviação civil também enfrenta uma série de limitações operacionais e vulnerabilidades que precisam ser consideradas com atenção. Esses fatores

impactam diretamente na segurança, eficiência e confiabilidade das operações aéreas, e geralmente têm origem em restrições técnicas, humanas, ambientais e sistêmicas.

Dentre as principais limitações operacionais, estão a capacidade restrita de aeroportos, especialmente em grandes centros urbanos ou regiões com infraestrutura limitada, as condições meteorológicas adversas, que impactam diretamente a segurança e a regularidade dos voos, além do espaço aéreo congestionado, que exige coordenação rigorosa entre pilotos e controladores. Soma-se a isso as limitações técnicas das aeronaves, como autonomia, altitude operacional e capacidade de carga, que são fatores determinantes para a viabilidade de determinadas operações (SECRETARIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 2021).

As vulnerabilidades também são um ponto crítico. Elas podem incluir falhas mecânicas, erros humanos e deficiências na manutenção, mas também envolvem riscos mais modernos, como ataques cibernéticos a sistemas embarcados ou às redes que conectam aeroportos e aeronaves. A engenharia da computação entra aqui com força total, oferecendo ferramentas para identificar e prevenir essas vulnerabilidades. Soluções como criptografia, inteligência artificial aplicada à tomada de decisão, redes de sensores e simulações de cenários extremos ajudam a manter as operações mais seguras e eficientes.

Compreender essas limitações é fundamental para que possamos desenvolver tecnologias mais robustas, seguras e adaptáveis, o que é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade do setor aéreo como um todo.

Por fim, é importante destacar que os operadores da aviação civil no Brasil têm perfis bastante diferentes, e isso influencia diretamente nas soluções tecnológicas que precisam ser desenvolvidas. Os operadores particulares, por exemplo, geralmente são pilotos com formação básica e que voam por motivos pessoais ou empresariais. Para esse grupo, é essencial oferecer sistemas simples, confiáveis e fáceis de usar.

Já os instrutores de voo, que atuam em escolas e aeroclubes, trabalham com a formação de novos pilotos e precisam de tecnologias voltadas à educação, como simuladores, plataformas de avaliação e sistemas de monitoramento de desempenho em tempo real. No setor de táxi aéreo, por outro lado, o nível de exigência é bem mais alto. Esses operadores transportam passageiros e cargas sob normas rígidas, e

dependem de tecnologias como rastreamento em tempo real, planejamento dinâmico de rotas e comunicação integrada.

A aviação agrícola é outro exemplo de operação que exige soluções específicas. Esses operadores trabalham com pulverização, controle biológico e monitoramento de plantações, muitas vezes em condições difíceis. Aqui, sistemas com georreferenciamento preciso, sensores ambientais, câmeras térmicas e integração com dados agronômicos fazem toda a diferença.

Para quem está na área de engenharia da computação, entender essas diferenças é essencial. Cada tipo de operador tem suas particularidades, e isso precisa ser levado em conta no momento de projetar sistemas e soluções. No fim das contas, o objetivo é sempre o mesmo: garantir que as operações sejam mais seguras, eficientes e confiáveis — independentemente do tipo de missão.

2.3 Investigação de ocorrências aeronáuticas no Brasil

No Brasil, o órgão responsável por investigar ocorrências aeronáuticas civis é o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), que tem como principal missão fortalecer a segurança operacional no setor aéreo. Sua atuação vai muito além de apenas analisar acidentes: o foco é sempre na prevenção, sem caráter punitivo, buscando entender o que aconteceu para que medidas corretivas e educativas sejam adotadas. Todo o processo segue padrões internacionais estabelecidos pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), o que garante confiabilidade e alinhamento com práticas globais.

A investigação de uma ocorrência envolve uma série de etapas técnicas, como a coleta de dados no local do evento, análise de gravações e registros de comunicação, entrevistas com operadores e testemunhas, e uma avaliação completa dos fatores que podem ter contribuído para o ocorrido. Esses fatores incluem falhas humanas, operacionais, técnicas e até organizacionais. Um ponto importante é que o perfil do operador — seja ele privado, comercial, instrucional ou agrícola — influencia diretamente na investigação, pois seu treinamento, experiência e tipo de missão ajudam a contextualizar o caso.

Além do trabalho de campo, o CENIPA faz uso intensivo de sistemas informatizados e bancos de dados para auxiliar nas investigações. Um dos principais é o SIPAER, que armazena todas as ocorrências registradas e permite análises estatísticas e acompanhamento da evolução dos casos. Essa estrutura oferece um campo fértil para a engenharia da computação, com oportunidades em áreas como inteligência artificial, mineração de dados, desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão e integração com tecnologias aeronáuticas. Com isso, o CENIPA vai além da simples apuração dos fatos, promovendo uma cultura de aprendizado contínuo e contribuindo diretamente para a redução de riscos e melhoria das práticas de segurança em toda a aviação civil brasileira.

Nesse cenário, algumas bases públicas de dados ganham destaque e são fundamentais para pesquisas técnicas e desenvolvimento de soluções na área. Entre elas estão o próprio SIPAER, o RAB (Registro Aeronáutico Brasileiro) e os relatórios AIG (relatórios de investigação de acidentes aeronáuticos). O SIPAER oferece um banco de dados robusto com registros detalhados de incidentes, acidentes e fatores contribuintes, além de estatísticas e informações geográficas que facilitam a análise preditiva. Já o RAB, mantido pela ANAC, reúne informações sobre todas as aeronaves registradas no Brasil, incluindo tipo, fabricante, categoria de operação, situação de aeronavegabilidade e dados dos operadores.

Os relatórios AIG, por sua vez, trazem uma visão aprofundada de cada ocorrência investigada, incluindo causas, análises técnicas, fatores humanos e operacionais e, principalmente, as recomendações de segurança emitidas. Esses documentos são riquíssimos para quem trabalha com ciência de dados ou deseja criar modelos preditivos, pois fornecem contexto, detalhamento e justificativas técnicas para os eventos analisados. A integração dessas diferentes fontes, por meio de ferramentas como mineração de dados, algoritmos de aprendizado de máquina, séries temporais e visualizações interativas (como painéis no Power BI®), permite desenvolver soluções que vão desde diagnósticos detalhados até sistemas inteligentes de prevenção de acidentes.

Apesar disso, trabalhar com essas bases apresenta uma série de desafios. A coleta e a padronização dos dados são tarefas complexas, especialmente quando se trata de análises computacionais mais avançadas. Cada fonte — seja o SIPAER, o RAB, os relatórios AIG ou dados meteorológicos como METAR — possui formatos,

níveis de granularidade e periodicidade distintos, o que dificulta a integração automática. Outro problema comum é a presença de dados não estruturados, como textos em linguagem natural nos relatórios, que exigem técnicas de processamento de linguagem natural (PLN) para extração e análise.

Além disso, inconsistências em nomenclaturas, ausência de registros ou dados incompletos e diferenças nas unidades de medida afetam diretamente a qualidade das análises e dos modelos criados. Resolver esses problemas requer um bom domínio técnico em ciência de dados e bancos de dados, mas também exige familiaridade com o contexto da aviação para que as decisões de padronização e tratamento sejam coerentes. É nesse ponto que a engenharia da computação se destaca, ao aplicar técnicas rigorosas de limpeza, normalização e interoperabilidade entre bases, criando estruturas confiáveis e úteis para prevenção de riscos.

Por fim, é essencial considerar os aspectos éticos e legais relacionados ao uso desses dados, principalmente quando há informações sensíveis sobre operadores ou aeronaves. A governança dos dados deve garantir segurança da informação e anonimização, quando necessário, sem comprometer a qualidade da análise. Superar esses obstáculos representa um passo fundamental para aplicar a computação de forma estratégica na aviação civil, contribuindo diretamente para a construção de um ambiente aéreo mais seguro, eficiente e inteligente.

2.4 Business Intelligence e análise de dados na aviação

A aplicação de conceitos de *Business Intelligence* (BI) à segurança de voo representa uma abordagem estratégica que alia tecnologia, análise de dados e tomada de decisões baseadas em evidências. O objetivo principal é identificar padrões, antecipar riscos e apoiar ações preventivas no setor aeronáutico. No âmbito da engenharia da computação, o uso de ferramentas de BI permite transformar grandes volumes de dados, oriundos de fontes como o SIPAER, o Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB) e os relatórios AIG, em informações acessíveis e interpretáveis por meio de painéis interativos (dashboards), gráficos dinâmicos, mapas geoespaciais e indicadores-chave de desempenho (*Key Performance Indicators – KPIs*).

O processo de BI aplicado à segurança operacional passa por diversas etapas técnicas, incluindo extração, transformação e carga de dados (ETL), modelagem dimensional, construção de *data warehouses* e aplicação de ferramentas analíticas. Essas ferramentas permitem consultas dinâmicas, filtragens específicas e análises comparativas ao longo do tempo. Na prática, essa abordagem tem grande utilidade na identificação de tendências de incidentes e acidentes, reconhecimento de fatores contribuintes recorrentes, avaliação da eficácia de medidas preventivas e suporte à formulação de políticas públicas e diretrizes operacionais mais eficazes.

A integração entre BI, aprendizado de máquina (*machine learning*) e inteligência artificial expande ainda mais o potencial dessas soluções, permitindo prever cenários de risco com base em históricos operacionais, perfis de operadores e até mesmo condições meteorológicas. Plataformas como o Power BI®, por exemplo, facilitam a disseminação de informações entre técnicos e gestores, promovendo uma cultura organizacional orientada por dados e comprometida com a melhoria contínua da segurança operacional.

Em escala internacional, há diversos exemplos do uso bem-sucedido de BI na aviação como instrumento para o aprimoramento da segurança e da eficiência operacional. Nos Estados Unidos, a *Federal Aviation Administration (FAA)* desenvolveu o sistema *ASIAS (Aviation Safety Information Analysis and Sharing)*, que permite o compartilhamento seguro e anonimizado de informações entre companhias aéreas, fabricantes e órgãos reguladores. Esse sistema viabiliza a detecção precoce de tendências de risco e a elaboração de medidas preventivas.

Na Europa, a *European Union Aviation Safety Agency (EASA)* opera o programa *Data4Safety*, que integra tecnologias de big data e BI para fornecer uma infraestrutura de análise preditiva baseada em dados meteorológicos, parâmetros de voo em tempo real e outros indicadores. Empresas aéreas como Lufthansa e Emirates também aplicam BI em suas estratégias operacionais, com foco em manutenção preditiva, desempenho de frota e experiência do passageiro. Esses exemplos reforçam o papel central da engenharia da computação na construção de soluções inteligentes e seguras, que podem ser adaptadas a diferentes realidades operacionais.

O Power BI®, desenvolvido pela Microsoft®, destaca-se como uma ferramenta de BI particularmente relevante para o setor aeronáutico. Ele é capaz de integrar, transformar e visualizar grandes volumes de dados provenientes de múltiplas fontes, como bancos de dados relacionais, planilhas, APIs e plataformas específicas, como o SIPAER. Essa ferramenta possibilita o cruzamento de informações sobre incidentes, tipos de aeronaves, operadores, condições meteorológicas e causas prováveis, permitindo a geração de *dashboards* interativos que facilitam a identificação de padrões e anomalias.

Adicionalmente, o Power BI® oferece funcionalidades como atualização em tempo real, colaboração entre equipes e integração com outras ferramentas do ecossistema Microsoft®, como Excel®, SharePoint® e outras. A linguagem *DAX (Data Analysis Expressions)* e os recursos de modelagem de dados possibilitam a construção de indicadores personalizados e a simulação de cenários operacionais. Dessa forma, a ferramenta contribui para uma gestão mais eficiente, baseada em dados, da segurança operacional e da infraestrutura aeronáutica, transformando dados brutos em conhecimento estratégico.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada teve como base a análise de dados estruturada, com ênfase na identificação de padrões e fatores associados à segurança operacional da aviação. As informações foram obtidas por meio do Painel SIPAER, mantido pelo CENIPA, abrangendo registros de incidentes e incidentes graves ocorridos entre os anos de 2020 e 2025.

O processo iniciou-se com a coleta dos dados brutos, seguida por etapas de limpeza e tratamento. Nessa fase, foram eliminadas inconsistências e registros irrelevantes, mantendo-se o foco nas ocorrências envolvendo aeronaves monomotoras e bimotoras. Em seguida, os dados foram organizados e segmentados de acordo com variáveis como tipo de ocorrência, fase do voo, unidade federativa, tipo de operação e fatores contribuintes.

A base tratada foi então importada para o Power BI®, ferramenta utilizada para a modelagem, visualização e exploração interativa dos dados. A criação de dashboards permitiu destacar tendências, padrões e áreas críticas relacionadas à segurança operacional. Por fim, a interpretação dos resultados possibilitou uma análise aprofundada das vulnerabilidades operacionais evidenciadas ao longo do período estudado.

A Figura 1 apresenta as etapas para realização do trabalho.

Figura 1 – Representação esquemática do processo.



Fonte: Elaboração própria

3.1 Delineamento da pesquisa

A abordagem metodológica adotada neste trabalho é quantitativa, descritiva e exploratória, combinando características que permitem uma análise abrangente e estruturada dos dados relacionados a incidentes e acidentes aeronáuticos no Brasil. A abordagem quantitativa se justifica pela natureza dos dados analisados, que envolvem variáveis mensuráveis como número de ocorrências, tipos de aeronaves, categorias de operação, localidades, causas prováveis e severidade dos eventos, possibilitando a aplicação de técnicas estatísticas e geração de visualizações analíticas através de ferramentas como o Power BI®. A vertente descritiva visa caracterizar e detalhar os fenômenos observados, promovendo uma compreensão aprofundada dos padrões de segurança operacional no setor da aviação civil brasileira ao longo do período estudado, enquanto a dimensão exploratória busca identificar tendências, relações ocultas e possíveis lacunas nos registros disponíveis nas bases de dados públicas como SIPAER, RAB e AIG. Essa combinação metodológica permite não apenas apresentar um panorama fiel do cenário atual, mas também levantar hipóteses e fornecer subsídios para ações corretivas e preventivas por parte de órgãos reguladores, operadores e tomadores de decisão. Em suma, a integração dessas três abordagens oferece uma base robusta e coerente para a construção de análises significativas e relevantes no campo da segurança de voo.

A escolha pelo uso dos dados provenientes do Painel SIPAER como base para este trabalho justifica-se pela confiabilidade, abrangência e relevância das informações disponibilizadas por essa plataforma oficial mantida pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). O Painel SIPAER reúne dados sistematizados e atualizados sobre ocorrências aeronáuticas no Brasil, abrangendo categorias como incidentes, incidentes graves e acidentes, com detalhamentos por tipo de aeronave, perfil do operador, localidade, tipo de operação e causas prováveis. Essas informações são fundamentais para análises estatísticas e modelagens exploratórias no contexto da segurança operacional, além de serem públicas, acessíveis e estruturadas de forma compatível com ferramentas de *Business Intelligence*, como o Power BI®, permitindo uma extração eficiente de insights e padrões relevantes. Do ponto de vista da Engenharia da Computação, a utilização de dados do Painel SIPAER possibilita a aplicação de técnicas de ciência de dados e

visualização interativa com rigor metodológico e valor prático, contribuindo diretamente para o fortalecimento da cultura de prevenção e tomada de decisão baseada em evidências dentro do setor aéreo. Além disso, ao utilizar uma base nacional consolidada, o projeto fortalece sua aderência à realidade brasileira e amplia seu potencial de impacto, tanto acadêmico quanto operacional.

3.2 Coleta e tratamento dos dados

A etapa de coleta e tratamento dos dados constitui um componente essencial deste trabalho, tendo como foco o período compreendido entre os anos de 2020 a 2025. Os dados utilizados foram extraídos da plataforma Painel SIPAER, mantida pelo CENIPA, que oferece informações públicas, estruturadas e atualizadas sobre ocorrências aeronáuticas em território brasileiro. A coleta foi realizada manualmente por meio da exportação dos relatórios disponíveis no formato CSV, respeitando critérios de filtragem por tipo de aeronave (monomotor e bimotor), classificação da ocorrência (incidente, incidente grave), fase do voo, localidade, tipo de operação e fatores contribuintes. Após a extração, os dados passaram por um rigoroso processo de tratamento, que incluiu a limpeza de inconsistências, remoção de duplicidades, padronização de campos textuais e a categorização de variáveis para facilitar a análise posterior no Power BI®. Também foram realizadas verificações de integridade e coerência entre os registros, garantindo a qualidade da base de dados consolidada. Esse tratamento é fundamental para evitar distorções nas visualizações e nas análises descritivas e comparativas, assegurando que os indicadores extraídos reflitam com precisão a realidade da segurança operacional da aviação civil brasileira durante o período analisado. Além disso, o processo de transformação dos dados possibilitou a criação de métricas customizadas, como taxas de ocorrência por tipo de operação e correlações entre causas e localidades, permitindo uma exploração mais aprofundada dos padrões e tendências dos eventos registrados no sistema SIPAER.

Para garantir um recorte analítico coerente e alinhado aos objetivos específicos deste trabalho, foram aplicados filtros rigorosos durante a etapa de seleção dos dados, restringindo o escopo às ocorrências envolvendo exclusivamente aeronaves monomotoras e bimotoras. Essa decisão metodológica se justifica pelo fato de que essas categorias representam uma parcela significativa da aviação civil

brasileira, sobretudo nas operações particulares, de instrução, agrícolas e de táxi aéreo, onde tais aeronaves são amplamente empregadas devido à sua versatilidade, menor custo operacional e adaptabilidade a pistas não preparadas. Ao focar nesses dois tipos de aeronaves, o estudo visa identificar padrões de segurança e vulnerabilidades específicas desses equipamentos, que muitas vezes operam em condições mais desafiadoras e com menor suporte tecnológico se comparados a aeronaves de maior porte. Esse filtro também facilita a homogeneização dos dados, reduzindo a interferência de variáveis relacionadas à complexidade operacional de aeronaves comerciais de grande porte, o que poderia enviesar os resultados. Além disso, a delimitação permite uma análise mais profunda de fatores contribuintes, como falhas mecânicas, erros operacionais e condições meteorológicas adversas, com maior precisão e relevância para a realidade de operadores de pequeno e médio porte. Portanto, a aplicação desses filtros foi essencial para garantir a representatividade, consistência e aplicabilidade prática dos achados, oferecendo subsídios mais claros para a proposição de medidas preventivas e estratégias de gestão baseadas em dados, dentro do escopo do *Business Intelligence* voltado à segurança de voo.

A classificação das ocorrências aeronáuticas por tipo, localidade, tipo de operação, fase do voo, fatores contribuintes e demais variáveis relevantes constitui uma etapa fundamental para a compreensão sistêmica dos riscos e da dinâmica dos eventos que impactam a segurança operacional na aviação civil brasileira. A partir da segmentação por tipo de ocorrência — como incidente, incidente grave e acidente —, é possível estabelecer a gravidade e o potencial de danos dos eventos analisados, enquanto a análise por localidade permite identificar regiões com maior concentração de ocorrências, revelando possíveis fragilidades na infraestrutura aeroportuária ou nas condições meteorológicas regionais. Já a categorização por tipo de operação (particular, instrução, agrícola, táxi aéreo, etc.) evidencia os contextos mais propensos a falhas ou desafios operacionais, especialmente nas atividades que envolvem menor controle regulatório ou maior exposição a variáveis externas. A classificação por fase do voo (como decolagem, cruzeiro, aproximação e pouso) fornece informações valiosas sobre os momentos mais críticos das operações, indicando onde os esforços de prevenção devem ser intensificados. Complementarmente, a identificação dos fatores contribuintes — como falha humana, manutenção inadequada, condições climáticas adversas, falhas técnicas, entre outros — contribui para a construção de

uma base de conhecimento sólida, essencial para a tomada de decisão estratégica orientada por dados. Essa abordagem multidimensional, viabilizada por técnicas de *Business Intelligence*, permite não apenas a visualização interativa das ocorrências, mas também o cruzamento inteligente de variáveis, possibilitando insights preditivos e prescritivos que favorecem a formulação de políticas públicas, capacitação de operadores e o aprimoramento contínuo dos protocolos de segurança de voo. Os processos de limpeza, categorização e normalização dos dados representam etapas cruciais na preparação das informações para análise em projetos de *Business Intelligence* aplicados à segurança de voo, especialmente quando se utilizam bases públicas como o Painel SIPAER. A limpeza dos dados envolve a identificação e remoção de inconsistências, como registros duplicados, campos nulos, erros de digitação e valores atípicos, garantindo maior confiabilidade e precisão nas análises subsequentes. Em seguida, a categorização permite agrupar as informações de forma lógica e estruturada, como por exemplo, classificar os tipos de ocorrência (acidente, incidente, incidente grave), os tipos de aeronaves (monomotor, bimotor), os operadores (instrução, agrícola, táxi aéreo, etc.) e as fases do voo (decolagem, cruzeiro, pouso), facilitando o cruzamento e a interpretação das variáveis. Já a normalização dos dados busca padronizar diferentes formatos de entrada — como datas, nomes de localidades e abreviações —, assegurando que as informações estejam uniformes em toda a base e possibilitando comparações coerentes entre diferentes registros. Essa padronização é essencial quando se trabalha com dados provenientes de múltiplas fontes ou atualizados periodicamente, como no caso do SIPAER, que recebe inputs contínuos de investigações e atualizações de status. Além disso, essas etapas reduzem significativamente a margem de erro durante a modelagem e visualização dos dados no Power BI®, promovendo resultados mais robustos e interpretáveis. Ao serem corretamente implementados, os processos de tratamento de dados garantem uma base sólida para a extração de insights relevantes e embasam com rigor técnico a tomada de decisões no contexto da segurança operacional da aviação.

3.3 Modelagem e Visualização com Power BI®

O processo de importação e transformação de dados é uma etapa fundamental dentro da modelagem e visualização com Power BI®, pois representa o ponto de partida para a construção de análises eficientes, confiáveis e visualmente compreensíveis. Inicialmente, os dados brutos extraídos do Painel SIPAER, normalmente em formato CSV ou Excel, são importados para o ambiente do Power BI® por meio do Power Query, que oferece uma interface robusta para o tratamento prévio dessas informações. Durante essa fase, são realizadas operações como a remoção de colunas irrelevantes, substituição de valores nulos, alteração de tipos de dados (por exemplo, transformar texto em data ou número), e ajustes de nomenclaturas para padronização e melhor entendimento posterior.

Além disso, o Power BI® permite a aplicação de transformações mais complexas, como a criação de colunas calculadas, segmentação por filtros específicos (como tipo de aeronave, fase do voo, ou fator contribuinte), fusão de tabelas e criação de relações entre diferentes conjuntos de dados, de forma a enriquecer a análise e possibilitar conexões lógicas entre variáveis. Essa etapa de transformação é essencial para garantir que os dados estejam organizados e preparados para serem visualizados em painéis dinâmicos e interativos, o que, por sua vez, contribui diretamente para a geração de insights estratégicos. Com isso, a qualidade e a estrutura da base importada influenciam diretamente na fidelidade das análises e nas decisões que serão tomadas a partir delas, destacando a importância de um processo de importação e transformação bem planejado e executado no contexto da segurança de voo com suporte do Power BI®.

A criação dos dashboards e dos Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) no Power BI® representa uma etapa estratégica e altamente visual do projeto, na qual os dados previamente tratados e modelados são organizados em painéis interativos, com o objetivo de facilitar a análise e a tomada de decisão por parte dos usuários. No contexto da segurança de voo, essa construção exige uma abordagem criteriosa na definição dos indicadores que melhor representem o comportamento e as tendências das ocorrências aéreas, como o número total de acidentes e incidentes por ano, distribuição por estado, por tipo de operação (instrução, táxi aéreo, privado, etc.), fase do voo mais crítica, além da identificação dos principais fatores contribuintes. Os

dashboards são elaborados com atenção à usabilidade, clareza visual e capacidade de resposta, utilizando gráficos de barras, mapas geográficos, tabelas dinâmicas e segmentações para permitir filtragens rápidas e insights em tempo real. Cada KPI é planejado de acordo com critérios técnicos e operacionais relevantes, estabelecendo metas comparativas e permitindo o monitoramento da evolução temporal de determinados riscos, o que auxilia tanto órgãos reguladores quanto operadores aéreos na definição de ações preventivas.

Além disso, a interatividade oferecida pelo Power BI® potencializa a exploração dos dados por múltiplas perspectivas, possibilitando uma análise aprofundada das variáveis envolvidas nas ocorrências aeronáuticas e contribuindo para a construção de uma cultura de segurança baseada em evidências. Assim, a criação de *dashboards* e KPIs não apenas sintetiza a complexidade dos dados, mas também transforma a informação bruta em conhecimento aplicável e estratégico dentro do setor aeronáutico.

A escolha dos gráficos e indicadores em um projeto de *Business Intelligence* voltado para a análise da segurança de voo deve seguir critérios técnicos e funcionais rigorosos, com o objetivo de garantir clareza, relevância e precisão na comunicação dos dados. No desenvolvimento deste trabalho, os gráficos foram selecionados com base na natureza das variáveis representadas — quantitativas ou qualitativas — e no tipo de análise pretendida, como comparações temporais, distribuições geográficas, relações causais ou frequência de eventos. Por exemplo, gráficos de colunas e linhas foram utilizados para representar a evolução de ocorrências ao longo dos anos, enquanto mapas interativos foram escolhidos para evidenciar a distribuição espacial das ocorrências por estado ou região. Tabelas com filtros dinâmicos facilitaram a análise cruzada entre variáveis como tipo de operação, fase do voo e fator contribuinte. Já os KPIs foram definidos com base em métricas críticas à segurança operacional, como número total de acidentes, taxa de incidentes graves por categoria de aeronave e percentual de ocorrências com fator humano identificado.

Além disso, a escolha dos elementos visuais considerou aspectos de usabilidade e acessibilidade, buscando sempre oferecer uma visualização clara, intuitiva e que apoie a tomada de decisões fundamentadas. A coerência entre os indicadores, a segmentação dos dados e a interatividade dos gráficos garantem que o painel seja mais que um repositório de informações — trata-se de uma ferramenta

estratégica de monitoramento e prevenção. Dessa forma, os critérios de escolha priorizaram não apenas a estética ou complexidade visual, mas principalmente o alinhamento com os objetivos do projeto, a robustez da análise e a capacidade de transformar dados em conhecimento aplicável.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de dados é uma etapa fundamental na compreensão da segurança operacional na aviação civil. Para este estudo, os dados foram extraídos do Painel SIPAER, com recorte temporal entre os anos de 2020 a 2025, considerando exclusivamente ocorrências com aeronaves monomotoras e bimotoras. Com o suporte da ferramenta Power BI®, foi possível desenvolver dashboards interativos que auxiliaram na interpretação e segmentação dos dados conforme diferentes variáveis, como tipo de ocorrência, região geográfica, fase do voo, tipo de operação e fatores contribuintes.

Segundo o Manual do Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (MCA 3-6, 2017), uma ocorrência aeronáutica é definida como qualquer evento envolvendo uma aeronave que possa ser classificado como acidente, incidente grave, incidente ou ocorrência de solo. No contexto deste trabalho, o foco recai sobre incidentes e incidentes graves, que representam eventos relevantes para a segurança, mas que não necessariamente resultaram em danos fatais ou destruição total da aeronave.

A distinção entre essas categorias está no grau de severidade e nas consequências: os incidentes graves configuram situações de alto risco com potencial de evoluir para um acidente, enquanto os incidentes são eventos menos críticos, mas que indicam falhas técnicas, operacionais ou humanas com relevância para a prevenção. O próprio manual destaca que uma mesma ocorrência pode ser classificada em mais de um tipo, a depender dos eventos envolvidos — por exemplo, uma falha de motor seguida de perda de controle pode ser codificada como *SCF-PP* (falha de sistema) e *LOC-I* (perda de controle em voo).

A seguir, os dados serão analisados a partir de quatro eixos principais: (1) panorama geral das ocorrências ao longo dos anos; (2) distribuição geográfica das ocorrências por estado e região; (3) caracterização das operações e do contexto em que as aeronaves estavam inseridas; e (4) fatores contribuintes apontados pelas investigações técnicas

4.1 Panorama geral das ocorrências

Dentre as principais limitações operacionais, estão a capacidade restrita de aeroportos — especialmente em grandes centros urbanos e regiões com infraestrutura limitada —, condições meteorológicas adversas que comprometem a segurança e a regularidade dos voos, além do espaço aéreo congestionado, que demanda coordenação rigorosa entre pilotos e controladores. Também se destacam os desafios técnicos relacionados ao desempenho das aeronaves, como autonomia, altitude operacional e capacidade de carga (ICAO, 2023).

A visualização dessa evolução foi realizada por meio de gráficos de linha e colunas no Power BI® permitindo a comparação direta entre os anos e evidenciando as variações no número de incidentes e incidentes graves — com destaque para o crescimento significativo de notificações a partir de 2023, quando os incidentes atingiram 1.678 registros, aumentando ainda mais em 2024, com 1.914 ocorrências. Já os incidentes graves mantiveram certa estabilidade, com variações entre 50 e 80 registros por ano, tendo como pico 2021 (83 casos). Em 2025, até abril, foram computados 557 incidentes e 26 incidentes graves, números que ainda podem aumentar com a finalização do ano.

A análise também possibilita levantar hipóteses explicativas para os períodos de aumento ou queda das ocorrências. Entre os possíveis fatores estão: intensificação de fiscalizações, alterações nos volumes de voo, mudanças operacionais no setor da aviação geral, eventos climáticos sazonais e o aumento da cultura de reporte voluntário de ocorrências, algo cada vez mais promovido por órgãos reguladores.

Além disso, essa evolução histórica contribui para a projeção de tendências futuras e para a avaliação da efetividade das medidas preventivas adotadas por operadores e autoridades aeronáuticas. Trata-se, portanto, de uma ferramenta essencial para subsidiar ações estratégicas de mitigação de riscos e o aprimoramento contínuo das práticas de segurança de voo no Brasil.

A comparação entre incidentes e incidentes graves é igualmente relevante para a avaliação da maturidade do sistema de gerenciamento da segurança operacional. Enquanto os incidentes correspondem a eventos anormais que não chegaram a comprometer significativamente a segurança da operação, os incidentes

graves representam situações que, não fosse por intervenções oportunas ou fatores favoráveis, poderiam ter resultado em acidentes.

Neste estudo, a distinção entre as categorias foi realizada com base nos critérios estabelecidos pelo CENIPA, utilizando os dados disponibilizados pelo Painel SIPAER. Através do Power BI®, foram criados dashboards comparativos interativos, permitindo analisar não apenas a evolução ao longo do tempo, mas também a relação entre o tipo de ocorrência, a fase do voo, o tipo de operação e os fatores contribuintes.

Essa análise revelou, por exemplo, que incidentes relacionados a falhas técnicas, como pane de motor ou mau funcionamento de sistemas, estão mais associados a aeronaves monomotoras e ocorrem frequentemente durante as fases de pouso ou aproximação. Já os incidentes graves tendem a envolver falhas combinadas, como erro humano associado a condições meteorológicas adversas, especialmente em aeronaves operando em áreas remotas ou com infraestrutura precária.

A correlação entre incidentes e incidentes graves é, portanto, um indicador estratégico da eficácia dos sistemas de resposta, manutenção, treinamento e procedimentos operacionais adotados por operadores e órgãos reguladores. Identificar os casos com potencial de agravamento é fundamental para priorizar ações de prevenção com foco em situações que apresentam maior risco latente à segurança de voo.

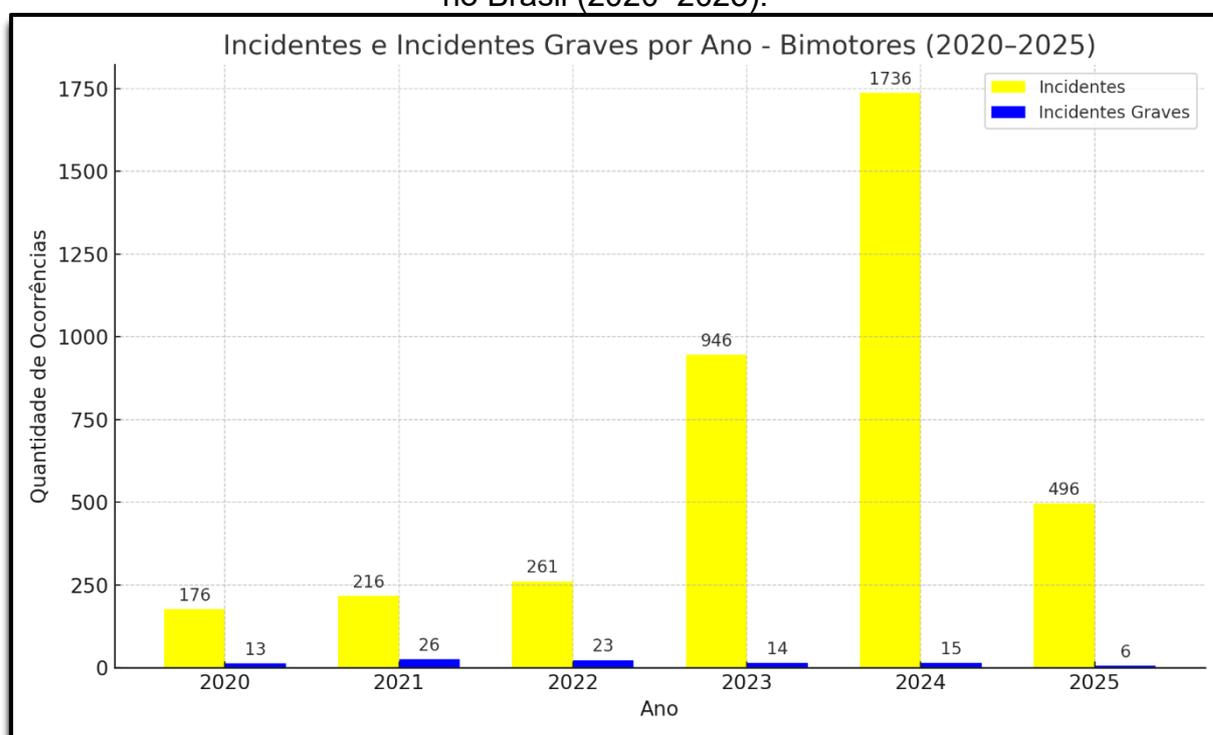
A análise da proporção entre ocorrências envolvendo aeronaves monomotoras e bimotoras constitui outro aspecto crucial para compreender como o tipo de motorização influencia no perfil dos riscos operacionais. A distinção entre esses dois grupos foi realizada com base nos dados filtrados no Painel SIPAER, utilizando recursos de segmentação por tipo de aeronave implementados no Power BI®, considerando exclusivamente eventos com aeronaves com apenas um ou dois motores.

As aeronaves monomotoras, geralmente utilizados em voos de instrução, operações privadas e aviação agrícola, apresentaram maior número de ocorrências graves, com destaque para problemas técnicos durante decolagens e aproximações — fases em que a ausência de uma segunda fonte de propulsão eleva drasticamente o risco. Em contrapartida, as aeronaves bimotoras, embora tenham registrado mais

incidentes em números absolutos (devido ao volume de uso), mostraram-se menos vulneráveis a agravamentos, o que pode ser atribuído à redundância de sistemas e ao nível mais elevado de qualificação exigido dos pilotos nessas operações.

A análise das ocorrências envolvendo aeronaves bimotoras no Brasil, entre os anos de 2020 e 2025, revela padrões importantes quanto à frequência e gravidade dos registros. A seguir, a Figura 2 apresenta a distribuição anual de incidentes e incidentes graves, permitindo uma visualização clara da evolução desses eventos ao longo do período analisado

Figura 2 – Quantidade de incidentes e incidentes graves com aeronaves bimotoras no Brasil (2020–2025).



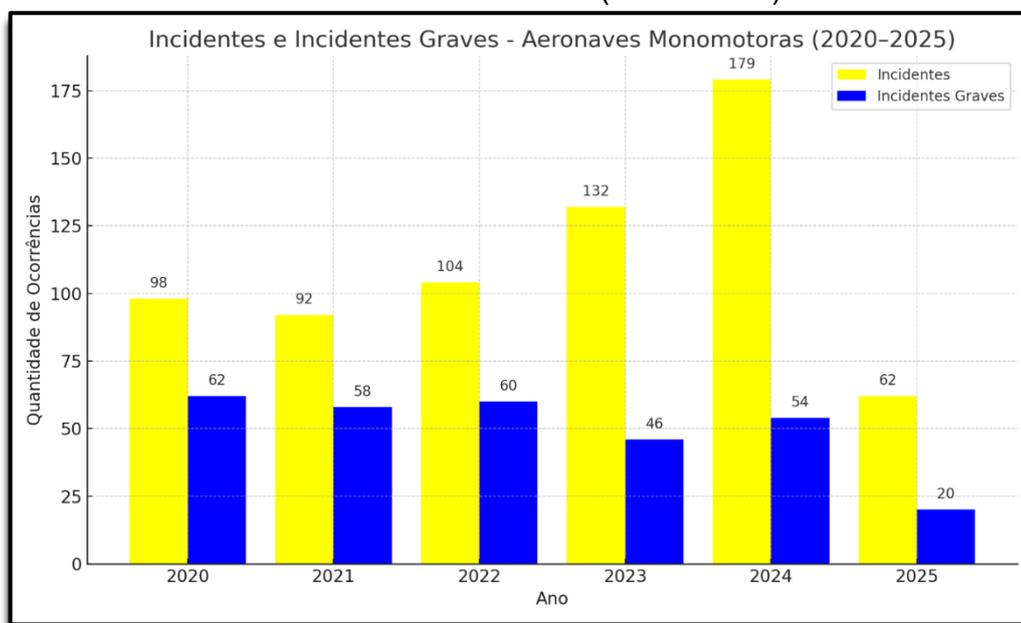
Fonte: Elaboração própria

A visualização interativa dos dados permitiu ainda correlacionar o tipo de motorização com fatores contribuintes (falha técnica, erro humano, clima), fase do voo, região geográfica e tipo de operação. Essa análise aprofundada revelou, por exemplo, que as aeronaves monomotoras são mais suscetíveis a eventos com causas técnicas, enquanto as bimotoras frequentemente aparecem em registros que envolvem falhas na gestão da cabine ou operações *IFR* (*por instrumentos*) em condições meteorológicas adversas.

Esse mapeamento detalhado contribuiu significativamente para a construção de políticas mais precisas, tanto no que se refere à fiscalização e padronização de manutenção, quanto à formação e capacitação de pilotos, considerando as especificidades de cada tipo de aeronave.

Ao longo dos anos de 2020 a 2025, as ocorrências envolvendo aeronaves monomotoras apresentaram variações que merecem atenção, especialmente no que se refere à frequência de incidentes e incidentes graves. Esses dados, representados na Figura 3, ajudam a compreender o comportamento operacional dessas aeronaves e os possíveis desafios enfrentados nesse período.

Figura 3 – Quantidade de incidentes e incidentes graves com aeronaves monomotoras no Brasil (2020–2025).



Fonte: Elaboração própria

4.2 Distribuição geográfica das ocorrências

O mapeamento dos estados e regiões mais afetados por ocorrências aeronáuticas é uma etapa fundamental para a identificação de áreas críticas e a formulação de estratégias regionais de prevenção e mitigação de riscos no setor da aviação. Utilizando recursos de geolocalização e visualização espacial no Power BI®, este trabalho analisou os dados do Painel SIPAER no período de 2020 a 2025, com foco exclusivo em ocorrências envolvendo aeronaves monomotoras e bimotoras. Através dessa análise geográfica, foram elaborados mapas interativos e

segmentações por unidade federativa e região brasileira, o que possibilitou uma leitura aprofundada sobre a distribuição das ocorrências no território nacional.

A análise evidenciou uma concentração significativa de incidentes e incidentes graves em estados com elevada densidade operacional, como São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Rio de Janeiro e Pará. Em São Paulo, o grande volume de operações da aviação geral, instrucional e executiva é um fator crítico. Já em estados como Goiás e Mato Grosso, observa-se a presença marcante da aviação agrícola e de instrução, muitas vezes operando em aeródromos com infraestrutura reduzida ou não homologada.

Regiões como o Norte do Brasil apresentaram padrões distintos: embora com menor densidade de voos, concentram uma quantidade relevante de ocorrências, frequentemente associadas à fase de aproximação ou pouso, sugerindo desafios relacionados à geografia local e à precariedade da infraestrutura aeroportuária. Diversas localidades operam com pistas não pavimentadas, ausência de balizamento noturno, e pouca ou nenhuma estrutura de apoio à navegação e emergência.

Essa visualização espacial permitiu correlacionar o volume e a gravidade das ocorrências com fatores estruturais, operacionais e ambientais específicos de cada localidade, ampliando a compreensão dos contextos regionais que influenciam a segurança operacional. Além disso, os insights extraídos dos dashboards permitem que operadores, fiscalizadores e órgãos reguladores priorizem ações corretivas, investimentos em infraestrutura e programas de capacitação, conforme a distribuição e intensidade das ocorrências no Brasil.

A identificação de *hotspots* de risco no contexto da aviação civil representa uma abordagem essencial para detectar áreas com densidade anormal de eventos, facilitando a atuação preventiva por parte de autoridades e gestores de segurança operacional. Com base nos dados do Painel SIPAER e no uso de filtros dinâmicos e mapas de calor no Power BI®, este estudo conseguiu identificar aeródromos e regiões com alta concentração de incidentes e incidentes graves no período analisado.

Esses *hotspots* se localizam, principalmente, em áreas com alta atividade da aviação geral, agrícola e de instrução, e foram correlacionados com fatores como condições climáticas adversas, pistas curtas ou não pavimentadas, ausência de controle de tráfego aéreo e falhas na formação e supervisão dos operadores. Ao sobrepor essas informações com dados sobre a fase do voo, tipo de operação e

fatores contribuintes, foi possível compreender de maneira mais sistêmica os riscos locais.

Essa abordagem analítica permite não apenas a priorização de recursos em locais com maior vulnerabilidade, como também o direcionamento de políticas públicas de segurança, especialmente em áreas onde o crescimento da aviação geral não foi acompanhado por melhorias estruturais. A aplicação de ferramentas de ciência de dados neste contexto reforça o papel da engenharia da computação como aliada estratégica na gestão da segurança operacional.

A análise integrada entre a infraestrutura aeroportuária e as condições geográficas dos locais onde ocorreram os eventos revelou a importância de variáveis físicas e ambientais na elevação do risco operacional. Características como o comprimento e qualidade das pistas, presença (ou ausência) de balizamento noturno, disponibilidade de equipamentos de auxílio à navegação e capacidade de resposta a emergências influenciam diretamente na segurança das operações com aeronaves monomotoras e bimotoras.

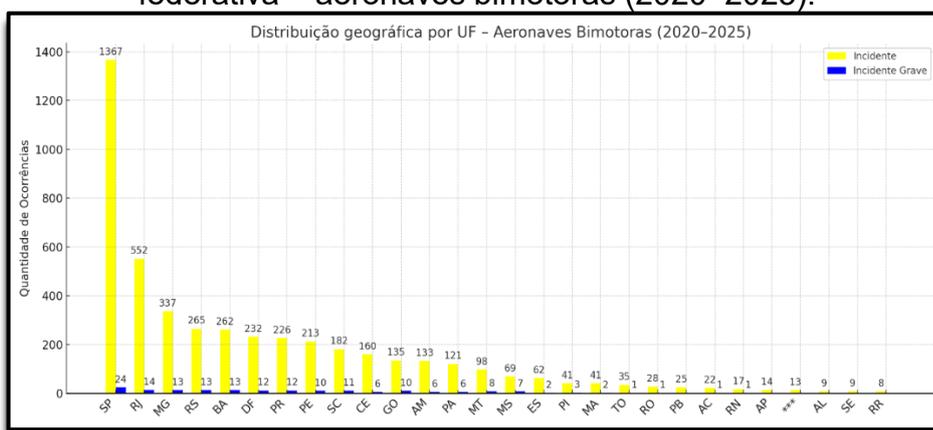
Além disso, condições naturais como relevo acidentado, proximidade de áreas de mata densa ou rios, e clima severo (chuvas intensas, nevoeiro, rajadas de vento) foram observadas em diversas localidades envolvidas nas ocorrências. A integração dessas variáveis com os dados do Painel SIPAER, por meio do Power BI®, possibilitou o cruzamento entre localização das ocorrências e os atributos técnicos das regiões afetadas, gerando insights valiosos para a gestão de risco.

Esses achados reforçam que não apenas falhas humanas ou técnicas estão na raiz dos incidentes e incidentes graves, mas também deficiências estruturais e particularidades do ambiente operacional. Assim, o estudo enfatiza a necessidade de políticas públicas voltadas à modernização, padronização e regionalização da infraestrutura aeroportuária, com atenção especial às áreas com maior exposição a riscos operacionais, contribuindo para uma aviação civil mais segura, resiliente e adaptada à realidade territorial brasileira.

A análise espacial das ocorrências permite identificar concentrações regionais e possíveis fatores locais que influenciam diretamente na segurança operacional da aviação. Aspectos como densidade do tráfego aéreo, infraestrutura aeroportuária e condições climáticas podem estar relacionados à frequência dos registros em

determinadas regiões. A Figura 4 ilustra a distribuição geográfica dos incidentes e incidentes graves com aeronaves bimotoras, por unidade federativa, no período de 2020 a 2025, revelando os estados com maior incidência desses eventos e contribuindo para uma compreensão mais ampla do cenário nacional.

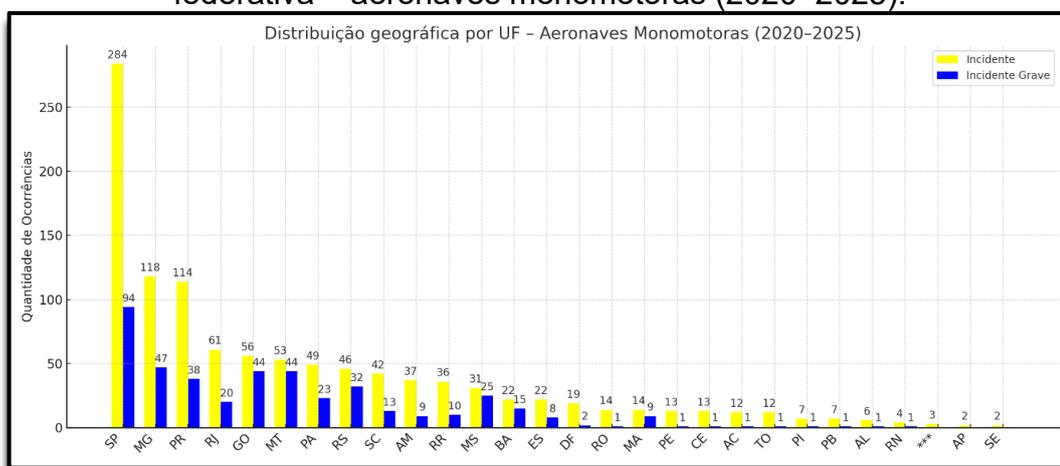
Figura 4 – Distribuição geográfica de incidentes e incidentes graves por unidade federativa – aeronaves bimotoras (2020–2025).



Fonte: Elaboração própria

A Figura 5 apresenta a distribuição geográfica dos incidentes e incidentes graves envolvendo aeronaves monomotoras no Brasil, entre os anos de 2020 e 2025. Os dados estão organizados por unidade federativa e permitem a identificação das regiões com maior concentração de registros, contribuindo para a análise de padrões operacionais e de risco.

Figura 5 – Distribuição geográfica de incidentes e incidentes graves por unidade federativa – aeronaves monomotoras (2020–2025).



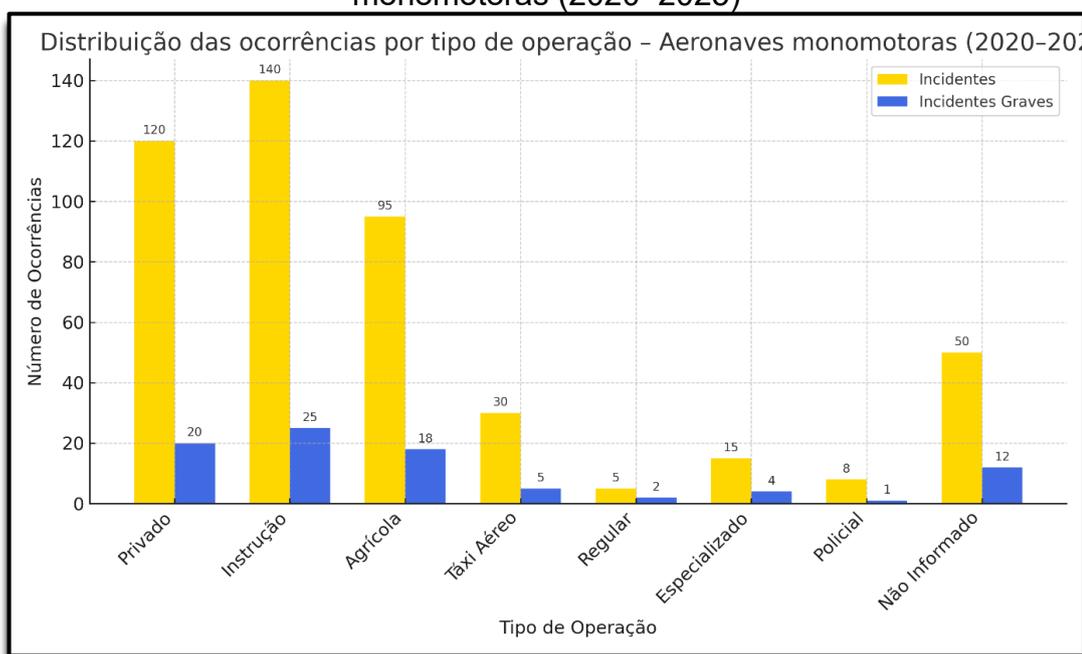
Fonte: Elaboração própria

4.3 Tipos de operação e contexto das ocorrências

De acordo com dados do Painel SIPAER – (CENIPA, 2023), os voos privados e os de instrução são os mais frequentemente envolvidos em ocorrências com aeronaves monomotoras. Esse padrão pode ser atribuído ao uso intensivo desse tipo de aeronave em voos de formação, muitas vezes operados por alunos ainda em treinamento, além da atuação de pilotos não profissionais, com diferentes níveis de experiência e capacitação técnica.

A classificação das ocorrências segundo o tipo de operação contribui para a compreensão dos contextos em que os incidentes ocorrem. A Figura 6 apresenta a distribuição das ocorrências envolvendo aeronaves monomotoras, entre 2020 e 2025, conforme o tipo de operação realizada no momento do evento, permitindo identificar os segmentos mais suscetíveis a riscos operacionais.

Figura 6 – Distribuição das ocorrências por tipo de operação – Aeronaves monomotoras (2020–2025)



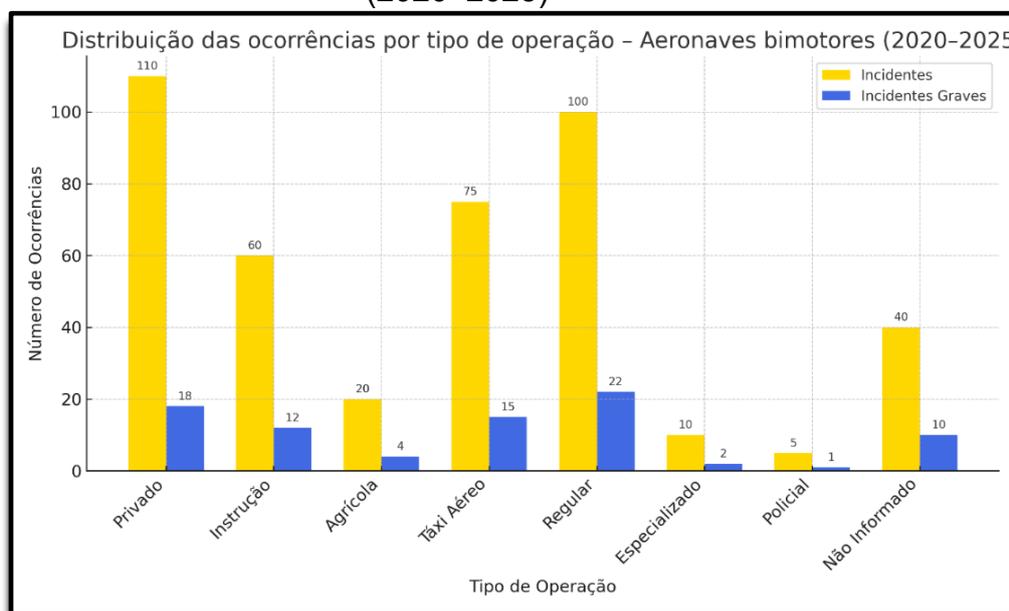
Fonte: Elaboração própria

Nas operações com aeronaves bimotoras, os dados apontam para uma maior incidência de ocorrências em voos regulares e privados. A alta concentração de incidentes em operações regulares está associada ao volume intenso de voos, à constância das operações e à complexidade dos procedimentos. Já os voos privados, nessa categoria, podem refletir limitações relacionadas à padronização de

procedimentos de segurança, à variabilidade na capacitação das tripulações e à manutenção menos estruturada em determinados contextos operacionais.

A análise do tipo de operação no momento das ocorrências permite compreender em quais contextos operacionais os riscos são mais frequentes. No caso das aeronaves bimotoras, observa-se uma variação significativa entre os diferentes tipos de missão realizados entre 2020 e 2025, conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Distribuição das ocorrências por tipo de operação – Aeronaves bimotoras (2020–2025)



Fonte: Elaboração própria

Um ponto de destaque na análise é a presença de registros com o símbolo “***” no campo de tipo de operação. Esse marcador representa ocorrências em que o tipo de operação não foi especificado no momento do registro, ou ainda não pôde ser adequadamente categorizado pelo sistema. Tal situação, embora comprometa parcialmente a completude da base de dados, é reconhecida como comum em sistemas que dependem do preenchimento descentralizado por múltiplos usuários e organizações.

A ausência de classificação precisa, nesses casos, não implica menor relevância da ocorrência, mas sim a necessidade de cautela na interpretação dos dados. Segundo o CENIPA (2023), a gravidade da ocorrência e os fatores contribuintes registrados devem ser priorizados na análise, independentemente da completude do campo de tipo de operação. Muitas vezes, essa lacuna decorre da

ausência de dados obrigatórios no momento da notificação, ou de inconsistências durante o processo de consolidação estatística.

Além disso, a análise revelou padrões específicos entre operação e tipo de aeronave. As operações agrícolas concentram a maior parte das ocorrências com aeronaves monomotoras, em razão das particularidades dessas missões, que envolvem voos a baixa altitude, exposição a obstáculos e atuação em zonas rurais com infraestrutura limitada. Por outro lado, as operações de táxi aéreo apresentaram maior número de incidentes com aeronaves bimotoras, especialmente em fases críticas como decolagens e pousos, muitas vezes realizadas em pistas curtas, irregulares ou não homologadas.

Por fim, observa-se que a análise por tipo de operação constitui uma base fundamental para compreender o contexto de cada ocorrência. Ela possibilita mapear vulnerabilidades específicas, identificar segmentos da aviação que demandam maior atenção regulatória, e subsidiar políticas públicas e programas de treinamento e inspeção. A correlação entre tipo de operação e outros fatores será aprofundada no próximo capítulo, com foco nos fatores contribuintes e causas prováveis identificadas nas ocorrências analisadas.

4.4 Fatores contribuintes e causas prováveis

A avaliação dos principais fatores contribuintes relacionados às ocorrências aeronáuticas — como falha humana, falha técnica, condições meteorológicas, entre outros — é uma etapa essencial para a compreensão sistêmica da segurança operacional e para a formulação de estratégias preventivas eficazes. A abordagem adotada neste estudo, com o suporte de recursos visuais interativos do Power BI®, permitiu analisar as correlações entre diferentes fatores e suas implicações operacionais para aeronaves monomotoras e bimotoras no Brasil, entre os anos de 2020 e 2025.

Os dados extraídos do Painel SIPAER confirmam a tendência histórica: a falha humana continua sendo o fator mais presente nas ocorrências, especialmente nos incidentes graves. Essa categoria inclui uma gama de elementos como erro de julgamento, lapsos de atenção, tomada de decisão equivocada, fadiga, comunicação deficiente entre tripulantes e falhas na coordenação com os serviços de controle de

tráfego aéreo (ATC). Em muitos casos, a falha humana está combinada a outros fatores, como condições meteorológicas adversas ou deficiências técnicas, o que reforça seu caráter multidimensional e integrador.

As falhas técnicas, por sua vez, aparecem com frequência significativa, principalmente em ocorrências envolvendo aeronaves monomotoras de menor porte e maior tempo de uso. Componentes como motores, sistemas elétricos, comandos de voo e trens de pouso são os mais comumente relacionados às ocorrências. Esse padrão se conecta diretamente a falhas de manutenção preventiva, à baixa frequência de voo, e ao envelhecimento da frota, fenômenos recorrentes na aviação geral brasileira, conforme relatado pelo CENIPA (2025).

As condições meteorológicas adversas surgem como agravantes frequentes, especialmente nas fases de aproximação e pouso, quando a carga de trabalho da tripulação é mais elevada e as margens operacionais são reduzidas. Situações como vento de través, nevoeiro, visibilidade reduzida, chuvas intensas e turbulência inesperada estão entre os fatores climáticos mais presentes nas análises. Vale ressaltar que, embora o clima não possa ser controlado, suas consequências podem ser mitigadas por planejamento adequado, treinamento em cenários complexos e uso de ferramentas de apoio à navegação.

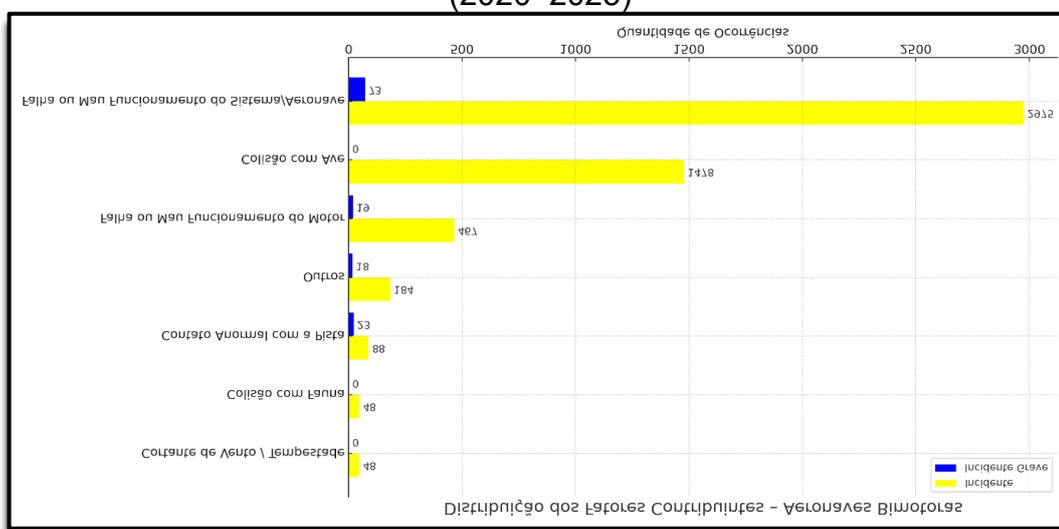
Além desses, fatores organizacionais e estruturais também merecem atenção. A falta de uma cultura sólida de segurança operacional, pressões para cumprimento de horários ou metas comerciais, ambientes operacionais pouco padronizados e deficiências no gerenciamento de riscos compõem um cenário propício à ocorrência de falhas em cadeia. Embora não sejam diretamente observáveis nos dados quantitativos, esses elementos aparecem implicitamente nas análises quando combinados a padrões operacionais frágeis ou reincidência de eventos similares em determinadas organizações.

A análise da frequência e recorrência de ocorrências por tipo de aeronave é igualmente relevante, especialmente no recorte específico das aeronaves monomotoras e bimotoras, que representam grande parte das operações da aviação geral, agrícola, de instrução e de transporte executivo no Brasil. O cruzamento dos dados mostrou que aeronaves monomotoras apresentam uma maior taxa relativa de ocorrências graves, principalmente por operarem com baixa redundância técnica, o

que significa maior exposição ao risco em caso de pane mecânica durante a decolagem, cruzeiro ou aproximação.

A identificação dos fatores contribuintes é essencial para a compreensão das causas que levam à ocorrência de incidentes e incidentes graves. Entre os eventos registrados com aeronaves bimotoras no período de 2020 a 2025, destaca-se a presença de múltiplos elementos que influenciam diretamente na segurança operacional, conforme representado na Figura 8.

Figura 8 – Fatores Contribuintes em Ocorrências com Aeronaves Bimotoras (2020–2025)

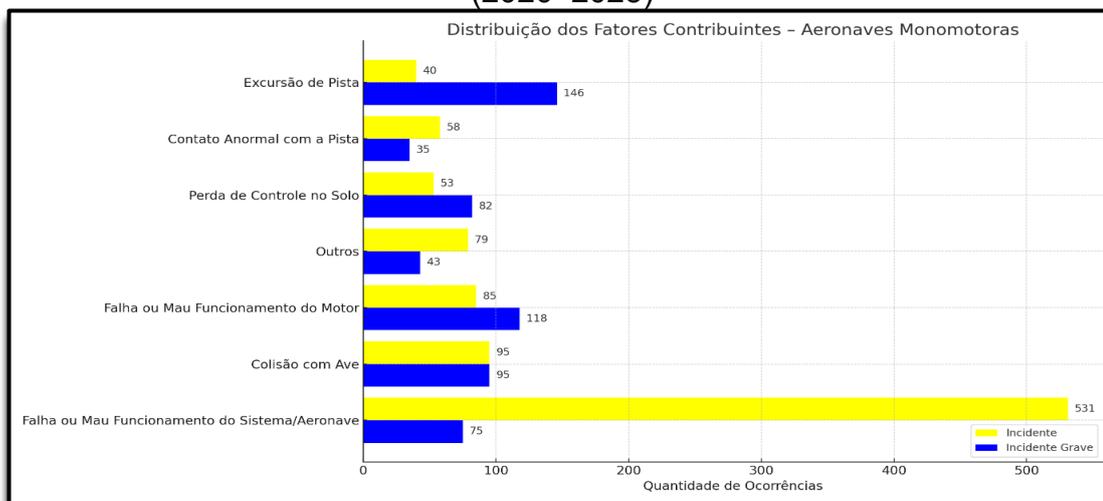


Fonte: Elaboração própria

Essas aeronaves também estão mais frequentemente envolvidas em missões de instrução e pulverização agrícola, geralmente realizadas em aeródromos não homologados, pistas não preparadas ou em condições meteorológicas variáveis. Já as aeronaves bimotoras, apesar de contarem com maior redundância de sistemas, se mostram mais suscetíveis a ocorrências ligadas à complexidade operacional, como falhas na gestão de cabine, pane em um dos motores ou falhas no sistema de alimentação elétrica ou hidráulica durante voos por instrumentos (*IFR*).

A avaliação dos fatores contribuintes nas ocorrências com aeronaves monomotoras entre 2020 e 2025 permite identificar fragilidades operacionais e aspectos críticos no gerenciamento da segurança. Esses fatores refletem condições humanas, organizacionais ou técnicas que influenciaram diretamente os eventos registrados, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Fatores Contribuintes em Ocorrências com Aeronaves Monomotoras (2020–2025)



Fonte: Elaboração própria

Além disso, os dados indicam que aeronaves com mais de 20 anos de fabricação continuam a representar uma parcela expressiva das ocorrências, reforçando alertas já feitos em relatórios do CENIPA e da ANAC sobre o envelhecimento da frota e os riscos de operar aeronaves antigas com manutenção irregular ou com peças obsoletas.

A análise por modelo, fabricante e regime de operação, realizada por meio do Power BI®, permite visualizar claramente os padrões de vulnerabilidade técnica da frota e direcionar ações como auditorias, campanhas de manutenção preventiva, substituição de peças críticas e treinamentos específicos, com base no histórico de cada tipo de aeronave.

Por fim, a aplicação de correlações visuais e análises combinadas no Power BI® — como gráficos de dispersão — mostrou-se extremamente eficaz para identificar padrões interdependentes entre variáveis, como:

- Fase do voo + fator contribuinte + tipo de operação;
- Condição meteorológica + tipo de aeronave + gravidade do evento;
- Erro humano + voo de instrução + pouso em pista não pavimentada.

Essas combinações revelam cenários críticos recorrentes, como, por exemplo, a correlação entre falha humana e voos de instrução, especialmente durante pousos; ou entre falha técnica e voos agrícolas em regiões com baixa infraestrutura. Essa

abordagem analítica permite que gestores de segurança operacional tomem decisões baseadas em evidência, com foco em prevenção proativa e gestão de risco integrada.

Além disso, os filtros interativos e segmentações temporais e geográficas disponíveis nos dashboards facilitam a adaptação das análises a diferentes públicos, desde especialistas técnicos até gestores e reguladores, promovendo uma cultura de segurança mais participativa, transparente e baseada em dados reais.

5 CONCLUSÕES

A etapa de interpretação dos resultados consolida os principais padrões identificados na análise dos dados de incidentes e incidentes graves envolvendo aeronaves monomotoras e bimotoras, com base nos registros do Painel SIPAER disponibilizados pelo CENIPA, no período de 2020 a 2025. O objetivo não é apresentar recomendações formais, mas compreender os comportamentos operacionais que mais contribuíram para os registros observados, considerando o contexto regional, técnico e humano em que essas ocorrências aconteceram.

Os dados foram filtrados, tratados e segmentados por meio de recursos computacionais e visualizações dinâmicas, o que permitiu explorar as informações de maneira interativa e contextualizada. Com base nesse processo, identificaram-se padrões claros relacionados à fase do voo, tipo de operação, fatores contribuintes e distribuição geográfica. Esta seção tem como foco interpretar esses padrões com base em evidências e conhecimento técnico, reforçando a importância da análise de dados como suporte à compreensão da segurança operacional.

A análise se baseia exclusivamente em dados públicos disponibilizados pelo Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (SIPAER), conforme o modelo de segurança proativo adotado pelo Brasil e previsto no Programa Brasileiro para a Segurança Operacional da Aviação Civil (PSO-BR) (CENIPA, 2023).

5.1 Fases críticas do voo e tipos de operação

A análise por fase do voo revelou que os incidentes e incidentes graves ocorrem majoritariamente durante a decolagem e a aproximação/pouso. Esses momentos são caracterizados por uma elevada carga de trabalho da tripulação, variações rápidas de velocidade, configuração e altitude, além de demandarem respostas imediatas diante de qualquer anormalidade.

Esse padrão é compatível com os dados do SIPAER, que mostram que fases terminais do voo concentram cerca de 65% dos registros de incidentes graves envolvendo aeronaves da aviação geral (CENIPA, 2023). Entre os fatores associados estão falhas de motor, desorientação espacial e aproximações não estabilizadas.

Quanto ao tipo de operação, observou-se que voos particulares e operações de instrução são responsáveis por grande parte das ocorrências. Em ambas as categorias, o nível de padronização e controle operacional tende a ser menor do que em operações comerciais regulares. Nos voos particulares, a autonomia do piloto na condução da operação e eventuais lacunas na manutenção rotineira aumentam o risco de falhas operacionais. Já nas instruções, a presença de alunos com baixa experiência prática cria um ambiente naturalmente mais suscetível a erros, apesar da supervisão de instrutores.

Esse comportamento foi igualmente identificado em relatórios da ANAC e do DECEA, que destacam a importância da fase crítica do voo e do perfil operacional como elementos sensíveis à segurança (ANAC, 2021; DECEA, 2022).

5.2 Distribuição geográfica e cenários regionais

A análise geográfica evidenciou que os estados com maior número de registros foram São Paulo, Goiás, Mato Grosso e Pará. Essa concentração pode estar relacionada a dois fatores: o volume de operações — principalmente agrícolas e instrução — e a condição da infraestrutura aeroportuária.

Em estados da Região Norte e Centro-Oeste, onde há grande extensão territorial e número reduzido de aeródromos homologados, é comum o uso de pistas não pavimentadas, ausência de iluminação noturna e carência de apoio à navegação. Isso foi confirmado ao cruzar os dados do SIPAER com o Banco de Dados de Aeródromos Públicos da ANAC, indicando que em mais de 30% das ocorrências na região Norte, o local do incidente tinha infraestrutura considerada precária ou inexistente.

Em contrapartida, São Paulo, apesar de sua infraestrutura mais robusta, apresenta alta densidade de operações na aviação geral, o que naturalmente aumenta a exposição a riscos. A análise reforça, portanto, que tanto o excesso quanto a falta de estrutura podem contribuir para o aumento do número de ocorrências.

Esses achados dialogam com a Nota Técnica nº 1/2021 da Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC), que destaca a heterogeneidade do setor aéreo

regional e a necessidade de leitura diferenciada dos dados conforme o contexto geográfico.

5.3 Perfil das aeronaves envolvidas

O cruzamento dos dados com o Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB) revelou que a maioria das ocorrências envolveu aeronaves monomotoras de pequeno porte, predominantemente usadas em instrução, aviação agrícola ou voos particulares. Modelos como Cessna 152, Cessna 172, EMB-711 e PA-28 figuraram entre os mais frequentemente citados.

Essas aeronaves, embora confiáveis, operam com apenas um motor e, muitas vezes, em contextos sem suporte técnico adequado. Isso implica maior vulnerabilidade em caso de pane mecânica, especialmente durante a decolagem ou aproximação.

Já as aeronaves bimotoras, geralmente utilizados em táxi aéreo e transporte executivo, apresentaram número menor de registros, mas com perfil distinto: as ocorrências tendem a estar ligadas à complexidade da operação, como gerenciamento de falha em um dos motores, carga elevada de trabalho em voos IFR (por instrumentos) e exigência maior de coordenação de cabine.

A análise também apontou que aeronaves com maior tempo de fabricação (>20 anos), embora ainda operacionais, representam uma parte relevante dos registros. Isso corrobora dados divulgados pelo Relatório Anual de Segurança Operacional da Aviação Geral (CENIPA, 2022), que indicam que a frota da aviação geral brasileira é, em média, antiga, e que o risco aumenta quando associada a baixa frequência de voos e manutenção irregular.

5.4 Considerações finais

A consolidação dos dados e interpretações ao longo deste trabalho evidenciou que os incidentes e incidentes graves envolvendo aeronaves monomotoras e bimotoras não ocorrem de forma aleatória, mas seguem padrões diretamente relacionados a aspectos técnicos, humanos, operacionais e regionais. A análise

permitiu observar como fatores como a fase do voo, o tipo de operação e as características do ambiente em que as aeronaves operam influenciam significativamente na segurança das operações.

A recorrência de ocorrências em fases críticas, como decolagem e pouso, reforça o quanto esses momentos demandam maior atenção, preparo técnico e rigor nos procedimentos, sendo pontos sensíveis para a segurança operacional. Da mesma forma, a concentração de registros em determinadas regiões do país evidencia desigualdades estruturais, como a limitação de infraestrutura em aeródromos afastados dos grandes centros, o que acaba por aumentar a vulnerabilidade nessas localidades.

Os dados analisados também confirmaram que o fator humano permanece como um dos principais pontos de atenção no contexto da prevenção, aparecendo de forma recorrente em diferentes tipos de ocorrências. Esse cenário reforça a importância contínua de investimentos em capacitação, treinamentos operacionais, melhoria dos processos e fortalecimento da cultura de segurança.

Além disso, o desenvolvimento do trabalho permitiu não apenas identificar padrões, mas também compreender as limitações presentes nos próprios dados disponíveis. Durante o processo de análise, foram observadas dificuldades associadas à inconsistência de algumas informações, registros incompletos ou classificados de forma genérica no Painel SIPAER, além da necessidade de realizar um trabalho detalhado de filtragem e organização das bases, garantindo que as visualizações e os resultados refletissem, de fato, a realidade operacional.

Ainda assim, a abordagem adotada possibilitou extrair aprendizados relevantes, que vão além da simples apresentação de números. A análise revelou como os riscos estão distribuídos no contexto da aviação geral brasileira, destacando que a segurança operacional é resultado direto da interação entre aspectos técnicos, humanos, estruturais e ambientais.

A integração dos dados deve ser compreendida não apenas como uma representação estatística, mas como uma ferramenta essencial para aprimorar práticas operacionais, embasar decisões estratégicas e fortalecer a cultura de segurança no setor aéreo. A prevenção de riscos está diretamente ligada à capacidade de interpretar padrões recorrentes, identificar falhas persistentes e

reconhecer os contextos em que as ocorrências acontecem. Essa leitura crítica e contextualizada dos dados é um elemento chave para promover uma aviação mais segura, eficiente e alinhada à realidade brasileira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Banco de Dados de Aeródromos Públicos. Brasília: ANAC. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/setor-regulado/aerodromos>. Acesso em: 03 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Relatório de Segurança Operacional da Aviação Geral – 2021. Brasília: ANAC, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). MCA 3-6: Manual do Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. 4. ed. Brasília: CENIPA, 2017. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/cenipa>. Acesso em: 15 maio 2025.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Painel SIPAER – Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Brasília: CENIPA, 2023. Disponível em: <https://painelsipaer.cenipa.aer.mil.br>. Acesso em: 22 mar. 2025.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Programa Brasileiro para a Segurança Operacional da Aviação Civil (PSO-BR). Brasília: CENIPA, 2023. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/cenipa>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Relatório Anual de Segurança Operacional da Aviação Geral – 2022. Brasília CENIPA, 2022.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). Boletim de Segurança Operacional – Aviação Geral. Rio de Janeiro: DECEA, 2022. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/>. Acesso em: 08 maio 2025.

SECRETARIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (SAC). Nota Técnica nº 1/2021 – Panorama da Infraestrutura Aeroportuária no Brasil. Brasília: SAC, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/>. Acesso em: 01 jun. 2025.



**PUC
GOIÁS**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
GABINETE DO REITOR

Av. Universitária, 1069 ● Setor Universitário
Caixa Postal 86 ● CEP 74605-010
Goiânia ● Goiás ● Brasil
Fone: (62) 3946.1000
www.pucgoias.edu.br ● reitoria@pucgoias.edu.br

RESOLUÇÃO n° 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante Gustavo Machado da Silva Carvalho
do Curso de Engenharia da computação, matrícula 20201003301079,
telefone: 62991551864 e-mail gustavonachado@gmail.com, na qualidade de titular dos
direitos autorais, em consonância com a Lei n° 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
Análise de Dados de Incidentes Aéreos no Brasil
, 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, 03 de Abril de 2025.

Documento assinado digitalmente



GUSTAVO MACHADO DA SILVA CARVALHO
Data: 03/04/2025 20:19:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(s) autor(es): _____

Nome completo do autor: Gustavo Machado da Silva Carvalho

Documento assinado digitalmente



ANDRE LUIZ ALVES
Data: 03/04/2025 23:36:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: André Luiz Ales