

A retomada do crescimento do movimento aéreo no Atlântico Sul pós-pandemia COVID-19 e o gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo: a aferição da capacidade do espaço aéreo por meio de um novo modelo matemático

The resumption of air movement growth in the post-COVID-19 pandemic South Atlantic and air traffic flow management: measuring airspace capacity through a new mathematical model

La reanudación del crecimiento del movimiento aéreo en la pandemia del Atlántico Sur posterior COVID-19 y la gestión del flujo del tránsito aéreo: medición de la capacidad del espacio aéreo a través de un nuevo modelo matemático

Eliseu Cavalcanti de Albuquerque^I

Pedro Arthur Linhares Lima^{II}

RESUMO

A situação geoestratégica do Brasil possui extrema relevância no processo decisório das políticas de desenvolvimento da América do Sul. Com a aprovação do Acordo de Livre Comércio entre o Mercosul e a União Europeia, espera-se um considerável crescimento do movimento aéreo de cargas e passageiros. Embora os impactos causados pela pandemia da COVID-19 tenham sido catastróficos para a aviação mundial, a retomada das operações aéreas com o crescimento represado da indústria poderá provocar congestionamentos no espaço aéreo. Esse quadro propositivo poderá ser ainda mais severo no espaço aéreo oceânico, onde há o corredor aéreo que liga a Europa à América do Sul, e causar sérias consequências econômicas para os países da Região. Com o objetivo de garantir maior precisão nos cálculos para definir as capacidades dos setores de espaço aéreo, foi apresentada neste estudo uma modelagem matemática capaz de aferir as capacidades das porções aéreas, que se mostrou mais adequada às

normas internacionais. Os resultados precisos dos cálculos proporcionarão a criação de indicadores de qualidade que nortearão os investimentos em tecnologias, equipamentos e recursos humanos, para melhorar a eficiência do sistema de gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo frente ao crescimento do movimento aéreo no espaço aéreo do Atlântico Sul.

Palavras-chave: Capacidade. Crescimento. Gerenciamento. Atlântico Sul.

ABSTRACT

The geostrategic situation in Brazil is extremely relevant in the decision-making process of development policies in South America. With the approval of the Free Trade Agreement between Mercosur and the European Union, a considerable growth in air cargo and cargo movement is expected. passengers. Although the impacts caused by the COVID-19 pandemic were catastrophic for world aviation, the resumption of air operations with the dammed growth of the industry

I. Universidade da Força Aérea (UNIFA). Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Mestrando em Ciências Aeroespaciais pela Universidade da Força Aérea (UNIFA). E-mail: eliseucavalcanti@yahoo.com.br

II. Universidade da Força Aérea (UNIFA). Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Doutorado em Engenharia da Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). E-mail: linharespall@fab.mil.br

Recebido: 19/11/20

Aceito: 15/09/21

could cause congestion in the airspace. This propositional picture could be even more severe in oceanic airspace, where there is an air corridor that connects Europe to South America, and cause serious economic consequences for the countries of the Region. In order to ensure greater precision in the calculations to define the capacities of the airspace sectors, a mathematical model capable of measuring the capacities of the aerial portions was presented in this study, which proved to be more adequate to international standards. The accurate results of the calculations will provide the creation of quality indicators to guide investments in technologies, equipment and human resources, in order to improve the efficiency of the air traffic flow management system in view of the growth of air movement in airspace of the South Atlantic.

Keywords: Capacity. Growth. Management. South Atlantic.

RESUMEN

La situación geoestratégica de Brasil es de gran relevancia en el proceso de toma de decisiones de las políticas de desarrollo en Sudamérica. Con la aprobación del Tratado de Libre Comercio entre Mercosur y la Unión Europea, se espera un crecimiento considerable de carga y pasajeros aéreos. Aunque los impactos causados por la pandemia de COVID-19 fueron catastróficos para la aviación mundial, la reanudación de las operaciones aéreas con el crecimiento de la industria represada podría causar congestión en el espacio aéreo. Este panorama proposicional podría ser aún más severo en el espacio aéreo oceánico, donde existe un corredor aéreo que une Europa y Sudamérica, y ocasiona graves consecuencias económicas para los países de la Región. Con el fin de asegurar una mayor precisión en los cálculos para definir las capacidades de los sectores del espacio aéreo, en este estudio se presentó un modelo matemático capaz de medir las capacidades de las porciones aéreas, el cual resultó más adecuado a los estándares internacionales. Los resultados precisos de los cálculos proporcionarán la creación de indicadores de calidad para orientar las inversiones en tecnologías, equipos y recursos humanos, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema de gestión de flujo del tránsito aéreo en vista del crecimiento del movimiento aéreo en el espacio aéreo del Atlántico Sur.

Palabras clave: Capacidad. Crecimiento. Gestión. Atlántico Sur.

1 INTRODUÇÃO

A posição geoestratégica do Brasil na América do Sul influencia diretamente os países da Região nos processos políticos decisórios para o desenvolvimento da América do Sul, ressalta a Política Nacional de Defesa (BRASIL, 2020, p. 77). Como um dos elementos dominantes desse cenário, que permeia as relações internacionais no entorno estratégico sul-americano, está o espaço aéreo brasileiro que, segundo o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2021),

[...]estende-se além de suas fronteiras. Ultrapassa a área sobre seu território e alcança uma significativa parte do Oceano Atlântico, perfazendo um total de 22 milhões de km², sobre terra e mar, acordados em Tratados Internacionais.

Essa abrangência torna o Brasil responsável pelo gerenciamento dos voos no principal corredor aéreo oceânico sul-americano, por onde passam os voos comerciais e de cargas que trafegam entre a Europa e a América do Sul. Para esse corredor, há uma expectativa de crescimento do movimento das operações aéreas, face à aprovação do Acordo de Livre Comércio entre o Mercosul e a União Europeia. Segundo a Agência Brasil,

os países do Mercosul e da União Europeia formarão uma das maiores áreas de livre comércio do planeta a partir do Acordo anunciado dia 28 de junho de 2019, em Bruxelas. Juntos, os dois blocos representam cerca de 25% da economia mundial e um mercado de 780 milhões de pessoas. (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

O aquecimento econômico estimulado pelo Acordo entre a União Europeia e o Mercosul deve incrementar o crescimento da aviação aérea de carga e de passageiros no espaço aéreo oceânico da Atlântico Sul, o qual foi impactado pela emergência sanitária da COVID-19. Esse prognóstico desperta a necessidade de avaliar a capacidade de absorção de aeronaves no principal corredor aéreo oceânico da América do Sul, sob a responsabilidade do Brasil, onde está canalizada toda a demanda de tráfego aéreo que transita entre a Europa e a América do Sul.

Conforme destaca a Publicação de Informações Aeronáuticas (DECEA, 2020), o espaço aéreo brasileiro, em função da sua imensa área, está dividido em porções menores, as quais são chamadas de setores. A Publicação de Informações Aeronáuticas (DECEA, 2020) ainda ressalta que a prestação dos serviços de tráfego aéreo nos setores do espaço aéreo oceânico ocorre por meio da Comunicação por Enlace de Dados Controlador e Piloto (CPDLC) e da Vigilância

Dependente Automática - Contrato (ADS-C), sem o auxílio de radares. Em função disso, há maiores imprecisões em relação às posições das aeronaves nas rotas aéreas, para fins de monitoramento.

Diante dessa conjuntura operacional, a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI, 2016) prevê a aplicação de separações longitudinal de 80 milhas náuticas, aproximadamente, 148 km, e lateral de 50 milhas náuticas, cerca de 93 km, entre as aeronaves que ocupam as mesmas altitudes e as mesmas rotas de voo. Em virtude dessas características, as coordenadas geográficas dispostas na Publicação de Informações Aeronáuticas - Brasil (DECEA, 2020) definem grandes setores para o espaço aéreo oceânico brasileiro.

Com vistas ao gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, para garantir a equidade e a qualidade da prestação dos serviços de tráfego aéreo, é fundamental estabelecerem-se as capacidades desses setores, a fim de obter-se o equilíbrio entre as demandas de tráfego aéreo e as capacidades. O DECEA, por meio do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), desenvolveu uma metodologia de cálculo de capacidade de setores, detalhada no Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014), com fulcro em normas internacionais.

Esse modelo utilizado no Brasil permite aferir as capacidades dos setores de espaço aéreo, contudo a precisão dos resultados de medição está ajustada para setores onde a média dos tempos de voo, medidos desde a entrada até a saída das aeronaves do setor, não seja maior que 28 minutos. Acima disto, os valores encontrados poderão estar eivados de efeitos discrepantes, conforme admite o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 13-14): “O fator de convergência tem a função de minimizar os efeitos discrepantes em setores grandes [...]”.

Face ao cenário apresentado e levando-se em conta a importância da medição precisa das capacidades dos setores do espaço aéreo oceânico para o gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, em função da expectativa do crescimento do movimento aéreo sobrejacente ao Atlântico Sul, este artigo propõe um novo modelo matemático com o objetivo de anular as distorções provocadas por longos tempos de voo no setor que atual fórmula não pode dirimir, de modo a produzir valores de capacidade de setores dentro dos limites previstos em normas internacionais.

Agora, com o cenário de pesquisa totalmente contextualizado, passa-se a tratar do problema de pesquisa, e dos objetivos geral e específicos que conduzirão o desenvolvimento do trabalho científico.

1.1 Problema de pesquisa

O problema de pesquisa reside em saber como o novo modelo matemático poderá mitigar os efeitos discrepantes causados pelos longos tempos de voo no setor de controle e limitar os valores de capacidade calculados àqueles previstos em normas?

1.2 Hipótese

Espera-se que o novo modelo matemático seja capaz de anular os efeitos discrepantes causados pelos longos tempos de voo no setor e gerar resultados de capacidade dentro dos limites das normas em vigor.

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivo geral

Por objetivo geral do trabalho visa-se analisar os modelos matemáticos atual e proposto utilizados para medir a capacidade dos setores do espaço aéreo, a fim de identificarem-se os efeitos discrepantes do atual modelo e os artifícios matemáticos criados para o modelo proposto, que poderão anular as distorções dos resultados de capacidade, causadas pelos longos tempos de voo no setor.

1.3.2 Objetivos específicos

Por objetivos específicos tem-se a finalidade de:

- 1) examinar as características e identificar as distorções do atual modelo matemático adotado pelo DECEA para medir a capacidade do espaço aéreo;
- 2) detalhar os cálculos do atual modelo e do modelo proposto; e
- 3) calcular a capacidade de setor, com dados reais, com o novo modelo matemático.

1.4 Justificativa

A proposta acadêmica e profissional do projeto é de desenvolver um modelo matemático capaz de aferir as capacidades dos grandes setores do espaço aéreo, visto que a atual fórmula matemática chancelada pelo DECEA, prevista no Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 13-14), apresenta efeitos discrepantes para setores em que o tempo médio de voo é superior a 28 minutos.

Nesse sentido, desenvolver um novo modelo matemático, capaz de anular os efeitos indesejáveis procedentes da atual fórmula, contribuirá para o

desenvolvimento de resultados mais precisos e de indicadores que poderão nortear os investimentos em tecnologias, equipamentos, recursos humanos e procedimentos para melhor eficiência do gerenciamento do fluxo no espaço oceânico do Atlântico Sul.

1.5 Metodologia do trabalho de pesquisa

1.5.1 Abordagem da pesquisa

Os estudos do trabalho científico foram abordados de maneira quantitativa, pois, foram realizados cálculos com base em dados reais de grandes setores de controle, utilizando o atual modelo matemático e o modelo proposto.

1.5.2 Objetivo da pesquisa

Do ponto de vista do objetivo, a pesquisa foi explicativa, pois foram coletados dados reais da operação, para identificarem-se as discrepâncias produzidas pelo atual modelo matemático utilizado para cálculo de capacidade dos setores e, posteriormente, os mesmos dados foram inseridos no novo modelo matemático e comparados os resultados.

1.5.3 Tipo de pesquisa

Quanto ao tipo, a pesquisa foi documental. Do ponto de vista teórico, para construir uma base científica, foram estudados documentos do Comando da Aeronáutica do Brasil e da Organização de Aviação Civil Internacional que tratam o tema, bem como os escritos que abordam os possíveis efeitos econômicos advindos do acordo entre o Mercosul e a União Europeia e que ressaltam a importância do corredor aéreo oceânico da América do Sul, diante da expectativa de crescimento das operações aéreas na região.

1.5.4 Validação da pesquisa

Foram coletados, *in loco*, no Centro de Controle de Área Atlântico, dados reais da operação, para que fossem calculados os valores de capacidade de setores do espaço aéreo oceânico brasileiro utilizando a fórmula matemática proposta. Os resultados obtidos passaram por uma análise criteriosa dos controladores de tráfego aéreo do Centro de Controle de Área Atlântico, que levaram em conta os critérios técnicos operacionais para a validação dos resultados encontrados com a utilização do modelo proposto.

1.6 Estrutura do trabalho de pesquisa

O trabalho de pesquisa está dividido em 4 capítulos, constituídos, respectivamente, da Introdução, Desenvolvimento Econômico e o Entorno Estratégico, Espaço Aéreo Brasileiro, Análise dos Modelos Matemáticos para o Cálculo de Capacidade e Conclusão.

O capítulo 1 aborda, de forma resumida, a posição geoestratégica do Brasil na América do Sul e a conjuntura econômica futura da região face à aprovação do acordo entre o Mercosul e a União Europeia, bem como discorre acerca da expectativa da retomada do crescimento das operações aéreas.

Os escritos do capítulo 2 estão dedicados à abordagem da expectativa de desenvolvimento econômico da América do Sul, à importância da retomada das operações aéreas para os países do entorno estratégico da América do Sul e aos impactos causados pela emergência sanitária da COVID-19.

No capítulo 3, são apresentadas as estruturas do espaço aéreo brasileiro e as particularidades dos setores do espaço aéreo oceânico.

No capítulo 4, discorre-se sobre a metodologia de capacidade adotada pelo Brasil, para estabelecer as capacidades dos setores, bem como são aprofundadas as análises dos modelos matemáticos.

Por último, é apresentada a conclusão, com os destaques relevantes que desencadearam profundas investigações e trouxeram dados suficientes às principais questões arvoradas no trabalho de pesquisa.

2 DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E O ENTORNO ESTRATÉGICO

A aprovação do Acordo de Livre Comércio entre o Mercosul e a União Europeia sinaliza que o país deverá preparar-se para um forte crescimento econômico, pois, conforme destaca a Agência Brasil,

[...] o Acordo só perde para o Tratado Continental Africano de Livre Comércio, que envolve 44 países da África e foi assinado em março de 2019. Mesmo assim, União Europeia e Mercosul fecharam o maior Acordo entre blocos econômicos da história, o que deve impulsionar fortemente o comércio entre os dois continentes. (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

O Acordo de Livre Comércio entre o Mercosul e a União Europeia promete aquecer as economias da Europa e da América do Sul e, conseqüentemente, movimentará a indústria de transporte aéreo, demandada pelos países participantes do acordo, a fim de atender o crescimento do transporte de carga e de passageiros. La

emergencia sanitaria del COVID-19, en este contexto, frenó la proyección de crecimiento de las operaciones aéreas, además de hacer caer el movimiento aéreo en abril de 2020 al equivalente del 30% de las operaciones aéreas de 2019, según el Informe Comparativo de Movimiento Aéreo (DECEA, 2021). Sin embargo, con el enfriamiento de la pandemia de COVID-19 resultante de la campaña de vacunación, se observan datos del Informe Comparativo de Movimientos Aéreos (DECEA, 2021) que indican la reanudación de las operaciones aéreas con un crecimiento sostenible desde mayo de 2021.

A retomada das operações aéreas pós - COVID-19 é de interesse de todos os países do mundo, especialmente, daqueles do entorno estratégico sul-americano que sofrerão influências diretas do crescimento das atividades econômicas, advindas do Acordo de Livre Comércio entre o Mercosul e a União Europeia. A conjuntura econômica prospectiva apresenta contornos que poderão fortalecer as relações internacionais entre os entes envolvidos e despertar o interesse colaborativo de investir em melhorias para os sistemas de controle de tráfego aéreo da Região, com vistas à expansão do movimento aéreo do Atlântico Sul.

Conforme orienta a Política Nacional de Defesa (BRASIL, 2020, p. 17).

No âmbito regional, a convergência de interesses contribui para o incremento da cooperação entre os países sul-americanos, o que poderá promover a consolidação da confiança mútua e a execução de projetos de defesa, visando, entre outros, ao desenvolvimento tecnológico e industrial, além de estratégias para a solução de problemas comuns.

Nesse contexto, face à identificação de um problema comum, o espaço aéreo oceânico brasileiro, responsável pelo gerenciamento do tráfego aéreo no corredor que liga a Europa à América do Sul, apresenta-se como um meio estratégico para os países da região, e a aferição da capacidade de absorção de aeronaves no corredor aéreo oceânico, nessa relação, é de suma importância para que sejam diagnosticadas as fragilidades técnicas e operacionais que restringem a prestação do serviço de navegação aérea sobrejacente ao Atlântico Sul.

3 ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

O espaço aéreo brasileiro, que cobre todo o território nacional, possui limites além de suas fronteiras, incluindo águas territoriais e jurisdicionais, bem como o espaço aéreo que tenha sido objeto do Acordo Regional de Navegação Aérea. Em consonância com o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2021), o espaço aéreo brasileiro

[...]estende-se além de suas fronteiras. Ultrapassa a área sobre seu território e alcança uma significativa parte do Oceano Atlântico, perfazendo um total de 22 milhões de km², sobre terra e mar, acordados em tratados internacionais.

Em função da extensa área, o DECEA dividiu o espaço aéreo brasileiro em porções menores denominadas FIR - Região de Informação de Voo -, espaço aéreo de dimensões definidas, sob responsabilidade dos Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA), conforme detalha o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2021).

- CINDACTA I (Brasília-DF) Responsável pela FIR Brasília, que abrange a região central do Brasil;
- CINDACTA II (Curitiba-PR) Responsável pela FIR Curitiba, que abrange o sul e parte do centro-sul brasileiro;
- CINDACTA III (Recife-PE) Responsável pelas FIR Recife e Atlântico, que abrangem o Nordeste e área sobrejacente ao Atlântico;
- CINDACTA IV (Manaus-AM) Responsável pela FIR Manaus, que se estende sobre grande parte da região amazônica.

O espaço aéreo oceânico, objeto deste estudo, está sob a égide do CINDACTA III e, de acordo com a Publicação de Informações Aeronáuticas - Brasil (DECEA, 2020), operacionalmente, é monitorado pelo Centro de Controle de Área Atlântico (ACC-AO), que presta o serviço de tráfego aéreo na área sobrejacente ao Atlântico Sul.

3.1 Espaço aéreo oceânico brasileiro

Segundo o Relatório de *Performance* ATM do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (DECEA, 2019), o CINDACTA III é o

responsável pelo controle e gerenciamento do espaço aéreo de uma área que totaliza 14,3 milhões de quilômetros quadrados, sendo 12,2 milhões de metros quadrados da FIR Atlântico e 2,1 milhões de metros quadrados da FIR-RE.

O espaço aéreo oceânico brasileiro, em função da sua área de extensão de 12,2 milhões de metros quadrados, está dividido em setores, organizadamente, dispostos no ambiente operacional do Centro de Controle de Área Atlântico, conforme destaca a Publicação de Informações Aeronáuticas - Brasil (DECEA, 2020).

Os setores estão cadastrados no Sistema Integrado de Gestão de Movimentos Aéreos (SIGMA, 2020), *software* desenvolvido pela empresa ATECH para o CGNA, e, segundo as pesquisas realizadas no SIGMA, os aviões, ao adentrarem nos setores do espaço aéreo oceânico brasileiro, levaram entre 1 hora e 2 horas e 40 minutos para deixá-los.

4 ANÁLISE DOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA OS CÁLCULOS DE CAPACIDADE

4.1 Modelo brasileiro de cálculo de capacidade de setor

O DECEA estabeleceu o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014) para o cálculo de capacidade dos setores do espaço aéreo, com base na carga de trabalho a que o controlador de tráfego aéreo será submetido. Essa variável será composta por todas as tarefas desenvolvidas pelos controladores na prestação do serviço de controle de tráfego aéreo. O Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 9) define que carga de trabalho

é o tempo utilizado pelo controlador de tráfego aéreo no processamento de todas as tarefas que uma posição de controle exige, em um intervalo de tempo, para manter o tráfego seguro e ordenado.

Os controladores de tráfego aéreo realizam tarefas de comunicação com os pilotos, bem como efetuam contatos telefônicos com outros órgãos de controle e utilizam as ferramentas do sistema de controle de tráfego aéreo para inserção de dados e planejamento. O CGNA, de acordo com o previsto no Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014), realiza, periodicamente, o levantamento de dados estatísticos relativos aos tempos médios de comunicação entre controladores e pilotos (T_{com}); aos tempos médios de tarefas secundárias (TTS), que representam contatos telefônicos com outros órgãos de controle e utilização das ferramentas do sistema; e aos tempos médios de permanência no setor (T), que correspondem ao tempo em que as aeronaves permanecem no setor. Esses dados são coletados *in loco*, no órgão de controle, observada a operação real. Após a coleta, as variáveis são inseridas no modelo matemático brasileiro adotado para o cálculo de capacidade de setores, previsto no Manual de Capacidade ATC (DECEA, 2014, p. 13), conforme apresentado na Tabela 1.

$$N_{ref} = \frac{(T \times \alpha_n)}{(T_{com} + TTS) \times 1,30}$$

Tabela 1 – Parâmetros do modelo matemático.

N_{ref}	Capacidade de setor ATC calculada
T	Tempo médio de permanência da aeronave no setor (em segundos)
T_{com}	Tempo médio de comunicação do controlador (transmissão e recepção) com a aeronave (em segundos)
TTS	Tempo médio despendido pelo controlador em tarefas secundárias (em segundos)
α_n	Fator de convergência
$1,30$	Fator cognitivo

Fonte: DECEA (2014).

Segundo o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 13), o Número de Referência (N_{ref}) expressa

o número ótimo de aeronaves em controle simultâneo que um determinado setor ATC é capaz de manter por um período de tempo, sem que, em momento algum, esse número de aeronaves controladas simultaneamente provoque uma sobrecarga de trabalho para o controlador de tráfego aéreo. Deve-se levar em conta que a capacidade calculada de um setor é o N_{ref} .

O chamado Fator Cognitivo, de acordo com Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 14), representado pela constante de 1,30

é a adição de 30% do tempo empregado nas tarefas de TCom e TTS. Refere-se ao estado de pensar do controlador de tráfego aéreo (fator cognitivo) durante o tempo gasto nas funções de planejamento, organização do tráfego e vigilância radar.

O Fator de Convergência (α_n) apresentado na modelagem foi criado com o objetivo de conter o acelerado crescimento da função linear, quando os tempos médios de permanência das aeronaves no setor forem superiores a 900 segundos. O Manual de Capacidade ATC (DECEA, 2014, p. 13) define que o α_n

é um fator de redução do tempo médio de permanência do tráfego no setor (T). O fator de convergência tem a função de minimizar os efeitos discrepantes em setores grandes para que N_{ref} não seja maior que 18 tráfegos.

A aplicação do fator de convergência, de acordo com o Manual de Capacidade ATC (DECEA, 2014, p. 14), reduz os efeitos discrepantes dos valores de capacidade para setores onde os tempos médios de voo não sejam superiores a 1700 segundos (aproximadamente 28 minutos). Acima desse tempo, há um considerável aumento da margem de erro dos cálculos, que torna o fator de convergência incapaz de ajustar o modelo matemático para tempos de voo superiores a 1 hora, de modo que os valores de capacidade não ultrapassem os limites previstos em normas.

Os estudos de capacidade de setores realizados no Brasil foram fundamentais para o estabelecimento de parâmetros temporais importantes a serem considerados na elaboração da metodologia brasileira de análise de capacidade de setor, contudo o país, como signatário da OACI, ratificou limites de capacidades instituídos pelo *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* (OACI, 2018, p. 133).

A fórmula é baseada em duas hipóteses: primeira, os setores funcionam melhor quando não administram mais de 25 aeronaves durante um período de 15 minutos; e segunda, os setores funcionam melhor quando administram no máximo 18 aeronaves durante um período de um minuto. A hipótese de 25 aeronaves levou à determinação de que cada aeronave requer 36 segundos do tempo de trabalho de um controlador.

Embora o Brasil adote os mesmos limites de capacidade de setores definidos pela OACI, face às peculiaridades do espaço aéreo brasileiro, o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014) estabelece uma metodologia de coleta dos tempos destinados às tarefas realizadas pelos controladores de tráfego aéreo. Esse é um ponto de divergência do Brasil em relação à OACI nos termos *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* (OACI, 2018).

Nesse contexto, ressalta-se que o primeiro limite estabelecido pela metodologia brasileira é denominado número referencial (N_{ref}), que o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 9) define como “número ótimo de aeronaves em controle simultâneo dentro de um setor ATC”. O segundo limite adotado pelo Brasil é chamado de número pico do setor ATC (N_{pico}) que, segundo o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 100),

é a capacidade de controle simultâneo que um determinado setor ATC tem condições de manter, por no máximo 19 (dezenove minutos) em uma hora, contínuo ou não, fins de atender um aumento de demanda de curta duração.

Para encontrar o N_{pico} , é necessário calcular os desvios-padrão do T , T_{com} e do TTS , a fim de que sejam criadas as seguintes variáveis para os cálculos do N_{pico} :

$$T_{m\acute{a}x} = T \text{ m\acute{e}dio adicionado ao desvio-padr\~{a}o;}$$

$$TTS_{m\acute{i}n} = TTS \text{ m\acute{e}dio subtra\~{i}do do desvio-padr\~{a}o; e}$$

$$T_{com\ m\acute{i}n} = T_{com} \text{ m\acute{e}dio subtra\~{i}do ao desvio-padr\~{a}o.}$$

Os valores dessas variáveis são aplicados a esta modelagem matemática para cálculo do N_{pico} .

$$N_{pico} = \frac{T_{m\acute{a}x}}{(T_{com\ m\acute{i}n} + TTS_{m\acute{i}n}) \times 1,30}$$

Outra medida importante que deve ser calculada é a Capacidade Horária do Setor (CHS), que, conforme preconiza o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 15),

[...]é o número de aeronaves que um setor é capaz de prestar o serviço de controle de tráfego aéreo no período de uma hora. É calculada a partir da fórmula a seguir:

$$CHS = \frac{3600 \times (0,683 \times N_{ref} + 0,317 \times N_{pico})}{T}$$

Essa fórmula, atualmente, é utilizada para os cálculos de CHS, contudo, como pode ser observado, esse modelo matemático opera, cartesianamente, os valores do N_{ref} e do N_{pico} , sem levar em consideração o intervalo entre esses números. Por essa razão, os resultados dos cálculos poderão ser superdimensionados.

4.2 Modelos matemáticos propostos para os cálculos de capacidade de setores

Os fatores de convergência do atual modelo atuam na contração do crescimento dos tempos de voo no setor (T), a fim de evitar que os valores de capacidade de setores sejam superiores aos estabelecidos em normas. O Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 13), contudo, assume que os resultados dos cálculos poderão estar contaminados quando o modelo matemático atual for utilizado para cálculo das capacidades de grandes setores do espaço aéreo.

Diante do problema identificado, este artigo propõe um novo modelo matemático que poderá mitigar os efeitos discrepantes, causados pelos longos tempos de voo no setor de controle, e limitar os valores de capacidade calculados àqueles previstos em normas, por meio de um crescimento contínuo, porém controlado, com o auxílio da função logarítmica.

Na proposta, os cálculos de N_{ref} serão realizados com a Fórmula Básica (Fb), que é uma função linear, e com a Fórmula Logarítmica (Fl), conforme aqui apresentado:

$$N_{ref} = Fb = \frac{T}{(T_{com} + TTS) \times 1,30} ,$$

equação utilizada para setores com tempo médio de permanência de até 900 segundos.

$$N_{ref} = Fl = Fb' + \log_n (T - 840) ,$$

onde Fb' é igual a $\frac{900}{(T_{com} + TTS) \times 1,30}$ e a base n

é igual a $8160^{1/(18-Fb')}$, equação utilizada para grandes setores. O número 8160 (ajustável) da base n será utilizado para garantir que o N_{ref} atingirá o seu valor máximo de 18 aeronaves para o tempo médio de permanência no setor (T) igual ou superior a 9000 segundos. Dessa forma, o modelo 1 proposto para o cálculo de capacidade do Número Referencial para grandes setores é o seguinte:

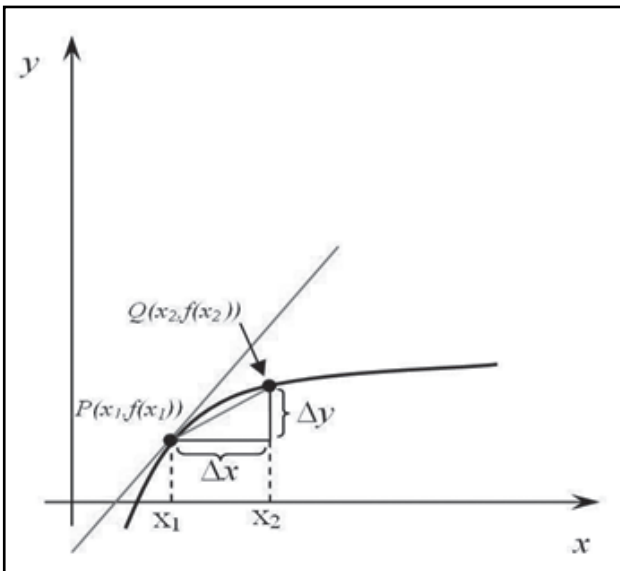
Modelo 1 - Cálculo do N_{ref} .

$$N_{ref} = \frac{900}{(T_{com} + TTS) \times 1,30} + \log_n (T - 840)$$

Fonte: O autor.

O gráfico de crescimento da nova função será formado pela interseção dos gráficos das funções linear e logarítmica, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Funções linear e logarítmica.



Fonte: Stewart (2005).

Com o novo modelo matemático, os cálculos de capacidade do N_{pico} serão realizados com a Fórmula Básica (FB) e com a Fórmula Logarítmica (FL), conforme aqui.

$$N_{pico} = FB = \frac{T_{máx}}{(T_{com_{min}} + TTS_{min}) \times 1,30} ,$$

equação utilizada para setores com tempo médio de permanência de até 900 segundos.

$$N_{pico} = FL = FB' + \log_n (T_{máx} - 840) ,$$

onde FB' é igual a $\frac{900}{(T_{com_{min}} + TTS_{min}) \times 1,30}$ e a

base n é igual a $9960^{1/(25-FB')}$, equação utilizada para grandes setores. O número 9960 (ajustável) da base n será utilizado para garantir que o N_{pico} atingirá o seu valor máximo de 25 aeronaves para o tempo médio de permanência no setor (T) igual ou superior a 10800 segundos.

Dessa forma, o modelo 2 proposto para o cálculo de capacidade do Número Pico para grandes setores é o seguinte:

Modelo 2 - Cálculo do N_{pico} .

$$N_{pico} = \frac{900}{(T_{com_{min}} + TTS_{min}) \times 1,30} + \log_n (T_{máx} - 840)$$

Fonte: O autor.

Com o objetivo de mitigar os valores de capacidade horária de setor (CHS) superdimensionados, gerados pela atual fórmula prevista no Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 15),

$$CHS = \frac{3600 \times (0,683 \times N_{ref} + 0,317 \times N_{pico})}{T} ,$$

e considerando que, por definição, o Número Referencial (N_{ref}) expressa o número ótimo de aeronaves em controle simultâneo no setor, propõe-se este modelo 3 para o cálculo da CHS .

Modelo 3 - Cálculo do CHS .

$$CHS = \frac{3600 \times N_{ref}}{T}$$

Fonte: O autor.

4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Para a validação dos modelos matemáticos propostos, foram utilizados dados reais de T_{com} , TTS e T , coletados *in loco*, no ACC-AO, pela equipe do CGNA, no período de 12 a 23 de março de 2018. Nessa oportunidade, foram calculados, com os novos modelos, os valores de capacidade do agrupamento de setores S2B/S2C/S3, que constitui parte do corredor aéreo que liga a Europa à América do Sul. Esses valores foram validados por meio do Conselho Operacional, formado pela equipe do CGNA e pelos controladores de tráfego aéreo do CINDACTA III.

4.3.1 Dados coletados pelo CGNA para o cálculo do N_{ref}

$$\begin{aligned} TTS &= 135,65 \text{ segundos;} \\ T_{com} &= 105,43 \text{ segundos;} \\ T &= 6987,6 \text{ segundos.} \end{aligned}$$

$$N_{ref} = \frac{900}{(T_{com}+TTS) \times 1,30} + \log_n (T - 840),$$

onde a base n é igual a $8160^{1/(18-Fb')}$, com

$$Fb' = \frac{900}{(T_{com}+TTS) \times 1,30}.$$

Logo, $N_{ref} = 17$. O valor de capacidade encontrado está dentro do limite estabelecido pelo Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 13) e pelo *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* (OACI, 2018, p. 133).

Para o emprego do atual modelo matemático para os cálculos, o fator de convergência (αn), para $T > 1700$ segundos, é de 0,65, conforme destaca o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 14). Dessa forma, o seguinte resultado é encontrado:

$$N_{ref} = \frac{T \times \alpha n}{(T_{com}+TTS) \times 1,30}.$$

Logo, $N_{ref} = 22$, valor acima do limite previsto em normas.

4.3.2 Dados coletados pelo CGNA para o cálculo do N_{pico}

$$\begin{aligned} TTS_{min} &= 70,98 \text{ segundos;} \\ T_{com_{min}} &= 24,16 \text{ segundos;} \\ T_{máx} &= 9290,4 \text{ segundos} \end{aligned}$$

$$N_{pico} = \frac{900}{(T_{com_{min}}+TTS_{min}) \times 1,30} + \log_n (T_{máx} - 840),$$

onde a base n é igual a $9960^{1/(25-FB')}$,

$$\text{com } FB' = \frac{900}{(T_{com_{min}}+TTS_{min}) \times 1,30}. \text{ Logo, } N_{pico} = 21.$$

O valor de capacidade encontrado está dentro do limite estabelecido pelo *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* (OACI, 2018, p. 133).

Para o emprego do atual modelo matemático para os cálculos, o fator de convergência (αn), para $T_{máx} > 1700$ segundos, é de 0,65, conforme destaca o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 14). Dessa forma, o seguinte resultado é encontrado:

$$N_{pico} = \frac{T_{máx}}{(T_{com_{min}}+TTS_{min}) \times 1,30}.$$

Logo, o $N_{pico} = 49$, valor acima do limite previsto em norma internacional.

Após a apresentação dos valores calculados por ambos modelos matemáticos, o Conselho Operacional do CINDACTA III resolveu homologar, em ata de reunião, os valores de capacidade expressos pelos novos modelos matemáticos propostos, que, atualmente, são utilizados pelo ACC-AO.

4.4 Operacionalização do modelo matemático proposto

Para operacionalizar a utilização das novas fórmulas, as equações, disponíveis no tutorial a seguir (DOUTORES DO EXCEL, 2020), poderão ser inseridas em uma planilha de Excel, com intuito de efetuarem-se os testes condicionais e serem gerados resultados, conforme esta sintaxe.

SE(teste_lógico;valor_se_verdadeiro;valor_se_falso).

4.4.1 Cálculo do N_{ref}

$$N_{ref} = SE (T > 900; \frac{900}{(T_{com}+TTS) \times 1,30} + \log_n (T - 840); \frac{T}{(T_{com}+TTS) \times 1,30}),$$

onde a base n é igual a $8160^{1/(18-Fb')}$, com

$$Fb' = \frac{900}{(T_{com}+TTS) \times 1,30}.$$

4.4.2 Cálculo do N_{pico}

$$N_{pico} = SE (T > 900; \frac{900}{(T_{com_{min}}+TTS_{min}) \times 1,30} + \log_n (T_{máx} - 840); \frac{T_{máx}}{(T_{com_{min}}+TTS_{min}) \times 1,30}),$$

onde a base n é igual a $9960^{1/(25-FB')}$, com

$$FB' = \frac{900}{(T_{com_{min}}+TTS_{min}) \times 1,30}.$$

5 CONCLUSÃO

A abertura das fronteiras internacionais, viabilizada pelo arrefecimento da emergência sanitária da COVID-19, e a expectativa de crescimento econômico advinda da aprovação do Acordo de Livre Comércio entre o Mercosul e a União Europeia criam um cenário otimista para a indústria de transporte aéreo internacional, especialmente, para os usuários que planejam incrementar as suas operações aéreas no corredor oceânico, sob

responsabilidade do Brasil, por onde passam as demandas de tráfego aéreo no eixo Europa/América do Sul.

Face à importância geoestratégica do espaço aéreo brasileiro para os países do entorno sul-americano, é de interesse da região que a capacidade do principal corredor aéreo oceânico do Atlântico Sul esteja adequada ao crescimento das operações aéreas para os próximos anos. Para isso, aferir as capacidades dos setores do espaço aéreo oceânico brasileiro com certa precisão é de fundamental importância para a geração de indicadores, que poderão nortear os investimentos em tecnologias, equipamentos, recursos humanos e procedimentos para melhoria dos sistemas de controle de tráfego aéreo, tornando o gerenciamento do fluxo de tráfego no espaço aéreo oceânico mais eficiente.

O serviço de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo não se limita a espaços aéreos congestionados. Nesse sentido, para que o espaço aéreo do Atlântico Sul seja utilizado na sua máxima extensão possível, é necessário que os Provedores de Serviço de Navegação Aérea (ANSP) da região conheçam as capacidades dos seus respectivos setores de espaço aéreo, para que dessa forma seja garantido o equilíbrio entre a demanda e a capacidade dos setores.

Conforme disponibilidade no Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 13), o Brasil desenvolveu um modelo matemático para aferição das capacidades dos setores de espaço aéreo, contudo, o Manual de Capacidade de Setor ATC (DECEA, 2014, p. 13) admite que os resultados, com a utilização do atual modelo, podem apresentar inconsistências para setores grandes. Em função dessa fragilidade, foi desenvolvido um novo modelo matemático, composto pela junção da função linear com a função logarítmica, que, durante o processo de validação, mostrou-se eficiente nos resultados e, comprovadamente, eliminou os efeitos discrepantes causados por longos tempos de voo no setor, gerando as capacidades referenciais, picos e horários dos setores, adequadas e ajustadas de acordo com as normas, o que responde à inquietação do problema de pesquisa.

Com a melhor aferição das capacidades dos setores do espaço aéreo oceânico, os especialistas em gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo poderão adotar as medidas mais otimizadas para garantir-se que os volumes de tráfego aéreo estejam compatíveis com as capacidades declaradas pelas autoridades competentes e promoverem-se estudos com vistas à ampliação das capacidades dos setores do espaço aéreo e à expansão do poder aeroespacial da região.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Mercosul e União Européia fecham maior Acordo**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2019-06/mercosul-e-ue-fecham-maior-acordo-entre-blocos-do-mundo>. 2020. Acesso em: 22 ago. 2020.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Relatório de Performance ATM do SISCEAB**, 2019. Disponível em: http://especiais.decea.gov.br/performance/wp-content/uploads/2020/06/Relatorio_SISCEAB_NET.pdf. Acesso em: 22 ago. 2020.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Espaço Aéreo Brasileiro**. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/?i=quem-somos&p=espaco-aereo-brasileiro>. Acesso em: 22 ago. 2020.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Manual de Capacidade de Setor ATC - MCA 100-17**. [Rio de Janeiro]. Em vigor desde 26 de ago. de 2014.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Publicação de Informações Aeronáuticas - Brasil**. AIP- BRASIL. [Rio de Janeiro], 2020.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Relatório Comparativo de Tráfego Aéreo**, 2021. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/relatorios_trafego_aereo/2021/Relatorio_Comparativo_de_Trafego_Aereo_2021.pdf. Acesso em: 22 de ago. 2021.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Política Nacional de Defesa/ Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília, DF, 2020. – Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-defesa/pnd_end_congresso.pdf. Acesso em: 28 de ago. de 2020.

DOUTORES DO EXCEL TREINAMENTOS ONLINE. **Realizando testes lógicos com a fórmula SE no Excel**. Disponível em: <https://doutoresdoexcel.com.br/se-no-excel/>. Acesso em: 28 de ago. de 2020.

OACI. **Air Traffic Management: Procedures for Air Navigation Services**. Doc. 4444. [Montreal]: 2016.

OACI. **Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ATFM)**. Doc. 9971. [Montreal]: 2018.

STEWART, James. **Cálculo**. Vol.1. 4 ed. São Paulo: Pioneira Thompson, 2005.