



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
DIVISÃO DE ENSINO  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2025

**NATÁLIA MENDES DUTRA, Cap Esp CTA**

**Inteligência Artificial no Planejamento do Espaço Aéreo: Contribuições para a segurança  
e eficiência da aviação**

Rio de Janeiro

2025

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
DIVISÃO DE ENSINO  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2025

NATÁLIA MENDES DUTRA, Cap Esp CTA

**Inteligência Artificial no Planejamento do Espaço Aéreo:** Contribuições para a segurança e eficiência da aviação

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Liderança com Ênfase em Gestão no COMAER.

Linha de Pesquisa: Uso da Inteligência Artificial  
Orientador: Carlos Eduardo José da Silva, Ten Cel  
R1 Esp Av

Rio de Janeiro

2025

**NATÁLIA MENDES DUTRA, Cap Esp CTA**

**Inteligência Artificial no Planejamento do Espaço Aéreo: Contribuições para a segurança e eficiência da aviação**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica.

Aprovado por:

---

Presidente, Carlos Eduardo José da Silva, Ten Cel R1 Esp Av - EAOAR

---

Tháís Lemgruber Americo, Cap AV - EAOAR

Rio de Janeiro

2025

## RESUMO

O planejamento do espaço aéreo é uma atividade estratégica que visa garantir a segurança e a eficiência das operações aéreas no Brasil. Diante da crescente complexidade dessa tarefa, devido à análise de múltiplos fatores, a Inteligência Artificial (IA) surge como uma tecnologia promissora, capaz de fortalecer os processos decisórios e reduzir a dependência exclusiva da análise humana. Defende-se, portanto, a tese de que a utilização da IA irá aprimorar o planejamento do espaço aéreo brasileiro, devido à sua capacidade de processar grandes volumes de dados e propor soluções. Primeiramente, argumenta-se que a IA contribuirá para a definição de trajetórias de chegadas e saídas de aeronaves que aumentem a segurança operacional do espaço aéreo, com destaque para o uso de sistemas multiagentes e técnicas de aprendizado por reforço profundo, que permitem prever conflitos e propor trajetórias mais seguras. O segundo argumento aborda a utilização da IA para auxiliar na definição de trajetórias mais eficientes, por meio da análise da performance das aeronaves e de técnicas de subida e descida contínua, utilizando ferramentas como aprendizado de máquina e algoritmos de *big data*. Com base nesses argumentos, conclui-se que a utilização da IA no planejamento do espaço aéreo representa um avanço relevante para a aviação nacional, bem como está alinhada às diretrizes do Plano Geral de Controle do Espaço Aéreo (PGCEA) e às estratégias da Força Aérea Brasileira (FAB). Além disso, seu uso pode ser estendido a outras áreas operacionais, promovendo maior integração, modernização e eficiência no setor aeronáutico brasileiro.

**Palavras-chave:** planejamento do espaço aéreo; inteligência artificial; segurança; eficiência.

## 1 INTRODUÇÃO

O Controle do Espaço Aéreo é uma atividade fundamental do Comando da Aeronáutica (COMAER), que contribui para atingir a missão de garantir a soberania do espaço aéreo brasileiro e a integração do território nacional. Para orientar sua evolução, o Plano Geral de Controle do Espaço Aéreo (PGCEA) estabelece diretrizes estratégicas, dentre as quais se destaca a otimização do espaço aéreo. Esse processo busca aprimorar continuamente a eficiência e a segurança das operações aéreas, assegurando o desenvolvimento da indústria do transporte aéreo nacional (Brasil, 2020).

Nesse contexto, o planejamento do espaço aéreo surge como uma atividade estratégica para a organização e o gerenciamento do espaço aéreo. Ele permite o desenvolvimento de cenários operacionais que atendam aos objetivos estratégicos de interesse do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), entre eles a melhoria da segurança operacional, o aumento da capacidade de tráfego aéreo e a definição de trajetórias de voo mais precisas e eficientes.

O planejamento do espaço aéreo envolve a análise detalhada de múltiplos fatores, incluindo infraestrutura aeroportuária, fluxos de tráfego, tipos de aeronaves, condições climáticas e capacidade de navegação. Seu principal objetivo é a definição de rotas de voo, trajetórias de chegada e saídas das aeronaves, além da setorização do espaço aéreo, que promovam uma circulação aérea segura, eficiente e sustentável.

Essa atividade requer uma equipe interdisciplinar composta por planejadores de espaço aéreo, elaboradores de procedimentos de navegação aérea, controladores de voo, pilotos, entre outros especialistas (Brasil, 2021b). No entanto, conciliar os diferentes interesses e restrições dos envolvidos representa um desafio significativo, cujo resultado depende diretamente da expertise da equipe responsável.

Diante desse cenário, a Inteligência Artificial (IA) surge como uma ferramenta promissora que tem o potencial de transformar a indústria da aviação, melhorando o desempenho operacional, aumentando a segurança e otimizando o uso do espaço aéreo (Eurocontrol, 2020).

A Força Aérea Brasileira (FAB) também tem promovido a adoção dessa tecnologia, destacando, em seu Plano Estratégico Militar da Aeronáutica (PEMAER), a necessidade de investir em pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de Inteligência Artificial (Brasil, 2024). Diante desse cenário, defende-se que a utilização da IA irá aprimorar o planejamento do espaço aéreo brasileiro.

Inicialmente, argumenta-se que essa tecnologia contribuirá para a definição de trajetórias de chegadas e saídas de aeronaves que aumentem a segurança operacional do espaço aéreo, pois sua capacidade de processar grandes volumes de dados lhe permite identificar conflitos e propor trajetórias otimizadas. Adicionalmente, a IA auxiliará na definição de trajetórias mais eficientes, uma vez que ao analisar o desempenho das aeronaves irá propor trajetórias que otimizem o consumo de combustível e reduzam as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

## 2 DESENVOLVIMENTO

O planejamento do espaço aéreo é um processo estruturado que pode ser dividido em quatro fases: planejamento, *design*, validação e implementação. A primeira fase consiste na identificação das necessidades operacionais e dos objetivos; a segunda refere-se à elaboração de alternativas para a estruturação do espaço aéreo. A fase de validação envolve a realização de testes, por meio de simulações e análises em ambiente operacional e a última fase consiste na implementação e monitoramento das mudanças (Brasil, 2021b).

A definição das trajetórias de chegada e saídas de aeronaves ocorre na fase de *design*, sendo fundamental para a organização do espaço aéreo. Nessa etapa, é necessário observar alguns princípios como: minimizar o impacto das mudanças de pista e dos efeitos meteorológicos, considerar picos sazonais de tráfego e otimizar o uso da infraestrutura e dos meios de comunicação disponíveis para o espaço aéreo considerado.

Além disso, a análise da estrutura de rotas, dos procedimentos de navegação e da setorização do espaço aéreo revela-se essencial para garantir um planejamento eficaz. Conforme a complexidade do espaço aéreo, devem ser avaliadas as técnicas de organização mais adequadas, visando à melhor distribuição do tráfego.

Nesse contexto, é imprescindível assegurar que as trajetórias sejam viáveis e compatíveis reduzindo a complexidade, garantindo a segurança operacional. Ademais, seu desenvolvimento deve considerar a performance das aeronaves, levando em conta variáveis como velocidade e razões de subida e descida, para prover trajetórias mais eficientes em termos de emissões de CO<sub>2</sub> (Brasil, 2021a).

## 2.1 CONTRIBUIÇÃO DA IA PARA A SEGURANÇA OPERACIONAL DO ESPAÇO AÉREO

A segurança operacional é uma premissa no planejamento do espaço aéreo e consiste na minimização de riscos de colisão entre aeronaves e outros incidentes. Durante a definição das trajetórias de chegada e saídas de aeronaves, fatores como a quantidade de cruzamentos entre trajetórias, a garantia da separação mínima entre elas e o volume de tráfego podem influenciar diretamente a segurança operacional.

Nesse contexto, estudos apontam a viabilidade do uso da Inteligência Artificial (IA) na análise e gestão do tráfego aéreo. Dib, Cardoso e Weigang (2005), por exemplo, propuseram um sistema baseado em ferramentas de inteligência artificial, através de sistemas multiagentes, com a capacidade de processamento distribuído via *Grid* Computacional, com o objetivo de aprimorar o gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo (ATFM).

Sistemas multiagentes são compostos por múltiplos agentes interativos que percebem o ambiente, tomam decisões e executam ações para atingir objetivos. Aplicam-se a problemas complexos que demandam uma abordagem distribuída (Wooldridge, 2009). Já o *Grid* Computacional é uma infraestrutura de *hardware* e *software* que viabiliza um acesso seguro, distribuído e de custo reduzido a recursos computacionais de alto desempenho (Foster, 2002).

O sistema de sincronização e gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo tem capacidade de prever congestionamentos e propor soluções que otimizem o fluxo, assegurando a eficiência operacional sem comprometer a segurança (Dib; Cardoso; Weigang, 2005). Essa abordagem de IA mostra-se pertinente ao planejamento do espaço aéreo, que, assim como o ATFM, exige a análise simultânea de múltiplas variáveis mantendo a segurança operacional.

Wang *et al.* (2019) também conduziram uma pesquisa voltada à mitigação de conflitos entre aeronaves no controle de tráfego aéreo, utilizando técnicas de detecção e resolução de conflitos (CD&R) com o apoio de algoritmos que geram trajetórias otimizadas como referência para os controladores. Por meio de simulações, foi demonstrado que o uso da técnica de IA de aprendizado por reforço profundo (*Deep Reinforcement Learning* – DRL) é eficaz na geração de trajetórias otimizadas e na resolução de conflitos.

Percebe-se que essa tecnologia pode ser aplicada igualmente ao planejamento do espaço aéreo para a melhoria da segurança operacional, pois utilizando dados históricos de fluxo de tráfego e a previsão do novo cenário será possível prever os conflitos e propor trajetórias mais seguras.

Face ao exposto, fica evidente que os sistemas baseados em Inteligência Artificial, como os sistemas multiagentes executados em *Grid* Computacional e as técnicas de DRL, oferecem

soluções eficazes para a definição de trajetórias de chegadas e saídas de aeronaves que aumentem a segurança operacional do espaço aéreo. Os sistemas multiagentes permitem a coordenação entre múltiplos elementos do espaço aéreo, otimizando as trajetórias sem comprometer os padrões de separação entre aeronaves, o que é essencial para a segurança operacional. Já as técnicas de DRL demonstraram, por meio de simulações, a capacidade de prever situações de conflito e gerar trajetórias alternativas mais seguras, com base em dados históricos e cenários projetados.

Diante da contribuição dessas tecnologias para a melhoria da segurança operacional, torna-se evidente que a utilização da IA irá aprimorar o planejamento do espaço aéreo. Sua capacidade de processar grandes volumes de dados, identificar conflitos e propor soluções seguras e otimizadas fortalece os processos decisórios e reduz a dependência exclusiva da análise humana. Assim, o uso da IA no planejamento do espaço aéreo não apenas eleva os padrões de segurança, como também contribui para uma gestão mais eficiente e precisa do espaço aéreo.

## 2.2 AUXÍLIO DA IA PARA DEFINIÇÃO DE TRAJETÓRIAS MAIS EFICIENTES

Trajetoórias de voo econômicas e sustentáveis são fundamentais para assegurar o desenvolvimento da aviação nacional. Atualmente, o consumo de combustível representa cerca de 40% dos custos operacionais das companhias. Desde 2020, o preço do combustível teve um aumento superior a 50%, impulsionado por crises internacionais, como a guerra na Ucrânia (França, 2024). Nesse contexto, a busca por estratégias de economia de combustível é indispensável para garantir a competitividade do setor.

Adicionalmente, a sustentabilidade tem sido objeto de compromissos internacionais, como o firmado pelo Brasil em 2022, durante a 41ª Assembleia da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI). Esse acordo visa à redução de emissões de CO<sub>2</sub>, com meta de crescimento neutro a partir de 2027 e a compensação total de emissões até 2050 (ANAC, 2022).

Estudos sobre otimização do uso de combustível se dividem em quatro grandes áreas: tecnologia e design de aeronaves, medidas políticas e socioeconômicas, combustíveis alternativos e, por fim, operação das aeronaves e infraestrutura aeronáutica (Singh; Sharma, 2015). Nesse último campo, percebe-se a importância do planejamento do espaço aéreo para garantir trajetórias mais eficientes que sejam econômicas e reduzam a emissão de CO<sub>2</sub>.

Nessa fase, é essencial considerar variáveis como perfil vertical de voo e o desempenho das aeronaves. Voos nivelados em baixas altitudes aumentam o consumo de combustível, sendo

preferíveis operações de subida e descida contínua, conforme as técnicas de *Continuous Climb Operations* (CCO) e *Continuous Descent Operations* (CDO) (OACI, 2024).

A técnica de CDO permite descidas otimizadas com tração mínima dos motores, mantendo por mais tempo níveis de voo mais econômicos. Já a técnica de CCO permite que as aeronaves atinjam e mantenham o nível de voo ótimo sem interrupções. Ambas são essenciais para reduzir consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> (OACI, 2024).

Nesse cenário, a IA oferece avanços significativos para a aviação, pois possibilita a análise detalhada da performance das aeronaves que pretendam operar em determinado espaço aéreo, viabilizando a definição de trajetórias mais eficientes e compatíveis com os diversos tipos de aeronaves.

As empresas aéreas têm investido no uso de IA para aprimorar o gerenciamento de combustível. Um exemplo dessa aplicação é o *MyFuelCoach*, desenvolvido pela *OpenAirlines*. Trata-se de um *software* baseado em IA que fornece aos pilotos recomendações personalizadas para otimizar as operações de voo, visando a redução do consumo de combustível (Openairlines, 2023).

Para alcançar esses resultados, o *MyFuelCoach* utiliza aprendizado de máquina e algoritmos de *big data* para analisar os dados de voo em tempo real e identificar oportunidades de economia de combustível, consequentemente reduzindo o impacto ambiental (Openairlines, 2023). Essa abordagem demonstra o potencial da IA para propor trajetórias mais econômicas e sustentáveis com base na análise de dados de performance de aeronaves.

Os sistemas inteligentes, ao integrar recursos como aprendizado de máquina e algoritmos de *big data*, possibilitam uma análise mais precisa da performance das diferentes aeronaves que operem em determinado espaço aéreo. Com isso, são capazes de definir perfis verticais ótimos que atendam da melhor forma a todos, reduzindo o consumo de combustível e minimizando o impacto ambiental.

Dessa forma, ao auxiliar na definição de trajetórias mais eficientes, a IA revela-se uma ferramenta essencial no aprimoramento do planejamento do espaço aéreo. A capacidade desses sistemas de considerar múltiplas variáveis operacionais, como o perfil ótimo de descida e subida das aeronaves e as restrições do espaço aéreo, assegura a elaboração de trajetórias mais econômicas e ambientalmente responsáveis. Assim, evidencia-se que a aplicação da IA não apenas contribui para atender às exigências de eficiência do setor, mas também consolida a tese de que a utilização da IA irá aprimorar o planejamento do espaço aéreo brasileiro.

### 3 CONCLUSÃO

O planejamento do espaço aéreo é uma atividade estratégica para a organização e o gerenciamento do espaço aéreo que envolve a análise detalhada de diversos fatores que permitem a definição de rotas de voo, trajetórias de chegada e saídas das aeronaves, bem como a setorização do espaço aéreo, com o objetivo de promover uma circulação aérea segura e eficiente.

Nesse sentido, o primeiro argumento demonstra que a IA contribuirá para a definição de trajetórias de chegada e saídas de aeronaves que aumentem a segurança operacional do espaço aéreo. Isso será possível por meio de tecnologias como sistemas multiagentes e aprendizado por reforço profundo (DRL), que permitem a detecção e resolução de conflitos entre aeronaves, otimizando as trajetórias de chegada e saídas das aeronaves sem comprometer a segurança.

O segundo argumento enfatiza o auxílio da IA na definição de trajetórias mais eficientes. Ao analisar o desempenho das aeronaves e otimizar os perfis verticais de voo, com base nas técnicas de operações de subida e descida contínuas (CCO e CDO), a IA irá contribuir para a redução do consumo de combustível e das emissões de CO<sub>2</sub>. Ferramentas como o *MyFuelCoach* demonstram essa capacidade ao analisar dados de voo e identificar trajetórias que permitam a economia de combustível e, conseqüentemente, a redução de emissões de CO<sub>2</sub> utilizando aprendizado de máquina e algoritmos de *big data*.

Diante desses argumentos, reafirma-se que a utilização da IA irá aprimorar o planejamento do espaço aéreo brasileiro, pois contribuirá tanto para a definição de trajetórias que aumentem a segurança operacional quanto para a definição de trajetórias mais eficientes.

Ademais, a aplicação da IA na otimização do espaço aéreo, alinha-se às diretrizes estratégicas do PGCEA, resultando no aprimoramento contínuo da eficiência e da segurança das operações aéreas, além de assegurar o desenvolvimento da indústria do transporte aéreo nacional. As discussões sobre a aplicação da IA no planejamento do espaço aéreo, reforçam a estratégia da FAB de investir nesta área, conforme destacado no PEMAER, e têm implicações significativas para outras áreas da FAB, bem como para a indústria aeronáutica como um todo.

A integração da IA pode ser estendida a outras atividades operacionais, como a manutenção de aeronaves, melhorando a eficiência geral das operações militares. Além disso, a colaboração entre a FAB e empresas aéreas pode acelerar a adoção de tecnologias de IA em todo o setor aéreo, promovendo um ambiente mais seguro, eficiente e sustentável para a aviação nacional. Portanto, é fundamental o desenvolvimento de tecnologias de IA, a fim de garantir um futuro mais avançado, integrado e moderno para o espaço aéreo brasileiro.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. Brasil firma compromisso para aviação sustentável junto à OACI. **Gov.br**, [s.l.], 07 out. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2022/brasil-firma-compromisso-para-aviacao-sustentavel-junto-a-OACI>. Acesso em: 30 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria DECEA nº 145/DGCEA, de 05 de outubro de 2021. Aprova a edição do MCA 100-19, Manual que dispõe sobre “Conceito de Espaço Aéreo”. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n.198, p. 265-338, 28 out. 2021a. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/mca-100-19>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria DECEA nº 146/DGCEA, de 05 de outubro de 2021. Aprova a reedição do ICA 100-44, que estabelece os critérios para o desenvolvimento de conceito de espaço aéreo. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n.198, p. 221-264, 28 out. 2021b. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ICA-100-44>. Acesso em: 25 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria EMAER nº 85/CEMAER, de 24 de novembro de 2020. Aprova o Plano Geral de Controle do Espaço Aéreo. **Boletim do Comando da Aeronáutica**. Rio de Janeiro, n. 216, p. 202-251, 27 nov. 2020. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/PCA-11-368>. Acesso em: 29 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria GABAER nº 1.453/GC3, de 5 de junho de 2024. Aprova a edição do Plano Estratégico Militar da Aeronáutica. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 107, p. 87-137, 10 jun. 2024. Disponível em: [https://www.fab.mil.br/Download/arquivos/PEMAER\\_2024\\_2033.pdf](https://www.fab.mil.br/Download/arquivos/PEMAER_2024_2033.pdf). Acesso em: 20 mar. 2025.

DIB, Marcos Vinícius Pinheiro; CARDOSO, Daniel Amaral; WEIGANG, Li. Sistema para sincronização e gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo multi-agentes. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, 2005. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/91>. Acesso em: 23 mar. 2025.

FOSTER, Ian. The grid: A new infrastructure for 21st century science. **Physics today**, [s.l.], v. 55, n. 2, p. 42-47, 2002. Disponível em: <https://pubs.aip.org/physicstoday/article/55/2/42/910540>. Acesso em: 27 mar. 2025.

FRANÇA, André. Combustível, dólar e geopolítica: passagens aéreas voam antes das férias. **InfoMoney**, São Paulo, 20 dez. 2024. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/consumo/combustivel-dolar-e-geopolitica-passagens-aereas-voam-antes-das-ferias/>. Acesso em: 30 mar. 2025.

EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION - EUROCONTROL. **The FLY AI Report: Demystifying and Accelerating AI in Aviation/ATM**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/publication/fly-ai-report>. Acesso em: 29 mar. 2025.

OPENAIRLINES. Harnessing Artificial Intelligence to Boost Fuel Efficiency. **Openairlines**, [s.l.] , 2023. Disponível em: <https://blog.openairlines.com/harnessing-artificial-intelligence-to-boost-fuel-efficiency>. Acesso em: 27 mar. 2025.

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL - OACI. **Manual Guía de Planificación de Espacio Aéreo de la Región SAM: Parte II: Técnicas de Planificación**. Lima: Oficina Regional Sudamericana (SAM), 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2024-RLA06901-SAMIG32/MG%20PLANESPA%20SAM%20PARTE%20II%20%20TEC%20PLANIF%20Original%20SAMIG32.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2025.

SINGH, Vedant; SHARMA, Somesh Kumar. Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. **European Transport Research Review**, [s.l.], v. 7, p. 1-24, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/275220802\\_Fuel\\_consumption\\_optimization\\_in\\_air\\_transport\\_a\\_review\\_classification\\_critique\\_simple\\_meta-analysis\\_and\\_future\\_research\\_implications](https://www.researchgate.net/publication/275220802_Fuel_consumption_optimization_in_air_transport_a_review_classification_critique_simple_meta-analysis_and_future_research_implications). Acesso em: 27 mar. 2025.

WANG, Zhuang; LI, Hui; WANG, Junfeng; SHEN, Feng. Deep reinforcement learning based conflict detection and resolution in air traffic control. **IET Intelligent Transport Systems**, [s.l.], v. 13, n. 6, p. 1041-1047, 2019. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-its.2018.5357>. Acesso em: 27 mar. 2025.

WOOLDRIDGE, Michael. **An introduction to multiagent systems**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=X3ZQ7yeDn2IC>. Acesso em: 27 mar. 2025.