



**ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2023**

MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA, Cap Eng

Transição para Operações Baseadas na Trajetória no espaço aéreo brasileiro

Rio de Janeiro
2023

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2023

MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA, Cap Eng

Transição para Operações Baseadas na Trajetória no espaço aéreo brasileiro

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso 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: Emprego da Força Aérea
Orientador: Herhíc Rabelo Alves Pereira,
TCel Av

Rio de Janeiro

2023

MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA, Cap Eng

Transição para Operações Baseadas na Trajetória no espaço aéreo brasileiro

Trabalho de conclusão de curso apresentado
no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da
Aeronáutica.

Aprovado por:

Herhic **Rabelo** Alves Pereira, T Cel Av
EAOAR

André da Costa Gonçalves, Prof Dr
EAOAR

Rio de Janeiro
2023

RESUMO

Mundialmente, os sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo estão sendo modernizados para cumprir metas mais rigorosas de desempenho em prol do desenvolvimento sustentável da aviação. Uma das recomendações da Organização da Aviação Civil Internacional para essa modernização é a implementação do conceito de Operações Baseadas na Trajetória (TBO). Trata-se de um novo paradigma de planejamento e execução das operações aéreas baseado no gerenciamento da trajetória de voo em quatro dimensões (4D). Este trabalho defende o estabelecimento de um plano de transição para o TBO no Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB) visando ao aumento da eficiência operacional, em consonância com os objetivos estratégicos do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Primeiramente, discute-se como um serviço de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo mais estratégico, colaborativo e apoiado por sistemas preditivos pode contribuir para otimizar o uso da capacidade disponível em aeroportos e no espaço aéreo, reduzindo atrasos, sobretudo durante condições meteorológicas adversas. Por outro lado, argumenta-se que a implementação de ferramentas de automação para o gerenciamento da trajetória 4D facilita o uso de procedimentos de navegação baseada em performance e a execução de trajetórias mais eficientes. Como resultado, o trabalho destaca áreas específicas que demandam investimentos em pesquisa e desenvolvimento para viabilizar a transição para o TBO no SISCEAB. O aumento da eficiência operacional que decorre dessa transição contribui para tornar o transporte aéreo brasileiro mais econômico, acessível e sustentável, além de fortalecer o reconhecimento internacional do DECEA como referência de excelência na gestão do tráfego aéreo.

Palavras-chave: Gerenciamento de Tráfego Aéreo. Operações Baseadas na Trajetória. Eficiência Operacional.

1 INTRODUÇÃO

O Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management – ATM*) é um componente fundamental do sistema global de aviação cujo objetivo é garantir a segurança, a eficiência e a sustentabilidade das operações aéreas. No Brasil, cabe à Força Aérea Brasileira a responsabilidade de efetuar o controle do espaço aéreo em apoio à aviação civil e militar (BRASIL, 2018), por meio do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão gestor do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). Anualmente, o DECEA é responsável pela gestão segura e ordenada de aproximadamente 1,5 milhão de voos que transitam pelos 22 milhões de km² de espaço aéreo sob sua responsabilidade (DECEA e EUROCONTROL, 2018), prestando um serviço de crucial importância para a soberania, o desenvolvimento e a integração nacional.

Mundialmente, os sistemas ATM estão passando por um amplo processo de evolução para elevar a sua capacidade operacional perante as demandas emergentes da aviação e os desafios para o seu desenvolvimento sustentável. Em especial, destaca-se a necessidade de cumprir metas cada vez mais rigorosas de segurança, eficiência e desempenho ambiental. No Brasil, a Concepção Operacional ATM Nacional aponta como um dos benefícios esperados do processo de modernização do SISCEAB o aumento da eficiência das operações com a implantação de rotas diretas e de serviços que permitam o cumprimento dos planejamentos, de acordo com os interesses dos operadores (BRASIL, 2020).

Para fomentar uma evolução harmonizada dos sistemas ATM e apoiar os Estados em seus planejamentos, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) estabeleceu um *framework* para a implementação de melhorias tecnológicas e operacionais denominado Evolução por Blocos do Sistema de Aviação (*Aviation System Block Upgrade – ASBU*), conforme descrito no Plano Global de Navegação Aérea (OACI, 2019). Um dos pilares desse *framework* é a implementação do conceito de Operações Baseadas na Trajetória (*Trajectory-Based Operations – TBO*). O TBO consiste em uma nova forma de planejamento e execução das operações aéreas baseada no gerenciamento estratégico, integrado e colaborativo da trajetória em quatro dimensões (4D), visando a melhor atender as preferências dos usuários do espaço aéreo e aumentar a previsibilidade de suas operações (OACI, 2019). A transição para o conceito TBO é um importante componente dos programas NextGen

(FAA, 2017) e SESAR (EUROCONTROL, 2020) para modernização do sistema ATM nos Estados Unidos e na Europa, respectivamente.

Considerando os objetivos estratégicos do DECEA e os esforços internacionais em andamento para aperfeiçoamento do ATM, este trabalho defende o estabelecimento de um plano de transição para o TBO no SISCEAB para o aumento da eficiência operacional dos fluxos de tráfego no espaço aéreo brasileiro. Primeiramente, será discutido como o TBO pode propiciar uma redução de atrasos a partir de um melhor uso da capacidade disponível em aeroportos e no espaço aéreo, especialmente durante períodos de condições meteorológicas adversas. Por outro lado, será discutido como esse novo conceito operacional pode resultar em trajetórias mais eficientes por meio de um aumento na execução de procedimentos modernos de navegação baseada em performance.

2 DESENVOLVIMENTO

De acordo com a FAA (2017), o TBO representa um novo método de ATM para estrategicamente planejar, gerenciar e otimizar os voos durante toda a operação, usando gerenciamento baseado em tempo, compartilhamento de informações e a capacidade das aeronaves de voar trajetórias precisas no espaço e no tempo. Kistan *et al.* (2017) apontam que o TBO é essencial para migrar progressivamente o sistema ATM de sua atual natureza amplamente centralizada e tática para um paradigma mais estratégico e distribuído. Assim, o TBO tem o potencial de impactar múltiplas dimensões de desempenho operacional. Especificamente, este trabalho discute como a eficiência do fluxo de tráfego aéreo brasileiro pode ser incrementada com a transição do SISCEAB para o TBO, por meio da otimização do uso da capacidade disponível em aeroportos e no espaço aéreo e do aumento da execução de procedimentos de navegação baseada em performance.

2.1 Otimização do uso da capacidade de aeroportos e do espaço aéreo

A capacidade de processamento de voos em aeroportos e no espaço aéreo é função de relações complexas entre diversos fatores estruturais e operacionais, apresentando um comportamento dinâmico e estocástico. Entre os fatores

determinantes da capacidade, destaca-se a meteorologia. Condições meteorológicas adversas, como visibilidade reduzida, rajadas de vento ou tempo severo convectivo, podem causar impactos significativos e, conseqüentemente, gerar desequilíbrios entre a demanda planejada de voos e a capacidade disponível, resultando em atrasos e custos adicionais para os operadores (HANSMAN e ODONI, 2016).

Para mitigar o impacto de tais eventos disruptivos, o sistema ATM presta o serviço de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management – ATFM*), implementando medidas específicas para regular os fluxos de tráfego aéreo. Por exemplo, restrições para aumento da separação longitudinal entre aeronaves durante o voo, denominadas *Miles-In-Trail (MIT)*, são aplicadas para reduzir o fluxo de tráfego em um determinado volume de espaço aéreo (HANSMAN e ODONI, 2016). No Brasil, essa medida de ATFM é a mais utilizada em resposta a desbalanceamentos entre demanda e capacidade, especialmente na Área de Controle Terminal São Paulo (TMA-SP), espaço aéreo que apresenta a maior densidade de tráfego do país (SANTOS, 2021).

Embora medidas de ATFM como a restrição MIT sejam comumente utilizadas, elas podem ocasionar uma utilização sub-ótima da capacidade e gerar ineficiências (FAA, 2017), uma vez que são aplicadas de forma local, tática, centralizada e empírica. Liu *et al.* (2017) estimaram que restrições MIT contribuem em até 5% para a ineficiência horizontal da trajetória de voo no espaço aéreo americano. Murça *et al.* (2020) também observaram um impacto negativo de restrições MIT na eficiência horizontal do fluxo de tráfego aéreo brasileiro.

Para reduzir a imprevisibilidade decorrente de interferências táticas na trajetória de voo causadas por desequilíbrios entre demanda e capacidade, o TBO contempla o aprimoramento do serviço de ATFM através de: maior aplicação de medidas em nível estratégico; novos sistemas de apoio à decisão para previsão de impactos meteorológicos na capacidade; e compartilhamento de informações relativas às preferências dos operadores (FAA, 2017; SESAR JU, 2017). Diversos esforços de pesquisa e desenvolvimento têm sido realizados nessas linhas de ação e apontam para um significativo potencial de redução de atrasos.

Primeiramente, a aplicação de medidas estratégicas, como o Programa de Atraso em Solo (*Ground Delay Program – GDP*), permite que atrasos sejam absorvidos antes da decolagem, de maneira mais segura e econômica (LIU e HANSEN, 2014). No entanto, o planejamento de medidas estratégicas é um desafio

para os gerentes de tráfego aéreo, uma vez que requer a antecipação de impactos meteorológicos na capacidade com precisão com algumas horas de antecedência.

Estudos recentes exploraram a aplicação de técnicas de análise avançada para o desenvolvimento de modelos preditivos e prescritivos capazes de apoiar essa tomada de decisão. Santos (2021) desenvolveu um modelo de previsão da capacidade de pouso para o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos a partir da aplicação de técnicas de aprendizado de máquina em dados meteorológicos e, adicionalmente, um modelo de otimização para a alocação de atrasos em solo em função das previsões probabilísticas de capacidade. Ao simular a utilização desses modelos para o planejamento de Programa de Atraso em Solo durante período com impactos meteorológicos, em substituição à aplicação tática de restrição MIT, observou um potencial de redução de atrasos de até 10%. De forma semelhante, Jones, Ellenbogen e Glina (2023) aplicaram técnicas de aprendizado de máquina para prever a permeabilidade de setores impactados por tempo severo convectivo no espaço aéreo americano e recomendar medidas de ATFM estratégicas, obtendo resultados promissores em termos de potencial de apoio à decisão.

Por fim, a incorporação das preferências dos usuários do espaço aéreo no TBO por meio de uma tomada de decisão colaborativa no ATFM também contribui para a otimização do uso da capacidade disponível e uma consequente redução de atrasos. Murça (2018) desenvolveu um modelo colaborativo de alocação de rotas e atrasos em solo e observou que a submissão de opções de trajetória alternativa pelos operadores resultou em uma redução de atrasos de 67% em um cenário de impacto de tempo severo convectivo no nordeste americano. Xu *et al.* (2020) também observaram uma significativa redução de atrasos de 97% com a aplicação de um *framework* de gestão colaborativa do fluxo de tráfego aéreo no espaço aéreo francês.

2.2 Aumento da execução de procedimentos de navegação baseada em performance

Além de proporcionar uma redução de atrasos por meio da otimização do uso da capacidade decorrente de um serviço de ATFM aprimorado, o TBO resultará em trajetórias mais eficientes ao propiciar um aumento da execução de procedimentos modernos de navegação baseada em performance.

Com a evolução dos sistemas de navegação por satélite, o planejamento do espaço aéreo passou a ser realizado sob a ótica da Navegação Baseada em Performance (*Performance-Based Navigation – PBN*), resultando em rotas e procedimentos cada vez mais diretos, flexíveis e precisos (LÓPEZ-LAGO *et al.*, 2020). Um exemplo de procedimento viabilizado pelo PBN é a Operação de Descida Contínua (*Continuous Descent Operations – CDO*). Ela permite que as aeronaves desçam de altitudes elevadas em cruzeiro até a aproximação final ao aeroporto de forma contínua, sem segmentos nivelados intermediários, sob configuração de potência mínima, gerando um menor nível de ruído, de consumo de combustível e de emissões (OACI, 2019). Embora os benefícios ambientais e econômicos desse tipo de procedimento de descida já tenham sido amplamente discutidos, ele é raramente executado em áreas terminais densas, uma vez que dificulta o sequenciamento e a separação das aeronaves pelos controladores de tráfego aéreo (SÁEZ *et al.*, 2021; SZENCZUK *et al.*, 2021). Assim, o mero planejamento do espaço aéreo usando procedimentos PBN não garante que eles sejam plenamente realizados na prática e que todo o seu potencial de benefícios seja observado.

Em contrapartida, o TBO contempla a implementação de processos de sincronização da trajetória 4D entre os sistemas embarcados e em solo e de novas ferramentas de automação para o sequenciamento e a separação das aeronaves baseadas na otimização da trajetória sincronizada (FAA, 2017), o que viabiliza um aumento na execução de procedimentos PBN. Diversos esforços de pesquisa têm sido realizados em apoio ao desenvolvimento dessas capacidades.

Como exemplo, Toratani (2019) propôs a incorporação de um novo algoritmo de otimização da trajetória 4D em ferramentas de sequenciamento de chegada. Em simulações para o Aeroporto Internacional de Tóquio, foram obtidas reduções de 79,4 segundos no tempo total de voo e de 187,7 libras no consumo de combustível por aeronave. Sáez *et al.* (2021) desenvolveram algoritmos de otimização para a alocação de procedimentos de chegada PBN e a separação das aeronaves de forma automática. A solução foi simulada para o Aeroporto de Estocolmo-Arlanda e resultou na execução de trajetórias mais eficientes em descida contínua, possibilitando reduções da distância e do tempo de voo de 8 milhas náuticas e 5,8 minutos, respectivamente, para cenários complexos de elevada densidade de tráfego.

Os resultados apresentados por esses estudos corroboram a importância da implementação de ferramentas de automação para a gestão otimizada da trajetória

4D de forma que procedimentos PBN sejam plenamente executados na prática e resultem em um aumento da eficiência das trajetórias de voo.

3 CONCLUSÃO

A modernização do sistema ATM é fundamental para elevar o desempenho operacional do tráfego aéreo e promover o desenvolvimento sustentável da aviação. Internacionalmente, diversos esforços estão sendo envidados para a implementação do TBO, um novo conceito para o ATM baseado no gerenciamento da trajetória 4D. Este trabalho defendeu o estabelecimento de um plano de transição para o TBO no SISCEAB para atingir o objetivo estratégico do DECEA de aumento da eficiência operacional do tráfego aéreo brasileiro.

Primeiramente, observou-se que o TBO contempla o aprimoramento do serviço de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo para viabilizar uma tomada de decisão mais estratégica, colaborativa e baseada em dados. Discutiu-se como esses fatores contribuem para otimizar o uso da capacidade disponível em aeroportos e no espaço aéreo, sobretudo durante períodos de condição meteorológica adversa. A partir de revisão da literatura científica, observou-se que a utilização de sistemas de apoio à decisão para previsão de impactos meteorológicos e alocação estratégica da capacidade, bem como o compartilhamento de informações relativas às preferências de rota dos operadores, tem um significativo potencial de reduzir atrasos.

Por outro lado, o TBO também requer a implementação de ferramentas de automação para a gestão da trajetória 4D. Discutiu-se como essas ferramentas viabilizam um aumento no uso de procedimentos modernos de navegação baseada em performance e a execução de trajetórias de voo mais eficientes em termos de distância, tempo de voo e consumo de combustível, com base em resultados de simulações computacionais apresentados em estudos científicos.

Assim, o trabalho apontou algumas áreas específicas que demandam investimentos em pesquisa e desenvolvimento para viabilizar a transição para o TBO e aumentar a eficiência operacional dos fluxos de tráfego no espaço aéreo brasileiro. Essa modernização do SISCEAB contribui, em última análise, para tornar o transporte aéreo brasileiro mais econômico, acessível e sustentável, bem como para fortalecer, nacional e internacionalmente, o reconhecimento do DECEA como referência de excelência na gestão do tráfego aéreo.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **PCA 11-47** Plano Estratégico Militar da Aeronáutica 2018 – 2027. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/Download/arquivos/pemaer.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **DCA 351-2** Concepção Operacional ATM Nacional. Brasília, 2021. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/dca-351-2>. Acesso em: 16 fev. 2023.
- DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo; EUROCONTROL. **Brazil/Europe comparison of operational ANS performance**. 2021. Disponível em: <https://performance.decea.mil.br/storage/performance/uploads/2022/07/Relatorio-DECEA-EUROCONTROL-ANS-PERFORMANCE.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2023.
- EUROCONTROL. **European ATM Master Plan**. 2020. Disponível em: <https://www.sesarju.eu/masterplan2020>. Acesso em: 16 fev. 2023.
- FAA, Federal Aviation Administration. **Vision for Trajectory-Based Operations**. 2017. Disponível em: https://www.faa.gov/air_traffic/technology/tbo/documents/Media/Vision%20for%20TBO%20%202025%20V2%20Sept%202017.pdf. Acesso em: 16 fev. 2023.
- HANSMAN, R. J.; ODONI, A. R. Air traffic control. *In*: BELOBABA, P.; ODONI, A. R.; BARNHART, C. **The global airline industry**. 2. ed. Southern Gate, Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2016. p. 395-421.
- JONES, J. C.; ELLENBOGEN, Z.; GLINA, Y. Recommending strategic air traffic management initiatives in convective weather. **Journal of Air Transportation**, p. 1–12, jan. 2023.
- KISTAN, T. *et al.* An evolutionary outlook of air traffic flow management techniques. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 88, p. 15–42, jan. 2017.
- LIU, Y.; HANSEN, M. Evaluation of the performance of Ground Delay Programs. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2400, n. 1, p. 54–64, jan. 2014.
- LIU, Y. *et al.* Causal analysis of en route flight inefficiency – the US experience. *In*: USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 12., 2017, Seattle, Washington, USA. **Proceedings** [...] Seattle, Washington, USA: Federal Aviation Administration & Eurocontrol, 2017.
- LÓPEZ-LAGO, M. *et al.* Present and future of air navigation: PBN operations and supporting technologies. **International Journal of Aeronautical and Space Sciences**, v. 21, n. 2, p. 451–468, out. 2019.

MURÇA, M. C. R. Collaborative air traffic flow management: Incorporating airline preferences in rerouting decisions. **Journal of Air Transport Management**, v. 71, p. 97–107, ago. 2018.

MURÇA, M. C. R. *et al.* Characterizing the Brazilian airspace structure and air traffic performance via trajectory data analytics. **Journal of Air Transport Management**, v. 85, p. 101798, jun. 2020.

OACI, Organização da Aviação Civil Internacional. **Doc 9750** Global Air Navigation Plan. 2019. Disponível em: <https://www.icao.int/publications/Pages/Publication.aspx?docnum=9750>. Acesso em: 16 fev. 2023.

OACI, Organização da Aviação Civil Internacional. **Global TBO Concept**. 2019. Disponível em: https://www.icao.int/airnavigation/tbo/PublishingImages/Pages/Why-Global-TBO-Concept/Global%20TBO%20Concept_V0.11.pdf. Acesso em: 16 fev. 2023.

SÁEZ, R. *et al.* Automated sequencing and merging with dynamic aircraft arrival routes and speed management for Continuous Descent Operations. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 132, p. 103402, nov. 2021.

SANTOS, R. M. **Airport capacity prediction and optimal allocation for strategic air traffic flow management at Sao Paulo/Guarulhos International Airport**. 2021. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2021.

SESAR JU, Single European Sky ATM Research Joint Undertaking. **SESAR 2020 Concept of Operations**. 2017. Disponível em: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b6d2b912&appId=PPGMS>. Acesso em: 05 mar. 2023.

SZENCZUK, J. B. T. *et al.* Causal analysis of vertical flight inefficiency during descents. **Revista Transportes**, v. 29, n. 4, p. 1–16, nov. 2021.

TORATANI, D. Application of merging optimization to an arrival manager algorithm considering Trajectory-Based Operations. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 109, p. 40–59, dez. 2019.

XU, Y. *et al.* A framework for collaborative air traffic flow management minimizing costs for airspace users: Enabling trajectory options and flexible pre-tactical delay management. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 134, p. 229–255, abr. 2020.