

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

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

Eliseu Cavalcanti de Albuquerque ^I

Pedro Arthur Linhares Lima ^{II}

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 mejor 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.

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. Universidad de la Fuerza Aérea (UNIFA). Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Maestro en Ciencias Aeroespaciales por la Universidad de la Fuerza Aérea (UNIFA). *Email:* eliseucavalcanti@yahoo.com.br

II. Universidad de la Fuerza Aérea (UNIFA). Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Doctor en Ingeniería de Producción por la Universidad Federal del Rio de Janeiro (UFRJ). *Email:* linharespall@fab.mil.br

Recibido: 19/11/20

Aceptado: 15/09/21

Las siglas y abreviaturas contenidas en el artículo corresponden a las del texto original en lengua portuguesa.

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.

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.

1 INTRODUCCIÓN

La posición geoestratégica de Brasil en América del Sur influye directamente en los países de la región en los procesos de decisión política para el desarrollo de América del Sur, destaca la Política Nacional de Defensa (BRASIL, 2020, p. 77). Uno de los elementos dominantes de este escenario, que permea las relaciones internacionales en el entorno estratégico sudamericano, es el espacio aéreo brasileño que, según el Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA, 2021),

[...]se extiende más allá de sus fronteras. Supera su territorio y se extiende a una parte importante del océano Atlántico, abarcando un total de 22 millones de km² en tierra y mar, según lo acordado en los tratados internacionales.

Este alcance hace que Brasil sea responsable de la gestión de los vuelos en el principal corredor aéreo oceánico sudamericano, por el que pasan los vuelos comerciales y de carga entre Europa y Sudamérica. Para este corredor, se espera que aumenten las operaciones aéreas, dada la aprobación del Acuerdo de Libre Comercio entre el Mercosur y la Unión Europea. Según la Agência Brasil,

los países del Mercosur y la Unión Europea formarán una de las mayores áreas de libre comercio del planeta a partir del Acuerdo anunciado el 28 de junio de 2019 en Bruselas. Juntos, los dos bloques representan alrededor del 25% de la economía mundial y un mercado de 780 millones de personas.(AGÊNCIA BRASIL, 2019).

El crecimiento económico estimulado por el Acuerdo entre la Unión Europea y el Mercosur debería aumentar el crecimiento de la aviación de carga y de pasajeros en el espacio aéreo oceánico del Atlántico Sur, que se vio afectado por la emergencia sanitaria de la COVID-19. Este pronóstico plantea la necesidad de evaluar la capacidad de absorción de aeronaves en el principal corredor aéreo oceánico de Sudamérica, bajo la responsabilidad de Brasil, donde se canaliza toda la demanda de tráfico aéreo entre Europa y Sudamérica.

Como destaca la Publicación de Información Aeronáutica (DECEA, 2020), el espacio aéreo brasileño, debido a su inmensidad, está dividido en porciones menores, que se denominan sectores. La Publicación de Información Aeronáutica (DECEA, 2020) también destaca que la prestación de servicios de tráfico aéreo en los sectores del espacio aéreo oceánico se produce a través de la Comunicación de Enlace de Datos de Controladores y Pilotos (CPDLC)

y de la Vigilancia Dependiente Automática - Contrato (ADS-C), sin la ayuda de radares. Debido a ello, existen mayores imprecisiones en relación a las posiciones de las aeronaves en las rutas aéreas, a efectos de control.

Ante esta coyuntura operativa, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 2016) prevé la aplicación de separaciones longitudinales de 80 millas náuticas, aproximadamente, 148 km, y laterales de 50 millas náuticas, unos 93 km, entre aeronaves que ocupan las mismas altitudes y las mismas trayectorias de vuelo. Debido a estas características, las coordenadas geográficas dispuestas en la Publicación de Información Aeronáutica - Brasil (DECEA, 2020) definen grandes sectores para el espacio aéreo oceánico brasileño.

Para gestionar el flujo de tráfico aéreo, garantizar la equidad y la calidad en la prestación de servicios de tráfico aéreo, es esencial establecer las capacidades de estos sectores para lograr un equilibrio entre las demandas de tráfico aéreo y las capacidades. DECEA, a través del Centro de Gestión de la Navegación Aérea (CGNA), desarrolló una metodología para el cálculo de la capacidad sectorial, detallada en el Manual de Capacidad Sectorial ATC (DECEA, 2014), basada en estándares internacionales.

Este modelo utilizado en Brasil permite medir las capacidades de los sectores del espacio aéreo, pero la precisión de los resultados de la medición se ajusta a los sectores en los que el tiempo medio de vuelo, medido desde la entrada hasta la salida de las aeronaves del sector, no es superior a 28 minutos. Por encima de esto, los valores encontrados pueden verse afectados por efectos discrepantes, como admite el Manual de Capacidad Sectorial del ATC (DECEA, 2014, p. 13-14): “El factor de convergencia tiene la función de minimizar los efectos discrepantes en los grandes sectores [...]”.

Ante el escenario planteado y teniendo en cuenta la importancia de la medición precisa de las capacidades del sector en el espacio aéreo oceánico para la gestión del flujo de tráfico aéreo, debido al crecimiento previsto del movimiento aéreo sobre el Atlántico Sur, este trabajo propone un nuevo modelo matemático con el objetivo de anular las distorsiones causadas por los largos tiempos de vuelo en el sector que la fórmula actual no puede resolver, para producir valores de capacidad del sector dentro de los límites previstos por las normas internacionales.

Una vez contextualizado el escenario de investigación, el siguiente paso es abordar el problema de investigación y los objetivos generales y específicos que guiarán el desarrollo del trabajo científico.

1.1 Problema de investigación

El problema de la investigación radica en saber cómo el nuevo modelo matemático puede mitigar los efectos discrepantes causados por los largos tiempos de vuelo en el sector de control y limitar los valores de capacidad calculados a los prescritos en las normas?

1.2 Hipótesis

Se espera que el nuevo modelo matemático pueda anular los efectos discrepantes causados por los largos tiempos de vuelo en el sector y generar resultados de capacidad dentro de los límites de las normativas actuales.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es analizar los modelos matemáticos actuales y propuestos utilizados para medir la capacidad de los sectores del espacio aéreo, con el fin de identificar los efectos discrepantes del modelo actual y los artificios matemáticos creados para el modelo propuesto, que pueden anular las distorsiones de los resultados de capacidad causadas por los largos tiempos de vuelo en el sector.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos se centran en:

- 1) examinar las características e identificar las distorsiones del actual modelo matemático adoptado por DECEA para medir la capacidad del espacio aéreo;
- 2) detallar los cálculos del modelo actual y el modelo propuesto; y
- 3) calcular la capacidad del sector, con datos reales, con el nuevo modelo matemático.

1.4 Justificativa

La propuesta académica y profesional del proyecto es desarrollar un modelo matemático capaz de medir las capacidades de los principales sectores del espacio aéreo, ya que la actual fórmula matemática aprobada por el DECEA, proporcionada en el Manual de Capacidades del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 13-14), presenta efectos discrepantes para los sectores en los que el tiempo medio de vuelo es superior a 28 minutos.

En este sentido, el desarrollo de un nuevo modelo matemático capaz de anular los efectos indeseables de la fórmula actual contribuirá al

desarrollo de resultados e indicadores más precisos que puedan orientar las inversiones en tecnologías, equipos, recursos humanos y procedimientos para gestionar mejor el flujo en el espacio oceánico del Atlántico Sur.

1.5 Metodología del trabajo de investigación

1.5.1 Planteamiento de la investigación

Los estudios del trabajo científico se abordaron de forma cuantitativa, ya que se realizaron cálculos basados en datos reales de grandes sectores de control, utilizando el modelo matemático actual y el modelo propuesto.

1.5.2 Objetivo de la investigación

Desde el punto de vista del objetivo, la investigación fue explicativa, ya que se recogieron datos operativos reales para identificar las discrepancias producidas por el modelo matemático actual utilizado para calcular la capacidad de los sectores y, posteriormente, se insertaron los mismos datos en el nuevo modelo matemático y se compararon los resultados.

1.5.3 Tipo de investigación

En cuanto al tipo, la investigación fue documental. Desde el punto de vista teórico, para construir una base científica, se estudiaron documentos del Comando Aeronáutico Brasileño y de la Organización de la Aviación Civil Internacional que tratan el tema, así como escritos que abordan los posibles efectos económicos derivados del acuerdo entre el Mercosur y la Unión Europea y que destacan la importancia del corredor aéreo oceánico sudamericano, dada la expectativa de crecimiento de las operaciones aéreas en la región.

1.5.4 Validación del trabajo de investigación

Se recogieron *in loco*, datos operativos reales en el Centro de Control del Área Atlántica, para calcular los valores de capacidad de los sectores del espacio aéreo oceánico brasileño utilizando la fórmula matemática propuesta. Los resultados obtenidos fueron sometidos a un cuidadoso análisis por parte de los controladores aéreos del Centro de Control del Área Atlántica, que tuvieron en cuenta los criterios técnicos operativos para la validación de los resultados encontrados con el uso del modelo propuesto.

1.6 Estructura del trabajo de investigación

El trabajo de investigación se divide en 4 capítulos, que consisten, respectivamente, en la Introducción, el Desarrollo Económico y el Entorno Estratégico, el Espacio Aéreo Brasileño, el Análisis de los Modelos Matemáticos para el Cálculo de la Capacidad y la Conclusión.

El capítulo 1 aborda brevemente la posición geoestratégica de Brasil en América del Sur y la futura situación económica de la región ante la aprobación del acuerdo entre el Mercosur y la Unión Europea, además de discutir la esperada reanudación del crecimiento de las operaciones aéreas.

El capítulo 2 trata del desarrollo económico esperado en Sudamérica, de la importancia de la reanudación de las operaciones aéreas para los países del entorno estratégico de Sudamérica y de los impactos causados por la emergencia sanitaria COVID-19.

El capítulo 3 presenta las estructuras del espacio aéreo brasileño y las particularidades de los sectores del espacio aéreo oceánico.

El capítulo 4 trata de la metodología de capacidad adoptada por Brasil para establecer las capacidades de los sectores, así como del análisis de los modelos matemáticos.

Por último, se presenta la conclusión, con los aspectos más destacados que desencadenaron investigaciones profundas y aportaron datos suficientes a las principales cuestiones planteadas en el trabajo de investigación.

2 DESARROLLO ECONÓMICO Y ENTORNO ESTRATÉGICO

La aprobación del Acuerdo de Libre Comercio entre el Mercosur y la Unión Europea indica que el país debe prepararse para un fuerte crecimiento económico, según destaca la Agência Brasil,

[...] el Acuerdo es el segundo después del Acuerdo Continental de Libre Comercio de África, en el que participan 44 países africanos y que se firmó en marzo de 2019. Aun así, la Unión Europea y Mercosur han cerrado el mayor Acuerdo entre bloques económicos de la historia, lo que debería impulsar fuertemente el comercio entre los dos continentes. (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

El Acuerdo de Libre Comercio entre el Mercosur y la Unión Europea promete calentar las economías de Europa y América del Sur y, en consecuencia, moverá la industria del transporte aéreo, demandada por los países participantes en el acuerdo, para atender el crecimiento del transporte de carga y pasajeros. 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.

La reanudación de las operaciones aéreas post - COVID-19 es de interés para todos los países del mundo, especialmente los del entorno estratégico sudamericano que se verán directamente influenciados por el crecimiento de las actividades económicas resultantes del Acuerdo de Libre Comercio entre el Mercosur y la Unión Europea. La situación económica prevista presenta esquemas que pueden fortalecer las relaciones internacionales entre las entidades involucradas y despertar el interés de colaboración de invertir en mejoras para los sistemas de control de tráfico aéreo de la región, con el objetivo de la expansión del movimiento aéreo en el Atlántico Sur.

Según lo orientado por la Política Nacional de Defensa (BRASIL, 2020, p. 17).

A nivel regional, la convergencia de intereses contribuye al aumento de la cooperación entre los países sudamericanos, lo que podría promover la consolidación de la confianza mutua y la puesta en marcha de proyectos de defensa, orientados, entre otros, al desarrollo tecnológico e industrial, así como a estrategias para la solución de problemas comunes.

En este contexto, dada la identificación de un problema común, el espacio aéreo oceánico brasileño, responsable por la gestión del tráfico aéreo en el corredor que une Europa y América del Sur, es un activo estratégico para los países de la región. La evaluación de la capacidad de absorción de aeronaves en el corredor aéreo oceánico, en esta relación, es de suma importancia para diagnosticar las debilidades técnicas y operativas que restringen la prestación del servicio de navegación aérea sobre el Atlántico Sur.

3 ESPACIO AÉREO BRASILEÑO

El espacio aéreo brasileño, que abarca todo el territorio nacional, tiene límites más allá de sus fronteras, incluyendo las aguas territoriales y jurisdiccionales, así como el espacio aéreo que ha sido objeto del Acuerdo Regional de Navegación Aérea. De acuerdo con el Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA, 2021), el espacio aéreo brasileño

[...]se extiende más allá de sus fronteras. Se extiende más allá de su territorio a una parte importante del Océano Atlántico, abarcando un total de 22 millones de km² en tierra y mar, según lo acordado en los tratados internacionales.

Debido a la gran extensión, el DECEA dividió el espacio aéreo brasileño en porciones más pequeñas denominadas FIR -Región de Información de Vuelo, espacio aéreo de dimensiones definidas, bajo la responsabilidad de los Centros Integrados de Defensa Aérea y Control del Tráfico Aéreo (CINDACTA), según detalla el Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA, 2021).

- CINDACTA I (Brasília-DF) Responsable del FIR de Brasília, que cubre la región central de Brasil;
- CINDACTA II (Curitiba-PR) Responsable del FIR de Curitiba, que abarca el sur y parte del centro-sur de Brasil;
- CINDACTA III (Recife-PE) Responsable de los FIRs Recife y Atlántico, que cubren el Nordeste y la zona sobre el Atlántico;
- CINDACTA IV (Manaus-AM) Responsable del FIR de Manaus, que cubre gran parte de la región amazónica.

El espacio aéreo oceánico, objeto de este estudio, está bajo la égida de CINDACTA III y, según la Publicación de Información Aeronáutica - Brasil (DECEA, 2020), operativamente, es monitoreado por el Centro de Control del Área Atlántica (ACC-AO), que presta el servicio de tráfico aéreo en el área que sobrevuela el Atlántico Sur.

3.1 Espacio aéreo oceánico brasileño

Según el Informe de *Performance* ATM del Sistema de Control del Espacio Aéreo Brasileño (DECEA, 2019), CINDACTA III es el

responsable del control y la gestión del espacio aéreo de una zona de 14,3 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales 12,2 millones de metros cuadrados se encuentran en la FIR del Atlántico y 2,1 millones de metros cuadrados en la FIR del RE.

El espacio aéreo oceánico brasileño, debido a su área de extensión de 12,2 millones de metros cuadrados, está dividido en sectores, organizados en el ámbito operacional del Centro de Control del Área Atlántica, como destaca la Publicación de Informaciones Aeronáutica - Brasil (DECEA, 2020).

Los sectores están registrados en el Sistema Integrado de Gestión de Movimientos Aéreos (SIGMA, 2020), *software* desarrollado por la empresa ATECH para la CGNA, y, de acuerdo con las encuestas realizadas en el SIGMA, las aeronaves, al entrar en los sectores del espacio aéreo oceánico brasileño, tardaban entre 1 hora y 2 horas y 40 minutos en salir de ellos.

4 ANÁLISIS DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA LOS CÁLCULOS DE CAPACIDAD

4.1 Modelo brasileño para el cálculo de la capacidad del sector

El DECEA estableció el Manual de Capacidad del Sector ATC (DECEA, 2014) para el cálculo de la capacidad de los sectores del espacio aéreo, en función de la carga de trabajo a la que estará sometido el controlador de tránsito aéreo. Esta variable estará compuesta por todas las tareas desarrolladas por los controladores en la prestación del servicio de control de tráfico aéreo. El Manual de Capacidades del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 9) define la carga de trabajo

es el tiempo que tarda el controlador aéreo en procesar todas las tareas que requiere un puesto de control, en un intervalo de tiempo, para mantener un tráfico seguro y ordenado.

Los controladores aéreos realizan tareas de comunicación con los pilotos, además de establecer contactos telefónicos con otros organismos de control y utilizar las herramientas del sistema de control del tráfico aéreo para la inserción de datos y la planificación. La CGNA, según el Manual de Capacidad del Sector ATC (DECEA, 2014), recoge periódicamente datos estadísticos sobre el tiempo medio de comunicación entre controladores y pilotos (T_{com}); el tiempo medio de tareas secundarias (T_{TS}), que representa los contactos telefónicos con otros organismos de control y el uso de las herramientas del sistema; y el tiempo medio de permanencia en el sector (T), que corresponde al tiempo de permanencia de las aeronaves en el sector. Estos datos se recogen in loco, en la agencia de control, observando el funcionamiento real. Después de la recolección, las variables se insertan en el modelo matemático brasileño adoptado para el cálculo de la capacidad del sector, proporcionado en el Manual de Capacidad del ATC (DECEA, 2014, p. 13), como se presenta en la Tabla 1.

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

Tabla 1 – Parámetros del modelo matemático.

N_{ref}	Capacidad calculada del sector ATC
T	Tiempo medio de permanencia del avión en el sector (en segundos)
T_{com}	Tiempo medio de comunicación del controlador (transmisión y recepción) con la aeronave (en segundos)
T_{TS}	Tiempo medio dedicado por el controlador a las tareas secundarias (en segundos)
α_n	Factor de convergencia
$1,30$	Factor cognitivo

Fuente: DECEA (2014).

Según el Manual de capacidad del sector ATC (DECEA, 2014, p. 13), el número de referencia (N_{ref}) expresa

el número óptimo de aeronaves bajo control simultáneo que un determinado sector ATC es capaz de mantener durante un periodo de tiempo, sin que ese número de aeronaves controladas simultáneamente provoque una carga de trabajo excesiva para el controlador aéreo. Hay que tener en cuenta que la capacidad calculada de un sector es el N_{ref} .

El llamado Factor Cognitivo, según el Manual de Capacidades del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 14), representado por la constante de 1,30

es la suma del 30% del tiempo dedicado a las tareas de TCom y TTS. Se refiere al estado mental del controlador de tráfico aéreo (factor cognitivo) durante el tiempo dedicado a las funciones de planificación, organización del tráfico y vigilancia por radar.

El Factor de Convergencia (α_n) presentado en la modelización fue creado con el objetivo de contener el crecimiento acelerado de la función lineal cuando los tiempos medios de permanencia de las aeronaves en el sector son superiores a 900 segundos. El Manual de capacidad de ATC (DECEA, 2014, p. 13) define que el α_n

es un factor de reducción del tiempo medio de permanencia del tráfico en el sector (T). El factor de convergencia tiene la función de minimizar los efectos discrepantes en los sectores grandes para que N_{ref} no sea superior a 18 tráficos.

La aplicación del factor de convergencia, según el Manual de Capacidades ATC (DECEA, 2014, p. 14), reduce los efectos discrepantes de los valores de capacidad para los sectores en los que los tiempos medios de vuelo no superan los 1700 segundos (aproximadamente 28 minutos). Por encima de este tiempo, aumenta considerablemente el margen de error de los cálculos, lo que hace que el factor de convergencia no pueda ajustar el modelo matemático para tiempos de vuelo superiores a 1 hora, de modo que los valores de capacidad no superen los límites previstos en las normas.

Los estudios de capacidad sectorial realizados en Brasil fueron fundamentales para el establecimiento de importantes parámetros temporales a considerar en el desarrollo de la metodología brasileña de análisis de capacidad sectorial, sin embargo el país, como signatario de la OACI, ratificó los límites de capacidad instituidos por el *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* (OACI, 2018, p. 133).

La fórmula se basa en dos supuestos: en primer lugar, los sectores funcionan mejor cuando gestionan no más de 25 aviones en un periodo de 15 minutos; y en segundo lugar, los sectores funcionan mejor cuando gestionan no más de 18 aviones en un periodo de un minuto. La hipótesis de 25 aviones llevó a determinar que cada avión requiere 36 segundos de tiempo de trabajo de un controlador.

Aunque Brasil adopta los mismos límites de capacidad sectorial definidos por la OACI, dadas las peculiaridades del espacio aéreo brasileño, el Manual de Capacidad Sectorial ATC (DECEA, 2014) establece una metodología para recoger los tiempos asignados a las tareas realizadas por los controladores aéreos. Este es un punto de divergencia de Brasil con respecto a la OACI en los términos *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* (OACI, 2018).

En este contexto, se destaca que el primer límite establecido por la metodología brasileña se denomina número de referencia (Nref), que el Manual de Capacidad del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 9) define como “el número óptimo de aeronaves en control simultáneo dentro de un sector ATC”. El segundo límite adoptado por Brasil se denomina número de pico del sector ATC (Npico) que, según el Manual de Capacidad del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 100),

es la capacidad de control simultáneo que un determinado sector ATC es capaz de mantener, durante un máximo de 19 (diecinueve minutos) en una hora, de forma continua o no, para atender un incremento de la demanda de corta duración.

Para encontrar el Npico, es necesario calcular las desviaciones estándar de T, Tcom y TTS para crear las siguientes variables para el Npico:

$$T_{m\acute{a}x} = T \text{ medio sumado a la desviación;}$$

$TTS_{m\acute{i}n} = TTS$ medio sustraído de la desviación estándar; y

$Tcom_{m\acute{i}n} = Tcom$ medio sustraído de la desviación estándar.

Los valores de estas variables se aplican a esta modelización matemática para el cálculo de Npico.

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

Otra medida importante que debe calcularse es la Capacidad Horaria del Sector (CHS), que, como recomienda el Manual de Capacidad del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 15),

[...]es el número de aeronaves que un sector es capaz de prestar servicio de control de tráfico aéreo en el periodo de una hora. Se calcula a partir de la siguiente fórmula:

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

Esta fórmula se utiliza actualmente para los cálculos de la CHS, sin embargo, como se puede observar, este modelo matemático opera, cartesianamente, los valores de Nref y Npico, sin tener en cuenta el intervalo entre estos números. Por esta razón, los resultados de los cálculos pueden estar sobredimensionados.

4.2 Modelos matemáticos propuestos para el cálculo de la capacidad del sector

Los factores de convergencia del modelo actual actúan para contraer el crecimiento de los tiempos de vuelo del sector (T) con el fin de evitar que los valores de capacidad del sector sean superiores a los establecidos en las normas. Sin embargo, el Manual de Capacidades del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 13) asume que los resultados de los cálculos pueden estar contaminados cuando se utiliza el modelo matemático actual para calcular las capacidades de los grandes sectores del espacio aéreo.

Ante el problema identificado, este artículo propone un nuevo modelo matemático que puede mitigar los efectos discrepantes, causados por los largos tiempos de vuelo en el sector de control, y limitar los valores de capacidad calculados a los previstos en las normas, mediante un crecimiento continuo, pero controlado, con la ayuda de la función logarítmica.

En la propuesta, los cálculos de Nref se realizarán con la Fórmula Básica (Fb), que es una función lineal, y con la Fórmula Logarítmica (Fl), como aquí presentado:

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

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

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

donde Fb' es igual a $\frac{900}{(T_{com} + TTS) \times 1,30}$ y la base n

es igual a $8160^{1/(18-Fb')}$, ecuación utilizada para los grandes sectores. Se utilizará el número 8160 (ajustable) de la base n para garantizar que N_{ref} alcance su valor máximo de 18 aviones para el tiempo medio de permanencia en el sector (T) igual o superior a 9000 segundos. Así, el modelo 1 propuesto para el cálculo de la capacidad del Número Referencial para grandes sectores es el siguiente:

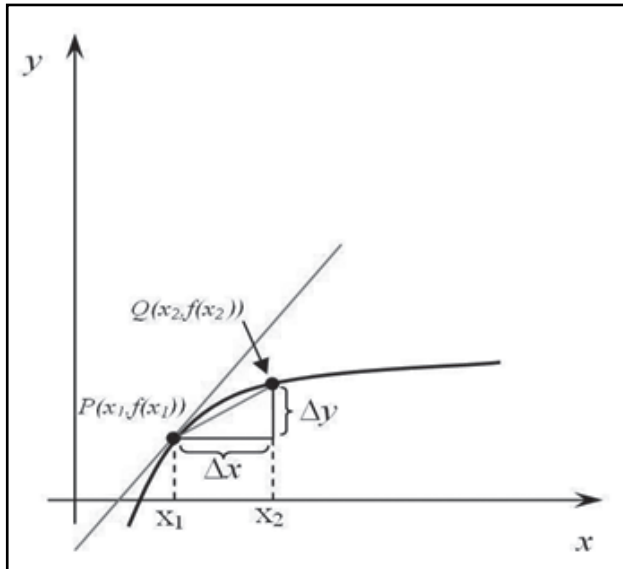
Modelo 1 - Cálculo do N_{ref} .

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

Fuente: El autor.

La gráfica de crecimiento de la nueva función estará formada por la intersección de las gráficas de las funciones lineal y logarítmica, como se muestra en la figura 1.

Figura 1 - Funciones lineales y logarítmicas.



Fuente: El autor.

Con el nuevo modelo matemático, los cálculos de capacidad N_{pico} se realizarán con la Fórmula Básica (FB) y la Fórmula Logarítmica (FL), como aquí.

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

ecuación utilizada para los sectores con un tiempo medio de permanencia de hasta 900 segundos.

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

donde FB' es igual a $\frac{900}{(T_{com_{min}} + TTS_{min}) \times 1,30}$ y a

base n es igual a $9960^{1/(25-FB')}$, ecuación utilizada para los sectores grandes. El número 9960 (ajustable) de la base n se utilizará para garantizar que N_{pico} alcance su valor máximo de 25 aviones para un tiempo medio de permanencia en el sector (T) igual o superior a 10800 segundos.

Así, el modelo 2 propuesto para el cálculo de capacidad del N_{pico} para grandes sectores es el siguiente:

Modelo 2 - Cálculo do N_{pico} .

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

Fuente: El autor.

Con el fin de mitigar los valores sobredimensionados de la capacidad horaria del sector (CHS) generados por la fórmula actual proporcionada en el Manual de Capacidad del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 15),

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

y considerando que, por definición, el Número de Referencia (N_{ref}) expresa el número óptimo de aeronaves bajo control simultáneo en el sector, se propone este modelo 3 para el cálculo del CHS.

Modelo 3 - Cálculo do CHS.

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

Fuente: El autor.

4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Para la validación de los modelos matemáticos propuestos, se utilizaron datos reales de T_{com} , TTS y T , recogidos in loco, en ACC-AO, por el equipo de la CGNA, en el periodo comprendido entre el 12 y el 23 de marzo de 2018. En esta ocasión, los valores de capacidad de la agrupación de sectores S2B/S2C/S3, que constituye parte del corredor aéreo que conecta Europa con Sudamérica, se calcularon con los nuevos modelos. Estos valores fueron validados por el Consejo Operativo, formado por el equipo del CGNA y los controladores aéreos de CINDACTA III.

4.3.1 Datos recogidos por la CGNA para calcular el N_{ref}

$TTS = 135,65$ segundos;

$T_{com} = 105,43$ segundos; e

$T = 6987,6$ segundos.

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

donde la base n es igual a $8160^{1/(18-Fb')}$, con

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

Por lo tanto, $N_{ref} = 17$. El valor de la capacidad encontrada está dentro del límite establecido por el Manual de Capacidad del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 13) y el *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* (OACI, 2018, p. 133).

Para el empleo del modelo matemático actual para los cálculos, el factor de convergencia (αn), para $T > 1700$ segundos, es de 0,65, como se destaca en el Manual de Capacidades del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 14). De este manera, se encuentra el siguiente resultado:

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

Por lo tanto, $N_{ref} = 22$, un valor superior al límite previsto en las normas.

4.3.2 Los datos recogidos por la CGNA para calcular el N_{pico}

$TTS_{min} = 70,98$ segundos;

$T_{com_{min}} = 24,16$ segundos; y

$T_{máx} = 9290,4$ segundos

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

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

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

El valor de la capacidad encontrada está dentro del límite establecido por el Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (OACI, 2018, p. 133).

Para el uso del presente modelo matemático para cálculos, el factor de convergencia (αn), para $T_{máx} > 1700$ segundos, es 0,65, como se destaca en el ATC Manual de capacidades del sector ATC (DECEA, 2014, p. 14). De esta forma, se encontró el resultado:

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

Por tanto, $N_{pico} = 49$, un valor superior al límite previsto en en las normas internacionales.

Tras la presentación de los valores calculados por ambos modelos matemáticos, el Consejo Operativo de CINDACTA III decidió homologar, en acta de reunión, los valores de capacidad expresados por los nuevos modelos matemáticos propuestos, que son los que actualmente utiliza ACC-AO.

4.4 Operacionalización del modelo matemático propuesto

Para hacer operativo el uso de las nuevas fórmulas, las ecuaciones, disponibles en el siguiente tutorial (DOCTORES DE EXCEL, 2020), pueden insertarse en una hoja de cálculo de Excel para realizar las pruebas condicionales y generar resultados, según esta sintaxis.

IF(logical_test>true_if_value>false_if_value).

4.4.1 Cálculo de N_{ref}

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

donde a base n es igual a $8160^{1/(18-Fb')}$, con

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

4.4.2 Cálculo do N_{pico}

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

donde a base n es igual a $9960^{1/(25-FB')}$, con

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

5 CONCLUSION

La apertura de las fronteras internacionales, posibilitada por el enfriamiento de la emergencia sanitaria de la COVID-19, y la expectativa de crecimiento económico derivada de la aprobación del Tratado de Libre Comercio entre el Mercosur y la Unión Europea crean un escenario optimista para la industria del transporte aéreo internacional, especialmente para los usuarios que planean aumentar sus operaciones aéreas

en el corredor oceánico, bajo responsabilidad de Brasil, a través de la cual las demandas de las exigencias del tráfico aéreo en el eje Europa/Sudamérica.

Dada la importancia geoestratégica del espacio aéreo brasileño para los países sudamericanos del entorno, es de interés para la región que la capacidad del principal corredor aéreo oceánico del Atlántico Sur sea adecuada al crecimiento de las operaciones aéreas para los próximos años. Por lo tanto, la medición de las capacidades de los sectores del espacio aéreo oceánico brasileño con cierta precisión es de fundamental importancia para la generación de indicadores, que puedan orientar las inversiones en tecnologías, equipos, recursos humanos y procedimientos para la mejora de los sistemas de control del tráfico aéreo, haciendo más eficiente la gestión del flujo de tráfico en el espacio aéreo oceánico.

El servicio de gestión del flujo de tráfico aéreo no se limita a los espacios aéreos congestionados. En este sentido, para que el espacio aéreo del Atlántico Sur se utilice al máximo es necesario que los Proveedores de Servicios de Navegación Aérea (PSNA) de la región conozcan las capacidades de sus respectivos sectores del espacio aéreo, de manera que se pueda garantizar un equilibrio entre la demanda y la capacidad de los sectores.

Como se puede ver en el Manual de Capacidades del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 13), Brasil ha desarrollado un modelo matemático para medir las capacidades del sector del espacio aéreo; sin embargo, el Manual de Capacidades del Sector ATC (DECEA, 2014, p. 13) admite que los resultados, utilizando el modelo actual, pueden presentar inconsistencias para los sectores grandes. Debido a esta debilidad, se desarrolló un nuevo modelo matemático, compuesto por la unión de la función lineal con la función logarítmica, el cual, durante el proceso de validación, demostró ser eficiente en los resultados y, demostrablemente, eliminó los efectos discrepantes causados por los largos tiempos de vuelo en el sector, generando las capacidades referenciales, pico y horarias de los sectores, adecuadas y ajustadas según las normas, lo que responde a la inquietud del problema de investigación.

Con una mejor evaluación de las capacidades de los sectores del espacio aéreo oceánico, los especialistas en gestión de flujos de tráfico aéreo podrán adoptar las medidas más óptimas para garantizar que los volúmenes de tráfico aéreo sean compatibles con las capacidades declaradas por las autoridades competentes y promover estudios destinados a aumentar las capacidades de los sectores del espacio aéreo y a ampliar la potencia aeroespacial de la región.

REFERENCIAS

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

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

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Espaço Aéreo Brasileiro**. Disponible em: <https://www.decea.mil.br/?i=quem-somos&p=espaco-aereo-brasileiro>. Acceso 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. Disponible em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/relatorios_trafego_aereo/2021/Relatorio_Comparativo_de_Trafego_Aereo_2021.pdf. Acceso em: 22 de ago. 2021.

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

DOUTORES DO EXCEL TREINAMENTOS ONLINE. **Realizando testes lógicos com a fórmula SE no Excel**. Disponible em: <https://doutoresdoexcel.com.br/se-no-excel/>. Acceso 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.