

“CONGESTIONAMENTOS FANTASMA” NOS FLUXOS DE TRÁFEGO AÉREO: SUA POSSÍVEL EXISTÊNCIA E CAUSAS PROVÁVEIS PARA SUAS OCORRÊNCIAS

Bruno Garcia Franciscone¹
Pedro Arthur Linhares²

RESUMO

Um efeito comum nos estudos de tráfego rodoviário é o denominado “congestionamento fantasma”, que ocorre sem uma causa aparente, como interdições de faixas de pistas, acidentes, dentre outras. Esse efeito advém do comportamento dos motoristas em ajustar suas velocidades às situações do momento. Levanta-se a hipótese de que este efeito também pode ocorrer no tráfego aéreo. Nesse sentido, este artigo buscou compreender as causas que podem gerar esse tipo de congestionamento nos fluxos de tráfego aéreo. Ele se baseou em pesquisa dos fluxos de aproximação para o aeroporto de Guarulhos, localizado na Terminal São Paulo, a mais movimentada da América Latina. A pesquisa, portanto, caracterizou-se como estudo de caso. A metodologia utilizada permitiu compreender algumas das prováveis causas que podem gerar interrupções de fluxo sem motivo aparente. Destacam-se problemas relacionados aos aspectos técnicos, humanos e operacionais. Dentre os problemas relacionados a esses aspectos, sugeriu-se que a ausência de ferramentas de automação e auxílio à decisão e a falta de técnicas de separação e gestão de velocidades geram, em momentos de maior demanda, um comportamento excessivamente restritivo nos controladores de tráfego aéreo, que passam a priorizar segurança à eficiência.

Palavras-chave: Gerenciamento de Tráfego Aéreo. Fluxo de Tráfego Aéreo. Aviação. Congestionamento Fantasma.

¹ Mestre em Ciências Aeroespaciais - Universidade da Força Aérea - UNIFA (2020). MBA em Gerenciamento de Projetos - SENAC (2018). Graduado em Física - Universidade de São Paulo (USP). Graduando em Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense (UFF). Assessor das Seções de Serviços de Tráfego Aéreo (ATS) e de Espaço Aéreo (EA), da Divisão de Coordenação e Controle de Gerenciamento de Tráfego Aéreo do Subdepartamento de Operações do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). E-mail: bruno.franciscone@gmail.com

² Doutor em Engenharia de Produção pela UFRJ (2003). MBA em Planejamento Estratégico pela COPPE-UFRJ (2009). Mestre em Ciência da Computação pelo Air Force Institute of Technology – EUA (1996). Professor do Programa de Pós-graduação em Ciências Aeroespaciais da Universidade da Força Aérea (UNIFA). Coordenador da UNIFA no Projeto Ciência, Tecnologia e Inovação em Defesa: Cibernética e Defesa Nacional, do Programa Pro-Defesa IV. Coordenador do Centro de Estudos Estratégicos da UNIFA. Participa de grupos de pesquisas na área de Segurança e Defesa Cibernética. E-mail: linhairespall@fab.mil.br/linhairespall@aer.mil.br

“PHANTOM TRAFFIC JAMS” IN AIR TRAFFIC FLOWS: THEIR POSSIBLE EXISTENCE AND PROBABLE CAUSES FOR THEIR OCCURRENCES

ABSTRACT

A common effect in road traffic studies is the so-called “phantom traffic jams”, which occurs without an apparent cause, such as lane closures, accidents, among others. This effect comes from the behavior of drivers in adjusting their speeds to current situations. It is suggested that this effect can also occur in air traffic. In this sense, this article sought to understand the causes that can generate this type of congestion in air traffic flows. It was based on research on the approach flows to Guarulhos airport, located at São Paulo Terminal, the busiest in Latin America. The research, therefore, was characterized as a case study. The methodology used allowed us to understand some of the probable causes that can generate flow interruptions for no apparent reason. Problems related to technical, human and operational aspects are highlighted. Among the problems related to these aspects, it was suggested that the absence of automation tools and decision aid and the lack of separation and speed management techniques generate, in times of greater demand, an excessively restrictive behavior in air traffic controllers, which now prioritize safety over efficiency.

Keywords: Air Traffic Management. Air Traffic Flow. Aviation. Phantom Congestion.

1 INTRODUÇÃO

Muitas vezes, interrupções no fluxo das aeronaves ocorrem, geram ineficiências e podem estar associadas a diversos fatores, tais como: condições meteorológicas adversas, sistemas de pistas impraticáveis, ou seja, pistas que por algum motivo não podem ser utilizadas por um determinado período para pouso ou decolagem das aeronaves, saturação da capacidade do espaço aéreo ou dos aeroportos, dentre outros. Porém, em alguns momentos, os motivos associados às reduções e interrupções no fluxo não são tão evidentes e necessitam ser estudados detalhadamente para que se determinem suas causas.

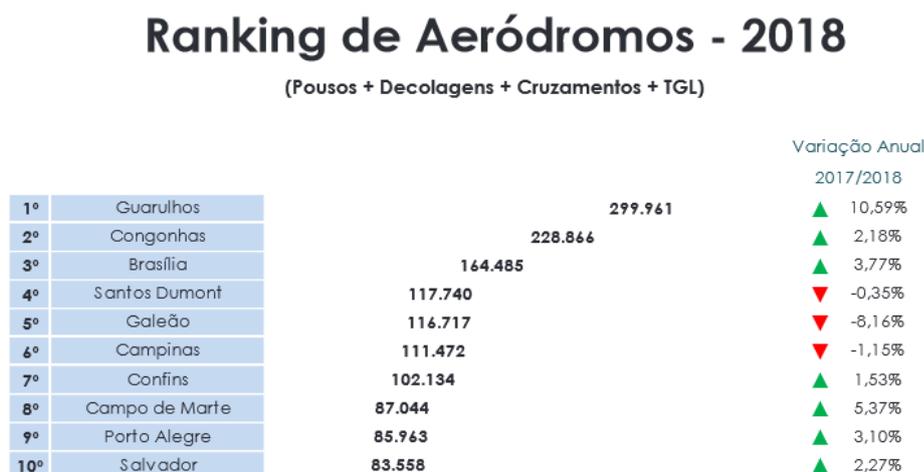
Há diversos motivos para as reduções e interrupções no fluxo de tráfego que culminam na ocorrência dos “congestionamentos fantasma”. Para o caso do tráfego rodoviário, onde esse efeito foi primeiramente identificado, observou-se que diversos fatores que ocorrem no cotidiano das rodovias levam à interrupção do fluxo, mas passam despercebidos aos olhos dos motoristas por estarem inseridos dentro dela. Apenas alguém fora das rodovias, por exemplo, um piloto de helicóptero pairando sobre elas e observando o fluxo de carros é capaz de notar esse efeito. Como exemplo da ocorrência desse tipo de congestionamento, pode-se mencionar interrupções intermitentes no fluxo de uma rodovia, quando não há nenhuma causa evidente, como, por exemplo, um acidente que possa deixar impraticável alguma faixa de tráfego.

Em analogia, após algumas adaptações, é possível, conforme será demonstrado, adaptar o mesmo modelo utilizado para análise de fluxos de tráfego rodoviário ao tráfego aéreo, de modo que haja a possibilidade de ocorrência de “congestionamentos fantasma”. Supõe-se que do mesmo modo que em uma rodovia, dependendo da densidade de aeronaves voando em uma aerovia, há uma velocidade ideal que maximiza o fluxo. Caso as aeronaves empreguem velocidades acima ou abaixo da velocidade ideal, há a possibilidade da ocorrência de interrupções no fluxo e, com isso, as aeronaves acabarão por serem “vetoradas”, ou seja, terão seus rumos alterados, saindo das rotas previstas para que espaço adicional entre elas seja alocado. Além disso, as aeronaves poderão

ter que fazer esperas em voo e voar em circuitos fechados, uma vez que não podem parar no ar.

O cenário utilizado neste estudo foi o do aeroporto de Guarulhos (SBGR), inserido na Terminal de Aérea de São Paulo. Essa escolha se justificou por ele ser o mais movimentado e consistir no principal *hub* internacional do país e um dos principais *hub* nacionais (Figura 1). Devido a isso, reduções e até mesmo interrupções nos fluxos de aeronaves para esse aeroporto causam impacto em toda a malha aérea nacional e ocasionam prejuízos às empresas e aos usuários, além dos impactos ambientais pelo acréscimo da emissão de gases poluentes na atmosfera e incremento nos níveis de ruído advindos de esperas e “vetorações” a baixas altitudes.

Figura 1 – Ranking de Aeródromos (2018)



Fonte: Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (2020).

A hipótese que balizou o desenvolvimento deste artigo é a de que há a possibilidade de existência dos “congestionamentos fantasma” no tráfego aéreo e supõe-se que eles ocorrem devido à inadequada gestão de velocidades, por parte de pilotos e controladores de tráfego aéreo. Considerou-se, neste estudo, que a alocação de voos ao longo dos dias para o aeroporto de Guarulhos (malha aérea) se realizou de maneira adequada e, por isso, não contribuirá para ineficiências dos fluxos de tráfego aéreo para o aeroporto em tela.

Para o levantamento de dados, optou-se primeiramente em utilizar o simulador em tempo acelerado localizado no Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), em São José dos Campos. Esse simulador é denominado *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM). Buscou-se simular o efeito no fluxo de tráfego aéreo de uma gestão inadequada das velocidades pelos pilotos e controladores de tráfego aéreo (ATCO), a partir de dados reais referentes a um dia de operação com alta demanda de tráfego.

Por fim, construíram-se questionários eletrônicos semiestruturados, destinados aos profissionais do Controle de Aproximação de São Paulo (APP-SP), do Centro de Controle de Brasília (ACC-BS) e do Centro de Controle de Curitiba (ACC-CW), diretamente envolvidos no controle de tráfego aéreo e no gerenciamento de tráfego aéreo das aeronaves destinadas ao aeroporto de Guarulhos e aos pilotos que rotineiramente utilizam as rotas de chegada padrão por instrumentos (STAR) e os procedimentos de aproximação por instrumentos (IAC) para esse aeroporto. Justificou-se a aplicação dos questionários a esses profissionais pela necessidade de entenderem-se as práticas adotadas para o sequenciamento das aeronaves e a forma com que ocorre a gestão de velocidade delas. Com isso, buscou-se identificar as possíveis causas das interrupções no fluxo de tráfego aéreo com destino ao aeroporto de Guarulhos e se elas apoiam a suposição da existência dos “congestionamentos fantasma”.

2 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM AS ATIVIDADES DE CONTROLE E GERENCIAMENTO DO TRÁFEGO AÉREO

Os controladores de um controle de aproximação são responsáveis em manter um fluxo rápido, seguro e ordenado de aeronaves em aproximação para um determinado aeroporto, desde sua transferência de um centro de controle, ao abandonar uma aerovia em descida, até sua transferência à torre de controle do aeroporto de destino, para o pouso. O trabalho desses controladores é dispor as aeronaves em filas, tanto nos fluxos de chegada quanto nos fluxos de saída e de

garantir que sempre haverá um espaçamento seguro entre elas, verticalmente, longitudinalmente e lateralmente (WICKENS; MAVOR; MCGEE, 1997).

A partir da década de 50, com as regras estabelecidas pelos Anexos à Convenção de Chicago e com o aumento no volume de tráfego aéreo, necessitou-se fragmentar o espaço aéreo em setores, cujas dimensões variavam em função da carga de trabalho a ser imposta ao controlador e dos padrões do fluxo de tráfego em seu interior. Essa fragmentação do espaço aéreo aumentou a complexidade da atividade de controle de tráfego aéreo, pois os controladores passaram a, além de controlar o tráfego aéreo, coordenar suas ações com os controladores dos setores adjacentes. Surge a partir disso, a figura do coordenador/supervisor de tráfego aéreo (GILBERT, 1973).

Nessa época, entretanto, ainda não havia ferramentas automatizadas de auxílio à decisão, nem um órgão central que gerenciasse o fluxo de aeronaves e a estrutura do espaço aéreo. Devido a isso, os controladores de tráfego aéreo se baseavam em suas experiências para determinar o sequenciamento das aeronaves e o padrão de separação entre elas, de modo local, sem uma consciência situacional global, o que ocasionava interrupções no fluxo e esperas em voo desnecessárias (WICKENS; MAVOR; MCGEE, 1997).

As aeronaves com destino ao aeroporto de Guarulhos, após o abandono do voo em rota, prosseguem nas chegadas padrão por instrumentos (STAR), em fluxos distintos, provenientes de diversas regiões do Brasil e do mundo. Antes do pouso, esses fluxos distintos são unidos e sequenciados para pouso “em fila”, de modo a utilizar-se o sistema de pistas de modo eficiente.

Segundo Nagaoka e Gwiggner (2014), quando a demanda média ultrapassa a capacidade, devido a horários de pico ou condições meteorológicas, congestionamentos previstos ocorrem. Adicionalmente, atrasos em rota são desnecessários caso os atrasos em solo sejam gerenciados adequadamente. Deve-se, no entanto, gestar as velocidades em rota e aproximação para sincronizar os fluxos de tráfego. Dessa forma, evitam-se “vetorações” e esperas. Entretanto, para que isso seja efetivo, necessita-se que os controladores de tráfego aéreo saibam quais as velocidades as aeronaves devem manter em determinado regime de fluxo, de acordo com a demanda do momento, para que

instruam os pilotos a mantê-las. Os pilotos, por sua vez, precisam, caso possível, efetivamente manterem as velocidades sugeridas.

A complexidade do trabalho do ATCO advém da limitação do número de parâmetros que podem manipular. Isso restringe sobremaneira o número de ações possíveis de serem executadas. Entretanto, o monitoramento continuado das aeronaves e a projeção de suas posições futuras é extremamente desgastante, por exigir enorme atenção e percepção (ATHÈNES et al, 2002).

Quando as demandas se tornam excessivas e a complexidade torna-se alta, os controladores de tráfego aéreo procuram manter uma *performance* adequada sem gasto excessivo de energia, ao modificar a forma como lidam com as solicitações dos pilotos. Essa flexibilidade e capacidade de adaptação não são facilmente ensinadas e tornam-se progressivamente mais importantes em cenários mais complexos e menos previsíveis. A tomada de decisão, na maior parte do tempo, no entanto, é rotineira e habilita o ATCO a selecionar procedimentos apropriados a serem aplicados em situações corretamente identificadas. No entanto, o grau de automação e as ferramentas de apoio à decisão influenciam diretamente na qualidade dessas tomadas de decisão (WICKENS; MAVOR; MCGEE, 1997).

Desenvolveram-se os sistemas *Arrival Management Systems* (AMANs) na Europa, ao longo de anos de pesquisas. Utilizam-se esses sistemas de maneiras diferentes nos diversos locais do mundo onde foram implementados. “*Arrival Management*” é o termo geral para o processo de organização das chegadas em fluxos contínuos e eficientes para pouso. Entretanto, o AMAN não substitui as decisões de um controlador de tráfego aéreo, não é a solução final para o sistema ATM e nem é uma ferramenta de alerta e resolução de conflitos de tráfego (BRUSSELS, 2010).

Basicamente, o AMAN “captura” as aeronaves a partir de aproximadamente 100NM de distância para o pouso. Sistemas em solo computam seus horários preferenciais de chegada. De acordo com os critérios de sequenciamento e a partir do horário preferencial de chegada, estabelece-se a ordem das aeronaves no fluxo de tráfego. Após isso, alertam-se os ATCO para que sequenciem as aeronaves conforme estabelecido pelo sistema (SUBEDI, 2015).

Ainda segundo Subedi (2015), sistemas de gerenciamento de voo das aeronaves possuem funcionalidades que utilizam modelos que consideram as aeronaves como pontos materiais e solucionam diversas equações diferenciais para prever suas trajetórias. Para que esse cálculo seja realizado, necessita-se das condições da aeronave (peso, potência, dentre outros), das condições de vento e temperatura, e das intenções da aeronave (razão de subida ou descida, velocidade, dentre outros). No entanto, a maior parte dessas informações não está disponível para sistemas de solo, e as que estão disponíveis, não são conhecidas com grande precisão.

Em pesquisa de satisfação realizada pelo DECEA em 2018, com controladores de tráfego Aéreo do ACC-BS e do ACC-CW, centros de controle que já haviam implementado a ferramenta AMAN há alguns anos e treinado seus efetivos para sua utilização, constataram-se, apesar da satisfação e do reconhecimento de que seu emprego melhorou consideravelmente a eficiência dos fluxos de aproximação e diminuiu consideravelmente os atrasos advindos de “vetorações” e esperas em voo, algumas limitações em seu emprego.

Dentre as limitações do AMAN, é possível destacar que o sistema não reconhece rotas fora das chegadas padrão por instrumentos (STAR), deixando de calcular o sequenciamento para aeronaves que seguem essas rotas, inviabilizando a utilização da ferramenta do modo adequado em condições meteorológicas adversas e impossibilitando o “encurtamento” das trajetórias das aeronaves. Outra limitação de destaque da ferramenta ocorre quando duas aeronaves chegam a um determinado *Metering Fix* (MF) (espécie de coordenadas geográficas que servem de baliza para atuação do AMAN) ao mesmo tempo, mas com uma determinada separação lateral. Nesses casos a ferramenta considera que as aeronaves já estão sequenciadas longitudinalmente com essa separação.

Adicionalmente, destaca-se a limitação da ferramenta em realizar cálculos baseados nas velocidades no solo reais das aeronaves, em especial para aeronaves de baixa *performance*, pois a ferramenta utiliza valores pré-fixados e não leva em conta fatores como preferências operacionais das empresas aéreas e ventos em altitude. Por fim, reportou-se a ausência de alerta por parte da

ferramenta quando há modificações em um sequenciamento, reduzindo-se assim a consciência situacional dos ATCO (DECEA, 2018).

A partir da evidenciação dessas limitações da ferramenta, a empresa ATECH passou a desenvolver uma nova versão do AMAN, denominada *Advanced AMAN*, com algumas novas funções, de acordo com requisitos definidos por ATCO das localidades onde a ferramenta está implementada.

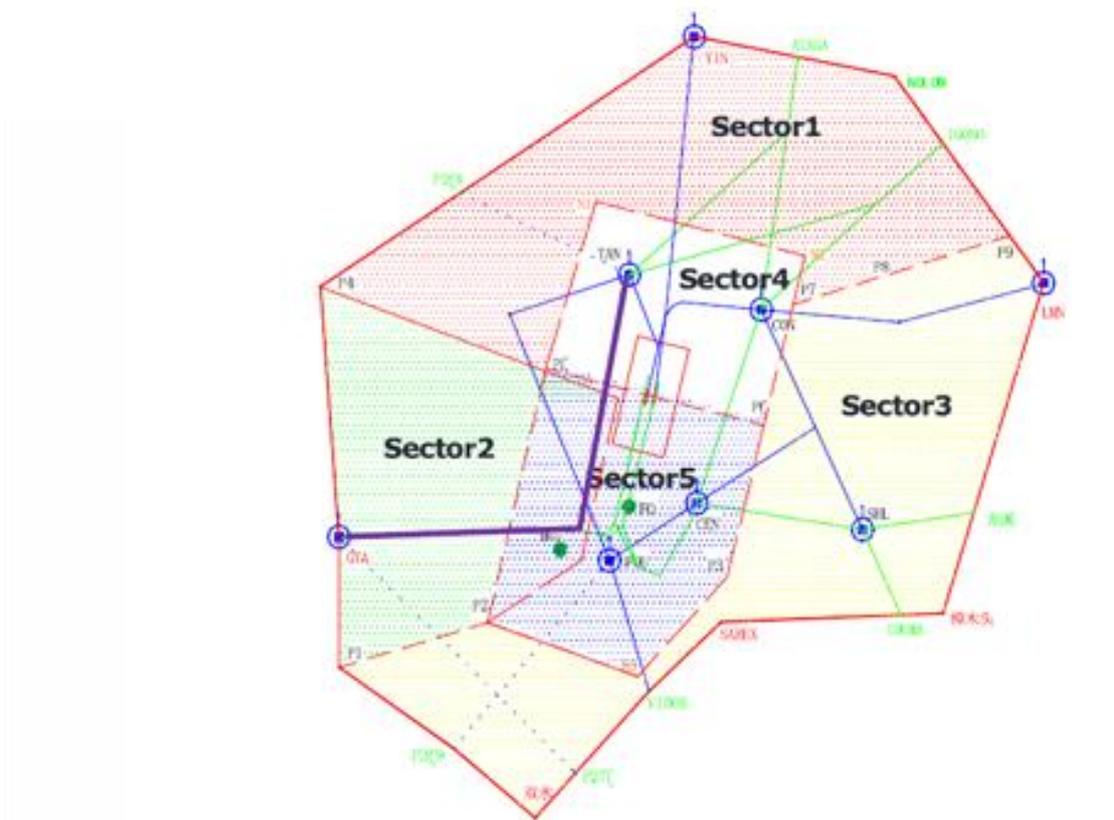
A terminal São Paulo ainda não possui o AMAN implementado para auxiliar no gerenciamento dos fluxos de tráfego em aproximação para seus principais aeroportos, incluindo o aeroporto de Guarulhos. No entanto, há perspectiva de sua implementação nos próximos anos.

3 ESTUDO DE CASO NA TERMINAL DE GUANGZHOU

A partir de um estudo empírico que buscou quantificar o sistema representado pela interação humana em uma Terminal movimentada da China, evidenciou-se o caos na dinâmica de fluxo de tráfego e nas atividades dos ATCO (conflitos em potencial e atividades de comunicação) que emerge em fases de fluxo semiestáveis e congestionadas. Devido a isso, as ferramentas de automação do futuro devem ser customizadas e inteligentes para levar em conta fatores humanos e as fases de fluxo (YANG et al, 2017).

Esse estudo se baseou, em parte, no diagrama fundamental, que relaciona variáveis de fluxo de tráfego (fluxo, densidade, dentre outros). Esse diagrama fundamental exhibe transições de estado de fluxo que correspondem a mudanças de estado do tráfego. Devido às distribuições esparsas e aleatórias dos fluxos de aeronaves, é difícil observar fases completas em uma única rota (Figura 2). Devido a isso, analisaram-se os dados de forma conjunta, englobando as rotas de aproximação com maior volume de tráfego (YANG et al, 2017).

Figura 2- Configuração do Espaço Aéreo da Terminal de Guangzhou

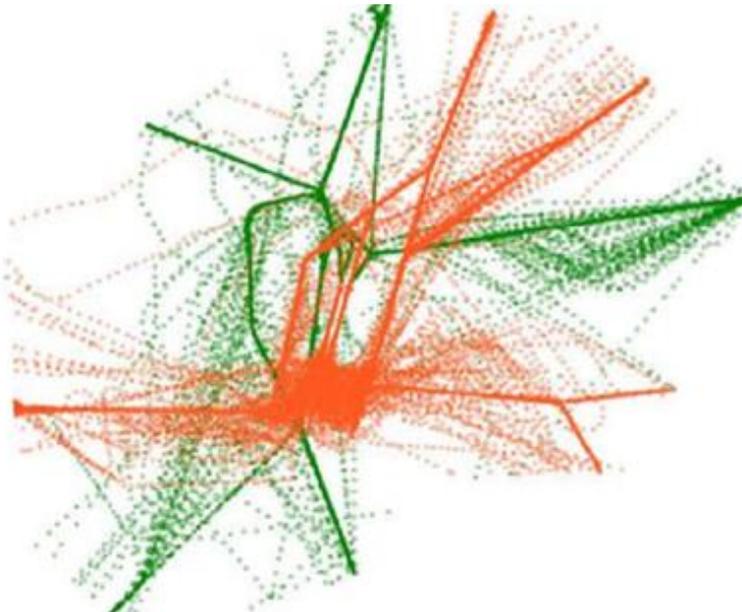


Fonte: Yang et al (2017, p. 23).

O Controle de Aproximação de Guangzhou é responsável pelos movimentos de saída e chegada do Aeroporto Internacional de *Baiyun*, um dos três aeroportos mais movimentados da China. Realizou-se um estudo empírico de tráfegos em aproximação para esse aeroporto, de modo a compreenderem-se as dinâmicas do espaço aéreo baseada em uma rede multinível, com auxílio de métricas analíticas de dados de trajetórias sincronizadas e de dados de comunicações oriundos de três dias específicos de operação (Figura 3) (YANG *et al*, 2017).



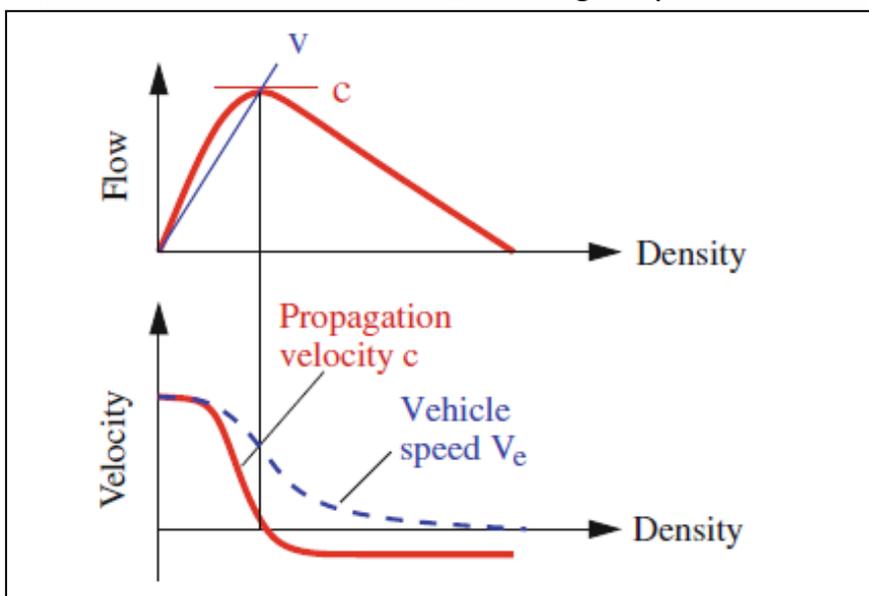
Figura 3 – Dados das trajetórias de chegada (laranja) e saída (verde) na Terminal Guangzhou



Fonte: Yang et al (2017, p. 230).

De acordo com os dados analisados no estudo de caso, conforme esperado, obteve-se uma relação não linear entre o fluxo e a densidade de aeronaves, de acordo com o diagrama fundamental apresentado na Figura 4, já comprovado empiricamente válido para o tráfego rodoviário.

Figura 4 – Diagrama Fundamental: Variação do Fluxo com a Densidade e da Velocidade com a Densidade de Tráfego esperados teoricamente



Fonte: Treiber e Kesting (2013, p. 84).

Quando se aumenta a densidade, restrições às aeronaves conduzem a uma velocidade menor. Já o fluxo de aeronaves e a densidade média equivalente apresentam uma relação côncava.

A partir do diagrama fundamental e da revisualização das trajetórias das aeronaves nos três dias de interesse, definiram-se quatro fases e analisaram-se essas fases com relação à dinâmica dos fluxos nas rotas selecionadas. Essas fases são: fase livre, fase suave, fase semiestável e fase congestionada (YANG *et al*, 2017).

Após a definição das fases de fluxo, o estudo empreendido no espaço aéreo terminal de Guangzhou passou a considerar a interação humana. Segundo Yang *et al* (2017), a compreensão da dinâmica do tráfego em áreas terminais não pode ser obtida sem considerar as interações humanas. Um espaço aéreo terminal consiste em setores controlados colaborativamente e o comportamento dos ATCO pode ser definido como um processo fechado e repetitivo.

As ações empreendidas por um controlador passam pelas etapas de planejamento, implementação, monitoramento e avaliação. Intuitivamente, um incremento no tráfego levaria a mais conflitos, um fluxo menos eficiente e maior carga de trabalho. Entretanto, análises de correlação mostraram que na fase suave, a eficiência do fluxo é mantida, mesmo com o aumento do número de conflitos em relação à fase livre. Além disso, há um incremento muito pequeno na carga de trabalho dos ATCO. Esse fenômeno é conhecido como “inibição de complexidade cognitiva” e consiste na redução da carga de trabalho pela simplificação da estratégia de controle para o cenário do momento (YANG *et al*, 2017).

Na fase suave, os tráfegos são instruídos a manter as trajetórias das STAR e suas restrições de velocidade padrão, para que seja formada uma estrutura familiar e estável de tráfego. Na fase semiestável, o fluxo médio aproxima-se de seu valor máximo e a capacidade máxima dos setores é atingida. À medida que o volume de tráfego e os conflitos crescem, os ATCO definem pontos específicos ao longo das STAR (ponto de confluência de rotas por exemplo), para aplicar “vetorações” radar. Isso cria uma padronização que diminui a carga de trabalho (YANG *et al*, 2017).

Quando os conflitos entre as aeronaves crescem demasiadamente, os ATCO procuram ser mais diretos nas comunicações e as priorizam de acordo com os conflitos que se apresentam. Por fim, na fase de congestionamento, os controladores passam a priorizar a segurança à eficiência, e na falta de ferramentas precisas para lidar com o caos, passam a aplicar separações maiores e muitas “vetorações” e esperas nas aeronaves (YANG *et al*, 2017).

O resultado deste estudo de caso evidencia que o fluxo de tráfego aéreo segue o diagrama fundamental, da mesma forma que o tráfego rodoviário e que a influência dos fatores humanos na gênese de congestionamentos de tráfego, especialmente em momentos de maior demanda, poderia ser evitados caso ferramentas de apoio à decisão, como o AMAN, auxiliasse os controladores de tráfego aéreo, evitando por exemplo reduções de velocidades excessivas e esperas em voo.

4 DADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO EM TEMPO ACELERADO

Realizaram-se simulações em tempo acelerado para averiguar os efeitos de diferentes padrões de gestão de velocidades das aeronaves na eficiência dos fluxos de tráfego aéreo. Utilizou-se o simulador conhecido como *Total Airspace and Airport Modeler*, desenvolvido pela empresa americana *Jeppsen*.

Simulou-se o cenário de aeronaves em aproximação para o aeroporto de Guarulhos, com os planos de voo extraídos do SIGMA, referentes ao dia 28 de fevereiro de 2019, véspera de carnaval, com a configuração das STAR para a pista 09 da direita (09R), representadas na Figura 5 a seguir. Essas STAR conduziam as aeronaves ao procedimento de aproximação de precisão ILS T, da pista 09R.

O movimento total foi de 309 aeronaves. Consideraram-se as condições meteorológicas favoráveis (Tabela 1).

Tabela 1 – Movimentos Nacionais e Internacionais por Região para o aeroporto de Guarulhos

Movimentos Nacionais por Região

	2016	2017	2018	Particip.
Nacionais	182.633	181.275	201.799	100%
Reg. Sudeste	42.563	41.061	44.767	22,2%
Reg. Sul	47.523	48.492	53.412	26,5%
Reg. Centro-Oeste	25.875	24.041	28.685	14,2%
Reg. Nordeste	58.966	60.218	65.934	32,7%
Reg. Norte	7.706	7.463	9.001	4,5%

Movimentos Internacionais por Região

	2016	2017	2018	Particip.
Internacionais	69.066	68.533	73.673	100%
América do Sul	32.675	31.565	33.955	46,1%
América Central	3.718	4.482	4.516	6,1%
América do Norte	14.908	15.027	16.435	22,3%
Europa	13.730	13.480	14.862	20,2%
Ásia	2.201	1.628	1.588	2,2%
África	1.834	2.351	2.317	3,1%

Fonte: Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (2018, p. 6).

Cada uma das simulações gerou como *outputs*: “consumo de combustível” e “tempo de espera”. Escolheu-se como indicador o tempo de espera e não o número de esperas, porque ao iniciar uma espera, nem sempre a aeronave a completa, pois o controlador pode solicitar que uma aeronave a abandone assim que se obtém a separação mínima requerida.

Figura 5 – Espaço Aéreo da Terminal São Paulo com as STAR utilizadas nas simulações



Fonte: Dos autores.

A primeira simulação realizada utilizou uma base de dados padrão denominada *Base of Aircraft Data (BADA)*, existente no próprio simulador e que atribuiu uma velocidade para cada uma das aeronaves, de acordo com a suas *performances* e com a fase do voo em que se encontravam. Além disso, o simulador considerou as restrições de velocidades impostas pelas próprias STAR e alterou as velocidades das aeronaves para manter a separação mínima requerida de 5 milhas náutica entre elas. Como *outputs* dessa primeira simulação, obteve-se um tempo de espera de 5 horas e 43 minutos, aproximadamente, e um total de consumo de combustível de 137 toneladas.

A segunda simulação considerou as aeronaves mantendo altas velocidades, pelo maior tempo possível, sem cumprir as restrições de velocidade das STAR e as velocidades ideais de acordo com a *performance*, para efeitos de economia de combustível. Para esses parâmetros, obteve-se como *outputs* um tempo de espera de aproximadamente 10 horas 47 minutos e um consumo de combustível de 123 toneladas.

Por fim, a terceira simulação utilizou parâmetros que procuraram reproduzir o comportamento mais restritivo dos ATCO, em momentos de maior demanda. Induziu-se esse comportamento mais restritivo pela fixação de separações um pouco maiores entre as aeronaves na aproximação final (de 6 a 8 milhas ao invés de 5 milhas). Isso ocasionou um aumento de separação entre as aeronaves nas trajetórias das STAR, devido à redução das velocidades das aeronaves além do necessário e antes do ponto ideal para se assegurar a separação mínima de 5 milhas náuticas na aproximação final. Para esses parâmetros, obteve-se como *outputs* um tempo de espera de aproximadamente 33 horas e um total de consumo de combustível de 174 toneladas de combustível. Os dados obtidos nas três simulações encontram-se discriminados na Tabela 2.

Tabela 2 – Outputs obtidos nas simulações em tempo acelerado no TAAM

	Parâmetros1(BADA)	Parâmetros 2 (alta velocidade)	Parâmetros 3 (baixa velocidade)
Tempo de espera	05 horas e 43 minutos	10 horas 47 minutos	33 horas
Consumo	137 toneladas	123 toneladas	174 toneladas

Fonte: Dos autores.

Justifica-se o menor consumo de combustível, apresentado nos dados obtidos para o cenário em que as aeronaves mantiveram velocidades elevadas, pelo fato de o TAAM considerar somente o tempo de voo das aeronaves no cálculo de consumo de combustível, sem considerar suas velocidades.

5 DADOS OBTIDOS DOS QUESTIONÁRIOS APLICADOS A PILOTOS E CONTROLADORES DE TRÁFEGO AÉREO

Endereçaram-se questionários aos controladores de tráfego aéreo do APP-SP, do ACC-BS e do ACC-CW, bem como aos gerentes da Célula de Gerenciamento de Fluxo (FMC) São Paulo, Brasília e Curitiba, devido a ser o cenário de interesse para o estudo e possível aplicação de melhorias operacionais. Em função das peculiaridades da Terminal São Paulo à época do estudo, existia a possibilidade de ocorrer descontinuidades em horários de pico, como consequência das decisões tomadas no sequenciamento sem um embasamento técnico adequado e pela ausência de ferramentas de suporte à decisão. Tendo isso em vista, procurou-se elaborar questões que refletissem como os controladores de tráfego aéreo empreendem a gestão de velocidades e quais técnicas e ferramentas utilizam para manter as separações mínimas de segurança entre as aeronaves.

No que concerne ao levantamento de campo, a população do APP-SP, do ACC-BS e do ACC-CW são compostas de 260 ATCO, de acordo com o Sistema de Gerenciamento de Pessoal (DECEA, 2022). Dessa população, uma amostra de 178 participaram da pesquisa. Essa amostra foi suficiente para, em termos de distribuição normal, proporcionar uma confiabilidade de 95%, com uma margem de erro de 5% (BOLFARINE, 2005).

Concomitantemente ao questionário endereçados aos ATCO, enviou-se um questionário estruturado aos pilotos que operam nas STAR para o aeroporto de Guarulhos, com o objetivo de conhecer de que forma realizam as gestões de velocidade das aeronaves. Além disso, buscou-se compreender a percepção dos pilotos sobre a eficácia do emprego das separações alocadas pelos ATCO, bem como da gestão de velocidade realizada por eles.

No que concerne ao levantamento de campo, a população finita de pilotos de empresas aéreas nacionais que operam nas STAR para o aeroporto de Guarulhos, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas Aéreas é de aproximadamente 2600 pilotos (ABEAR, 2022). Dessa população, uma amostra de 115 participou da pesquisa. Essa amostra foi suficiente para, em termos de distribuição normal, proporcionar uma confiabilidade de 95% com uma margem de erro de 10% (BOLFARINE, 2005).

Dentre as respostas obtidas dos controladores de tráfego aéreo, referentes a atrasos em momentos de alta demanda devido ao emprego de velocidades muito altas pelas aeronaves. Constatou-se que a maioria dos respondentes, cerca de 86% discordaram, pelo menos parcialmente, que atrasos em momentos de maior demanda possam ser causados por aeronaves empregando velocidades muito altas.

Com relação à ferramenta mais eficaz para o sequenciamento de aeronaves em momentos de maior demanda, a maioria dos respondentes, 64,6%, optou pela “vetoração” radar, seguida de gestão de velocidades (10,1%) e esperas em voo (9%). Os demais, cerca de 16%, forneceram respostas diversas, dentre as mais relevantes: controle das decolagens, medidas de gerenciamento de fluxo adequadas e definição de horários específicos para “entrar” na Terminal, uma visão alinhada com o conceito de controle por trajetórias 4D.

Quanto à questão da forma com que os controladores de tráfego aéreo procedem para aumentar a separação entre aeronaves, quando necessário, a maioria (75,3%) mencionou que utiliza a experiência adquirida na prática, enquanto os demais empregam técnicas preestabelecidas em publicações ou manuais. Quanto ao método de separação mais utilizado para sequenciar aeronaves para o pouso, 58,4% dos ATCO apontou a separação por distância, enquanto 30,3%, a separação por tempo.

A partir de dados obtidos junto ao Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea e dispostos na Tabela 3, é possível observar que os ATCO, em coordenação com os gerentes de fluxo, definem padrões de separação fixos para aeronaves nas STAR com destino ao aeroporto de Guarulhos, que se repetem ao longo dos meses e que parecem não considerar os diferentes cenários com relação ao vento e variações de demanda

Tabela 3 – Dados de operações reais extraídos dos relatórios diários do CGNA com os padrões de separação em milhas náuticas empregados para sequenciar as aeronaves provenientes das STAR utilizadas pelas aeronaves com destino ao aeroporto de Guarulhos.

Data	separação	separação	separação	Equipe
06/01/2018	30	20	30	1
07/01/2018	30	30	30	2
24/01/2018	30	20	20	4
08/02/2018	30	10	20	4
17/05/2018	20	20	20	2
25/05/2018	30	10	30	5
08/06/2018	20	10	30	4
25/06/2018	20	10	30	1
28/06/2018	20	10	30	4
29/06/2018	20	10	30	5
30/06/2018	20	10	20	1
01/07/2018	20	10	30	3
02/07/2018	20	10	30	4
11/07/2018	20	10	20	2
15/07/2018	20	10	30	1
16/07/2018	20	10	30	2
23/07/2018	30	10	30	4
24/07/2018	20	10	30	5
25/07/2018	20	30	30	1

26/07/2018	20	10	30	2
27/07/2018	20	10	30	3
28/07/2018	20	10	30	4
29/07/2018	30	20	30	5
30/07/2018	20	10	30	1
01/08/2018	20	10	30	3
02/08/2018	20	10	30	4
03/08/2018	20	10	30	5
06/09/2018	20	10	30	2
27/10/2018	20	10	30	3
01/11/2018	20	10	30	3
26/11/2018	20	10	30	3
08/12/2018	20	10	30	5
10/01/2019	20	10	30	3
01/02/2019	20	10	30	5
04/02/2019	20	10	30	3
18/02/2019	20	30	30	2
01/04/2019	20	10	30	4
05/04/2019	20	10	30	3
12/04/2019	20	10	30	5
18/04/2019	20	10	30	1
23/07/2019	20	10	30	3
23/11/2019	20	10	30	5

Fonte: Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea (2020).

Revista Brasileira de Aviação Civil

Quanto às considerações finais apresentadas pelos ATCO ao final do questionário, destaca-se a menção à ausência de coordenação, por vezes, entre os ACC-BS e ACC-CW e o APP-SP, o que ocasiona alternância entre acelerações e reduções de velocidade das aeronaves por órgãos de controle distintos. Adicionalmente, os controladores de tráfego aéreo destacaram a necessidade de expansão da infraestrutura do aeroporto de Guarulhos para atender à crescente demanda, bem como o gerenciamento dos horários de decolagem nos aeroportos, para reduzir os atrasos em rota e nas aproximações.

Por fim, os controladores de tráfego aéreo mencionaram a necessidade de implementação do AMAN no APP-SP com a finalidade de contribuir com a redução dos atrasos, uma vez que ele fornece apoio à decisão para os controladores de tráfego aéreo. A partir dos dados obtidos dos questionários aplicados aos pilotos, constatou-se que quase a totalidade deles possui pelo menos 8 anos de experiência.

Evidenciou-se que mais de 70% estão pelo menos parcialmente de acordo de que os atrasos em horários de alta demanda estão associados a emprego de velocidades muito baixas pelas aeronaves. Quanto à técnica mais eficaz para o sequenciamento de aeronaves para o aeroporto de Guarulhos em momentos de alta demanda, a maior parte dos pilotos mencionou que consideravam a gestão de velocidades, em primeiro lugar, seguido por “vetorações” radar e esperas, em segundo e terceiro lugares. Sobre a percepção dos pilotos quanto à gestão de velocidades empregada pelos controladores de tráfego aéreo do APP-SP, mais de 70% deles acredita que, pelo menos parcialmente, ela é ineficaz.

Extraí-se também dos dados obtidos que mais de 35% dos pilotos acreditam que reduzir uma velocidade determinada, sem que tenha havido instruções do controlador de tráfego aéreo, é uma medida eficaz para se evitar atrasos. Constata-se, por fim, das afirmações apresentadas pelos pilotos, que os controladores de tráfego aéreo realizam as gestões de velocidades de forma inadequada, em especial durante as descidas. Adicionalmente, os pilotos acreditam que realizam uma melhor gestão de velocidades, mesmo sem ter a visão completa de todos os fluxos da Terminal, com auxílio do Sistema Anticolisão de Bordo (TCAS).

6 ANÁLISE DOS DADOS

A partir do estudo de caso empreendido na Terminal de Guangzhou, observou-se que em momentos de maior demanda de tráfego e na ausência de ferramentas de apoio à decisão, os controladores de tráfego aéreo acabam por agir de maneira mais restritiva, priorizando segurança à eficiência dos fluxos de tráfego aéreo e reduzindo a velocidade das aeronaves além do necessário. Além disso, constatou-se que os fluxos de tráfego seguem modelos utilizados para o tráfego rodoviário, o que reforça que “congestionamentos fantasma” de tráfego, previstos nesses modelos, talvez possam também se aplicar ao tráfego aéreo.

Analisando-se os dados obtidos pela simulação em tempo acelerado, constatou-se que a ideia intuitiva de que manter altas velocidades implica em menores tempos de voo se provou falsa. Isso se deve ao fato de quando as

aeronaves em alta velocidade precisam reduzi-las em momentos de maior demanda, o fazem mais bruscamente e, dessa forma, as aeronaves que a seguem, e também mantêm altas velocidades, têm de reduzi-las de maneira mais intensa, Da mesma forma, como elas não podem parar completamente no ar, iniciam esperas em voo. Esse efeito parece similar ao que ocorre para o tráfego rodoviário e que geram as *shockwaves*, responsáveis pelos “congestionamentos fantasma”.

Conforme se esperava, para o cenário de simulação de alta demanda, com aumento da separação mínima entre as aeronaves, devido ao emprego de velocidades muito baixas durante o sequenciamento, o tempo total de espera elevou-se consideravelmente, o que demonstrou que comportamentos conservadores dos ATCO, ocasionados pela ausência de técnicas de sequenciamento e ferramentas adequadas de auxílio à decisão, podem ser prejudiciais à eficiência das operações.

Analisando-se os dados obtidos dos questionários aplicados aos controladores de tráfego aéreo, contata-se que algumas respostas evidenciaram que, apesar dos ATCO considerarem a “vetoração” como a melhor técnica, o *layout* da Terminal São Paulo não favorecia seu emprego à época da realização do estudo, devido à proximidade e a alta densidade de trajetórias de chegada e saída existentes. O pequeno percentual de respostas que consideraram a gestão de velocidades como a melhor técnica a ser empregada em momentos de maior demanda, pode estar relacionado à ausência de ferramentas adequadas de apoio à decisão no APP-SP.

Provavelmente, essa percepção mudará caso haja a implementação do AMAN na Terminal São Paulo. Além disso, o desenvolvimento de um manual com técnicas de separação para auxiliar os controladores na gestão de velocidade das aeronaves, sem ter de recorrer tanto a “vetorações” e esperas em voo, poderá favorecer a eficiência dos fluxos de aeronaves em aproximação para o aeroporto de Guarulhos.

Evidenciou-se também a partir das respostas dos controladores de tráfego aéreo, conforme se esperava, que profissionais experientes, que são a maioria dentre os respondentes do questionário, costumam basear-se na experiência para solucionar problemas, já os mais inexperientes, baseiam-se em conhecimento. Isso

muito provavelmente advém da ausência de uma ferramenta de apoio à decisão para definir padrões de separação mais ajustados às situações atuais do tráfego.

Além disso, destaca-se que a falta de coordenação entre um centro de controle de área e um controle de aproximação, conforme mencionado nas respostas dos ATCO, pode ocasionar ineficiências no fluxo e gerar um congestionamento fantasma. O centro de controle pode manter a velocidade das aeronaves muito acima ou muito abaixo do necessário, por desconhecer o cenário corrente no interior da Terminal. Entretanto, velocidades ideais publicadas nas STAR podem reduzir esse efeito, além de diminuir a carga de trabalho entre pilotos e controladores de tráfego aéreo.

A ausência de técnicas de separação normatizadas e de ferramentas de automação e suporte à decisão são os fatores primordiais para os atrasos, conforme mencionado no estudo de caso da Terminal de Gungzhou. Entretanto, apenas 12,9% dos controladores de tráfego aéreo respondentes apontaram a ausência de ferramentas de automação e de auxílio à decisão como fator preponderante que contribui para os atrasos. Esse resultado já era esperado, pois é bastante intuitivo que aeronaves em momento de maior demanda reduzam suas velocidades e que reduções excessivas impactam ainda mais no fluxo, conforme demonstrou-se na simulação em tempo acelerado.

Analisando os dados dos questionários respondidos pelos pilotos, constata-se que maioria deles, assim como ocorreu para os ATCO, discordou, pelo menos parcialmente, que pode haver atrasos associados ao emprego de velocidades muito altas pelas aeronaves, em momentos de maior demanda. Essa percepção ocorre porque não é intuitivo considerar que atrasos podem aumentar caso as aeronaves empreguem velocidades muito altas.

Diferentemente das respostas dos ATCO, os pilotos consideraram a “vetoração” como técnica mais eficaz. De fato, a gestão de velocidades, caso empregada de modo adequado, é a técnica menos restritiva de todas, além de manter as aeronaves nas trajetórias previstas das STAR. O expressivo número de respostas que consideram “vetorações” radar a técnica mais eficaz pode estar relacionada à percepção por parte dos pilotos de que a gestão de velocidades pelos controladores de tráfego aéreo não é realizada de forma adequada e que

esses pilotos prefeririam manter uma velocidade maior, mesmo tendo que ser desviados de suas trajetórias padrão.

Apesar da utilização da ferramenta AMAN pelos ACC-BS e ACC-CW, demonstrou-se ao longo do artigo que sua versão atual possui diversas limitações e apenas informa em quantos minutos um tráfego precisa ser atrasado ou adiantado, mas não informa de que forma isso deve ser feito. Ressalta-se que, além da melhoria dos requisitos do AMAN, necessita-se de um manual para orientar o controlador de tráfego aéreo a separar e sequenciar as aeronaves de acordo com o sugerido pelo sistema.

Da mesma forma, praticamente a mesma porcentagem de pilotos acredita que alterar a velocidade determinada por um ATCO, nesse caso para um valor superior, é uma medida eficaz para se evitarem atrasos. No entanto, pelos mesmos motivos da redução, uma aceleração empregada sem autorização de um controlador de tráfego aéreo pode potencializar os atrasos, já que o piloto não consegue visualizar o cenário completo da Terminal naquele instante e nem sabe qual o planejamento do controlador de tráfego aéreo para o sequenciamento das aeronaves.

O comportamento de se aumentar a velocidade de uma aeronave sem autorização do ATCO é muitas vezes empregada pelos pilotos quando se percebe, com o auxílio do equipamento TCAS, que a aeronave à frente está muito distante e deseja-se reduzir essa distância, ou como forma de tentar “passar à frente” de outras aeronaves em um sequenciamento conduzido por um ATCO. A maior parte dos pilotos crê que o método de separação de aeronaves por distância é o mais apropriado. Entretanto, uma parte significativa deles, 31.3%, considera a separação por tempo mais apropriada e mencionam que isso é realizado de maneira eficaz em algumas terminais do mundo.

Portanto, a partir da bibliografia consultada e dos dados obtidos no estudo de caso apresentado, em simulação e pelos questionários aplicados a pilotos e a controladores de tráfego aéreo, evidenciou-se que a ausência de ferramentas de apoio à decisão e de técnicas de separação podem conduzir a uma gestão inadequada das velocidades por parte dos controladores de tráfego aéreo, e que isso desencadeia um “congestionamento fantasma” de tráfego aéreo, uma vez que

fluxos de tráfego aéreo se adequam ao diagrama fundamental da mesma forma que o tráfego rodoviário. Adicionalmente, o uso do TCAS pelos pilotos como forma de ajustar a própria velocidade com base no tráfego à sua frente desconsidera o cenário global de fluxo de aproximação em uma Terminal e da mesma forma, pode gerar esse tipo de congestionamento.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho evidenciou que gestões inadequadas de velocidades empreendidas por pilotos e/ou controladores de tráfego aéreo devido a percepções inadequadas do senso comum, a falta de ferramentas de apoio a decisão, ausência de técnicas bem estabelecidas de separação entre aeronaves, ocasionam “congestionamentos fantasma” de tráfego aéreo, que são congestionamentos que parecem não ter uma causa aparente, conforme a hipótese que se desejava comprovar. Esse tipo de congestionamento, inicialmente identificado para fluxos de tráfego rodoviários, está também presente no tráfego aéreo.

A ocorrência deste tipo de congestionamento foge à percepção de parte dos pilotos e dos controladores de tráfego aéreo e pode gerar ineficiências no fluxo de tráfego aéreo. Essas ineficiências poderiam ser evitadas a partir da conscientização da existência dos “congestionamentos fantasmas”, do estabelecimento de técnicas de separação embasadas, de ações de treinamento e de implementações de ferramentas de apoio à decisão.



REFERÊNCIAS

ATHÈNES, S.; AVERTY, P.; PUECHMOREL, S.; DELAHAYE, D.; COLLET, C. **ATC Complexity and Controller workload: trying to bridge the gap**. HCI-Aero, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS AÉREAS. **Dados e fatos**. Disponível em: < <https://www.abear.com.br/imprensa/dados-e-fatos/>> Acesso em: 24 de jan de 2022.

BOLFARINE, Heleno. **Elementos de Amostragem**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2005.

BRUSSELS. European Organization for the Safety of Air Navigation. **Arrival manager: implementation guidelines and lessons learned**. Brussels: Eurocontrol, 2010. Disponível em: <https://skybrary.aero/bookshelf/books/2416.pdf>. Acesso em: 25 July 2020.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. **Anuário Estatístico 2018**. Disponível em: <http://portal.cgna.decea.mil.br/> .Acesso em: 23 de jan. de 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. **Anuário Estatístico 2020**. Disponível em: <http://portal.cgna.decea.mil.br/>. Acesso em: 23 de jan. de 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. **Relatórios Operacionais Diários 2020**. Disponível em: <http://portal.cgna.decea.mil.br/> .Acesso em: 25 de jan. de 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Sistema de Gerenciamento de Pessoal Operacional**, c2022. Disponível em: <https://servicos.decea.mil.br/> .Acesso em: 25 de jan. de 2022.

GILBERT, Glen A. Historical Development of the Air Traffic Control System. **IEEE Transactions on Communications**, United State, v. 21, n. 5, p. 364-375, may 1973.

NAGAOKA, S.; GWIGNER, C. **Data and queueing analysis of a Japanese air-traffic flow**. European Journal of Operational Research, Amsterdam, v.235, n.1, p.265-275, 2014.

SUBEDI, Bimal. **Arrival Manager (AMAN) and its implementation study in Vilnius International Airport**. 2015. Final work (Bachelor's degree in Air Traffic Controller)

- Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels, Universitat Politècnica de Catalunya, Vilnius, 2015.

TREIBER, Martin; KESTING, Arne. **Traffic Flow Dynamics – Data, Models and Simulation**. Berlin: Springer, 2013.

WICKENS, Christopher D.; MAVOR, Anne S.; MCGEE, James P. **Flight to the future: human factors in air traffic control**. Washington D.C: National Academy Press, 1997.

YANG, Lei *et al.* Empirical exploration of air traffic and human dynamics in terminal airspaces. **Transportation Research Part C: emerging technologies**, United Kingdom, n. 84, p. 219-244, nov. 2017.

