

**AUXÍLIO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO CONTROLE E GESTÃO DO TRÁFEGO AÉREO**Anna Paula Bechepeche<sup>1</sup>  
Vinicius Sebba Carrijo<sup>2</sup>**RESUMO**

Esta pesquisa se concentra no uso de algoritmos de inteligência artificial (IA) para controle e otimização de tráfego aéreo, com atenção especial à segurança operacional. A ciência da computação artificial de rápido crescimento estendeu seus braços para vários setores com operações robóticas, nas quais a aviação não é exceção, e tentou automatizar inúmeras operações diminuindo a carga cognitiva humana nos controladores de tráfego. Por exemplo, a IA permitiu “cockpits digitais” ou “cockpits de vidro” em grandes aeronaves que fornecem dados integrados em tempo real e, portanto, melhor consciência situacional para os pilotos. Esta pesquisa visa discutir as ramificações dessa tecnologia no tráfego aéreo brasileiro, visando cumprir um imperativo crescente de fornecer operações de aviação mais seguras e sustentáveis. Como forma de atingir esta investigação, será realizada uma metodologia descritiva e qualitativa baseada em pesquisa documental e bibliográfica. Do material revisado, pode-se concluir que o DECEA implementou sistemas de IA como o SIRIUS no Brasil para otimizar o uso do espaço aéreo, diminuindo o tempo de espera das aeronaves e tornando a indústria mais sustentável. O estudo também enfatiza a necessidade de XAI (IA Explicável) para que as pessoas que controlam as máquinas possam entender e ter fé nas escolhas propostas pela tecnologia. Ele afirma que a IA não tem apenas potencial de transformação nos setores de aviação do Brasil, mas também é uma ferramenta crucial de segurança operacional. Portanto, recomendam-se mais investimentos em tecnologias de IA e no desenvolvimento de profissionais capazes de lidar com essa inovação.

**Palavras-chave:** Inteligência Artificial; Tráfego Aéreo; Cockpit Digital; Segurança Operacional; Sustentabilidade.

<sup>1</sup> Graduada em Física pela Universidade Federal de Goiás (1988), Mestre em Física pela Universidade de São Paulo (1991), Doutora em Química pela Universidade Federal de São Carlos (1996). Atualmente é professora efetiva na Pontifícia Universidade Católica de Goiás e na Universidade Estadual de Goiás. Possui experiência na área de Física, com ênfase em Física da Matéria Condensada. E-mail: [abechepeche@yahoo.com.br](mailto:abechepeche@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Graduando em Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás. E-mail: [vscarrijo@yahoo.com.br](mailto:vscarrijo@yahoo.com.br)

# **AID OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE CONTROL AND MANAGEMENT OF AIR TRAFFIC**

## **ABSTRACT**

*This research focuses on the use of AI algorithms for air traffic control and optimization, with special attention to operational safety. The rapidly growing artificial computer science has extended its arms to several sectors with robotic operations, where aviation is no exception, and has attempted to automate numerous operations by decreasing the human cognitive load on traffic controllers. For example, AI has enabled “digital cockpits” or “glass cockpits” in large aircraft that provide integrated real-time data and, therefore, better situational awareness for pilots. This research aims to discuss the ramifications of this technology in Brazilian air traffic, aiming to fulfill a growing imperative of providing safer and more sustainable aviation operations. As a way to achieve this investigation, a descriptive and qualitative methodology based on documentary and bibliographic research will be carried out. From the reviewed material, it can be concluded that DECEA has implemented AI systems such as SIRIUS in Brazil to optimize the use of airspace, decreasing aircraft waiting times and making the industry more sustainable. The study also emphasizes the need for XAI (Explainable AI) so that people controlling machines can understand and have faith in the choices proposed by the technology. It states that AI not only has the potential to transform Brazil’s aviation sectors, but is also a crucial tool for operational safety. Therefore, more investment are recommended in AI technologies and in the development of professionals capable of dealing with this innovation.*

**Keywords:** Artificial Intelligence; Air Traffic; Digital Cockpit; Operational Safety; Sustainability.

ISSN 2763-7697

## **1 INTRODUÇÃO**

Este estudo considerará a IA no contexto de sua aplicação considerável, como um instrumento que auxilia no controle e gerenciamento do tráfego aéreo, com prioridade dada à segurança operacional e à eficiência das operações. O controle de tráfego aéreo existe principalmente para garantir que não haja colisões e para organizar o fluxo de aeronaves. Isso fica claro com a explicação de Soares (2019) que relata que “os operadores humanos são sobrecarregados e estão sob altos níveis de responsabilidade, especialmente em regiões de alto nível, como o controle de aproximação em São Paulo”.

Ainda segundo o mesmo autor, a dependência de operações manuais é um

dos fatores de estresse, juntamente com sua duração mais prolongada, o que causa fadiga nos controladores e aumenta a probabilidade de incidentes e falhas operacionais. Nesse cenário, a IA é uma inovação bastante promissora em operações, que pode aliviar a sobrecarga cognitiva ocorrida entre os operadores de tráfego (Soares, 2019).

Perante essa importância de estudo, a hipótese central deste estudo é como o uso da inteligência artificial no controle de tráfego aéreo pode auxiliar na redução de erros/equívocos humanos, procurando melhorar a segurança operacional e o aumento da eficiência na gestão do tráfego aéreo, que hoje encontra-se em constantes alterações e desafios devido a questões climáticas ou outras interferências humanas ou não.

Desse modo, levando em consideração exemplos de outras áreas (área da saúde, como exemplo) que estão utilizando a IA, pode-se acreditar que, ao automatizar tarefas repetitivas, ocorre uma redução de estresse e alivia a carga atribuída neste caso aos controladores de voo, o que pode contribuir para operações mais ágeis e seguras. Diante disso, a pergunta norteadora deste estudo será: como a IA (inteligência artificial) pode atuar no controle de tráfego aéreo, otimizando a segurança, melhorando a eficiência e reduzindo a carga que hoje recai sobre os controladores humanos?

Como resposta para a hipótese construída, o objetivo desta pesquisa será o de apresentar o impacto da IA quando utilizada como ferramenta auxiliar no controle de tráfego aéreo. Assim, esta pesquisa investigará as atuais aplicações da IA nesse setor, destacando os benefícios oferecidos aos controladores e os principais desafios e limitações que ainda persistem.

A escolha desse tema se justifica pela crescente complexidade e quantidade do tráfego aéreo brasileiro e estrangeiro, ao qual demandam soluções modernas/inovadoras para assegurar a eficiência e segurança dessas operações. Portanto, a implementação de IA nesse setor pode tornar-se uma grande oportunidade para modernizar as condições de trabalho e contribuir para a diminuição da carga mental exigida sobre os controladores, reduzindo o impacto do estresse e da sobrecarga física exigida, o que potencializará assim a segurança operacional em um setor indispensável para a mobilidade/locomoção interna e

externa do país.

Este estudo investiga o modo que a inteligência artificial pode atuar como uma ferramenta de auxílio e apoio para o controle de tráfego aéreo. Também pretende contribuir com o desenvolvimento de novas estratégias para uma integração efetiva da tecnologia, orientando futuras aplicações e políticas de automação que possam ampliar a sustentabilidade e a segurança na aviação civil/militar.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

As primeiras informações sobre IA ocorreram na década de cinquenta do século XX, quando Allan Turing, um matemático britânico, cogitou pela primeira vez a existência de uma “máquina inteligente”. Esse pensamento, até aquele momento uma ficção, foi caracterizado por outros cientistas da época como algo impressionante, tendo sido mencionado pela primeira vez em seu artigo “Computing Machinery and Intelligence”, publicado no mesmo ano.

### 2.1 SURGIMENTO, EVOLUÇÃO E CRIAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL - IA

O que acabou chamando a atenção de seus entusiastas foi a sua audaciosa questão, sendo ela “as máquinas podem pensar?” (Turing, 1950, p. 433). Esta questão seminal marcou, portanto, o início oficial da pesquisa em IA. Dessa forma, é a questão de introduzir o que o próprio autor chamou de Teste de Turing - um experimento para determinar se uma máquina poderia ou não ser feita para responder como um homem e no final tão intimamente semelhante que não se poderia distinguir entre as respostas de um ser humano e as de uma máquina.

Nesse contexto, o próprio Turing explica: “Proponho considerar a questão: 'As máquinas podem pensar?' Isso deve ser substituído por uma que seja mais direta: 'Existem máquinas imagináveis que fariam um bom trabalho imitando um humano?’” (TURING 1950, p. 433). Ele, desta maneira, define um critério que seria fundamental para o estudo da inteligência artificial.

O termo Inteligência Artificial não foi formalmente cunhado ainda por mais



três anos, mas somente em 1956, por John McCarthy na Conferência de Dartmouth. Com a influência de Turing, cientistas como Marvin Minsky, Nathaniel Rochester e Claude Shannon se reuniram para discutir a ideia de máquinas poderem ser construídas simulando a inteligência humana.

Dessa forma, McCarthy declarou em 1956 que “o propósito da conferência era explorar o desenvolvimento de computadores que iriam 'entender a linguagem humana, resolver problemas, aprender com a experiência, fazer conjecturas e provar ser tão corrigíveis quanto um ser humano faria.” Hans Moravec cita Turing junto com McCarthy no livro “Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence” (1988) o seguinte: Turing plantou as primeiras sementes intelectuais da IA, e McCarthy esclareceu a semente em um tópico focado, após o qual as pessoas poderiam realmente trabalhar em algoritmos e sistemas de solução de problemas (Moravec, 1988).

## 2.2 IA NO SETOR AEROESPACIAL

De acordo com Almeida (2021), as décadas de 1980 e 1990 testemunharam a penetração da IA na aviação e no ATC. Os primeiros assumiram a forma de sistemas de automação no monitoramento de dados de voo e auxílio às operações em direção a escolhas mais informadas em operações complexas, mas foi na década de 2000, junto com o aprendizado de máquina e redes neurais muito mais aprofundados, que a indústria aeroespacial levantou o peso com a IA. Em áreas de pesquisa, como de “sistemas de suporte à decisão”, a IA tem colaborado para seu uso efetivo em operações aeronáuticas, favorecendo para o aprimoramento da segurança e a eficiência operacional de modo mais ágil.

Empresas e organizações, como a NASA e a Administração Federal de Aviação dos EUA (FAA), foram pioneiras a respeito da implementação da Inteligência Artificial dentro dos sistemas de aviação. Segundo a empresa Mapfre Global Risksa (2024), a IA teve respostas rápidas em agir como uma solução para lidar com o crescente tráfego aéreo. Ela faz previsões sobre o fluxo de tráfego; oferece ajustes em tempo real naquele momento para evitar congestionamentos e reduz a chance de colisões. A Eurocontrol, agência europeia de segurança

aérea, também começou a adotar IA para auxiliar os controladores de tráfego aéreo na análise e interpretação de dados de monitoramento e previsão meteorológica.

### 2.3 RECEPÇÃO DA IA NO SETOR AÉREO BRASILEIRO

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), juntamente com o Departamento de Controle do Espaço Aéreo, mais conhecido como DECEA, via a necessidade de investir em novos projetos, especialmente no ano de 2010. Um dos maiores espaços aéreos do mundo consegue ser administrado pelo Brasil tendo uma enorme extensão territorial e grande importância na sua localização devido às rotas internacionais, então ANAC e DECEA começaram a adotar tecnologias de IA para ajudar no controle do tráfego e reduzir incidentes. A implantação da IA visa “aumentar a segurança; otimizar o uso do espaço aéreo e reduzir os tempos de espera”, conforme citado por um relatório da ANAC (ANAC, 2022).

Como no sistema SIRIUS do DECEA, a IA é utilizada para otimização de rotas e minimização dos tempos de espera de aeronaves. O sistema recebe instruções na forma de condições em tempo real que compreendem, entre outros, o clima e o fluxo de aeronaves, e as alimenta em algoritmos de aprendizado de máquina para execução, reduzindo assim o grau de instrução do usuário. Essas inovações demonstram como o Brasil tem acompanhado o cenário internacional ao implementar IA de forma progressiva no setor.

### 2.4 IMPACTOS E PERSPECTIVAS DA IA NO SETOR AÉREO BRASILEIRO

O futuro parece brilhante em relação ao uso de IA na aviação brasileira. A implementação da IA poderia revolucionar completamente o controle de tráfego, permitindo um monitoramento de rotas mais preciso e ágil para evitar congestionamentos e incidentes. Conforme apontado por Cocchioni *et al.*, (2023 p.6 ), um "sistema de controle de tráfego aéreo aprimorado por IA fornece previsibilidade e segurança em condições de intensa densidade de tráfego". No geral, o setor brasileiro tem um grande desafio a enfrentar devido às extensões do

campo e à diversidade climática; aqui, a IA pode servir como uma alternativa mais robusta e resiliente.

Neste caso, é provável que uma aplicação mais ampla da IA reduza a dependência de mão de obra, aumente a sustentabilidade por meio da otimização de rotas e economia de combustível bem como ainda mais a segurança. No entanto, para que essas tecnologias revolucionárias decolem, o Brasil precisa de investimentos substanciais, infraestrutura de dados em vigor e treinamento de profissionais que possam efetivamente incorporar esses sistemas avançados. Só então o trabalho humano aparecerá para que as máquinas funcionem efetivamente no contexto.

## 2.5 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA E DA IA NO CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO

O controle de tráfego aéreo antes das IAs era totalmente manual, o que exigia grande atenção dos controladores, os quais utilizavam mapas e comunicações verbais ou não verbais para controlar o tráfego. Embora a partir das décadas de 1960 e 1970 os sistemas de radar e automação tenham começado a entrar no setor, a gestão operacional permaneceu altamente dependente de humanos. Isso começou a mudar com a digitalização ocorrida nos anos 2000, a qual, juntamente com a Internet, trouxe a agilidade e o apoio dos sistemas de assistência ao controlador que, mesmo sendo bastante primitivos por não serem capazes de gerar pela sua própria autonomia, já agilizaram o processo.

Realizando um comparativo de sua evolução, a IA segundo, Cocchioni et al. (2023 p. 5), permitiu “[...] o monitoramento e a interpretação de dados complexos de tráfego e clima, identificando potenciais conflitos com mais precisão do que os humanos”. Essa capacidade, mesmo que preditiva, foi evoluindo ao longo dos anos de apoio para ferramenta indispensável na relação profissional e controle, uma vez que com sua utilização o controle e tráfego aéreo nunca esteve tão consciente e seguro de suas análises e decisões em tempo recorde.

## 2.6 IA NO AUMENTO DE SEGURANÇA E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

A utilização da inteligência artificial (IA) nas operações organizacionais é fundamental para otimizar a eficiência e a segurança, aplicando análises preditivas e abordagens automatizadas. Como enfatizam Babiloni e Aricó (2022, p. 15), a “análise de padrões e resolução autônoma de conflitos” conduzida pela IA pode reduzir significativamente o erro humano. Esta automação é particularmente benéfica em cenários de tráfego congestionado, onde algoritmos avançados como XGBoost e redes neurais podem calcular rotas ideais, que minimizam a latência, o consumo de combustível e as emissões de carbono.

Desta feita, os sistemas de apoio à decisão (SAD) podem prever e resolver conflitos antes que se tornem ameaças concretas. Um estudo da Eurocontrol (2022) ilustra como a inteligência artificial pode fornecer suporte em tempo real e fornecer recomendações para evitar colisões e gerir o tráfego de forma proativa. Contudo, para garantir a eficácia destes sistemas, eles devem trabalhar claramente e integrar princípios delimitados e definidos de inteligência artificial (XAI), o que permite que os operadores compreendam e confiem nas recomendações.

Além disso, a IA ajuda a monitorar continuamente as operações e a identificar gargalos em tempo real. De acordo com a Engineering Brasil (2023), o uso da inteligência artificial nas operações de negócios pode analisar/comparar grandes quantidades de dados ao criar oportunidades de melhoria, o que na prática atua na redução de tempo de inatividade das aeronaves, uma vez que são realizadas mais manutenções preventivas e menos manutenções corretivas, o que agiliza e otimiza o tempo de espera.

Tudo isso facilita a operação do controlador que, enquanto a IA realiza todas as análises necessárias dentro de um banco de dados, pode se concentrar em atividades mais estratégicas. Desta maneira, a inteligência artificial possui a capacidade de aprimorar a segurança ao detectar ameaças em tempo real, analisando dados de diversas fontes, permitindo respostas rápidas e proativas, reduzindo o risco e melhorando a proteção de ativos valiosos. Isso porque, hoje, com a disponibilidade de ferramentas avançadas de autenticação, como



reconhecimento facial e biometria, é inegável que vieram para facilitar e melhorar esse controle.

## 2.7 INTEGRAÇÃO HUMANO-IA E DESAFIOS ÉTICOS E OPERACIONAIS

O desafio mais proeminente deles seria o paradigma para colaboração humano-robô, mais especificamente em relação às interfaces homem-máquina. Considerações podem ser feitas com relação a esse fenômeno; a IFATCA acredita que, apesar de trazer eficiência, não há substituição aos seres humanos como um elemento crítico das operações.

Isso envolve a capacidade de um controlador experiente de "interpretar tons de voz e tomar decisões com base em julgamentos subjetivos", algo que a IA não possui (EUROCONTROL, 2022). Além disso, de acordo com Cocchioni *et al.*, (2023), isso deve tornar possível que o Sistema assuma tarefas humanas em vez de "substituir completamente suas ações", o que pode levar a uma "redução na autonomia operacional" e conseqüentemente faria o sistema falhar ainda mais durante uma emergência.

Outro ponto de discórdia acerca da IA é a opacidade dos algoritmos. Sistemas baseados em inteligência artificial, especialmente aprendizado de máquina, são "caixas pretas", e isso cria desconfiança entre os controladores. Babiloni e Aricó (2022) argumentam que a única maneira de resolver isso é por meio do investimento em IA explicável (XAI), pois permitirá que os controladores percebam por que certas recomendações foram feitas e confiem na tecnologia, uma questão de vital importância para operações relacionadas à segurança.

## 2.8 SUSTENTABILIDADE E O PAPEL DA IA NA REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

A modernização do controle de tráfego aéreo gira em torno da inclusão da sustentabilidade, enquanto a inteligência artificial assume bem sua posição no comando. Com uma pressão cada vez maior para a diminuição do impacto ambiental nas indústrias da aeronáutica, a modernização no CTA representa uma

das principais estratégias tecnológicas para otimização operacional e cumprimento de metas de sustentabilidade. Por exemplo, em 2022, a Agência Europeia para a Segurança da Aviação mencionou que a IA tem capacidade de calcular/alterar rotas com o objetivo de trazer grandes economias de combustível, conseqüentemente gerando uma quantidade significativa menor de carbono (EASA, 2022). A abordagem sustentável usa algoritmos de otimização e redes neurais, que processam grandes dados em tempo real para chegar às rotas mais curtas e melhores.

Além disso, os algoritmos podem prever o mau tempo, o congestionamento do tráfego, mudar rotas para contornar atrasos e diminuir os tempos de voo. Essas inovações não apenas melhoram a eficiência operacional das companhias aéreas, diz Cocchioni *et al.*, (2023), mas também são um meio de aviação mais ecológico. Os autores afirmam que a inteligência artificial apresenta uma "oportunidade enorme para transformar o setor de aviação em algo verdadeiramente sustentável", simplesmente porque cada minuto gasto no ar se traduz em economias enormes de combustível e um impacto ambiental minimizado.

Além disso, a antecipação de conflitos potenciais desencadeados pelo consumo de IA no gerenciamento de tráfego aéreo será possível. Recentemente, foi notícia que um controle mais flexível e refinado, uma acomodação rápida para mudanças repentinas nas condições de voo foram alcançadas devido à IA, disse o relatório da Eurocontrol.

De acordo com o relatório, a segurança pode ser preservada enquanto se colhem benefícios ambientais consideráveis ao permitir que a IA colabore com controladores humanos (EUROCONTROL, 2022). Esses avanços apoiados pela IA no CTA ressaltam a capacidade de resposta da indústria da aviação às demandas globais por emissões reduzidas. O futuro da IA na indústria representa um progresso estratégico em direção a uma aviação mais limpa e eficiente, atingindo o equilíbrio adequado entre segurança e conservação ambiental em um setor que é a tábua de salvação para a mobilidade global.

### 2.8.1 Perspectivas Futuras e Necessidades de Regulamentação

A crescente automação do controle de tráfego aéreo (CTA) com IA levanta a questão fundamental de regulamentação e legitimidade: como impor tecnologias tão sofisticadas. Apesar disso, com a evolução da tecnologia, é necessária uma reformulação para estabelecer novos regulamentos e normas na parte de gestão, com intenção de integrar aspectos técnicos e de segurança, mais complexos. Instituições como a Eurocontrol e a Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA), estão trabalhando em formas de aprimorar e criar novas regulamentações, ao oferecer uma base estável e confiável para uma integração mais efetiva da IA na indústria de aviação.

Segundo o relatório da Eurocontrol, a segurança e a transparência do ano de 2022 foram fundamentais para ganhar a confiança na utilização da IA como respostas não apenas entre os operadores, mas também entre os passageiros. Essas diretrizes visam aproximar a IA do CTA do ideal e minimizar qualquer risco, nutrindo uma situação em que tanto os operadores quanto os passageiros depositariam confiança na tecnologia (EUROCONTROL, 2022).

Isso deve fazer parte da regulamentação da explicabilidade da IA, um fator importante para aumentar a confiança e, portanto, o uso da IA por operadores humanos do futuro, de acordo com a Eurocontrol. Assistentes de cabine de IA transparentes podem permitir que futuros pilotos entendam por que eles recomendam certas ações a serem tomadas e evitar possivelmente se inscrever para ações erradas (Babiloni; Aricó, 2022).

Além disso, isso é identificado no relatório da EASA sobre proteção de dados e privacidade. A noção de privacidade de dados é novamente reiterada como um dos fatores cruciais que precisam ser incorporados para garantir estruturas regulatórias seguras e éticas sobre o uso de IA em CTA.

Ainda mais, o crescimento das viagens aéreas precisa que essas regras sejam globais, já que as viagens aéreas são entre diferentes países. A orientação exigiria o alinhamento de práticas entre agências como a EASA e a US FAA (Federal Aviation Administration) para padronizar a automação na aviação para maior segurança e operação facilitada de sistemas avançados de inteligência

artificial em diferentes países (EASA, 2022; FAA, 2023). Além disso, eles esclarecerão a responsabilidade legal em relação a falhas ou incidentes associados ao uso de IA, surgindo como uma nova fronteira na aviação moderna, onde há uma centralização crescente da automação.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho possui suas diretrizes principais caracterizadas de forma descritiva, baseando seus dados em informações qualitativas, o que significa dizer que seus procedimentos foram definidos metodologicamente em correspondência ao objetivo do estudo conforme explicam os autores Marconi e Lakatos (2017) e Gil (2010). Deste modo, todos os seus dados e informações coletados procuraram explorar a aplicação e os impactos da inteligência artificial em prol de otimizar a segurança e a eficiência no controle de tráfego aéreo.

#### 3.1 REVISÃO DA LITERATURA

- A revisão caracterizada como bibliográfica foi conduzida seguindo os passos propostos por Marconi e Lakatos (2017), sendo fiel ao tema e aos objetivos específicos definidos para a pesquisa.
- Para isso, foram realizadas buscas utilizando as seguintes palavras/frases chaves: “inteligência artificial na aviação”, “automação em aeronaves”, “segurança operacional na aviação”, “tecnologia glass cockpit” e “impactos da tecnologia artificial no espaço aéreo”, entre outras.
- A busca foi realizada em bases de dados científicas, como IEEE Xplore, Scopus, Web of Science e Google Scholar, empregando critérios e as palavras-chaves já mencionadas.
- A delimitação temporal foi para estudos publicados nos últimos 15 anos, dando preferência aos mais recentes para capturar o desenvolvimento de tecnologias de IA e automação na aviação.



### 3.2 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS MATERIAIS

- Relevância dos Materiais Selecionados para Objetivos de Pesquisa e Contribuição para uma Melhor Compreensão da Aplicação de IA em Aeronaves Pequenas. A análise foi feita considerando os critérios definidos por Gil (2010) que deu prioridade a estudos originais, revisões sistemáticas, teses e publicações técnicas relevantes que trazem uma visão geral sobre o tópico.
- Este grupo estava particularmente interessado em artigos sobre segurança e desempenho operacional com princípios de IA, e aqueles artigos de impacto sobre a automação de aeronaves muito leves.

### 3.3 SÍNTESE E ORGANIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram coletados e organizados em resposta ao problema de pesquisa, seguindo as sugestões de Marconi e Lakatos (2017) sobre como preparar um relatório de pesquisa.

Tabelas e gráficos foram desenvolvidos na direção de ajudar a visualizar e compreender melhor os principais progressos e problemas da IA na vigilância e cautela de pequenas aeronaves.

Logo, a metodologia utilizada para conduzir a pesquisa permitiu uma análise detalhada e abrangente das vantagens e desafios que a IA apresenta no setor de aviação, com ênfase especial em aeronaves de pequeno porte, o que aumenta ainda mais o nível de conhecimento, a identificação de práticas mais seguras e eficientes no uso de tecnologias de automação na aviação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo analisado e discutido o objetivo deste artigo de uma forma literária, com base principalmente no estudo de Almeida (2021), a presente pesquisa teve como objetivo explorar as implicações da IA no controle de pequenas aeronaves.

Tal escolha permitiu ampliar e suplementar o tópico deste artigo, fornecendo um exemplo concreto que incorporou a automação em avanços substanciais em segurança e eficiência operacional no setor de aviação. Além disso, Almeida (2021) se concentrou em evidências empíricas pequenas, mas de suporte, da eficácia da IA, com níveis aprimorados de segurança e carga cognitiva reduzida entre pilotos e controladores de aeronaves, especialmente as pequenas.

Considerando os desafios enfrentados pelos humanos no gerenciamento do controle de tráfego aéreo, também é relevante vincular a automação com a carga cognitiva e a segurança. Estudos como os de Ned (2016) e Ferreira (2022) ajudam a entender a dimensão da fadiga e do estresse dos controladores de tráfego aéreo, que poderiam ser reduzidos por meio de tecnologias interativas de IA. Ned (2016) argumenta que a carga de trabalho e a responsabilidade sobre os controladores podem ser reduzidas com mais uso da automação, o que lhes permitiria mais liberdade para decidir e, portanto, aumentar a segurança nas operações. Isso, ele argumenta, faz com que longos turnos de trabalho e pressão sustentada se tornem cansativos, um fator que reduz o desempenho humano e também poderia ser reduzido com automação inteligente, como tecnologias de IA que também estão sendo implementadas em pequenas aeronaves. Como no caso do Cessna C172 Skyhawk e Cirrus SR20/22, que integram IA para melhorar a segurança de voo e apoiar a tomada de decisão (Castro, 2019; Campos, 2018).

Além disso, o estudo de Ferreira (2022) revela que quando turnos longos estão prestes a terminar, as capacidades cognitivas e motoras dos controladores de tráfego aéreo diminuem drasticamente. Falhas de controle podem resultar disso, constituindo riscos potenciais à segurança. Da mesma forma, em aeronaves de pequeno porte, o uso de IA reduziu a carga cognitiva na pilotagem e aprimorou a navegação e o monitoramento em tempo real para reduzir a sobrecarga mental e as respostas motoras mais lentas, ambos aspectos críticos do desempenho dos pilotos e controladores (Pecharromán; Veiga, 2018; Scoda, 2014).

Portanto, nesta conta da análise de Almeida (2021), que segue de perto os trabalhos estabelecidos por Ned (2016) e Ferreira (2022), a automação pode ser tomada como um parceiro estratégico para reduzir a fadiga e aumentar a segurança. Níveis mais baixos de automação foram testemunhados com o Cessna

C172 e o Cirrus SR20/22, especialmente em áreas de alto *throughgagement*, o que pode aliviar algumas cargas cognitivas tanto do piloto quanto do controlador de tráfego aéreo.

No entanto, é igualmente importante encontrar um equilíbrio entre intervenção humana e automação de forma que haja sempre um operador bem treinado e preparado para interagir adequadamente com as tecnologias. Esta é uma garantia de segurança e eficácia a longo prazo neste setor, especialmente em circunstâncias de alta demanda. Embora muito útil, a automação não substitui o julgamento humano; este último é importante quando se trata de lidar com, por exemplo, situações inesperadas ou complexas.

Considerando o supracitado, a tabela a seguir descreve as principais capacidades e contribuições da IA especificamente no controle de pequenas aeronaves, incluindo micro-UAVs. Isso está de acordo com as descobertas do estudo de Almeida (2021). Essas informações podem mostrar como as tecnologias de IA podem aumentar a segurança e a eficiência, reduzindo a carga cognitiva dos pilotos e permitindo a tomada de decisões em tempo real.

Resumindo as palavras de Almeida (2021), a análise de pequenas aeronaves revela o potencial da IA na transformação da aviação em direção a operações mais seguras e informadas. O Cessna C172 e o Cirrus SR20/22 são exemplos evidentes por meio dos quais os modelos podem servir para impulsionar a automação para otimizar as operações e diminuir a sobrecarga cognitiva dos pilotos, oferecendo monitoramento automatizado em tempo real. Essas eficiências trazidas pela IA, baseadas em navegação mais precisa e suporte à tomada de decisões, vêm ainda mais à tona. Tais avanços já estão caminhando para uma grande mudança, na qual a navegação deve se tornar mais segura e eficiente, principalmente em pequenas aeronaves (Quadro 1).

No entanto, como enfatizado por Ned (2016) e Ferreira (2022), a automação não é a panaceia definitiva para substituir a mão de obra. Ambos os estudos elaboram sobre a importância do complemento da automação com o controle humano, embora com alívio da fadiga do operador e da carga cognitiva; eles têm que ser bem apoiados por treinamento adequado e sempre também contingentes à presença do humano para a segurança das operações.

Quadro 1 – Características e Contribuições da IA em Aeronaves de Pequeno Porte

MODELO DE AERONAVE	CARACTERÍSTICAS	TECNOLOGIA IA	BENEFÍCIOS E DESAFIOS
<b>Cessna C172 Skyhawk</b>	Monomotor com glass cockpit digital, motor de 180 HP, capacidade para três passageiros e um piloto	Piloto automático e navegação assistida por IA	Aumento da segurança de voo, melhorando a consciência situacional e suportando a tomada de decisão (CAMPOS, 2018).
<b>Cirrus SR20/22</b>	Painel 100% digital, capacidade de operar em pistas curtas, acomoda quatro pessoas	IA para monitoramento e controle do voo	Integração plena com IA; desafios incluem a necessidade de treinamento constante dos operadores (CASTRO, 2019).
<b>Amazon</b>	Monomotor com glass cockpit, GPS e indicador de temperatura	Navegação e rastreamento GPS	Aumenta a precisão do monitoramento; IA limitada a informações de voo específicas (Pecharromás; Veiga, 2018).
<b>Paradise P1</b>	Ultraligeiro com dois assentos, tela Dynon Skyview e piloto automático	SUITE (sistema único integrado de tramitação eletrônica) navegação com IA	Melhoria no controle de rota, maior segurança em condições de baixa visibilidade; IA restrita à aviação de pequeno porte (Scoda, 2014).

Fonte: Adaptado de Almeida (2021), Castro (2019), Campos (2018), Pecharromás e Veiga (2018), Scoda (2014).

A união entre tecnologia e expertise humana é realmente essencial para a obtenção de benefícios de longo prazo na aviação em geral e mais particularmente quando a pressão é muito alta ou em caso de um evento inesperado. Portanto, segundo Almeida (2021), Ned (2016) e Ferreira (2022) discutiram, a automação como um parceiro estratégico tem a capacidade no sistema de trabalho de reduzir a fadiga, multiplicar a segurança e garantir a eficiência nas operações de aviação.



Mas é uma situação em que pilotos e controladores sempre conseguem interagir adequadamente com tais tecnologias para garantir a segurança e a eficiência das operações a longo prazo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo conseguiu apresentar uma visão ampla sobre o uso da IA no controle e gerenciamento de tráfego aéreo, dando foco principalmente à segurança e eficiência da tecnologia. Desde que os sistemas de suporte à decisão e as operações de voo automatizadas surgiram, observa-se que a IA é uma resposta sólida para o surgimento de muitos desafios na aviação, como a sobrecarga dos controladores, além das demandas adicionais por segurança e sustentabilidade.

O histórico da pesquisa mostra que a inteligência artificial se expandiu a partir de seu atributo fundamental de ter capacidades de monitoramento e previsão em tempo real. No tráfego aéreo, essas capacidades dizem respeito à habilidade de calcular rotas sob condições de segurança e eficiência máximas, a fim de minimizar acidentes e otimizar os melhores cenários, além de garantir eficiência com segurança. Essa contribuição tem sido positiva como resultado do aprimoramento digital de conveses de voo e rotas por IA para a saúde dos controladores.

Além disso, a influência da IA no setor de aviação brasileiro foi um tema abordado. Ferramentas como o SIRIUS, do DECEA, são implementadas para otimização de rotas, reduzindo o tempo médio de voo das aeronaves. O aumento da eficiência do espaço aéreo está intimamente relacionado à sustentabilidade, pois a IA tem a capacidade de encurtar a duração dos voos, consequentemente reduzindo o consumo de combustível e as emissões de carbono. Embora o Brasil esteja acompanhando o resto do mundo nesse campo, a crescente implementação da tecnologia exige mais investimentos em infraestrutura e recursos humanos, assim como regulamentação, para concretizar os benefícios.

Outro elemento importante da construção é o foco em XAI (IA explicável), para garantir que as recomendações dos sistemas sejam tais que os operadores

humanos possam entendê-las e confiar nelas – particularmente vital na tomada de decisões de alta frequência com base em fatos em tempo real. Isso, como resultado, aponta para a necessidade de a pesquisa colocar estruturas regulatórias bastante rigorosas em torno da proteção de dados, transparência e ética no uso da IA, para promover ambientes seguros e confiáveis para todos. Devido à complexidade dessas novas tecnologias, sugere-se constante estudos e adaptações para as novas ferramentas de IA.

Esta pesquisa finalmente fornece evidências para a teoria inicial de que a IA é um aspecto muito importante da modernização da indústria de tráfego aéreo. Isso tem a capacidade de melhorar a segurança, eficiência e sustentabilidade e, portanto, recomenda-se o esforço da indústria da aviação no desenvolvimento posterior dessas tecnologias e na criação de formas seguras e éticas de integração para garantir que o Brasil continue sendo parte da comunidade global da aviação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Idlom Fernando dos Reis. **O uso da inteligência artificial aplicada à aviação de médio e pequeno portes e a sua contribuição para segurança de voo**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Aeronáuticas) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola de Gestão e Negócios, Goiânia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/2173>. Acesso em: 30 out. 2024.

ANAC, **Agência Nacional de Aviação Civil**. Relatório Anual de Segurança Operacional da Aviação Civil. Brasília, DF: ANAC, 2023.

BABILONI, Fabio; ARICÓ, Pietro. **A Survey on Artificial Intelligence (AI) and eXplainable AI in Air Traffic Management: Current Trends and Development with Future Research Trajectory**. Applied Sciences, v. 12, n. 3, p. 1295, 2022. DOI: 10.3390/app12031295.

CAMPOS, A. C. V. de. **Conhecimento geral das aeronaves (asas fixas)**. Palhoça: UnisulVirtual, 2018.

CASTRO, C. S. de. **Displays eletrônicos em aeronaves de pequeno porte**. 2019. Monografia (Bacharel em Ciências Aeronáuticas) – Curso de Ciências Aeronáuticas, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, SC.

COCHIONI, Matteo; BONELLI, Stefano; WESTIN, Carl; FERREIRA, Ana; CAVAGNETTO, Nicola. **Guidelines for Artificial Intelligence in Air Traffic Management: A Contribution to EASA Strategy.** In: AHFE Conference Series, 2023, New York. Proceedings... New York: AHFE Open Access Journal, 2023. p. 78-85. DOI: 10.54941/ahfe1003008.

ENGINEERING BRASIL. **O uso da inteligência artificial para melhorar a eficiência operacional.** Engineering Brasil, São Paulo, 3 abr. 2023. Disponível em: <https://engineeringbrasil.com>. Acesso em: 31 out. 2024.

EUROCONTROL. **Digitalisation and AI in Air Traffic Control: Balancing Innovation with the Human Element.** Disponível em: <https://www.eurocontrol.int>. Acesso em: 30 out. 2024.

FERREIRA, Ivanir. **Controladores de tráfego aéreo sofrem de fadiga mental e baixa resposta motora no final do turno.** Jornal da USP, 29 nov. 2022. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-da-saude/controladores-de-trafego-aereo-sofrem-de-fadiga-mental-e-baixa-resposta-motora/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

IEEE Xplore. **Review on Artificial Intelligence Techniques for Improving Representative Air Traffic Management Capability.** BIAI Journals & Magazine, 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9940157>. Acesso em: 30 out. 2024.

MAPFRE GLOBAL RISKS. **Inteligência artificial: ruptura e desafio na aviação.** Disponível em: <https://www.mapfreglobalrisks.com/pt-br/gerencia-riscos-seguros/estudos/inteligencia-artificial-ruptura-desafio-aviacao/>. Acesso em: 30 out. 2024.

MDPI. **Explanation of Machine-Learning Solutions in Air-Traffic Management.** Applied Sciences, v. 12, n. 3, p. 1240-1255, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com>. Acesso em: 30 out. 2024.

MORAVEC, H. **Mind Children – The Future of Robot and Human Intelligence.** Cambridge: Harvard University Press, 1988.

NED, Gustavo Carney. **Fadiga nos Controladores de Tráfego Aéreo: Uma Realidade**.  
Revista Conexão Sipaer. Disponível:  
<http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/viewFile/382/325>.  
Acesso: 28 de nov. 2024.

PECHARROMÁN, P. M.; VEIGA, R. **Estudo sobre a indústria brasileira e europeia de veículos aéreos não tripulados.** 2018. Disponível em: [www.mdic.gov.br/imagens/publicacao\\_DRONES-20161130-20012017-web.pdf](http://www.mdic.gov.br/imagens/publicacao_DRONES-20161130-20012017-web.pdf).

SCODA. **Dynamic WT9. 2014.** Disponível em:  
<https://www.scodaeronautica.com.br/avioes/index.php?pagina=dynamic-site>.

SOARES, Aroldo Soares da Costa Filho. **Refreshment de Regulamento de Tráfego Aéreo para PC/IFR/PLA/DOV - Avião e Helicóptero.** 4. ed. São Paulo: Editora Espaço Aéreo, 2023.

