

Revista da



UNIVERSIDADE DA FORÇA AÉREA  
Uma Visão do Poder Aeroespacial

e-ISSN 2175-2567



# CORPO EDITORIAL



## Revista da UNIFA

Publicação Semestral da Editora da Universidade da Força Aérea (ED-UNIFA)

v. 34 n. 2 Julho/Dezembro 2021

### Reitor da UNIFA

Brig Ar Lélío Walter Pinheiro da Silva Junior

### Pró-Reitor de Apoio à Pesquisa e ao Ensino

Cel Av R/1 Valdomiro Alves Fagundes

### Coordenador da Editora da UNIFA

1º Ten BIB Leandro Henrique de Oliveira Spinola

### Editor-Chefe

Prof. Dr. Bruno de Melo Oliveira

### Editores-Assistentes

1º Ten BIB Cíntia Sales de Sousa

1º Ten BIB Cíntia Carneiro Marinho

1º Ten BIB Adriana Maria dos Santos

1º Ten BIB Leandro Henrique de Oliveira Spinola

Prof.a. Ma. Marisa Helena de Oliveira Silva

SO R1 Roberto Fernandes Ferreira

### Comitê de Ética Institucional

Brig Ar Lélío Walter Pinheiro da Silva Junior - UNIFA - RJ

Brig Int R/1 Pedro Arthur Linhares Lima - UNIFA - RJ

Cel Av Gleison Antônio Somensi - EAOR - RJ

Cel Av Allan Davis Cabral da Costa - ECEMAR - RJ

Cel Int Alexandre Jorge Esteves - UNIFA - RJ

Cel Int Bruno Ferreira de Oliveira - UNIFA - RJ

Cel Av R/1 Nelson Augusto Bacellar Gonçalves - UNIFA - RJ

Cel Av R/1 Valdomiro Alves Fagundes - UNIFA - RJ

Cel Av R/1 Gil Lessa Amaral de Carvalho - UNIFA - RJ

Cel Int R/1 Carlos Alberto Leite da Silva - UNIFA - RJ

Ten Cel Av Marcio Henrique Teixeira de Souza - EAOR - RJ

1º Ten BIB Leandro Henrique de Oliveira Spinola - UNIFA - RJ

Prof. Dr. Gills Vilar Lopes - UNIFA - RJ

Prof. Dr. Alexander Barreiros Cardoso Bomfim - UNIFA - RJ

### Conselho Editorial Científico

Andréa Fabiana de Lira - UFBA - BA

Claudio Rodrigues Corrêa - EGN - RJ

Erico Duarte - UFRGS - RS

Fabio Walter - UFRP - PB

Fernando de Souza Costa - INPE - SP

Flavio Neri Jasper - SEFA - DF

Francisco Eduardo Alves de Almeida - EGN - RJ

Guilherme Sandoval Góes - ESG - RJ

João Roberto Martins Filho - UFSCar - SP

Koshun Iha - ITA - SP

Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães - IEAv - SP

Marco Antonio Sala Minucci - IEAv - SP

Marcos Jorge Alves Gemaque - UNIFA - RJ

Thais Russomano - PUC - RS - RS

Vantuil Pereira - UFRJ - RJ

### Revisão Técnica

1º Ten MSS Maristani Cristina Girotti Americo - AFA - SP

1º Ten MIS Eliane Maria Heanna Machado Matioli - AFA - SP

1º Ten BIB Cíntia Sales de Sousa - UNIFA - RJ

1º Ten BIB Cíntia Carneiro Marinho - UNIFA - RJ

1º Ten SVA Dejáir Fernandes Junior - CDA - RJ

2º Ten BIB Adriana Maria dos Santos - UNIFA - RJ

2º Ten MSS Ana Carolina Aparecida Marques Soarez - AFA - SP

Prof.ª Catarina Labouré Madeira Barreto Ferreira - UNIFA - RJ

Prof.ª Dr.ª Cláudia Maria Souza Antunes - UNIFA - RJ

Prof.a. Ma. Marisa Helena de Oliveira Silva - UNIFA - RJ

### Editoria Científica

SO R1 Roberto Fernandes Ferreira

### Equipe de Edição

Diagramação

SO SDE Samuel Gonçalves Mastrange

CB SGS Lessandro Augusto da Silva Queluci

Desenvolvimento WEB

2S SAD Diego Sodré Ribeiro



### Nossa capa

Arte do CB SGS Lessandro Augusto da Silva Queluci.

# REVISTA DA UNIFA

Uma Visão do Poder Aeroespacial

v. 34 n. 2 julho/dezembro 2021

Rio de Janeiro - RJ

Revista da UNIFA	Rio de Janeiro	v. 34	n. 2	p. 01 - 152	jul./dez. 2021
------------------	----------------	-------	------	-------------	----------------

Os textos publicados na revista são de inteira responsabilidade de seus autores.

*The authors assume full responsibility for the texts published in the journal.*

*Los textos publicados en la revista son de entera responsabilidad de sus autores.*

Indexado em / indexed in / indexado en:



Classificado no / classified at the / clasificado en: **WebQualis da CAPES / CAPES WebQualis / WebQualis de la CAPES**

Disponível em / Available in / Disponible en:



Licenciada / Licensed / con licencia:



Revista da UNIFA / Universidade da Força Aérea. – Ano 1, n. 1 (23 out.1985)-ano 20, n. 23 (nov. 2008); [nova sér.], v. 22, n. 24 (jan./jun. 2009)-v. 28, n. 37 (dez. 2015); [nova sér.], v. 29, n. 2 (dez. 2016)- . – Rio de Janeiro : Universidade da Força Aérea, 1985- .

Semestral.

A partir de janeiro/junho 2009 numerado como volume.

A partir de janeiro/junho 2016 a numeração dos fascículos recomeça a cada ano com n. 1 e a numeração dos volumes mantém a sequência do ano anterior.

ISSN 1677-4558.

e-ISSN 2175-2567.

Distribuição gratuita.

1. Força Aérea Brasil - periódicos. 2. Aeronáutica - Brasil. 3. Poder aeroespacial. I. Universidade da Força Aérea.

CDU: 355.354(81)(05)

2021

Impresso no Brasil

*Printed in Brazil*

*Impreso en Brasil*

Distribuição gratuita

free distribution

distribución gratuita



<b>Editorial</b> .....	4
<i>Editorial</i> .....	5
<i>Editorial</i> .....	6

## ARTIGOS / ARTICLES / ARTÍCULOS

### REVISÃO / REVIEW / REVISIÓN

<b>O futuro da confiabilidade da navegação aérea dependente do clima espacial</b> .....	7
<i>The future of air navigation reliability dependent on space weather</i> .....	23
<i>El futuro de la fiabilidad de la navegación aérea dependiente del clima espacial</i> .....	39
João Pedro Souza Aguiar e Dario Eberhardt	
<b>Regulação para o ADS-B1 no espaço aéreo brasileiro</b> .....	55
<i>Regulation for ADS-B1 in Brazilian airspace</i> .....	70
<i>Regulación para ADS-B1 en el espacio aéreo brasileño</i> .....	85
Raul Sandoval Cerqueira	

### ATUALIZAÇÃO / UPDATING / ACTUALIZACIÓN

<b>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</b> .....	100
<i>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</i> .....	110
<i>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</i> .....	120
Eliseu Cavalcanti de Albuquerque e Pedro Arthur Linhares Lima	

### ESTUDO DE CASO / CASE STUDY / ESTUDIO DE CASO

<b>O impacto da redução do esforço aéreo na formação do piloto instrutor entre os anos 2012 e 2015</b> .....	130
<i>The impact of reduced air effort on training the instructor pilot between 2012 and 2015</i> .....	137
<i>El impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la formación del piloto instructor entre 2012 y 2015</i> .....	144
Renato Russo Guimarães	

### PARECERISTAS DAS EDIÇÕES DE 2021 .....151

### ORIENTAÇÕES PARA SUBMISSÃO / ORIENTATIONS FOR SUBMISSION / ORIENTACIONES PARA SUBMISIÓN .....152

Mais um volume de nosso periódico está concluído, disponibilizando ao público leitor mais um conjunto de artigos científicos. O presente número da Revista da UNIFA corresponde à quarta edição de nossa publicação em tempos de pandemia. Ele representa a continuidade de relevantes serviços de natureza acadêmica, interligando os meios civis e militares nacionais. Desde seu primeiro número, publicado em 1985, o periódico tem se preocupado em coligar trabalhos produzidos no seio da comunidade acadêmica da Aeronáutica, e nos melhores ambientes acadêmicos civis. O grande componente agregador dos manuscritos é o Poder Aeroespacial e seus elementos constitutivos, que são investigados pelos mais diversos enfoques.

A aviação civil e comercial ocupam saliente espaço nas páginas desta edição. Dispomos de dois artigos que se aproximam tematicamente: a mesma preocupação com o domínio e a gestão do espaço aéreo brasileiro. O primeiro deles, de autoria de João Pedro de Souza Aguiar e Dario Eberhardt (PUC-RS) destacam como a atividade aérea pode ser afetada por fenômenos naturais emanados do ambiente espacial e a interferência destes na utilização de sistemas de satélites empregados na navegação aérea (GNSS). O trabalho seguinte, de Raul Sandoval Cerqueira, da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), aborda a regulamentação do uso do Sistema de Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) no esforço de monitoramento do espaço aéreo brasileiro, especialmente em zonas onde a cobertura do radar convencional não se mostra adequada. Fica explícita aqui a relação entre atividade aérea e suas conexões com as tecnologias que permitem sua manutenção dentro de critérios de segurança e de controle por parte das autoridades responsáveis.

Continuando, a nossa publicação tratará também de um tema extremamente atual. Ainda tendo como tópico a aviação civil, mais precisamente a atividade do setor comercial aéreo, apresentamos ao leitor outro manuscrito. Resultado de pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Ciências Aeroespaciais da Universidade da Força Aérea, temos mais um artigo nesta edição. De autoria de Eliseu Cavalcanti de Albuquerque e Pedro Arthur Linhares Lima, orientando e orientador, respectivamente, o texto empreende uma análise prospectiva a partir de modelagem matemática sobre a retomada e intensificação das operações aéreas represadas motivadas pela menor circulação da aviação nos primeiros meses da pandemia de COVID-19. Além dos impactos no campo da saúde, a pandemia teve outros desdobramentos, interferindo na dinâmica econômica de diversos países, não poupando a aviação comercial brasileira.

De autoria de Renato Russo Guimarães, temos uma relevante contribuição sobre a instrução operacional de pilotos instrutores com foco no Programa de Instrução e Manutenção Operacional (PIMO) do 1º/2º Grupo de Transporte, tendo como amostra as atividades desenvolvidas entre os anos de 2012 e 2015. Em suma, o trabalho trata de um importante aspecto relativo à capacitação de pessoal aeronavegante do Comando da Aeronáutica, atividade que compreende um dos componentes do Poder Aeroespacial Brasileiro.

Diante das reflexões aqui contidas, esperamos colaborar com a difusão dos conhecimentos acerca do Poder Aeroespacial.

Boa leitura!

Prof. Dr. Bruno de Melo Oliveira  
Editor-Chefe da Revista da UNIFA

Another volume of the journal of the University of the Air Force was completed, making new scientific articles available to readers. The current publication corresponds to the fourth edition in times of pandemic. It represents the continuity of relevant services of academic nature, interconnecting Brazilian civilian and military milieus. Since the first publication, in 1985, collecting works, whether produced within the academic Aeronautical community, or the best civil academic environments has been a preoccupation for the journal. The scope of the journal allows to gather articles related to Airspace Power and its constituent elements, which are investigated by diverse approaches.

Civil and commercial aviation occupy an important place in this journal. Two articles, which are similar in relation to the team, are available: both focus on the domain and the management of the Brazilian airspace. The first one, whose author is João Pedro de Souza Aguiar and Dario Eberhardt (PUC-RS) explores how the air activity can be affected by natural phenomena from the space environment and the phenomena interference in the use of satellite systems in air navigation (GNSS). The second one, by Raul Sandoval Cerqueira, who works at National Civil Aviation Agency (ANAC), discusses the regulation of the use of Automatic Dependent Surveillance by Broadcasting (ADS-B) in order to monitor the Brazilian airspace, especially in areas where conventional radar coverage is not suitable. The relation between air activity and its connections with technologies that allow safe and controlled maintenance within safety and control criteria by the responsible authorities is explained here.

Next, in this publication, an extremely up-to-date subject will be covered. Still concerning the civil aviation, the air commercial sector, it is presented another manuscript to the readers. There is also another article in this edition, which was written by Eliseu Cavalcanti de Albuquerque and Pedro Arthur Linhares Lima, advisee and adviser, respectively from the Airspace Sciences Postgraduate Program of the University of the Air Force. The text presents a prospective analysis based on mathematical modeling on the resumption and the intensification of air operations motivated by the lower circulation of aviation during the first months of the COVID-19 pandemic. In addition to the health field impacts, there were other consequences due to the pandemic, which interfered with the economy in several countries, including the Brazilian commercial aviation.

Another article, by Renato Russo Guimarães, points out a relevant contribution on the operational instruction of pilot flight instructors focused on the Instruction and Operational Maintenance Program (PIMO) under the responsibility of the 1st./2nd. Transport Group, whose activities were developed between 2012 and 2015. In short, the work involves an important aspect related to the training of aeronautical personnel of the Aeronautics Command, an activity that comprises one of the Brazilian Airspace Power components.

In view of these considerations, it is expected the dissemination of knowledge about the Airspace Power.

Good reading!

Professor Ph.D. Bruno de Melo Oliveira  
Editor-Chef of the journal of the University of the Air Force

Se concluye un volumen más de nuestra revista, poniendo a disposición del público lector un conjunto más de artículos científicos. El presente número de la Revista UNIFA corresponde a la cuarta edición de nuestra publicación en tiempos de pandemia. Representa la continuidad de los servicios académicos pertinentes, vinculando los medios civiles y militares nacionales. Desde su primer número, publicado en 1985, la revista se ha dedicado por recopilar los trabajos producidos en la comunidad académica de Aeronáutica y en los mejores entornos académicos civiles. El principal componente agregador de los manuscritos es el Poder Aeroespacial y sus elementos constitutivos, que son investigados por los más diversos enfoques.

La aviación civil y comercial ocupan un lugar importante en las páginas de esta edición. Tenemos dos artículos temáticamente similares: la misma preocupación por el dominio y la gestión del espacio aéreo brasileño. El primero, de João Pedro de Souza Aguiar y Dario Eberhardt (PUC-RS), destaca cómo la actividad aérea puede verse afectada por los fenómenos naturales que emanan del entorno espacial y su interferencia en el uso de los sistemas de satélites empleados en la navegación aérea (GNSS). El siguiente documento, de Raúl Sandoval Cerqueira, de la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC), aborda la regulación del uso del Sistema de Vigilancia Dependiente Automática por Radiodifusión (ADS-B) en el esfuerzo de monitoreo del espacio aéreo brasileño, especialmente en las áreas donde la cobertura de radar convencional no resulta adecuada. Queda explícita aquí la relación entre la actividad aérea y sus conexiones con las tecnologías que permitan su mantenimiento dentro de los criterios de seguridad y control por parte de las autoridades responsables.

Continuando, nuestra publicación también tratará un tema de gran actualidad. Siguiendo con el tema de la aviación civil, más concretamente con la actividad del sector de las aerolíneas comerciales, presentamos al lector otro manuscrito. Fruto de las investigaciones del Programa de Postgrado en Ciencias Aeroespaciales de la Universidade da Força Aérea, tenemos otro artículo en esta edición. De autoría de Eliseu Cavalcanti de Albuquerque y Pedro Arthur Linhares Lima, consejero y supervisor, respectivamente, el texto realiza un análisis prospectivo a partir de la modelización matemática sobre la reanudación e intensificación de las operaciones aéreas represadas motivadas por la menor circulación de la aviación en los primeros meses de la pandemia de COVID-19. Además de los impactos sanitarios, la pandemia tuvo otras ramificaciones, interfiriendo en la dinámica económica de varios países, no perdonando a la aviación comercial brasileña.

De la autoría de Renato Russo Guimarães, tenemos una relevante contribución sobre la instrucción operativa de los pilotos instructores con foco en el Programa de Instrucción y Mantenimiento Operativo (PIMO) del 1º/2º Grupo de Transporte, teniendo como muestra las actividades desarrolladas entre los años 2012 y 2015. En resumen, el trabajo trata de un aspecto importante relativo a la formación del personal aeronáutico de la Fuerza Aérea, actividad que constituye uno de los componentes del Poder Aeroespacial Brasileño.

En vista de las reflexiones aquí contenidas, esperamos colaborar con la difusión del conocimiento sobre el Poder Aeroespacial.

¡Disfrute de la lectura!

Prof. Dr. Bruno de Melo Oliveira  
Redactor Jefe de la UNIFA



# O futuro da confiabilidade da navegação aérea dependente do clima espacial

*The future of air navigation reliability dependent on space weather*

*El futuro de la fiabilidad de la navegación aérea dependiente del clima espacial*

João Pedro Souza Aguiar <sup>I</sup>

Dario Eberhardt <sup>II</sup>

## RESUMO

A atividade aérea mundial cresce de forma constante, o que aumenta a densidade de aeronaves em todo o território geográfico. Por esse motivo, existe uma tendência para novas tecnologias de navegação que, atendendo requisitos de integridade, precisão, disponibilidade e continuidade, vão permitir a manutenção da segurança aérea mesmo com o aumento do número de voos. Os meios de posicionamento mais utilizados hoje são dependentes de satélites, que abrangem o Sistema de Satélites de Navegação Global (GNSS). O sistema é dependente do equilíbrio geomagnético da Terra e do meio eletrônico da ionosfera. Ambos são alvo de bombardeamentos de radiação solar e cósmica, i.e. clima espacial. O presente trabalho tem como objetivo ser uma fonte informativa, ou *review*, da relação entre clima espacial e aviação, para auxiliar na conscientização dos leitores, principalmente àqueles pilotos, principais responsáveis pela segurança dos voos. Será apresentada uma forma simplificada da teoria dos fenômenos do clima espacial, como estes podem afetar a aviação e as tecnologias, o histórico de eventos que atingiram o planeta e as iniciativas que foram e estão sendo desenvolvidas para sua mitigação e seu monitoramento. Como metodologia, foram consultados artigos científicos, livros teóricos, manuais, reportagens, sites de agências de pesquisa e apresentações de organizações.

Essas fontes permitiram concluir que os estudos são recentes, há pouca conscientização para os usuários destas tecnologias e, visto a complexidade da origem dos fenômenos do clima espacial, existe uma falta de qualidade na sua previsão. Essa falta de qualidade, atrelada à necessidade de tecnologias mais confiáveis para o futuro do espaço aéreo, eleva a pertinência do objetivo deste trabalho.

**Palavras-chave:** Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviação.

## ABSTRACT

*The world's aviation activity rises constantly, increasing aircraft density in all geographic territories. For this reason, there is a tendency of new navigation technologies to arise that, attending requirements of integrity, accuracy, availability, and continuity, will promote maintenance of air safety, even with increasing flight numbers. The means of positioning determination most used today at aircraft are dependent on satellites. The constellations GPS (Global Positioning System) and GLONASS (Global Navigation Satellite System – in Russian), and the augmentation systems WAAS (Wide Area Augmentation System) and European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), for example, are compounds of the Global Navigation Satellite System (GNSS).*

I. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Graduando em Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. *E-mail:* j.aguiar@edu.pucrs.br

II. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Doutorado em Microeletrônica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. *E-mail:* dario.eberhardt@pucrs.br

Recebido: 06/10/21

Aceito: 15/09/21

*All the mentioned, are dependent of Earth geomagnetic and ionosphere equilibrium. Both are targets of solar and cosmic radiation bombardments, i.e. space weather. Depending on that phenomenon intensity, serious damages could occur on positioning systems, as in several others, such communications and power grids. In retrospect, space weather already led to losses such as in the events of 1989 and October 2003 on CONUS American region. The forecast quality for such occurrences is still poor, while society complacency associated to this subject is high, which further extends to the aviation, considering the potential damages.*

**Keywords:** Space weather; ionosphere; GNSS; aviation.

## RESUMEN

*La actividad aérea mundial está creciendo de manera constante, aumentando la densidad de aeronaves en todo el territorio geográfico. Por ello, existe una tendencia hacia las nuevas tecnologías de navegación que, cumpliendo con los requisitos de integridad, precisión, disponibilidad y continuidad, permitirán el mantenimiento de la seguridad aérea incluso con el aumento del número de vuelos. Los medios más utilizados para determinar el posicionamiento en las aeronaves en la actualidad dependen de los satélites. Navegación global - en ruso), y los sistemas de aumentación WASS (Sistema de aumento de área amplia) y EGNOS (Servicio de Superposición de Ngeoestacionaria Europea), por ejemplo, son los medios que componen el Sistema de Navegación por Satélite global (GNSS). Todo lo anterior depende del equilibrio geomagnético de la Tierra y del medio electrónico de la ionosfera. Ambos son objetivos de bombardeos de radiación solar y cósmica, es decir, el clima espacial. Dependiendo de la intensidad de estos fenómenos, pueden ocurrir daños graves a los sistemas de posicionamiento, así como a varias otras áreas, como las comunicaciones y las redes eléctricas. En retrospectiva, el clima espacial ya ha causado un gran daño, como en los eventos de 1989 en América del Norte y en octubre de 2003 en la región americana de CONUS. La calidad de la previsión de estos sucesos sigue siendo baja y la complacencia de la sociedad con respecto al problema es alta, incluso en la aviación, teniendo en cuenta los posibles daños.*

**Palabras clave:** Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviación.

## 1 INTRODUÇÃO

A principal interferência nos sistemas de posicionamento e comunicações de aeronaves advém do equilíbrio eletrônico da ionosfera (ICAO, 2019a). Essa camada da atmosfera é um intermediário essencial da vida social moderna, pois influencia todas as tecnologias dependentes de satélites, assim como redes elétricas e comunicações. *Solar flares*, ejeções coronais de massa (CMEs) e radiações cósmicas - componentes do clima espacial, sempre estiveram presentes como fonte desse desequilíbrio. Caso eventos atinjam o planeta dependendo da sua intensidade, são passíveis de influenciar, em efeito cascata, o equilíbrio geomagnético da Terra, causando perturbações na atmosfera, prejudicando a integridade de todos os sinais de rádio e podendo causar danos materiais e grandes prejuízos financeiros. Na aviação, podem afetar os sistemas de comunicação de alta frequência (HF) e por satélite (SATCOM), navegação e vigilância GNSS e pode ocorrer aumento da radiação nas altitudes de voo (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a).

Em uma reunião do subcomitê técnico científico da Organização das Nações Unidas (ONU), ocorrida em 2013, ficou determinado que o clima espacial é um potencial causador de desastres naturais (UNITED NATIONS, 2013). Os fenômenos do espaço estão sendo monitorados, suas intensidades analisadas, bem como áreas de ocorrência e eventuais prejuízos. Diversas iniciativas e estudos em andamento existem para buscar melhor precisão nas previsões de ocorrências relacionadas com o clima espacial, que serão detalhados neste artigo. A consciência de tais fatos é pequena na sociedade, principalmente dentro da aviação, pois consequências de eventos severos são raras, ocorrendo uma ou duas vezes em 100 anos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Este trabalho objetiva a informação e a conscientização dos usuários que possam ser afetados, como pilotos, despachantes operacionais de voo e controladores. Traz o alerta para a falta de qualidade na previsão, visto a complexidade da origem dos eventos de clima espacial. Possui pertinência uma vez que o espaço aéreo, em condições não contingenciais, se apresenta cada vez mais denso e necessita de maior confiabilidade.

### 1.1 Histórico

O evento de clima espacial mais severo que se possui registro, ocorrido em 1 de setembro de 1859, completou 160 anos, de acordo com o National Research Council (2008). O evento é conhecido como “Evento

de Carrington” por ter sido observado pelo astrônomo inglês Richard Carrington, em Redhill, no Reino Unido (SHEEHAN, 2014). Se a mesma magnitude do fenômeno ocorresse atualmente, com as infraestruturas modernas e complexas presentes em nossa sociedade, as consequências seriam “profundas”<sup>1</sup> (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 20, tradução nossa).

O evento, i.e., as explosões solares, foram observadas também pelo astrônomo amador Richard Hodgson em Londres, na Inglaterra, e que confirmou a descoberta de Carrington (HOCKEY, 2014). As influências das explosões solares foram amplamente observadas no período da meia-noite, madrugada do dia 2. O céu adquiriu cores distintas das que comumente são vistas na aurora. Os tons eram avermelhados e verdes. O brilho também foi muito mais intenso, com relatos de pessoas que chegaram a pensar que já era dia. Esse efeito foi observado em diversas localidades, como demonstrado na Figura 1, em latitudes onde não ocorrem efeitos ionosféricos visíveis, como Cuba, Bahamas, Jamaica, El Salvador, Havaí e Guiana Francesa, bem próximas do grande círculo. Também foi observado em outras regiões da América do Sul (até norte do Chile), Europa, Ásia e Austrália (BARBOSA, 2015).

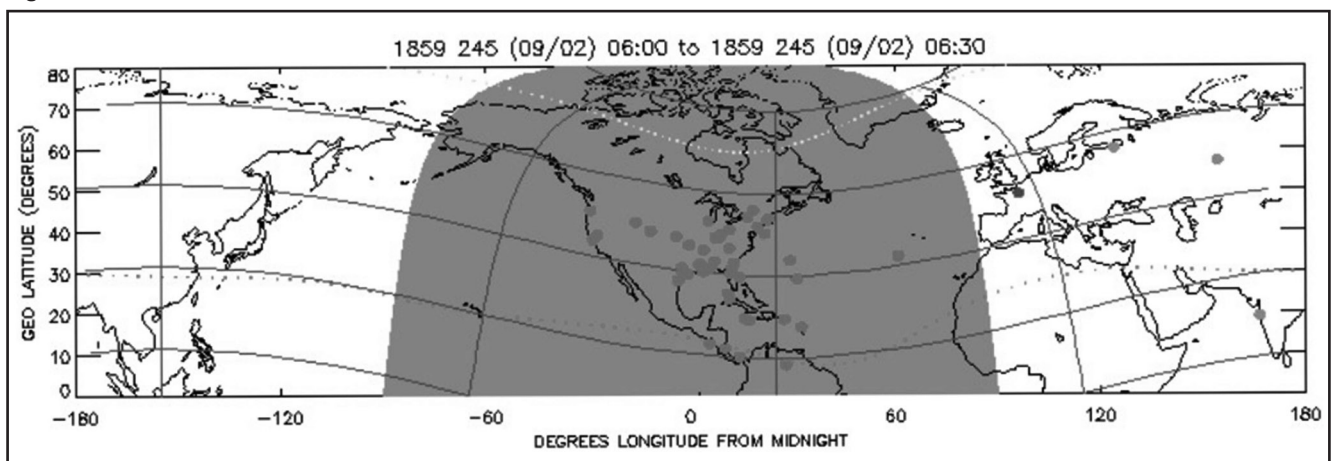
Os danos causados possuíam menor abrangência, pois as invenções elétricas estavam em seu início. No entanto, os telégrafos da época sofreram grandes influências, desde faíscas espontâneas até mensagens com códigos morse ilegíveis. Se desconectassem o instrumento da bateria, os “códigos” persistiam devido à corrente induzida nos cabos do sistema. Esta corrente também é conhecida como correntes parasitas, ou correntes de Foucault.

A partir desse evento considerável, pesquisadores iniciaram, na década de 1860, a ligação do fenômeno das auroras, as manchas solares e o magnetismo da terra, considerando-os dependentes. Ainda assim, o entendimento da natureza envolvida não era nítido. O maior avanço científico a respeito somente ocorreu durante a guerra fria, com a corrida espacial. Em 1957, a União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) lançou o primeiro satélite artificial denominado *Sputnik-1*, focado no estudo da atmosfera superior. Em seguida, os EUA lançaram o Explorer 1 em 1959 com os mesmos objetivos do *Sputnik-1*. Estes primeiros satélites lançados foram essenciais para o estudo dos efeitos da radiação solar e cósmica, assim como para a ciência da composição da ionosfera. Na década de 1970, houve o descobrimento das ejeções coronais de massa (GOSLING, 1993; HAPGOOD, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; TOUSEY, 1973).

Consequências graves do clima espacial são raras. Como exemplo, houve outros registros de fortes influências, como durante a Segunda Guerra Mundial. Observações de radar foram interrompidas durante emissões solares de radiação, fato que somente foi reconhecido como causa solar em 1946 (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). Em 1972, o estado de Illinois no EUA sofreu uma perda nas comunicações. Em 13 de março de 1989, outro forte bombardeamento solar causou diversos danos na América do Norte, principalmente na área das redes elétricas. Esse fato gerou falhas gerais em geradores e transformadores. A província de Quebec, Canadá, ficou sem luz durante este evento.

Em 2003, 2005, 2015 e 2017 também ocorreram fortes eventos, com amplas influências em tecnologias, expostos respectivamente em (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004), (BARBOSA, 2015), (BLAŠKOVIĆ, 2015) e (REDMON et al., 2018). Seus efeitos na aviação serão detalhados neste trabalho.

**Figura 1** - Locais onde foram observadas auroras em 1859.



Fonte: (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 21).

<sup>1</sup> Tradução de “profound”.



## 2 CLIMA ESPACIAL

WMO (*World Meteorological Organization*) define clima espacial como: “O estado físico e fenomenológico do ambiente espacial, que inclui o Sol e os ambientes interplanetários e planetários”<sup>2</sup> (ICAO, 2019a, p. 5, tradução nossa). Portanto, clima espacial inclui o Sol e outros astros, como eventos de supernovas, que emitem radiação intergaláctica que atinge o planeta Terra, radiação esta conhecida como cósmica, ou GCR (*Galactic Cosmic Rays*) (ICAO, 2019a).

### 2.1 Clima espacial: o Sol

A origem solar do clima espacial inclui ventos solares, CMEs e *solar flares*. Estes são fenômenos originados da sua atmosfera, que podem gerar grandes nuvens de plasma magnetizado e/ou radiação de partículas altamente energizadas, que se propagam através do espaço (HAPGOOD, 2017). As CMEs e os *solar flares* possuem potencial de interferir com a segurança da aviação.

As partículas expelidas deste astro se propagam pelo espaço através de linhas de campo magnético (BOWHILL, 1971), produzido através do processo de dínamo. A teoria deste processo é presente para a explicação da geração do campo magnético de todos os planetas, em que o núcleo apresenta calor intenso que libera íons. Com isto, há fluido carregado eletricamente que possui um movimento de rotação e convecção constante, ocorrendo a produção de campo magnético.

Os ventos solares, as CMEs e os *solar flares* são produzidos por meio de um processo denominado reconexão magnética. Este processo acontece na atmosfera solar quando dois campos magnéticos com direções convergentes se cruzam, transformando e liberando, repentinamente, energia magnética em energia cinética. Tal processo pode também ocorrer fora da atmosfera solar, entre os campos magnéticos da Terra e do espaço interplanetário contrário ao Sol (*Dungey Cycle*), contribuindo para tempestades geomagnéticas através do reenvio de plasma ao planeta (HAPGOOD, 2017; HESSE; CASSAK, 2020).

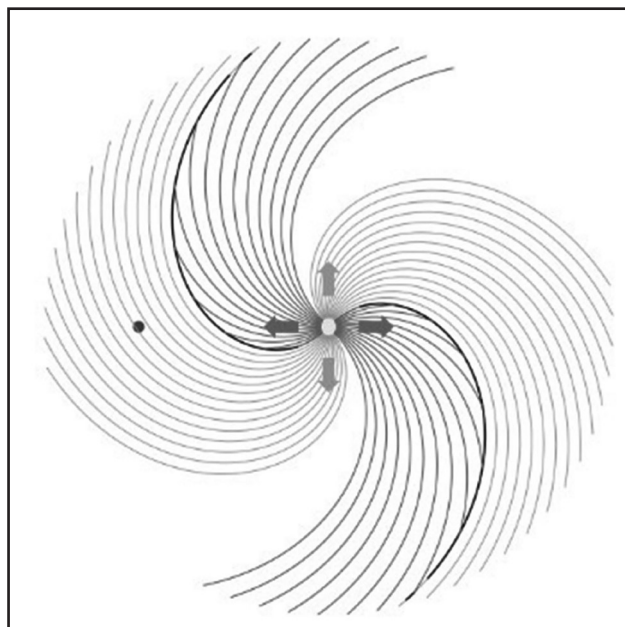
O campo magnético é transportado tanto pela CME como pelos ventos solares. Isto ocorre de forma semelhante ao fundamento do processo de dínamo descrito anteriormente. O plasma possui alta condutividade a ponto

de permitir a condução de magnetismo pelo espaço. É utilizado o termo “*frozen in*” para o campo magnético, quando transportado junto com a liberação do plasma (HAPGOOD, 2017, p. 17; MENK; WATERS, 2013, p. 2).

Os ventos solares são plasma que continuamente escapam da região coronal do Sol, pois superam a gravitação devido às altas temperaturas<sup>3</sup>, e não representam risco à segurança para a aviação. Possuem velocidades médias que variam de 500 a 800 quilômetros por segundo e, quando atingem a Terra, interagem com o campo magnético terrestre através da força de Lorentz, modelando-o e formando a magnetosfera (HAPGOOD, 2017; MENK; WATERS, 2013). No entanto, devido ao processo de reconexão magnética na superfície solar, pode ocorrer a liberação de ventos solares de alta velocidade, perturbando o campo geomagnético terrestre (ICAO, 2019a). Neste contexto, são os principais responsáveis pela aurora, manifestação do clima espacial visível aos olhos, e que é a absorção e condução da energia solar pela ionosfera.

A rotação do Sol interfere na liberação dos ventos solares de forma que, quando emergem da atmosfera, executam uma trajetória semelhante a da água de um aspersor de jardim, como esquematizado na Figura 2. O formato desta trajetória também é conhecido como “*Parker Spiral*” (MENK; WATERS, 2013). Este termo surgiu na década de 1950, criado por Eugene Newman Parker quando estudava tais fenômenos solares.

Figura 2 - Esquema da trajetória dos ventos solares.



Fonte: (HAPGOOD, 2017, p. 7).

<sup>2</sup> Tradução de: “The physical and phenomenological state of the natural space environment, including the Sun and the interplanetary and planetary environments”.

<sup>3</sup> Acredita-se que a liberação de energia cinética, através da reconexão magnética, seja a causa da elevação das temperaturas na coroa solar, que chegam ao milhão de Kelvins, comparado com 6000K na superfície (HAPGOOD, 2017).



As CMEs são ventos solares em forma de nuvens de plasma que possuem energia altíssima, com massa que pode ter bilhões de toneladas e velocidade de até 3.000 km/s. Podem chegar à Terra em menos de um dia, ou até mais de 4 dias, após sua liberação da coroa. As CMEs possuem liberação direcionada e a chance de atingir a Terra é pequena. Representam grande risco à aviação e tecnologias, pois podem desencadear as tempestades geomagnéticas, que são perturbações no campo magnético terrestre, devido à absorção de plasma na magnetosfera, que geram ciclos de reconexão magnética no lado do globo oposto ao Sol. Estes ciclos reenviam plasma ao planeta e podem ser chamados de *Dungey Cycle* ou sub-tempestades. Devido ao processo, grande quantidade de energia é dissipada na ionosfera, contribuindo para a alteração das características físicas dos sinais de satélites, quando atravessam tal camada atmosférica. Isto reduz a precisão do posicionamento das aeronaves (podendo ocasionar a perda do posicionamento) e prejudica os sistemas de comunicação HF e SATCOM (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a; MENK; WATERS, 2013; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

Outro processo desencadeado por tempestades geomagnéticas é a indução de correntes em solo (GIC<sup>4</sup>), que pode afetar infraestruturas elétricas como redes de energia e sistemas ferroviários. Danos a estes sistemas gerariam grandes prejuízos, como detalhado em TAKAHASHI et al., (2015, p. 33).

Os *solar flares* são liberações de energias em menor escala na forma de radiação eletromagnética (comprimentos de ondas EUV e Raios-X<sup>5</sup>). Os depósitos de energia são rápidos, atingindo a Terra em minutos. Sua ocorrência tem relação com as CMEs, pois podem ser um indicativo antecedente à liberação da ejeção coronal, mas também podem ocorrer separadamente. Têm potencial de influenciar, somente nas regiões da Terra iluminadas pelo sol, os sistemas de comunicações e monitoramento HF, que utilizam frequência entre 1-20 Mhz; os sistemas elétricos embarcados e a saúde das tripulações. Nas regiões polares, seus efeitos são maiores, devido ao comportamento magnético terrestre que permite maior depósito de prótons nas latitudes mais altas. Através desta característica, a radiação atinge altitudes inferiores e interfere de forma mais significativa nos sistemas de comunicação HF, principalmente das rotas árticas, utilizadas para voos entre América e Ásia. A radiação pode ser também recebida em latitudes e altitudes baixas<sup>6</sup>, devido a fenômenos ionosféricos equatoriais mais complexos (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a).

O número de elétrons depositados na ionosfera, após a chegada do plasma, possui unidade denominada de TEC (*Total Electron Content*). Valores de TEC são determinados pelo número de elétrons em uma coluna de 1m<sup>2</sup> entre um sinal de satélite e o seu receptor, que atravessa a ionosfera. Variação de TEC causa variação proporcional no equilíbrio eletrônico da ionosfera, ocasionando alterações na velocidade, polarização, fase e amplitude (cintilação ionosférica) das ondas de rádio propagadas pelo GPS. As alterações podem indicar posição errônea do receptor, assim como podem ocasionar a perda do sinal do satélite (AGUIAR, 2010; COSTER; KOMJATHY, 2008). Uma unidade de TEC, igual a 10<sup>16</sup> elétrons/m<sup>2</sup>, corresponde a 0,163 m de atraso na aferição da posição do receptor, sendo portanto, um bom indicador para a qualidade do posicionamento. O TEC varia regularmente devido ao ciclo das manchas solares, à época do ano, hora do dia e localização geográfica (KOMJATHY et al., 2003).

Estas ejeções de energia solar ocorrem com maior frequência em um período cíclico de atividade do Sol, quando há maior atividade. Este ciclo de maior atividade possui 11 anos aproximadamente (GOSLING, 1993; WEBB, 1991). A atividade solar é diretamente proporcional aos grupos de manchas solares visíveis, que são constantemente monitoradas por observatórios, como os satélites da agência espacial NASA, SOHO e STEREO-A. Durante o período de máxima atividade, os *solar flares* são emitidos, em média, 25 vezes por dia e as CMEs, 5 vezes por dia. A densidade energética é liberada de forma semelhante entre *solar flares* e CMEs, no entanto, a chance de a Terra sofrer a influência de uma CME é menor, pois possui liberação direcionada. Em contrapartida, os danos seriam maiores através das CMEs devido ao forte campo magnético unido ao plasma (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

## 2.2 Clima espacial: radiações cósmicas

Os raios cósmicos, que são provenientes de fora do sistema solar, atingem a Terra constantemente, com intensidade que varia pouco com o tempo. A interferência dos raios cósmicos sobre a Terra é inversamente proporcional à atividade solar, pois as CMEs e os *solar flares* interagem com a radiação cósmica de forma a reduzir sua interação com a atmosfera terrestre.

Assim como as radiações solares, seus efeitos serão maiores em latitudes mais altas (acima de 55° de latitude

<sup>4</sup> Sigla de Ground-Induced Currents.

<sup>5</sup> EUV é sigla para Ultravioleta Extremo com faixa de comprimento de onda de 10nm – 121nm (nanômetros). Raios-X possuem 1nm – 20nm.

<sup>6</sup> Próximas ao nível de voo 300 (10-12km).

magnética), como nos polos, e aumentam com a altitude, atingindo um máximo entre 60-65.000 pés. Dependendo da intensidade, podem ser prejudiciais aos equipamentos eletrônicos embarcados e, com longa exposição, à saúde da tripulação (ICAO, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

### 2.3 Clima espacial: o Brasil

O Brasil é uma das regiões do globo terrestre com maiores influências ionosféricas, e maiores valores e variações de TEC. Está localizado em uma região equatorial e possui parte do território próximo à AMAS (Anomalia Magnética da América do Sul). O equador magnético apresenta, juntamente com os polos, maiores irregularidades ionosféricas principalmente nos períodos após o pôr do sol local, ocorrendo com maior frequência cintilações na frequência dos sinais de satélite. As irregularidades são causadas pelo aumento do campo elétrico ionosférico no período pós-vespertino, devido a uma maior movimentação do plasma (*Fountain Effect*), dando origem também a bolhas de plasma (SPOGLI et al., 2013).

A AMAS é uma região onde o campo geomagnético possui os menores valores de intensidade, contribuindo, de forma semelhante aos polos, para o maior depósito de radiação. Tal característica permite maior perturbação na ionosfera, o que também contribui para cintilações nos sinais de satélites do GNSS (SPOGLI et al., 2013). Tais comportamentos da ionosfera sobre o Brasil são muito prejudiciais para a precisão do posicionamento (KOMJATHY et al., 2003; MATSUOKA; DE OLIVEIRA CAMARGO; BATISTA, 2006).

## 3 TECNOLOGIAS PARA A AVIAÇÃO QUE MITIGAM EFEITOS DO CLIMA ESPACIAL

A ICAO (Organização Internacional de Aviação Civil) exige para os sistemas concernentes à navegação aérea que possuam precisão, integridade, disponibilidade e continuidade para todas as fases de voo. Estes requisitos são expostos no Anexo 10 da Convenção de Aviação Civil Internacional através das SARPs (Práticas e Padrões Recomendadas de Segurança). Para atender estas demandas de performance de navegação, foram necessários novas tecnologias, por meio dos avanços nas pesquisas relacionadas com o clima espacial.

Em 2003, nos EUA, foi certificado o SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) próprio, denominado de WAAS (*Wide Area Augmentation System*). É um sistema

de aumento do posicionamento, focado para corrigir os efeitos ionosféricos presentes no território americano, além de atrasos de relógio do satélite e erros de órbita. Seu funcionamento é composto de estações GPS em solo, com suas posições precisamente definidas, e que continuamente medem as diferenças em relação ao aferimento dos satélites. Estes dados são então enviados a uma estação central, que gera as mensagens corrigidas. Estas mensagens são transmitidas para satélites geoestacionários que, em sequência, retransmitem para os receptores embarcados nas aeronaves. Com este sistema, as aeronaves são capazes de executar procedimentos de precisão através do LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*) em localidades diversas pelo território americano, onde não há auxílios-rádio para navegação (COSTER; KOMJATHY, 2008; FAA, 2019). Semelhante ao WAAS, há outros sistemas que compõem o SBAS e que operam da mesma forma. No Japão, utilizam o MSAS (*MTSAT Satellite Augmentation System*), operacional desde 2007. Na Europa utiliza-se o sistema EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), iniciado em 2011. Na Índia, utilizam o GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation*), certificado em 2014. Os 4 citados estão operacionais, enquanto há outros sistemas que estão em desenvolvimento, como o SDCM (*System for Differential Corrections and Monitoring*) da Rússia e o SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*) da China (DENNIS; HEMSTAD, 2016). Os sistemas operacionais fazem parte do IWG (*Interoperability Working Group*), atendendo requisitos ICAO, para oferecerem os serviços de aumento com livre transição entre si. Desta forma, unifica-se a tecnologia de melhora de precisão pelo hemisfério (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2011).

O *ground-based augmentation system* (GBAS) é um segundo sistema de aumento do GNSS, desenvolvido para melhorar a precisão do posicionamento por meio de correções diferenciais por equipamentos em solo. Através das correções deste sistema, os erros ionosféricos comuns se tornam negligíveis. Quando o sistema é instalado em aeroportos, podem ser executadas aproximações e pousos por instrumentos com precisão, chamados de *GBAS Landing System* (GLS). Dependendo do tipo de serviço de aproximação GBAS (GAST), as aproximações podem ser realizadas com precisão ainda maior (CAT II/III). Por exemplo, nos EUA os sistemas GBAS presentes são o LAAS (*Local Area Augmentation System*) e SLS (*Satellite Landing System*) desenvolvidos pela Administração Federal de Aviação (FAA) e pela Honeywell, respectivamente. O primeiro GBAS foi aprovado em 2012 no Aeroporto Internacional de Newark, nos Estados Unidos (YOON et al., 2019).

Somado a estas tecnologias de aumento, a grande maioria das aeronaves comerciais possui um sistema de reversão, caso os sinais GNSS apresentem falha. Será determinada a posição da aeronave com base no conjunto entre sinais do sistema inercial da aeronave e sinais de rádio (VOR/DME). A tripulação pode fazer uso exclusivo da navegação convencional ou, se não houver sinais de rádio disponíveis na região, a tripulação pode pedir auxílio ao ATC. Estas são estratégias de mitigação enquanto não houver procedimentos de contingência próprios para a ocasião (EUROCONTROL, 2020; ICAO, 2018).

#### 4 INTERFERÊNCIAS REMANESCENTES NA AVIAÇÃO

Em 29 de outubro de 2003, se iniciou o evento que ficou conhecido como Tempestades de Halloween, que atingiu diversas regiões dos Estados Unidos. O evento inabilitou o serviço de aproximação de precisão do WAAS, que ficou inutilizável durante 15 horas no dia 29, e 11.3 horas no dia 30 (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004).

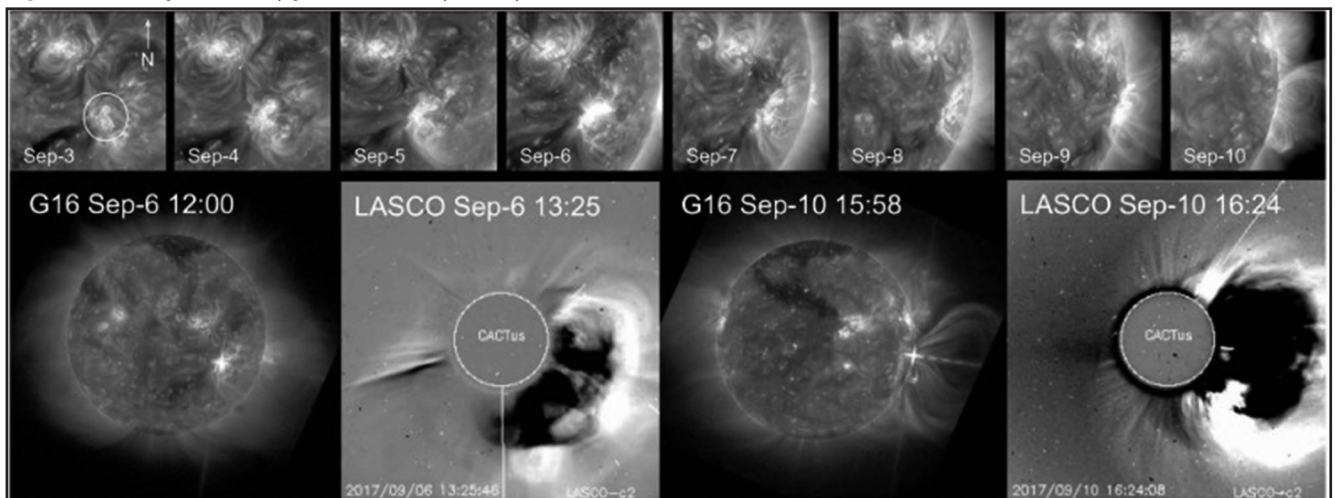
Em dezembro de 2005, houve perturbação nos sistemas de navegação de GPS que durou 10 minutos, desorientando aeronaves, navios e plataformas de petróleo (BARBOSA, 2015). No dia 4 de novembro de 2015, o serviço de tráfego aéreo da Suécia reportou que aeronaves não apareciam em seus radares. O problema durou aproximadamente 1 hora. A causa considerada foi uma tempestade solar (BLAŠKOVIĆ, 2015).

No dia 3 de setembro de 2017, ocorreu um evento que sobrepôs o SBAS dos EUA e Europa. A região solar categorizada como região 46 do grupo Catania —

nomenclatura da agência americana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), iniciou uma atividade magnética mais complexa, gerando uma série de *solar flares* e CMEs, cujos efeitos foram sentidos nos dias 6, 7 e 10 do mês (REDMON et al., 2018). Na Figura 3, tem-se imagens do desenvolvimento desta atividade solar. A região emitiu um vento solar de magnitude X9.3<sup>7</sup>. O último mais forte havia ocorrido em setembro de 2005, com intensidade X17<sup>7</sup> no ciclo solar 23 (REDMON et al., 2018). Neste evento de 2017, a NOAA emitiu alertas com sua escala mais severa para risco de perda de comunicações, tempestades geomagnéticas e alta radiação de partículas. Foi reportada perda de comunicação HF em voo no dia 6 e perda de capacidade para procedimentos LPV do WAAS e EGNOS no dia 8 (REDMON et al., 2018). Além disso, neste período, as comunidades do Caribe enfrentavam o furacão José. Devido ao evento de clima espacial, sofreram dificuldades nos serviços de comunicações para atendimento à emergência, reportadas por HWN (*Hurricane Weather Net*) e DGAC (*French Civil Aviation Authority*) (REDMON et al., 2018).

O sistema de aumento europeu EGNOS sofreu uma redução considerável de sua disponibilidade em 2017, conforme demonstrado na Figura 4. No dia 06 de setembro, houve perda de aproximadamente 10% da taxa de disponibilidade, o que afetou a segurança de procedimentos LPV (BERDERMANN et al., 2018). Esse decréscimo ocorreu devido a CME que atingiu o planeta, depositando plasma na região da ionosfera e aumentando valores de TEC repentinamente. Isto dificulta os receptores de manter correções de sinal e, na maioria dos casos, ocorre perda de ligação entre o satélite. Esta perda é chamada de “*loss of lock*” (BERDERMANN et al., 2018).

**Figura 3** - Evolução das erupções solares captadas pelos satélites SDO, GOES e SOHO, no intervalo entre os dias 3 e 10 de setembro.

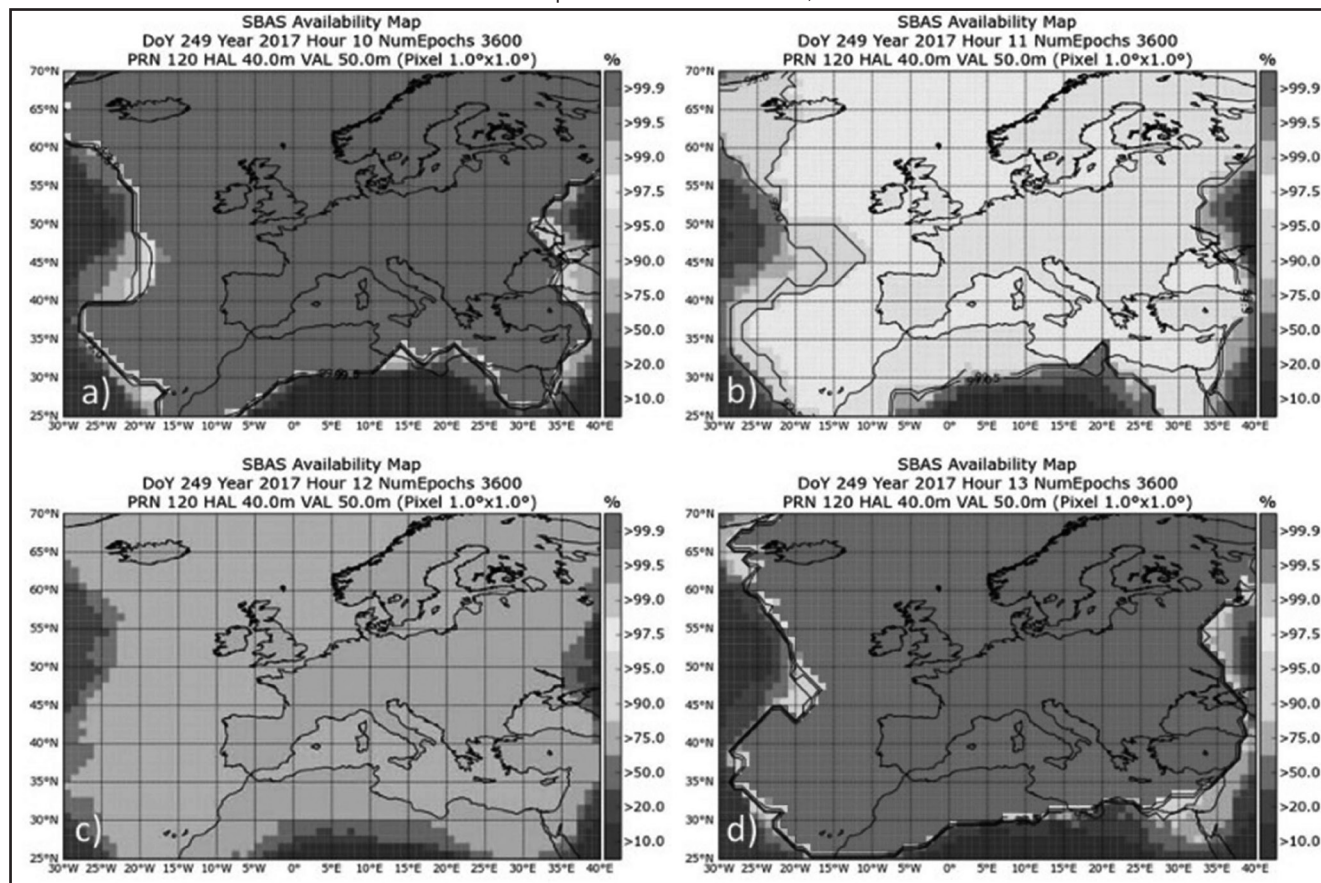


Fonte: (REDMON et al., 2018, p. 4).

<sup>7</sup> Escala do NOAA, disponibilizada no portal do SWPC (*Space Weather Prediction Center*).



**Figura 4** - Mapa com escala da disponibilidade do SBAS europeu EGNOS no intervalo de tempo entre as 10:00 e 13:00 (UTC) do dia 6 de setembro de 2017. Cinza mais forte indica alta disponibilidade e cinza claro, baixa.



Fonte: (BERDERMANN et al., 2018, p. 9).

Um evento de clima espacial semelhante ao de 1859 nunca foi repetido. Os danos são desconhecidos na prática, apesar de existirem algumas previsões de intensidade, como em (BAKER et al., 2013). Por meio de um modelo preditivo, eles mediram o dano que uma CME poderia ter causado no planeta em 2012. Esta CME não atingiu o globo por questão de uma semana de rotação solar. Com o método, os autores concluíram que a intensidade da ejeção coronal havia sido mais intensa que a do evento de 1859 de Carrington, e os danos semelhantes à analogia de (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008): que a sociedade ainda estaria “pegando os pedaços”<sup>8</sup> (BAKER et al., 2013, p. 590).

### 5 ESCOPO DE MONITORAMENTO DO CLIMA ESPACIAL ATUAL

Os danos causados pelo clima espacial, assim como os danos potenciais, geraram iniciativas com objetivo de entender a sua origem, realizar observações,

recolher dados e prever fenômenos. Atualmente, a organização mundial central para a aviação que realiza estudos a respeito é a WMO (*World Meteorological Organization*). Ela trabalha de forma conjunta com a ICAO, melhorando as previsões mundiais emitidas pelo WAFS (*World Area Forecast System*) e, atualmente, o principal objetivo é mitigar os impactos do clima espacial (*WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION*, [s.d.]).

Os EUA possuem algumas organizações de fornecimento de informações. Dentre elas o SWPC (*Space Weather Prediction Center*) sob administração do NOAA. Neste centro, são disponibilizadas em seu site, <<https://www.swpc.noaa.gov>>, escalas diárias que demonstram as tecnologias e os sistemas que podem ser afetados com os eventos de clima espacial. São três escalas que mensuram: impacto em sistemas de rádio (HF e satélites); níveis de radiações provenientes de tempestades solares e níveis das tempestades geomagnéticas (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

<sup>8</sup> Tradução de “picking up the pieces”.



Na Europa, a ESA (*European Space Agency*) criou um programa em 2009 para melhorar a consciência dos usuários a respeito dos perigos do espaço. Foi denominada de SSA (*Space Situational Awareness*). A partir da iniciativa, foi criado um segmento atrelado à segurança global, chamado de *Space Weather Office*, para estudo do clima espacial, com foco em mitigar os seus efeitos. Dentro deste segmento, está em desenvolvimento o *Space Weather Service Network* da ESA, que visa prover produtos e serviços de cinco áreas diferentes para usuários. Estas cinco áreas são administradas por especialistas e são divididas em: clima solar, clima da heliosfera, radiação espacial, clima ionosférico e condições geomagnéticas. Esta iniciativa tem como um de seus principais objetivos fornecer produtos mais precisos e confiáveis (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]).

No Brasil, também foram criadas algumas iniciativas para estudo e desenvolvimento de tecnologias para enfrentar influências do clima espacial. O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) criou o programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) em 2007, com o objetivo de propor mecanismos de alerta e procedimentos de defesa para sistemas de comunicação via satélite, GNSS, sistemas de segurança de voo, sistemas energéticos de grande dimensão, sistema de proteção e de controle de altitude de satélites, entre outros. No site do programa, <[www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/](http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/)>, são disponibilizadas, de forma semelhante ao NOAA, através do SWPC, escalas diárias que demonstram os potenciais danos às tecnologias. O projeto faz parte do DIDAE (Divisão de Aeronomia) do INPE, que conta, também, com outras iniciativas de pesquisa, como o projeto EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*), com foco no monitoramento e estudo da região equatorial (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, [s.d.]).

O Brasil também possui infraestrutura robusta de redes de estações que monitoram sinais GNSS, principalmente das constelações GPS e GLONASS. Ele é composta pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), da rede dos projetos CIGALA e CALIBRA, do LISN e do GNSS-NavAer. Elas analisam e estudam os efeitos que a ionosfera, próxima ao equador magnético, impõe ao posicionamento, com propósito de entender

melhor suas características e desenvolver tecnologias mais precisas e confiáveis, assim como novos métodos de posicionamento.

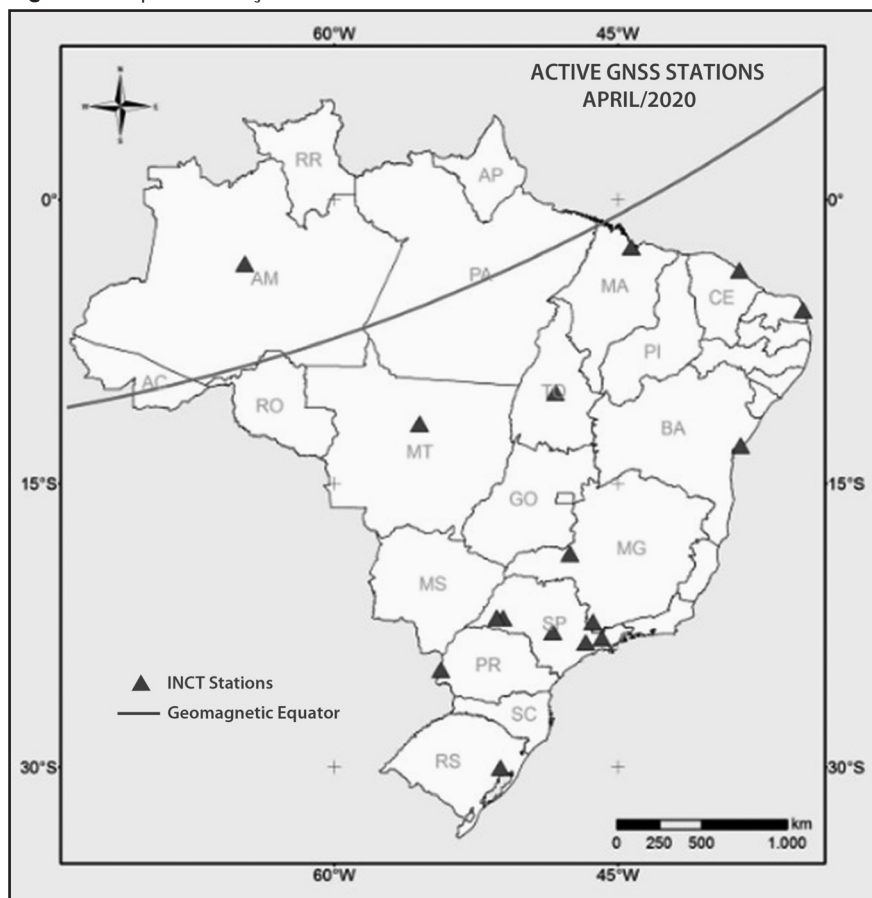
A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), sobre administração do IBGE, possui estações GNSS desde 1996, que armazenam continuamente as observações do código e da fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites das constelações GPS ou GLONASS (IBGE, [s.d.]). Seus dados são comumente utilizados em pesquisas.

O projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*), financiado pela Comissão Europeia (EC) da Agência Europeia do GNSS (GSA), foi criado para desenvolver e testar tecnologias de mitigação a cintilação ionosférica na América do Sul, através de estações GNSS em solo. Esse projeto possuiu como foco analisar os potenciais efeitos do período de máxima atividade solar do ano de 2013. O projeto teve início em março de 2010 e foi concluído em fevereiro de 2012, sendo continuado pelo projeto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL*). Este possuía objetivo de evoluir os algoritmos corretivos para as técnicas de posicionamento GNSS de alta precisão, expandindo o número de estações GNSS do projeto anterior CIGALA, sendo concluído em fevereiro de 2015 (AGUIAR, 2010).

O LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*) é um projeto internacional para estudo de fenômenos ionosféricos, com instrumentos geofísicos localizados na América do Sul, próximos do equador magnético e até o meridiano 70°W. Possui diversas instituições colaboradoras, com pesquisadores do INPE como representantes brasileiros (INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, [s.d.]).

O GNSS-NavAer foi criado pelo INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) em 2017. O principal objetivo da iniciativa é melhorar o conhecimento teórico das influências ionosféricas sobre o sinal GNSS, para aplicação segura na navegação aérea. Possui uma rede de estações GNSS para coleta de dados ionosféricos, denominada rede GNSS NavAer, espalhadas pelo território brasileiro, conforme ilustrado na Figura 5. Possui várias instituições colaboradoras, entre elas a UNESP, o INPE, o ITA e a UFRGS (INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, [s.d.]).

Figura 5 - Mapa das estações da rede GNSS NavAer.



Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, [s.d.].

Em junho de 2017, a ICAO questionou dos Estados o interesse em colaborar com informações a respeito do clima espacial. Dos interessados, o conselho da ICAO designou, em novembro de 2018, três centros globais: PECASUS (Finlândia, com parceiros da Bélgica, Áustria, Itália, Inglaterra, Chipre, Polônia, Holanda, Alemanha e África do Sul), SWPC (NOAA, EUA) e ACFJ (consórcio entre Austrália, Canadá, França e Japão) (ICAO, 2019b). Denominados de SWXC, os centros, sem hierarquia, se comprometeriam ao monitoramento e fornecimento de informações e recomendações, emitindo avisos de eventos do clima espacial que possam afetar comunicações, navegação baseada em GNSS e sistemas de monitoramento, assim como casos de risco de radiação à tripulação. As recomendações devem seguir a regulamentação internacional da Convenção de Aviação Civil Internacional, expostas no Anexo 3 – *Meteorological Service for International Air Navigation*. Para os usuários da aviação especificamente, foi lançado em 2019, pela ICAO, um material guia para o clima espacial – Documento 10100, *Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation* (ICAO, 2019b).

Portanto, após a emenda 78 do Anexo 3 da Convenção, operacional em novembro de 2018, a

documentação exigida no pré-voos possui o acréscimo da apresentação de eventos relevantes à rota, relacionados com o clima espacial, emitidos pelos SWXC. A linguagem das informações é abreviada, sendo os efeitos sobre comunicações HF, comunicações via satélite (SATCOM), degradação do GNSS e exposição à radiação, classificados, respectivamente, como HF COM, SATCOM, GNSS e RADIATION. No quesito da intensidade dos fenômenos, é utilizado MOD para moderada e SEV para severa. Exemplos das mensagens emitidas estão listadas nas tabelas I e II.

Em consonância com as alterações do Anexo 3, o Brasil, por meio da portaria 335 de 25 de janeiro de 2021, estabeleceu uma cooperação técnico-científica entre o INPE e o DECEA, através do EMBRACE e CIMAER (Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica) respectivamente. A cooperação visa aprimorar o Serviço de Meteorologia Espacial Aeronáutica, disponibilizando informações e assessoramento sobre fenômenos meteorológicos espaciais, conforme recomendações do Anexo 3, com intenção de tornar-se um SWXC regional da América do Sul (BRASIL, 2021; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2021).

Tabelas 1 e 2 - Exemplos de avisos de eventos que podem ser emitidos por um SWXC.

<b>(communication header)</b>	
<b>SWX ADVISORY</b>	
<b>DTG:</b>	<b>20161108/0000Z</b>
<b>SWXC:</b>	<b>(to be determined)</b>
<b>SWX EFFECT:</b>	<b>RADIATION MOD</b>
<b>ADVISORY NR:</b>	<b>2016/2</b>
<b>FCST SWX:</b>	<b>20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +6 HR:</b>	<b>20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +12 HR:</b>	<b>20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +18 HR:</b>	<b>20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +24 HR:</b>	<b>20161109/0100Z NO SWX EXP</b>
<b>RMK:</b>	<b>RADIATION LEVELS HAVE EXCEEDED 100 PERCENT OF BACKGROUND LEVELS AT FL350 AND ABOVE. THE CURRENT EVENT HAS PEAKED AND LEVELS ARE SLOWLY RETURNING TO BACKGROUND LEVELS. SEE WWW.SPACEWEATHERPROVIDER.WEB</b>
<b>NXT ADVISORY:</b>	<b>NO FURTHER ADVISORIES</b>

<b>(communication header)</b>	
<b>SWX ADVISORY</b>	
<b>DTG:</b>	<b>20161108/0100Z</b>
<b>SWXC:</b>	<b>(to be determined)</b>
<b>SWX EFFECT:</b>	<b>GNSS MOD AND HF COM MOD</b>
<b>ADVISORY NR:</b>	<b>2016/1</b>
<b>OBS SWX:</b>	<b>20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +6 HR:</b>	<b>20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +12 HR:</b>	<b>20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +18 HR:</b>	<b>20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +24 HR:</b>	<b>20161109/0100Z NO SWX EXP</b>
<b>RMK:</b>	<b>LOW-LEVEL GEOMAGNETIC STORMING IS CAUSING INCREASED AURORAL ACTIVITY AND SUBSEQUENT MOD DEGRADATION OF GNSS AND HF COM AVAILABILITY IN THE AURORAL ZONE. THIS STORMING IS EXPECTED TO SUBSIDE</b>

Fonte: (RUTLEDGE, 2020).

Apesar dos avanços e dos sistemas disponíveis, alguns eventos ainda são imprevisíveis. Perdas de comunicação HF, que ocorrem nas regiões diurnas da Terra, acontecem sem aviso prévio. Radiação mais intensa, causada por tempestade solar, pode ser prevista, mas por vezes é rápida e atinge as pessoas e os sistemas sem prévio preparo (ICAO, 2019a).

## 6 NOVAS INICIATIVAS

Os avanços nos estudos do clima espacial e seus efeitos em tecnologias seguem por caminhos científicos e técnicos. A NASA e ESA são agências que se aprofundam na linha científica de estudo, provendo maior conhecimento teórico, como por meio das missões espaciais MMS e LaGrange. No Brasil, a cooperação do INPE com o DECEA forma a principal fonte de

pesquisa. A partir de tais conhecimentos, avanços na área técnica passam a existir, como a criação do sistema SBAS DFMC do GNSS.

Atualmente, o sistema de posicionamento usado sobre uma aeronave consta de uma constelação de satélite e uma frequência de sinal. Para a constelação GPS, usa-se a frequência denominada L1 (1575 MHz), devendo haver no mínimo 4 satélites para aferição tridimensional da posição do receptor (ICAO, 2017). Este sistema é utilizado em PBN (*Performance Based Navigation*), ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) e TAWS (*Terrain Avoidance Warning System*).

O sistema DFMC (*Dual-Frequency Multi-Constellation*) é um sistema futuro que possui como objetivo aumentar a robustez do atual SBAS do GNSS. Adicionará uma frequência ao sistema, denominada de L5 (1176,45 MHz), e permitirá a integração entre as constelações

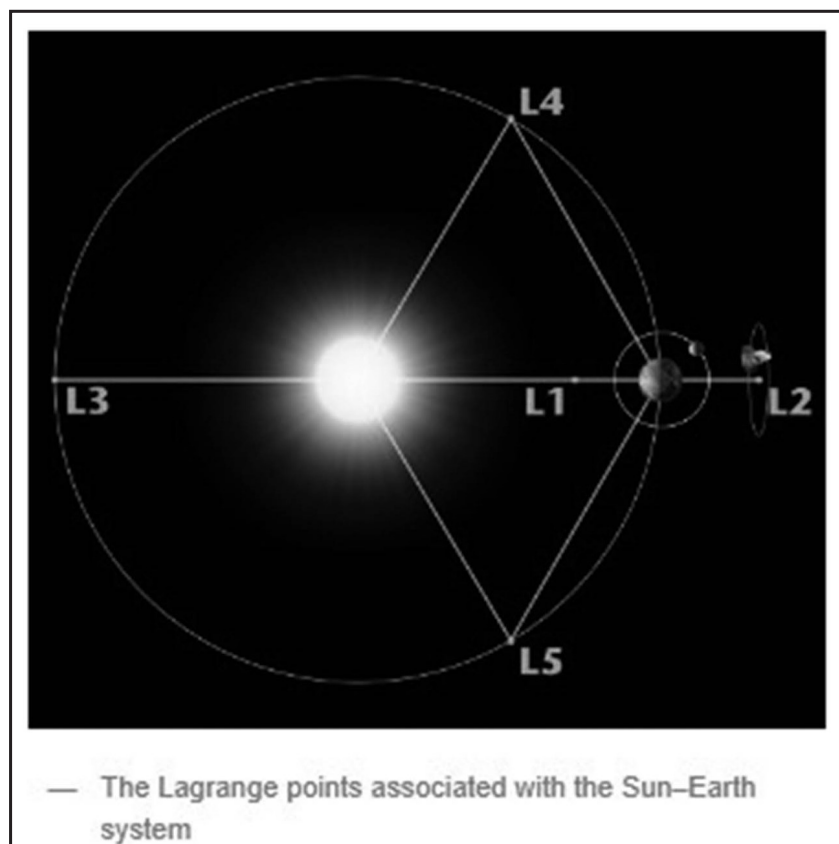
GPS, Galileo, GLONASS e BeiDou. Através destas implementações, esse sistema contribuirá para dar maior resistência contra a cintilação ionosférica e melhorar a geometria entre satélites. O DFMC está em processo de certificação. A ICAO desenvolveu o conceito de operação (CONOPS) do sistema, descrevendo como será utilizado na aviação nos próximos anos. As respectivas SARPs estão previstas para serem validadas no ano de 2022 (ICAO, [s.d.]; RICARD, 2019).

Na linha científica, a missão espacial da NASA MMS é composta de 4 aeronaves que navegam em formação pela magnetosfera, região onde está presente o campo magnético da Terra. Seu lançamento ocorreu em março de 2015 com o objetivo de estudar o fenômeno de reconexão magnética. As 4 aeronaves formam um esquema de pirâmide, que possibilita a visualização tridimensional do fenômeno magnético. A partir do sucesso da visualização, estudam com maior nitidez o que ocorre, com o objetivo de avaliar e evoluir o conhecimento preditivo sobre a reconexão magnética (NASA, [s.d.]).

A missão LaGrange é um conceito de exploração científica futura da European Space Agency (ESA). No

site de apresentação do conceito (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]), a agência afirma: “Observações e previsões somente são possíveis se dados suficientes de observações estiverem constantemente disponíveis, através do fornecimento de informações precisas e pontuais do clima espacial”<sup>9</sup> (tradução nossa). A missão visa os pontos de LaGrange do espaço, como apresentados na Figura 6. São pontos em que as forças de gravidade do Sol e da Terra interagem sobre eles, de forma que criam estabilidade, ou seja, nessas posições os objetos não orbitam. Há cinco pontos com esta característica na heliosfera, identificados como L1, L2, L3, L4 e L5. A missão será colocar aeronaves nos pontos L1 e L5. O objetivo da primeira posição é melhorar as observações interplanetárias para se avaliar a velocidade dos ventos solares, suas densidades, temperatura e pressão dinâmica. O objetivo da aeronave na posição L5 será complementar as observações da aeronave em L1, observando-se a propagação das nuvens de plasma emitidas pelo Sol em melhor ângulo, assim como observar a face do Sol antecedente, antes da mesma facear a Terra.

**Figura 6** - Esquema das posições *LaGrange*.



Fonte: (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]).

<sup>9</sup> Tradução de: “Providing timely and accurate space weather information, nowcasts and forecasts is possible only if sufficient observation data are continuously available.”



## 7 CONCLUSÃO

O sistema de navegação GNSS está projetado para ser o principal recurso da PBN (*Performance Based Navigation*) até 2030 (EUROCONTROL, 2020). Reuniões da ICAO definem planos futuros para o sistema, que incluem aumento contínuo da disponibilidade, previsão e integridade do posicionamento (SMAOUI, 2017). Estas melhorias são necessárias uma vez que o espaço aéreo, em condições não contingenciais, se apresenta cada vez mais denso e necessita de maior confiabilidade.

Uma das principais ameaças à acurácia do GNSS possui origem complexa e de difícil previsão. Os danos que podem ser causados nas mais diversas redes tecnológicas são imensuráveis, pois nenhum evento como o de 1859 se repetiu. No entanto, é conhecido, entre pesquisadores, que os danos materiais seriam graves, afetando profundamente a questão financeira dos países (BAKER et al., 2013; BERDERMANN et al., 2018; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Os sistemas atuais preditivos ainda não são confiáveis, pois existem fenômenos solares que não são previsíveis (ICAO, 2019a). Durante os eventos citados de 2017, por exemplo, a aviação não estava ciente, e apenas receberam o alerta de que tal serviço estava indisponível (HF e LPV) (REDMON et al., 2018). Está sendo exigido pela União Europeia, nos próximos anos, que, os provedores de serviço de navegação aérea (ANSP) criem procedimentos de contingência, caso o único meio comum global de navegação (GNSS) falhe. Estes procedimentos foram amplamente discutidos em EUROCONTROL (2020), detalhando ações de reversão para meios convencionais, como VOR/DME, além de procedimentos de responsabilidade do ATC. O documento auxiliará na criação de um segundo documento futuro, mas com caráter regulatório.

As novas missões espaciais lideradas pela NASA e ESA podem transmitir um grande avanço teórico sobre o tema, melhorando as

capacidades preditivas. No entanto, os novos estudos são recentes e outros ainda são futuros, como a MMS e LaGrange, respectivamente.

Para o aumento da segurança, assim como para a redução dos danos que podem ser causados pelo clima espacial, é necessário que haja maior consciência a respeito desta natureza pelos principais usuários das tecnologias ameaçadas, principalmente pelos aviadores. Existe o apelo entre algumas fontes, como BERDERMANN et al. (2018), REDMON et al., (2018) e HAPGOOD, (2017, p. 3), que discutem sobre a necessidade da contínua melhora no aprendizado e conhecimento preditivo sobre o tema.

O Brasil não possui sistema de mitigação aos efeitos ionosféricos semelhante ao SBAS e GBAS para a aviação. No entanto, existem diversas pesquisas e projetos, como os do INPE e do INCT, que podem futuramente trazer novos métodos de posicionamento para o Brasil.

Em 2017, houve uma reunião entre DECEA e representantes da FAA, do Boston College e das empresas Mirus, Honeywell, Boeing e companhias aéreas, para discutirem e projetarem a certificação do GBAS no aeroporto Galeão do Rio de Janeiro (GALEMBECK, 2017). No trabalho de SURCO ESPEJO et al., (2020), foi simulada a precisão da fase de aproximação e pouso de uma aeronave no aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro. Foi concluído que o sistema de aumento GBAS instalado no local não pode ser certificado para uso, devido aos efeitos ionosféricos equatoriais presentes, que reduzem sua precisão.

A localização geomagnética brasileira é contribuinte para maiores efeitos negativos, caso ocorram eventos de clima espacial (SPOGLI et al., 2013). Portanto, a conscientização a respeito no país deveria existir com igual ou maior rigor, considerando os fatos. A falta de conhecimento sobre o tema existe no Brasil, como também em toda a sociedade, incluindo usuários de tecnologias suscetíveis. Para HAPGOOD, (2017), este é um grande desafio a ser resolvido.



## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Claudinei. Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS. **Aleph**, [S. l.], 2010.
- BAKER, D. N.; LI, X.; PULKKINEN, A.; NGWIRA, C. M.; MAYS, M. L.; GALVIN, A. B.; SIMUNAC, K. D. C. A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios. **Space Weather**, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 585–591, 2013. DOI: 10.1002/swe.20097. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/swe.20097>. Acesso em: 16 jun. 2020.
- BARBOSA, Cássio. **Os 156 anos de Carrington I G1 - Ciência e Saúde - Observatório**. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/blog/observatorio/post/os-156-anos-de-carrington.html>. Acesso em: 16 maio. 2020.
- BERDERMANN, J.; KRIEGEL, M.; BANY, D.; HEYMANN, F.; HOQUE, M. M.; WILKEN, V.; BORRIES, C.; HESSELBARTH, A.; JAKOWSKI, N. Ionospheric Response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and Its Implication for Navigation Services Over Europe. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 10, p. 1604–1615, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001933. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2018SW001933>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- BLASKOVIC, Teo. **The Sweden Case: Airplanes disappear from radars due to “solar storm.”** 2015. Disponível em: <https://watchers.news/2015/11/05/the-sweden-case-aircrafts-disappear-from-radars-due-to-solar-storm/>. Acesso em: 23 set. 2021.
- BOWHILL, S. A. Introduction to ionospheric physics. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 301, 1971. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90209-1.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Portaria nº 335, de 25 de janeiro de 2021**. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=515&pagina=5&data=28/01/2021>.
- COSTER, Anthea; KOMJATHY, Attila. Space Weather and the Global Positioning System. **Space Weather**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. n/a-n/a, 2008. DOI: 10.1029/2008sw000400.
- DENNIS, Jed; HEMSTAD, Mark. Selecting among Dual Frequency Multiple Constellation (DFMC) Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS) during En-route and Non-Precision Flight Operations. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 65–83, 2016. DOI: 10.1002/navi.127.
- DOHERTY, Patricia; COSTER, Anthea J.; MURTAGH, William. Space weather effects of October–November 2003. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 267–271, 2004. DOI: 10.1007/s10291-004-0109-3.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **The “no name” space weather mission**. [s.d.]. Disponível em: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Lagrange\\_mission2](https://www.esa.int/Safety_Security/Lagrange_mission2). Acesso em: 6 jun. 2020.
- EUROCONTROL. **European GNSS Contingency/ Reversion Handbook for PBN Operations**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [www.trainingzone.eurocontrol.int](http://www.trainingzone.eurocontrol.int). Acesso em: 28 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **SBAS Interoperability**. 2011. Disponível em: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Interoperability](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Interoperability). Acesso em: 31 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **Space Weather Office**. [s.d.]. Disponível em: [http://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Weather\\_Office](http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Weather_Office). Acesso em: 2 jun. 2020.
- FAA. **Satellite Navigation - WAAS - How It Works**. 2019. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/). Acesso em: 27 maio. 2020.
- GALEMBECK, Glória. **Cooperação entre Brasil e Estados Unidos fomenta pesquisa de GBAS para baixas latitudes**. 2017. Disponível em: [https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg\\_noticia&materia=cooperacao-entre-brasil-e-estados-unidos-fomenta-pesquisa-de-gbas-para-baixas-latitudes](https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=cooperacao-entre-brasil-e-estados-unidos-fomenta-pesquisa-de-gbas-para-baixas-latitudes). Acesso em: 8 set. 2020.
- GOSLING, J. T. The solar flare myth. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 98, n. A11, p. 18937–18949, 1993. DOI: 10.1029/93JA01896. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/93JA01896>.
- HAPGOOD, Mike. **Space Weather**. [S.l.]: IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/978-0-7503-1372-8. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1372-8>.
- HESSE, M.; CASSAK, P. A. Magnetic Reconnection in the Space Sciences: Past, Present, and Future. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 125, n. 2, p. 1–24, 2020. DOI: 10.1029/2018ja025935.
- HOCKEY, Thomas; HODGSON, Richard. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. [S.l.]: Springer New York, 2014. p. 989–989. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7\_9075.

Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7\\_9075](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9075). Acesso em: 23 jun. 2020.

IBGE. **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=sobre>. Acesso em: 25 ago. 2020.

ICAO. **Doc 9849 AN/457 - Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual**. Third ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **MID Doc 011 - Guidance on GNSS implementation in the MID region**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.icao.int/MID/MIDANPIRG/Pages/MID-Docs.aspx>.

ICAO. **DOC 10100 - Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation**. First ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **ICAO Space Weather Advisories**. Singapore. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/mission\\_support/ato\\_intl/cross\\_polar/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/). Acesso em: 3 jun. 2020b.

ICAO. **DFMC SBAS SARPS - Baseline draft for validation**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/DFMC-SBAS.aspx>. Acesso em: 8 jun. 2020.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Presentation**. [s.d.]. Disponível em: <http://lisn.igp.gob.pe/about/detail/presentation/>. Acesso em: 7 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O Projeto**. [s.d.]. Disponível em: <http://inct-gnss-avaer.fct.unesp.br/pt/projeto.php>. Acesso em: 6 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Relatório Descritivo - EMBRACE**. São José dos Campos. Disponível em: [http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA\\_EMBRACE.pdf](http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA_EMBRACE.pdf). Acesso em: 23 set. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **O Programa Embrace**. [s.d.]. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-embrace/>. Acesso em: 30 jul. 2020.

KOMJATHY, Attila; SPARKS, Lawrence; MANNUCCI, Anthony J.; XIAOQING, Pi. An assessment of the current waas ionospheric correction algorithm in the South American region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 50, n. 3, p. 193–204, 2003. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2003.tb00329.x.

MATSUOKA, Marcelo Tomio; DE OLIVEIRA CAMARGO, Paulo; BATISTA, Inez Staciarini. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região Brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de Outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodesicas**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 315–334, 2006.

MENK, Frederick W.; WATERS, Colin L. **Magnetoseismology**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. DOI: 10.1002/9783527652051. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527652051>.

NASA. **The Magnetospheric Multiscale Mission**. [s.d.]. Disponível em: [https://mms.gsfc.nasa.gov/about\\_mms.html](https://mms.gsfc.nasa.gov/about_mms.html). Acesso em: 5 jun. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Coronal Mass Ejections**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>. Acesso em: 30 jul. 2020a.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Galactic Cosmic Rays**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/galactic-cosmic-rays>. Acesso em: 13 ago. 2020b.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA Space Weather Scales**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. Acesso em: 13 ago. 2020c.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2008. DOI: 10.17226/12507. Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog/12507>.

REDMON, R. J.; SEATON, D. B.; STEENBURGH, R.; HE, J.; RODRIGUEZ, J. V. September 2017's Geoeffective Space Weather and Impacts to Caribbean Radio Communications During Hurricane Response. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 9, p. 1190–1201, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001897.

RICARD, Nathalie. **Dual Frequency Multiconstellation SBAS Key Concepts**. Rome. Disponível em: [https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new\\_egnos\\_ops/sites/default/files/EWS19%20GSA%20-%20Introduction%20to%20EGNOS%20DFMC%20services.pdf](https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/EWS19%20GSA%20-%20Introduction%20to%20EGNOS%20DFMC%20services.pdf). Acesso em: 8 jun. 2020.

RUTLEDGE, Bob. **Space Weather Update**. Boulder, CO. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/mission\\_support/ato\\_intl/cross\\_polar/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/).

SHEEHAN, William. Carrington, Richard Christopher. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 373–375. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7\_9034. Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7\\_9034](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9034). Acesso em: 23 jun. 2020.

SMAOUI, Mohamed. **ICAO Global Provisions and Regional Developments related to GNSS**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 14 jun. 2020.

SPOGLI, Luca; ALFONSI, Lucilla; ROMANO, Vincenzo; DE FRANCESCHI, Giorgiana; JOAO FRANCISCO, Galera Monico; HIROKAZU SHIMABUKURO, Milton; BOUGARD, Bruno; AQUINO, Marcio. Assessing the GNSS scintillation climate over Brazil under increasing solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 105–106, n. November 2018, p. 199–206, 2013. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.003.

SURCO ESPEJO, Teddy M.; COSTA, Emanuel; DE MORAES, Alison O.; DE PAULA, Eurico R.; FRANCISCO GALERA MONICO, João. **Ionospheric Effects on Signal in Space and on Ground Based Augmentation System**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 30 ago. 2020.

TAKAHASHI, Directions Kazue; CHI, Peter J.; DENTON, Richard E.; EDS, Robert L. Lysak;

ABERCROMBIE, Faulting Rachel; MCGARR, Art; HYNDMAN, Processes David W.; DAY-, Frederick D. Geophysical Monograph Series. [S. l.], p. 1–4, 2015. DOI: 10.1029/164GM03.

TOUSEY, R. The solar corona. In: SPACE RESEARCH CONFERENCE 1973, **Anais [...]**. [S.l.: s.n.] p. 713–730.

UNITED NATIONS. **Preliminary draft report and proposed candidate guidelines of expert group C: Space Weather**. Vienna. Disponível em: [https://www.unoosa.org/pdf/limited/c1/AC105\\_C1\\_2013\\_CRP13E.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/limited/c1/AC105_C1_2013_CRP13E.pdf). Acesso em: 23 set. 2021.

WEBB, David F. The solar cycle variation of the rates of CMEs and related activity. **Advances in Space Research**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 37–40, 1991. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90086-Y. Acesso em: 17 jun. 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Aeronautical Meteorology Programme**. [s.d.]. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/programmes/aeronautical-meteorology-programme>. Acesso em: 1 jun. 2020.

YOON, Moonseok; KIM, Dongwoo; PULLEN, Sam; LEE, Jiyun. Assessment and mitigation of equatorial plasma bubble impacts on category I GBAS operations in the Brazilian region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 66, n. 3, p. 643–659, 2019. DOI: 10.1002/navi.328.

# The future of air navigation reliability dependent on space weather

*El futuro de la fiabilidad de la navegación aérea dependiente del clima espacial*

*O futuro da confiabilidade da navegação aérea dependente do clima espacial*

João Pedro Souza Aguiar<sup>I</sup>

Dario Eberhardt<sup>II</sup>

## ABSTRACT

The world aviation activity rises constantly, increasing aircraft density in all geographic territories. For this reason, there is a tendency of new navigation technologies to arise that, attending requirements of integrity, accuracy, availability, and continuity, will promote maintenance of air safety, even with increasing flight numbers. The means of positioning determination most used today in aircraft are dependent on satellites. The constellations GPS (Global Positioning System) and GLONASS (Global Navigation Satellite System – in Russian), and the augmentation systems WAAS (Wide Area Augmentation System) and European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), for example, are compounds of the Global Navigation Satellite System (GNSS). All the mentioned, are dependent on Earth geomagnetic and ionosphere equilibrium. Both are targets of solar and cosmic radiation bombardments, i.e. space weather. Depending on that phenomenon intensity, serious damages could occur on positioning systems, as in several others, such communications and power grids. In retrospect, space weather already led to losses such as in the events of 1989 and October 2003

on the CONUS American region. The forecast quality for such occurrences is still poor, while society complacency associated with this subject is high, which further extends to aviation, considering the potential damages.

**Keywords:** Space weather; ionosphere; GNSS; aviation.

## RESUMEN

*La actividad aérea mundial está creciendo de manera constante, aumentando la densidad de aeronaves en todo el territorio geográfico. Por ello, existe una tendencia hacia las nuevas tecnologías de navegación que, cumpliendo con los requisitos de integridad, precisión, disponibilidad y continuidad, permitirán el mantenimiento de la seguridad aérea incluso con el aumento del número de vuelos. Los medios más utilizados para determinar el posicionamiento en las aeronaves en la actualidad dependen de los satélites. Navegación global - en ruso), y los sistemas de aumentación WASS (Sistema de aumento de área amplia) y EGNOS (Servicio de Superposición de Ngeoestacionaria Europea), por ejemplo, son los medios que componen*

I. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brazil. Undergraduate in Aeronautical Sciences at Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul. Email: j.aguiar@edu.pucrs.br

II. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brazil. PhD in Microelectronics from the Federal University of Rio Grande do Sul. Email: dario.eberhardt@pucrs.br

Received: 10/06/21

Accepted: 09/15/21

The acronyms and abbreviations contained in this article correspond to the ones used in the original article in Portuguese.



*el Sistema de Navegación por Satélite global (GNSS). Todo lo anterior depende del equilibrio geomagnético de la Tierra y del medio electrónico de la ionosfera. Ambos son objetivos de bombardeos de radiación solar y cósmica, es decir, el clima espacial. Dependiendo de la intensidad de estos fenómenos, pueden ocurrir daños graves a los sistemas de posicionamiento, así como a varias otras áreas, como las comunicaciones y las redes eléctricas. En retrospectiva, el clima espacial ya ha causado un gran daño, como en los eventos de 1989 en América del Norte y en octubre de 2003 en la región americana de CONUS. La calidad de la previsión de estos sucesos sigue siendo baja y la complacencia de la sociedad con respecto al problema es alta, incluso en la aviación, teniendo en cuenta los posibles daños.*

**Palabras clave:** *Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviación.*

## RESUMO

*A atividade aérea mundial cresce de forma constante, o que aumenta a densidade de aeronaves em todo o território geográfico. Por esse motivo, existe uma tendência para novas tecnologias de navegação que, atendendo requisitos de integridade, precisão, disponibilidade e continuidade, vão permitir a manutenção da segurança aérea mesmo com o aumento do número de voos. Os meios de posicionamento mais utilizados hoje são dependentes de satélites, que abrangem o Sistema de Satélites de Navegação Global (GNSS). O sistema é dependente do equilíbrio geomagnético da Terra e do meio eletrônico da ionosfera. Ambos são alvo de bombardeamentos de radiação solar e cósmica, i.e. clima espacial. O presente trabalho tem como objetivo ser uma fonte informativa, ou review, da relação entre clima espacial e aviação, para auxiliar na conscientização dos leitores, principalmente àqueles pilotos, principais responsáveis pela segurança dos voos. Será apresentada uma forma simplificada da teoria dos fenômenos do clima espacial, como estes podem afetar a aviação e as tecnologias, o histórico de eventos que atingiram o planeta e as iniciativas que foram e estão sendo desenvolvidas para sua mitigação e seu monitoramento. Como metodologia, foram consultados artigos científicos, livros teóricos, manuais, reportagens, sites de agências de pesquisa e apresentações de organizações.*

*Essas fontes permitiram concluir que os estudos são recentes, há pouca conscientização para os usuários destas tecnologias e, visto a complexidade da origem dos fenômenos do clima espacial, existe uma falta de qualidade na sua previsão. Essa falta de qualidade, atrelada à necessidade de tecnologias mais confiáveis para o futuro do espaço aéreo, eleva a pertinência do objetivo deste trabalho.*

**Palavras-chave:** *Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviação.*

## 1 INTRODUCTION

The main interference in aircraft positioning and communication systems comes from the electronic ionosphere equilibrium (ICAO, 2019a). This layer of the atmosphere is an essential intermediary of modern social life, since it influences all satellite-dependent technologies, as well as electrical networks and communications. Solar flares, coronal mass ejections (CMEs) and cosmic radiation - components of space weather, have always been present as a source of this imbalance. If events reach the planet, depending on their intensity, they are likely to influence, in a cascading effect, the Earth's geomagnetic balance, causing atmospheric disturbances, impairing the integrity of all radio signals and possibly causing material damage and enormous financial losses. In aviation, they can affect high-frequency (HF) and satellite communication systems (SATCOM), navigation and GNSS surveillance, and the radiation increase at flight altitudes may occur (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019 a).

During a meeting of the scientific technical subcommittee of the United Nations (UN), held in 2013, it was determined that space weather is a potential cause of natural disasters (UNITED NATIONS, 2013). Space phenomena are being monitored, their intensities are being analyzed, as well as areas of occurrence and possible damages. There are several initiatives and ongoing studies that seek better accuracy in the predictions of events related to space weather, which will be detailed in this article.

There is little awareness of such facts in society, especially in aviation, because consequences of severe events are rare and occur once or twice in a 100 years (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). This work aims to inform and raise awareness of users such as pilots, operational flight dispatchers and controllers. This article warns about the lack of quality in the forecast, due to the complexity of the origin of space weather events. It is relevant since the airspace, under

non-contingency conditions, is increasingly dense and requires greater reliability.

### 1.1 Historic

The most severe space weather event on record, which occurred on September 1, 1859, turned 160, according to the National Research Council (2008). The event is known as the “Carrington event” because it was observed by the English astronomer Richard Carrington, in Redhill, UK (SHEEHAN, 2014). If the same magnitude of the phenomenon had occurred today, with the modern and complex infrastructures, the consequences would have been “profound”<sup>1</sup> (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 20, our translation). The event, i.e. the solar flares, was also observed by the amateur astronomer Richard Hodgson in London, England, who confirmed Carrington’s discovery (HOCKEY, 2014). The influences of solar flares were widely observed between midnight and early morning of day 2. The colors in the sky, whose tones were reddish and green, were different from the ones which are commonly seen in aurora. The glow was also much more intense and people reported that they thought it was daylight. This effect was observed in several locations, in latitudes where there are no visible ionospheric effects, such as Cuba, Bahamas, Jamaica, El Salvador, Hawaii and French Guiana, very close to the great circle, as shown in Figure 1. The same effect was also observed in other regions of South America (to northern Chile), Europe, Asia and Australia (BARBOSA, 2015).

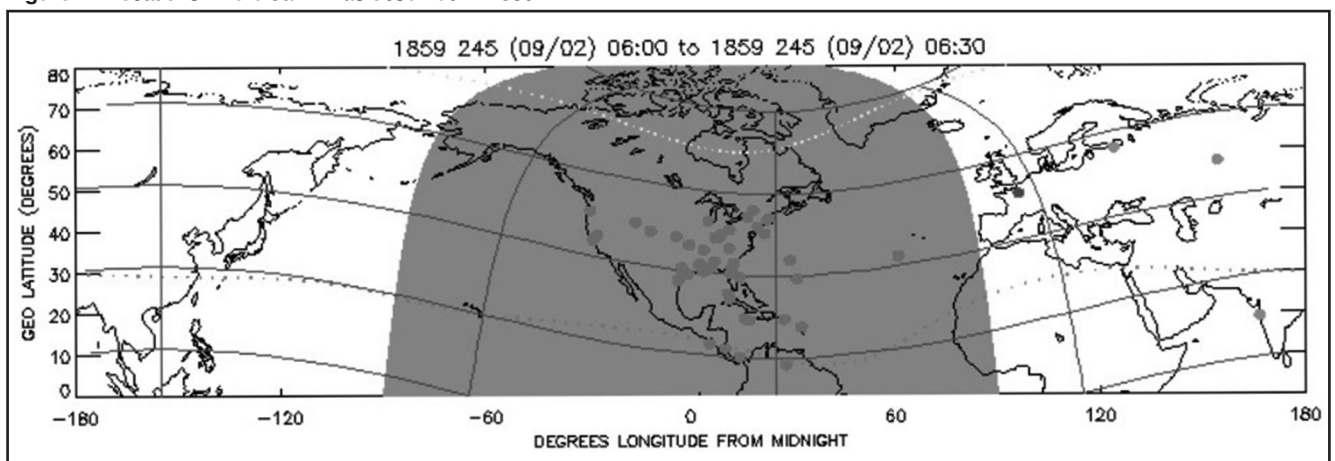
The damage caused by the solar flares was less extensive, since electrical inventions were rudimentary. However, at that time, the telegraphs were greatly influenced, from spontaneous sparks to unreadable morse code messages. If

the device was disconnected from the battery, the “codes” continued to be transmitted due to the induced current in the system cables. This current is also known as Eddy currents or Foucault currents.

From this important event, in the 1860s, researchers started to link the phenomenon of aurora to sunspots and the earth’s magnetism. These researchers noticed that the three phenomena were interrelated. However, the understanding of the phenomenon was not clear. The greatest scientific advance on this subject only occurred during the cold war, with the space race. In 1957, the Union of Soviet Socialist Republics (USSR) launched the first artificial satellite called Sputnik-1, which provided information about the upper atmosphere. After that, Explorer 1 was launched by the US in 1959 with the same goals as Sputnik-1. These satellites, which were the first ones to be launched, were essential for the study of the solar and cosmic radiation effects, as well as for the science of the ionosphere composition. In the 1970s, coronal mass ejections were discovered (GOSLING, 1993; HAPGOOD, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; TOUSEY, 1973).

Serious consequences of space weather are rare. As an example, there were other records of strong influences, such as during the Second World War. Radar observations were interrupted during solar radiation emissions, which were only recognized as a solar cause in 1946 (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). In 1972, there was loss of communication in the state of Illinois, USA. On March 13, 1989, another heavy solar bombardment caused extensive damage in North America, mainly in the area of electrical networks. The bombardment caused failures in generators and transformers. The power was off during this event in the province of Quebec, Canada.

**Figure 1** - Locations where dawn was observed in 1859.



Source: (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 21).

<sup>1</sup> Translation of “profound”.

In 2003, 2005, 2015 and 2017 there were also strong events with broad influences on technologies, according to the following author's works: (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004), (BARBOSA, 2015), (BLAŠKOVIĆ, 2015) e (REDMON et al., 2018). The consequences of these events in aviation will be detailed in this article.

## 2 SPACE WEATHER

WMO (World Meteorological Organization) defines space weather as: "The physical and phenomenological state of the natural space environment, including the Sun and the interplanetary and planetary environments"<sup>2</sup> (ICAO, 2019a, p. 5, our translation). Therefore, space weather includes the Sun and other stars, such as supernova events, which emit intergalactic radiation that reaches the Earth, known as cosmic radiation, or GCR (Galactic Cosmic Rays) (ICAO, 2019a).

### 2.1 The Sun

The solar origin of space weather includes solar winds, CMEs and solar flares. These phenomena are originated from the sun atmosphere, which can generate large clouds of magnetized plasma and/or radiation from highly energized particles, which propagate through space (HAPGOOD, 2017). CMEs and solar flares have the potential to interfere with aviation safety.

The particles expelled from this astro, propagate via space through magnetic field lines (BOWHILL, 1971), which is produced through the dynamo process. This process allows the explanation of the magnetic field generation of all planets, in which ions are released due to the core intense heat. Hence, this process generates electrically charged fluid that has a constant rotation and convection movement, producing a magnetic field.

Solar winds, CMEs and solar flares are produced through a process called magnetic reconnection. This process takes place in the solar atmosphere when two magnetic fields with converging directions cross each other, transforming and releasing magnetic energy into kinetic energy in a sudden way. Such process can also occur outside the solar atmosphere between the Earth's magnetic fields and interplanetary space, which is opposite the Sun (Dungey Cycle), contributing to geomagnetic storms by sending plasma back to the planet (HAPGOOD, 2017; HESSE; CASSAK, 2020).

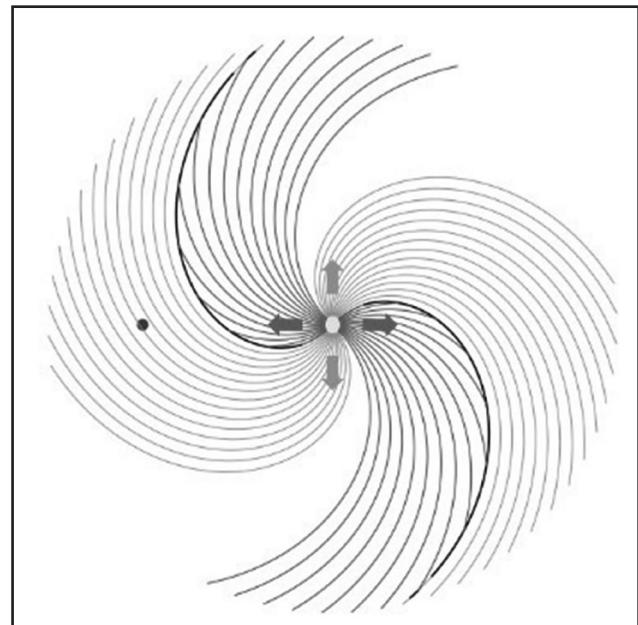
The magnetic field is carried by both the CME and the solar winds. This is similar to the foundation of the dynamo

process described earlier. Plasma has high conductivity, allowing the conduction of magnetism through space. The term "frozen in" is used for the magnetic field when it is transported along with the plasma release (HAPGOOD, 2017, p. 17; MENK; WATERS, 2013, p. 2).

Solar winds are plasma that continually escapes from the coronal region of the Sun, as they overcome gravitation due to high temperatures<sup>3</sup>, and do not pose a safety risk to aviation. They have average speeds ranging from 500 to 800 kilometers per second and, when they reach Earth, they interact with the Earth's magnetic field through the Lorentz force, shaping it and forming the magnetosphere (HAPGOOD, 2017; MENK; WATERS, 2013). However, due to the process of magnetic reconnection on the solar surface, the release of high-speed solar winds may occur, disturbing the Earth's geomagnetic field (ICAO, 2019a). In this context, they are the main responsible for the aurora, which is the manifestation of space weather visible to the eyes and is the absorption and conduction of solar energy by the ionosphere.

The rotation of the Sun interferes with the release of solar winds so that, when they emerge from the atmosphere, they follow a trajectory similar to the water from a garden sprinkler, as shown in Figure 2. The shape of this trajectory is also known as the "Parker Spiral" (MENK; WATERS, 2013). This term emerged in the 1950s and was created by Eugene Newman Parker when he was studying such solar phenomena.

**Figure 2** - Schematic of the solar wind trajectory.



**Source:** (HAPGOOD, 2017, p. 7).

<sup>2</sup> Translation of: "The physical and phenomenological state of the natural space environment, including the Sun and the interplanetary and planetary environments".

<sup>3</sup> It is believed that the release of kinetic energy, through magnetic reconnection, is the cause of the rise in temperatures in the solar corona, which reach a million Kelvin, compared to 6000K at the surface (HAPGOOD, 2017).



CMEs are solar winds in the form of plasma clouds that have very high energy, with mass that can have billions of tons and speeds of up to 3,000 km/s. They can reach Earth in less than a day, or even more than 4 days, after their release from corona. CMEs have targeted release and the chance of hitting Earth is small. They represent a great risk to aviation and technologies, as they can trigger geomagnetic storms, which are disturbances in the Earth's magnetic field, due to the absorption of plasma in the magnetosphere, which generate magnetic reconnection cycles on the side of the globe opposite the Sun. These cycles send plasma back to the planet and can be called the Dungey Cycle or sub-storms. Due to the process, a large amount of energy is dissipated in the ionosphere, contributing to the physical characteristic alterations of the satellite signals, when they cross this atmospheric layer. This reduces the accuracy of aircraft positioning (which can lead to loss of positioning) and harms HF and SATCOM communication systems (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a; MENK; WATERS, 2013; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

Another process triggered by geomagnetic storms is the induction of ground currents (GIC<sup>4</sup>), that can affect electrical infrastructure such as power grids and rail systems. Great losses would be generated if these systems were damaged, as detailed in TAKAHASHI et al., (2015, p. 33).

Solar flares are energy emissions on a smaller scale in the form of electromagnetic radiation (EUV wavelengths and X-rays<sup>5</sup>). Energy deposits are fast, reaching the Earth in minutes. Deposit occurrence is related to CMEs, as they can be an antecedent indication of the coronal ejection release, but they can also occur separately. They have the potential to influence, only in the regions of the Earth illuminated by the sun, the HF communications and monitoring systems, which use frequencies between 1-20 Mhz, onboard electrical systems and crew health. In the polar regions, their effects are greater, due to the terrestrial magnetic behavior that allows greater deposition of protons at higher latitudes. Through this characteristic, the radiation reaches lower altitudes and interferes more significantly in HF communication systems, mainly on arctic routes, used for flights between America and Asia. Radiation can also be received at low latitudes and altitudes<sup>6</sup>, due to more complex equatorial ionospheric phenomena (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a).

The number of electrons deposited in the ionosphere, after the arrival of the plasma, has a unit called TEC (Total Electron Content). TEC values are determined by the number of electrons in a 1m<sup>2</sup> column between a satellite signal and its receiver, which traverses the ionosphere. The TEC variation causes a proportional oscillation in the electronic balance of the ionosphere, causing changes in the speed, polarization, phase and amplitude (ionospheric scintillation) of the radio waves propagated by the GPS. Changes may indicate erroneous position of the receiver, as well as loss of satellite signal (AGUIAR, 2010; COSTER; KOMJATHY, 2008). One unit of TEC, equal to 10<sup>16</sup> electrons/m<sup>2</sup>, corresponds to 0.163 m of delay in gauging the position of the receiver. Therefore, it is a good indicator for the quality of the positioning. TEC varies regularly due to the sunspot cycle, time of year, time of day and geographic location (KOMJATHY et al., 2003).

These ejections of solar energy occur most frequently in a cyclical period of the Sun's activity, when there is greater activity. This cycle of greater activity lasts approximately 11 years (GOSLING, 1993; WEBB, 1991). Solar activity is directly proportional to visible sunspot groups, which are constantly monitored by observatories, such as NASA, SOHO and STEREO-A space agency satellites. During the period of maximum activity, solar flares are emitted, on average, 25 times a day and CMEs, 5 times a day. Energy density is released similarly between solar flares and CMEs. However, the chance of Earth being influenced by a CME is lower as it has a targeted release. In contrast, the damage would be greater through the CMEs due to the strong magnetic field attached to the plasma (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

## 2.2 Cosmic Radiation

Cosmic rays, which come from outside the solar system, hit the Earth constantly, with intensity that varies little with the passage of time. The interference of cosmic rays on Earth is inversely proportional to solar activity, as CMEs and solar flares interact with cosmic radiation in order to reduce their interaction with the Earth's atmosphere.

Like solar radiation, their effects will be greater at higher latitudes (above 55° magnetic latitude), cas at

<sup>4</sup> Stands for Ground-Induced Currents.

<sup>5</sup> EUV stands for Extreme Ultraviolet with a wavelength range of 10nm – 121nm (nanometers). X-rays are 1nm – 20nm.

<sup>6</sup> Close to flight level 300 (10-12km).



the poles, and increase with altitude, peaking between 60-65,000 feet. Depending on the intensity, they can be harmful to electronic equipment on board and, with long exposure, to the crew health (ICAO, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

### 2.3 Brazil

Brazil is one of the regions in the globe with the greatest ionospheric influences and the greatest values and variations of TEC. It is located in an equatorial region and part of its territory is close to SAMA (South Atlantic Magnetic Anomaly). The magnetic equator presents, together with the poles, greater ionospheric irregularities, mainly after the local sunset, with more often scintillations in the satellite signal frequency. These irregularities are caused by the increase of the ionospheric electric field in the post-evening period, due to a greater movement of the plasma (Fountain Effect), also giving rise to plasma bubbles (SPOGLI et al., 2013).

SAMA is a region where the geomagnetic field has the lowest intensity values, contributing, similarly to the poles, for a larger deposit of radiation. Such characteristic allows greater disturbance in the ionosphere, which also contributes to scintillation in GNSS satellite signals (SPOGLI et al., 2013). This ionospheric behavior over Brazil is very harmful to positioning accuracy (KOMJATHY et al., 2003; MATSUOKA; DE OLIVEIRA CAMARGO; BATISTA, 2006).

## 3 TECHNOLOGIES FOR AVIATION THAT REDUCE SPACE WEATHER EFFECTS

ICAO (International Civil Aviation Organization) requires that systems related to air navigation have accuracy, integrity, availability and continuity for all phases of flight. These requirements are set out in Annex 10 of the Convention on International Civil Aviation through SARPs (Standards and Recommended Practices). New technologies were required in order to meet these demands on navigation performance, through advances in research related to space weather.

In 2003, in the USA, SBAS (Satellite Based Augmentation System) was certified, called WAAS (Wide Area Augmentation System). It is a positioning augmentation system, focused on correcting the ionospheric effects in the American territory, in addition to satellite clock delays and orbit errors.

The system consists of ground GPS stations, with their positions precisely defined and that measure, continuously, the differences in relation to the satellite calibration. These data are sent to a central station, which generates the corrected messages. The messages are transmitted to geostationary satellites which, in sequence, relay to the receivers on board the aircraft. With this system, the aircraft are able to perform precision procedures through the LPV (Localizer Performance with Vertical Guidance) in different locations across the American territory, where there are no radio aids for navigation (COSTER; KOMJATHY, 2008; FAA, 2019). Similar to WAAS, there are other systems that make up SBAS and operate in the same way. In Japan, MSAS (MTSAT Satellite Augmentation System) is used since 2007. In Europe, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) system is used since 2011. GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation), certified in 2014, is used in India. The four systems mentioned above are operational, while other are under implementation, such as SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring) in Russia and SNAS (Satellite Navigation Augmentation System) in China (DENNIS; HEMSTA D, 2016). The operating systems are part of IWG (Interoperability Working Group) and meet ICAO requirements to offer augmentation services with free transition between them. Therefore, precision improvement technology is unified across the hemisphere (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2011).

The ground-based augmentation system (GBAS) is a second GNSS augmentation system designed to improve positioning accuracy through differential corrections by ground equipment. Through this system corrections, the common ionospheric errors become negligible. When the system is installed at airports, precision instrument approaches and landings can be performed, called GBAS Landing System (GLS). Depending on the type of GBAS (GAST) approach service, approaches can be performed with even greater accuracy (CAT II/III). For example, in the USA the GBAS systems are LAAS (Local Area Augmentation System) and SLS (Satellite Landing System), developed by the Federal Aviation Administration (FAA) and Honeywell, respectively. The first GBAS was approved in 2012 at Newark International Airport in the United States (YOON et al., 2019).

In addition to these augmentation technologies, the vast majority of commercial aircraft have a reversing system, in case the GNSS signals fail. The

aircraft position will be determined based on the combination of signals from the aircraft inertial system and radio signals (VOR/DME). The crew can make exclusive use of conventional navigation or, if there are no radio signals available in the region, the crew can ask ATC for assistance. These are reduction strategies as long as there are no appropriate contingency procedures for the occasion (EUROCONTROL, 2020; ICAO, 2018).

#### 4 REMAINING INTERFERENCES IN AVIATION

On October 29, 2003, the event, known as Halloween Storms, began and hit several regions of the United States. The event disabled the WAAS precision approach service, which was unusable for 15 hours on the 29th and for 11.3 hours on the 30th (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004).

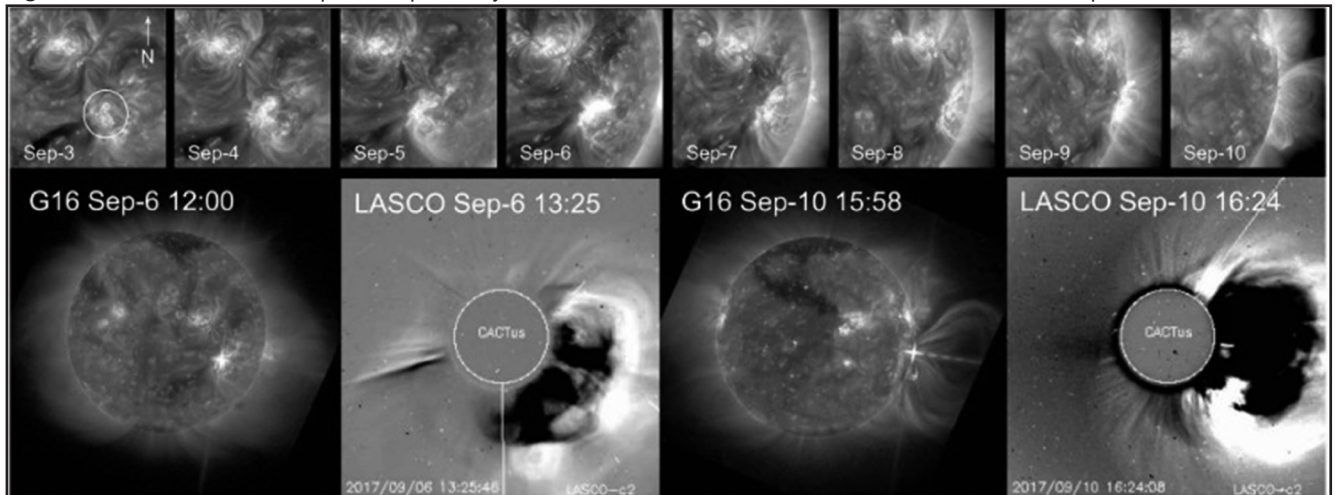
In December 2005, there was disruption to GPS navigation systems that lasted 10 minutes, causing disorientation in aircraft, ships and oil rigs (BARBOSA, 2015). On November 4, 2015, the Swedish air traffic service reported that aircraft were not showing up on their radars. The problem lasted approximately 1 hour and it was caused by a solar storm (BLAŠKOVIĆ, 2015).

On September 3, 2017, an event overlapped the US and Europe SBAS. The solar region categorized as region 46 of the Catania group, which is a denomination given by the American agency NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), initiated a more complex magnetic activity, generating

a series of solar flares and CMEs, whose effects were felt on September 6th, 7th and 10th (REDMON et al., 2018). In Figure 3, there are images of this solar activity development. A solar wind of magnitude X9.3<sup>7</sup> was emitted in the region. One of the strongest solar winds occurred in September 2005, with intensity X17<sup>7</sup> in solar cycle 23 (REDMON et al., 2018). During the event occurred in 2017, the most severe warnings were issued by NOAA for the risk of loss of communications, geomagnetic storms, and high particle radiation. Loss of in-flight HF communication was reported on the 6th and loss of capability for WAAS and EGNOS LPV procedures on the 8th (REDMON et al., 2018). In addition, during this period, the Caribbean communities were facing Hurricane José. Due to the space weather event, they had difficulties in relation to the communication services for emergency response, which were reported by HWN (Hurricane Weather Net) and DGAC (French Civil Aviation Authority) (REDMON et al., 2018).

There was a considerable reduction in the European EGNOS augmentation system availability in 2017, as shown in Figure 4. On September 6, there was a loss of approximately 10% of the availability rate, which affected the safety of LPV procedures (BERDERMANN et al., 2018). This decrease occurred because CME hit the planet, deposited plasma in the ionosphere region and suddenly increased TEC values. That makes it difficult for receivers to maintain signal corrections and, in most cases, loss of connection between the satellites occurs. This loss is called “loss of lock” (BERDERMANN et al., 2018).

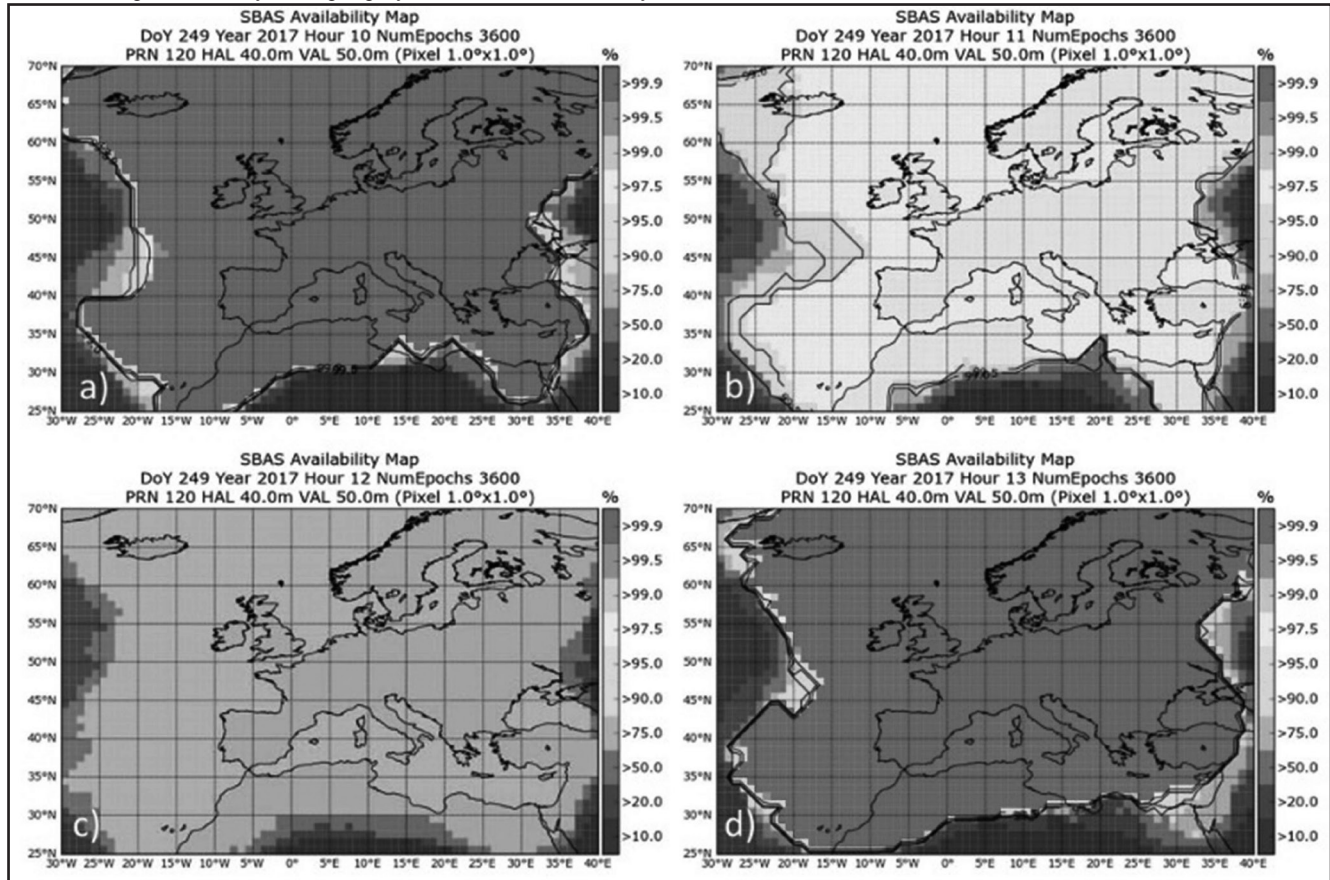
**Figure 3** - Evolution of solar eruptions captured by SDO, GOES and SOHO satellites, between 3 and 10 of September.



Source: (REDMON et al., 2018, p. 4).

<sup>7</sup> NOAA scale, available on the SWPC portal (Space Weather Prediction Center).

**Figure 4** - Scale map of European SBAS EGNOS availability between 10:00 and 13:00 (UTC) of September 6 2017. Darkest gray indicatess high availability and light gray indicates low availability.



Source: (BERDERMANN et al., 2018, p. 9).

A space weather event, similar to the one occurred in 1859, has never taken place again. In practice, damage is unknown, although there are some intensity predictions, as in (BAKER et al., 2013). Using a predictive model, the damage that a CME could have done to the planet was measured in 2012. This CME did not reach the globe as a matter of a week of solar rotation. Through the method, the authors concluded that the intensity of the coronal ejection had been more intense than the one occurred in 1859, Carrington event, and damage similar to the analogy of (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008): that society would still be “picking up the pieces”<sup>8</sup> (BAKER et al., 2013, p. 590).

## 5 MONITORING SCOPE OF THE CURRENT SPACE WEATHER

The damage caused by space weather, as well as the potential damage, generated initiatives aiming to

understand its origin, carry out observations, collect data and predict phenomena. Currently, the central world organization for aviation that carries out studies on this subject is the WMO (World Meteorological Organization). It works along with ICAO, improving the world forecasts issued by the WAFS (World Area Forecast System). Nowadays, the main objective is to reduce the space weather impacts (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, [s.d.]).

There are some information delivery organizations in the USA, such as SWPC (Space Weather Prediction Center), under the administration of NOAA. At this center, daily scales that demonstrate technologies and systems affected by space weather events are available on the website <<https://www.swpc.noaa.gov>>. There are three measurement scales: impact on radio systems (HF and satellites); levels of radiation from solar storms and levels of geomagnetic storms (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

<sup>8</sup> Translation of “picking up the pieces”.



In Europe, a program was created by ESA (European Space Agency) in 2009 to improve users' awareness on the dangers of space. It was called SSA (Space Situational Awareness). From this program, a segment linked to the global security, called Space Weather Office, was created to study the space weather, aiming to reduce its effects. Within this segment, ESA Space Weather Service Network is under development and aims to provide products and services from five different areas to users. These five areas are managed by experts and are divided into: solar climate, heliosphere climate, space radiation, ionospheric climate and geomagnetic conditions. One of its main objectives is to provide more accurate and reliable products (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]). In Brazil, some initiatives were also created to study and develop technologies in order to face the influences of space weather. EMBRACE program (Brazilian Study and Monitoring of Space Weather) was created by INPE (National Institute for Space Research) in 2007, aiming to propose alert mechanisms and defense procedures for satellite communication systems, GNSS, flight safety systems, large-scale energy systems, satellite protection and altitude control systems, among others. Daily scales, that demonstrate the potential damage to technologies, are available on the website <[www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/](http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/)>. Such availability is similar to NOAA through SWPC. The project is part of DIDAE (Division of Aeronomy), one of INPE projects, which also has other research initiatives, such as the EQUARS project (Equatorial Atmosphere Research Satellite), focused on monitoring and studying the equatorial region (NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH, [s.d.]).

Brazil also has a robust infrastructure of station networks that monitor GNSS signals, mainly from the GPS and GLONASS constellations. It is made up of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS (RBMC), the network of CIGALA and CALIBRA projects, LISN and GNSS-NavAer. The effects that the ionosphere, close to the magnetic equator, imposes on the positioning, are analyzed and studied, in order to better understand its characteristics and develop more accurate and reliable technologies, as well as new positioning methods. The Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS (RBMC), under IBGE administration, has GNSS

stations since 1996, which continuously store the code and phase observations of the carrier waves transmitted by the satellites of the GPS or GLONASS constellations (IBGE, [s.d.]) and the data are commonly used in research.

The CIGALA project (Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America), funded by the European Commission (EC) of the European GNSS Agency (GSA), was created to develop and test technologies to reduce ionospheric scintillation in South America, through GNSS ground stations. This project focused on analyzing the potential effects of the period of maximum solar activity in 2013. The project started in March 2010 and was concluded in February 2012. Such project was continued by the CALIBRA project (Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in Brazil) whose objective was to evolve the corrective algorithms for high precision GNSS positioning techniques, expanding the number of GNSS stations of the previous project CIGALA and was completed in February 2015 (AGUIAR, 2010).

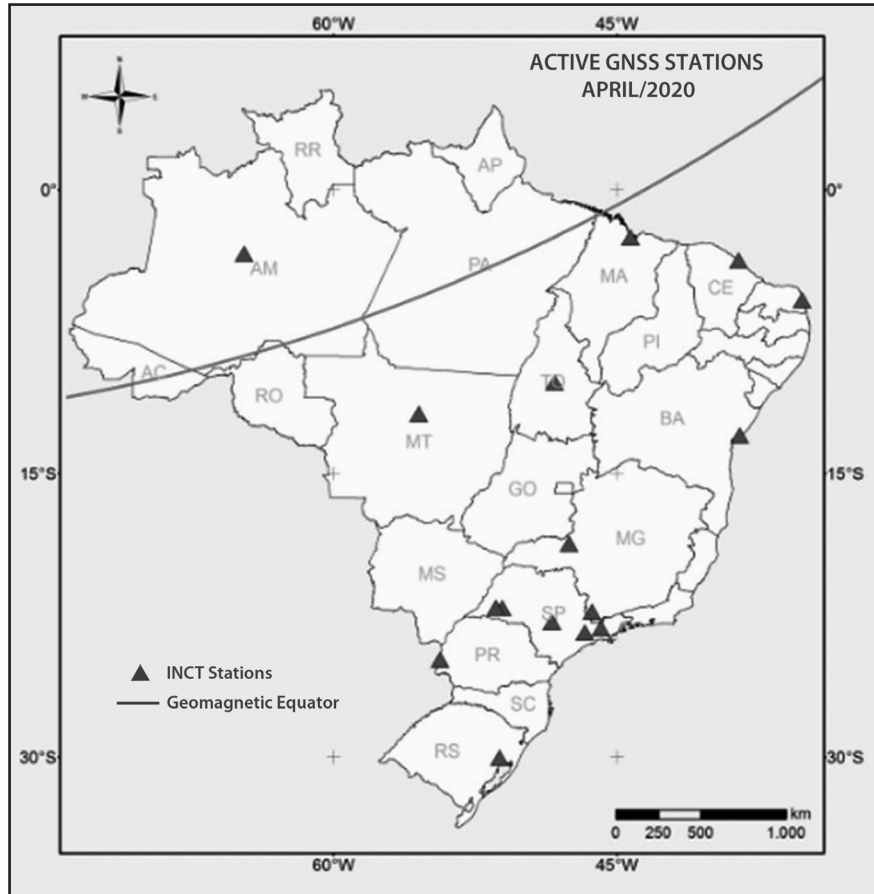
LISN (Low-Latitude Ionospheric Sensor Network) is an international project which studies the ionospheric phenomena, through geophysical instruments which are located in South America, close to the magnetic equator and up to the 70°W meridian. There are several institutions, which cooperate with LISN and researchers from INPE as Brazilian representatives (GEOPHYSICAL INSTITUTE OF PERU, [s.d.]).

The GNSS-NavAer was created by the NIST (National Institute of Science and Technology) in 2017. The main objective is to improve the theoretical knowledge of ionospheric influences on the GNSS signal, for safe application in air navigation. It has GNSS network stations for collecting ionospheric data, called GNSS NavAer network, and are spread throughout the Brazilian territory, as illustrated in Figure 5. There are several institutions which cooperate with the project, including UNESP, INPE, ITA and UFRGS (NATIONAL INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, [s.d.]).

In June 2017, the States were questioned by ICAO about their interest in cooperating with information on space weather. From the States which showed interest,



Figure 5 - GNSS NavAer Network Station Map.



Source: NATIONAL INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, [s.d.].

three global centers were designated by ICAO council in November 2018: PECASUS (Finland, with partners from Belgium, Austria, Italy, England, Cyprus, Poland, Netherlands, Germany and South Africa), SWPC (NOAA, USA) and ACFJ (consortium between Australia, Canada, France and Japan) (ICAO, 2019b). The centers, named SWXC, without hierarchy, would commit to monitoring and providing information and recommendations, issuing warnings of space weather events that may affect communications, GNSS-based navigation and monitoring systems, as well as cases of radiation risk to the crew. The recommendations must follow the international regulations of the Convention on the International Civil Aviation, set out in Annex 3 – Meteorological Service for International Air Navigation. A guide material on space weather was released in 2019 by ICAO for aviation users specifically – Document 10100, Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation (ICAO, 2019b).

Therefore, after the amendment 78 of Annex 3 to the Convention, in use in November 2018,

the documentation required in the pre-flight includes the specification, of information related to the relevant weather events to the route, issued by SWXC. The language of information is abbreviated and the effects on HF communications, satellite communications (SATCOM), GNSS degradation and radiation exposure are classified, respectively, as HF COM, SATCOM, GNSS and RADIATION. Regarding to the intensity of the phenomena, MOD is used for moderate and SEV is used for severe. Examples of the messages issued are listed in tables I and II.

In accordance with the amendments to Annex 3, Brazil, through Ordinance 335 of January 25, 2021, established a technical-scientific cooperation between INPE and DECEA, through EMBRACE and CIMAER (Integrated Aeronautical Meteorology Center) respectively. The cooperation aims to improve the Aeronautical Space Meteorology Service, providing information and advice on space meteorological phenomena, as recommended in Annex 3, in order to become a regional SWXC in South America (BRAZIL, 2021; NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH, 2021).

Tables 1 and 2 - Examples of event warnings that can be issued by SWXC.

<b>(communication header)</b>	
<b>SWX ADVISORY</b>	
<b>DTG:</b>	<b>20161108/0000Z</b>
<b>SWXC:</b>	<b>(to be determined)</b>
<b>SWX EFFECT:</b>	<b>RADIATION MOD</b>
<b>ADVISORY NR:</b>	<b>2016/2</b>
<b>FCST SWX:</b>	<b>20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +6 HR:</b>	<b>20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +12 HR:</b>	<b>20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +18 HR:</b>	<b>20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +24 HR:</b>	<b>20161109/0100Z NO SWX EXP</b>
<b>RMK:</b>	<b>RADIATION LEVELS HAVE EXCEEDED 100 PERCENT OF BACKGROUND LEVELS AT FL350 AND ABOVE. THE CURRENT EVENT HAS PEAKED AND LEVELS ARE SLOWLY RETURNING TO BACKGROUND LEVELS. SEE WWW.SPACEWEATHERPROVIDER.WEB</b>
<b>NXT ADVISORY:</b>	<b>NO FURTHER ADVISORIES</b>

<b>(communication header)</b>	
<b>SWX ADVISORY</b>	
<b>DTG:</b>	<b>20161108/0100Z</b>
<b>SWXC:</b>	<b>(to be determined)</b>
<b>SWX EFFECT:</b>	<b>GNSS MOD AND HF COM MOD</b>
<b>ADVISORY NR:</b>	<b>2016/1</b>
<b>OBS SWX:</b>	<b>20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +6 HR:</b>	<b>20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +12 HR:</b>	<b>20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +18 HR:</b>	<b>20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +24 HR:</b>	<b>20161109/0100Z NO SWX EXP</b>
<b>RMK:</b>	<b>LOW-LEVEL GEOMAGNETIC STORMING IS CAUSING INCREASED AURORAL ACTIVITY AND SUBSEQUENT MOD DEGRADATION OF GNSS AND HF COM AVAILABILITY IN THE AURORAL ZONE. THIS STORMING IS EXPECTED TO SUBSIDE</b>

Source: (RUTLEDGE, 2020).

Despite the advances and available systems, some events are still unpredictable. Losses of HF communication, which occur in the Earth's daytime regions, happen without warning. More intense radiation, caused by a solar storm, can be predicted, but sometimes it is fast and reaches people and systems without prior preparation (ICAO, 2019a).

## 6 NEW INITIATIVES

Advances in the studies of space weather and its effects on technologies follow scientific and technical paths. NASA and ESA are agencies that delve into the scientific subject, providing greater theoretical knowledge, through MMS and LaGrange space missions. In Brazil, INPE cooperation with DECEA constitutes the main source of research.

Based on such knowledge, advances in the technical area started to exist, such as the creation of the GNSS SBAS DFMC system.

Currently, the positioning system used on an aircraft consists of a satellite constellation and a signal frequency. For GPS constellation, the frequency L1 (1575 MHz) is used, and there must be at least 4 satellites for three-dimensional gauging of the receiver position (ICAO, 2017). This system is used in PBN (Performance Based Navigation), ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) and TAWS (Terrain Avoidance Warning System).

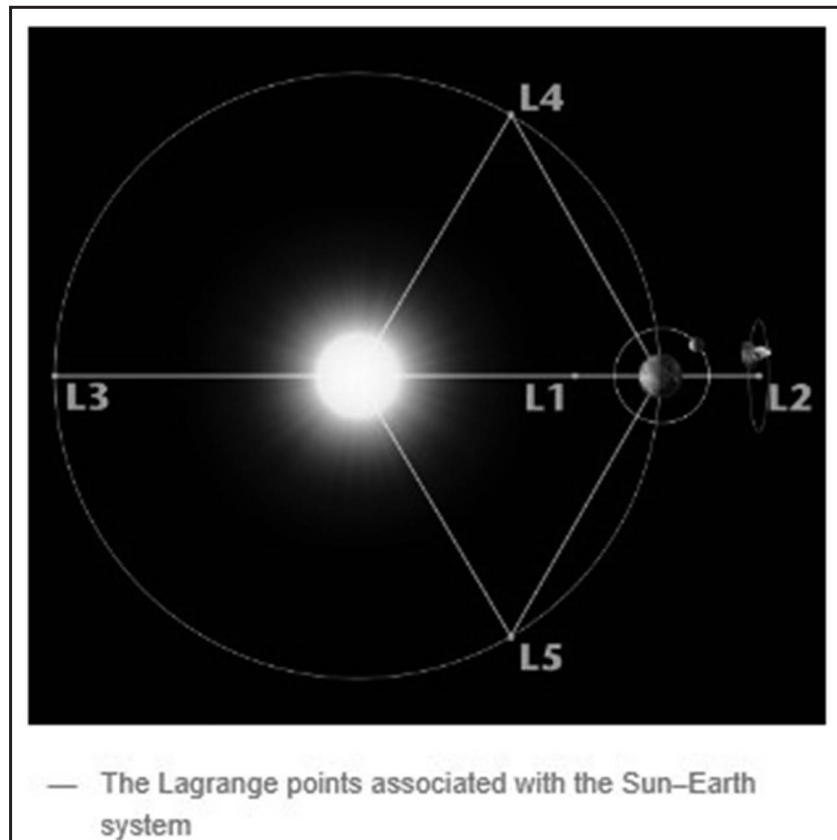
DFMC (Dual-Frequency Multi-Constellation) is a future system that aims to increase the robustness of the current SBAS of the GNSS. A frequency L5 (1176.45 MHz) will be added to the system. This will allow the integration between GPS, Galileo,

GLONASS and BeiDou constellations. Through these implementations, this system will contribute to provide greater resistance against ionospheric scintillation and improve the geometry among satellites. DFMC is in certification process. The operation concept (CONOPS) for the system was developed by ICAO, in which it is described how it will be used in aviation in the coming years. The respective SARPs are expected to be validated in 2022 (ICAO, [s.d.]; RICARD, 2019).

In the scientific subject, NASA MMS space mission is composed of 4 aircraft that navigate in formation through the magnetosphere, a region where the Earth's magnetic field is present. It was launched in March 2015 aiming to study the phenomenon of magnetic reconnection. The 4 aircraft form a pyramid scheme, which allows the three-dimensional visualization of the magnetic phenomenon. From the success of the visualization, it is studied more clearly what it happens, with the aim of evaluating and develop the predictive knowledge about magnetic reconnection (NASA, [s.d.]).

LaGrange mission is a future scientific exploration concept by the European Space Agency (ESA). On the presentation website (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]), it is stated by the agency that: "Providing timely and accurate space weather information, nowcasts and forecasts is possible only if sufficient observation data are continuously available"<sup>9</sup>. The mission aims at the LaGrange points of space, as shown in Figure 6. These are points where the Sun and the Earth's gravity forces interact on the points, in order to provide stability, that is, the objects do not orbit in these positions. There are five points with this feature on the heliosphere, identified as L1, L2, L3, L4 and L5. The mission is to place aircraft at points L1 and L5. The purpose of the first position is to improve interplanetary observations to assess the speed, densities, temperature and dynamic pressure of the solar winds. The objective of the aircraft in L5 position is to complement the aircraft observations in L1 and notice the plasma cloud propagation emitted by the Sun at a better angle, as well as observe the face of the preceding Sun before it faces the Earth.

Figure 6 - Scheme of LaGrange positions.



Source: (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]).

<sup>9</sup> Translation of: "Providing timely and accurate space weather information, nowcasts and forecasts is possible only if sufficient observation data are continuously available."

## 7 CONCLUSION

GNSS navigation system is projected to be the main feature of PBN (Performance Based Navigation) by 2030 (EUROCONTROL, 2020). Future plans for the system are defined at ICAO meetings, which include continuously increase of availability, forecasting and positioning integrity (SMAOUI, 2017). These improvements are necessary since the airspace, in non-contingency conditions, is increasingly dense and requires greater reliability.

One of the main threats to GNSS accuracy has a complex origin and is difficult to predict. The damage that can be caused in the most diverse technological networks is immeasurable, as there was no event like the one occurred in 1859. However, it is known among researchers that the material damages would be serious, deeply affecting the financial situation of the countries (BAKER et al., 2013; BERDERMANN et al., 2018; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Current predictive systems are still not reliable, as there are solar phenomena that are not predictable (ICAO, 2019a). During the 2017 events, for example, the aviation community was not aware, and only received the alert that such service was unavailable (HF and LPV) (REDMON et al., 2018). It has been required by the European Union, in the coming years, that Air Navigation Service Provider (ANSP) creates contingency procedures if the only common global means of navigation (GNSS) fails. These procedures were extensively discussed in EUROCONTROL (2020) and reversal actions to conventional means were detailed, such as VOR/DME, besides procedures under ATC responsibility. The document will guide the creation of a second document in the future, which will be regulatory.

The new space missions led by NASA and ESA could convey a theoretical breakthrough on the

topic, improving predictive capabilities. However, the studies are recent and others are still being analyzed, such as MMS and LaGrange, respectively.

In order to increase security, as well as to reduce the damage that can be caused by space weather, it is necessary to have greater awareness of this phenomenon by the main users of threatened technologies, mainly by aviators. This topic is so relevant that some authors, such as BERDERMANN et al. (2018), REDMON et al., (2018) and HAPGOOD, (2017, p. 3), discuss the need for continuous improvement in learning and predictive knowledge on the subject.

Brazil does not have a reduction system for ionospheric effects similar to SBAS and GBAS for aviation. However, there are several researches and projects, such as the ones performed at INPE and INCT, which may bring new positioning methods to Brazil in the future.

In 2017, there was a meeting between DECEA and representatives of FAA, Boston College, companies like Mirus, Honeywell, Boeing and airline companies to discuss and design the GBAS certification at Galeão International Airport in Rio de Janeiro (GALEMBECK, 2017). In SURCO ESPEJO's work et al., (2020) the precision of the approach and landing phase of an aircraft was simulated at Galeão airport, in Rio de Janeiro. It was concluded that the GBAS augmentation system installed at the airport cannot be certified for use, due to the equatorial ionospheric effects, which reduce the instrument accuracy.

The Brazilian geomagnetic location is a contributor to greater negative effects if space weather events occur (SPOGLI et al., 2013). Therefore, weather space awareness in Brazil should be equal or greater in rigor. There is lack of knowledge on the subject in Brazil, as well as throughout society, including users of susceptible technologies. For HAPGOOD, (2017), this is a great challenge to be faced.



## REFERENCES

- AGUIAR, Claudinei. Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS. **Aleph**, [S. l.], 2010.
- BAKER, D. N.; LI, X.; PULKKINEN, A.; NGWIRA, C. M.; MAYS, M. L.; GALVIN, A. B.; SIMUNAC, K. D. C. A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios. **Space Weather**, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 585–591, 2013. DOI: 10.1002/swe.20097. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/swe.20097>. Acesso em: 16 jun. 2020.
- BARBOSA, Cássio. **Os 156 anos de Carrington I G1 - Ciência e Saúde - Observatório**. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/blog/observatorio/post/os-156-anos-de-carrington.html>. Acesso em: 16 maio. 2020.
- BERDERMANN, J.; KRIEGEL, M.; BANY, D.; HEYMANN, F.; HOQUE, M. M.; WILKEN, V.; BORRIES, C.; HESSELBARTH, A.; JAKOWSKI, N. Ionospheric Response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and Its Implication for Navigation Services Over Europe. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 10, p. 1604–1615, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001933. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2018SW001933>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- BLASKOVIC, Teo. **The Sweden Case: Airplanes disappear from radars due to “solar storm.”** 2015. Disponível em: <https://watchers.news/2015/11/05/the-sweden-case-aircrafts-disappear-from-radars-due-to-solar-storm/>. Acesso em: 23 set. 2021.
- BOWHILL, S. A. Introduction to ionospheric physics. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 301, 1971. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90209-1.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Portaria nº 335, de 25 de janeiro de 2021**. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=515&pagina=5&data=28/01/2021>.
- COSTER, Anthea; KOMJATHY, Attila. Space Weather and the Global Positioning System. **Space Weather**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. n/a-n/a, 2008. DOI: 10.1029/2008sw000400.
- DENNIS, Jed; HEMSTAD, Mark. Selecting among Dual Frequency Multiple Constellation (DFMC) Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS) during En-route and Non-Precision Flight Operations. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 65–83, 2016. DOI: 10.1002/navi.127.
- DOHERTY, Patricia; COSTER, Anthea J.; MURTAGH, William. Space weather effects of October–November 2003. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 267–271, 2004. DOI: 10.1007/s10291-004-0109-3.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **The “no name” space weather mission**. [s.d.]. Disponível em: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Lagrange\\_mission2](https://www.esa.int/Safety_Security/Lagrange_mission2). Acesso em: 6 jun. 2020.
- EUROCONTROL. **European GNSS Contingency/ Reversion Handbook for PBN Operations**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [www.trainingzone.eurocontrol.int](http://www.trainingzone.eurocontrol.int). Acesso em: 28 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **SBAS Interoperability**. 2011. Disponível em: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Interoperability](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Interoperability). Acesso em: 31 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **Space Weather Office**. [s.d.]. Disponível em: [http://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Weather\\_Office](http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Weather_Office). Acesso em: 2 jun. 2020.
- FAA. **Satellite Navigation - WAAS - How It Works**. 2019. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/). Acesso em: 27 maio. 2020.
- GALEMBECK, Glória. **Cooperação entre Brasil e Estados Unidos fomenta pesquisa de GBAS para baixas latitudes**. 2017. Disponível em: [https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg\\_noticia&materia=cooperacao-entre-brasil-e-estados-unidos-fomenta-pesquisa-de-gbas-para-baixas-latitudes](https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=cooperacao-entre-brasil-e-estados-unidos-fomenta-pesquisa-de-gbas-para-baixas-latitudes). Acesso em: 8 set. 2020.
- GOSLING, J. T. The solar flare myth. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 98, n. A11, p. 18937–18949, 1993. DOI: 10.1029/93JA01896. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/93JA01896>.
- HAPGOOD, Mike. **Space Weather**. [S.l.]: IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/978-0-7503-1372-8. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1372-8>.
- HESSE, M.; CASSAK, P. A. Magnetic Reconnection in the Space Sciences: Past, Present, and Future. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 125, n. 2, p. 1–24, 2020. DOI: 10.1029/2018ja025935.
- HOCKEY, Thomas; HODGSON, Richard. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. [S.l.]: Springer New York, 2014. p. 989–989. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7\_9075.

Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7\\_9075](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9075). Acesso em: 23 jun. 2020.

IBGE. **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=sobre>. Acesso em: 25 ago. 2020.

ICAO. **Doc 9849 AN/457 - Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual**. Third ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **MID Doc 011 - Guidance on GNSS implementation in the MID region**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.icao.int/MID/MIDANPIRG/Pages/MID-Docs.aspx>.

ICAO. **DOC 10100 - Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation**. First ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **ICAO Space Weather Advisories**. Singapore. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/mission\\_support/ato\\_intl/cross\\_polar/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/). Acesso em: 3 jun. 2020b.

ICAO. **DFMC SBAS SARPS - Baseline draft for validation**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/DFMC-SBAS.aspx>. Acesso em: 8 jun. 2020.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Presentation**. [s.d.]. Disponível em: <http://lisn.igp.gob.pe/about/detail/presentation/>. Acesso em: 7 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O Projeto**. [s.d.]. Disponível em: <http://inct-gnss-nsaer.fct.unesp.br/pt/projeto.php>. Acesso em: 6 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Relatório Descritivo - EMBRACE**. São José dos Campos. Disponível em: [http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA\\_EMBRACE.pdf](http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA_EMBRACE.pdf). Acesso em: 23 set. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **O Programa Embrace**. [s.d.]. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-embrace/>. Acesso em: 30 jul. 2020.

KOMJATHY, Attila; SPARKS, Lawrence; MANNUCCI, Anthony J.; XIAOQING, Pi. An assessment of the current waas ionospheric correction algorithm in the South American region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 50, n. 3, p. 193–204, 2003. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2003.tb00329.x.

MATSUOKA, Marcelo Tomio; DE OLIVEIRA CAMARGO, Paulo; BATISTA, Inez Staciarini. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região Brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de Outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodesicas**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 315–334, 2006.

MENK, Frederick W.; WATERS, Colin L. **Magnetoseismology**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. DOI: 10.1002/9783527652051. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527652051>.

NASA. **The Magnetospheric Multiscale Mission**. [s.d.]. Disponível em: [https://mms.gsfc.nasa.gov/about\\_mms.html](https://mms.gsfc.nasa.gov/about_mms.html). Acesso em: 5 jun. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Coronal Mass Ejections**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>. Acesso em: 30 jul. 2020a.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Galactic Cosmic Rays**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/galactic-cosmic-rays>. Acesso em: 13 ago. 2020b.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA Space Weather Scales**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. Acesso em: 13 ago. 2020c.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2008. DOI: 10.17226/12507. Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog/12507>.

REDMON, R. J.; SEATON, D. B.; STEENBURGH, R.; HE, J.; RODRIGUEZ, J. V. September 2017's Geoeffective Space Weather and Impacts to Caribbean Radio Communications During Hurricane Response. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 9, p. 1190–1201, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001897.

RICARD, Nathalie. **Dual Frequency Multiconstellation SBAS Key Concepts**. Rome. Disponível em: [https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new\\_egnos\\_ops/sites/default/files/EWS19%20GSA%20-%20Introduction%20to%20EGNOS%20DFMC%20services.pdf](https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/EWS19%20GSA%20-%20Introduction%20to%20EGNOS%20DFMC%20services.pdf). Acesso em: 8 jun. 2020.

RUTLEDGE, Bob. **Space Weather Update**. Boulder, CO. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/mission\\_support/ato\\_intl/cross\\_polar/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/).

SHEEHAN, William. Carrington, Richard Christopher. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 373–375. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7\_9034. Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7\\_9034](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9034). Acesso em: 23 jun. 2020.

SMAOUI, Mohamed. **ICAO Global Provisions and Regional Developments related to GNSS**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 14 jun. 2020.

SPOGLI, Luca; ALFONSI, Lucilla; ROMANO, Vincenzo; DE FRANCESCHI, Giorgiana; JOAO FRANCISCO, Galera Monico; HIROKAZU SHIMABUKURO, Milton; BOUGARD, Bruno; AQUINO, Marcio. Assessing the GNSS scintillation climate over Brazil under increasing solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 105–106, n. November 2018, p. 199–206, 2013. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.003.

SURCO ESPEJO, Teddy M.; COSTA, Emanoel; DE MORAES, Alison O.; DE PAULA, Eurico R.; FRANCISCO GALERA MONICO, João. **Ionospheric Effects on Signal in Space and on Ground Based Augmentation System**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 30 ago. 2020.

TAKAHASHI, Directions Kazue; CHI, Peter J.; DENTON, Richard E.; EDS, Robert L. Lysak;

ABERCROMBIE, Faulting Rachel; MCGARR, Art; HYNDMAN, Processes David W.; DAY-, Frederick D. Geophysical Monograph Series. [S. l.], p. 1–4, 2015. DOI: 10.1029/164GM03.

TOUSEY, R. The solar corona. In: SPACE RESEARCH CONFERENCE 1973, **Anais [...]**. [S.l.: s.n.] p. 713–730.

UNITED NATIONS. **Preliminary draft report and proposed candidate guidelines of expert group C: Space Weather**. Vienna. Disponível em: [https://www.unoosa.org/pdf/limited/c1/AC105\\_C1\\_2013\\_CRP13E.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/limited/c1/AC105_C1_2013_CRP13E.pdf). Acesso em: 23 set. 2021.

WEBB, David F. The solar cycle variation of the rates of CMEs and related activity. **Advances in Space Research**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 37–40, 1991. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90086-Y. Acesso em: 17 jun. 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Aeronautical Meteorology Programme**. [s.d.]. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/programmes/aeronautical-meteorology-programme>. Acesso em: 1 jun. 2020.

YOON, Moonseok; KIM, Dongwoo; PULLEN, Sam; LEE, Jiyun. Assessment and mitigation of equatorial plasma bubble impacts on category I GBAS operations in the Brazilian region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 66, n. 3, p. 643–659, 2019. DOI: 10.1002/navi.328.

# El futuro de la fiabilidad de la navegación aérea dependiente del clima espacial

*The future of air navigation reliability dependent on space weather*

*O futuro da confiabilidade da navegação aérea dependente do clima espacial*

João Pedro Souza Aguiar<sup>I</sup>

Dario Eberhardt<sup>II</sup>

## RESUMEN

La actividad aérea mundial está creciendo de manera constante, aumentando la densidad de aeronaves en todo el territorio geográfico. Por ello, existe una tendencia hacia las nuevas tecnologías de navegación que, cumpliendo con los requisitos de integridad, precisión, disponibilidad y continuidad, permitirán el mantenimiento de la seguridad aérea incluso con el aumento del número de vuelos. Los medios más utilizados para determinar el posicionamiento en las aeronaves en la actualidad dependen de los satélites. Navegación global - en ruso), y los sistemas de aumentación WASS (Sistema de aumento de área amplia) y EGNOS (Servicio de Superposición de Ngeoestacionaria Europea), por ejemplo, son los medios que componen el Sistema de Navegación por Satélite global (GNSS). Todo lo anterior depende del equilibrio geomagnético de la Tierra y del medio electrónico de la ionosfera. Ambos son objetivos de bombardeos de radiación solar y cósmica, es decir, el clima espacial. Dependiendo de la intensidad de estos fenómenos, pueden ocurrir daños graves a los sistemas de posicionamiento, así como a varias otras áreas, como las comunicaciones y las redes eléctricas. En retrospectiva, el clima espacial ya ha causado un gran daño, como en los eventos de 1989 en América del Norte y en octubre de 2003 en la región americana de CONUS. La calidad de la previsión de estos sucesos sigue siendo baja y la complacencia de la sociedad con respecto al problema es alta, incluso en la aviación, teniendo en cuenta los posibles daños.

**Palabras clave:** Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviación.

## ABSTRACT

*The world's aviation activity rises constantly, increasing aircraft density in all geographic territories. For this reason, there is a tendency of new navigation technologies to arise that, attending requirements of integrity, accuracy, availability, and continuity, will promote maintenance of air safety, even with increasing flight numbers. The means of positioning determination most used today at aircraft are dependent on satellites. The constellations GPS (Global Positioning System) and GLONASS (Global Navigation Satellite System – in Russian), and the augmentation systems WAAS (Wide Area Augmentation System) and European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), for example, are compounds of the Global Navigation Satellite System (GNSS). All the mentioned, are dependent of Earth geomagnetic and ionosphere equilibrium. Both are targets of solar and cosmic radiation bombardments, i.e. space weather. Depending on that phenomenon intensity, serious damages could occur on positioning systems, as in several others, such communications and power grids. In retrospect, space weather already led to losses such as in the events of 1989 and October 2003*

I. Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Graduado en Ciencias Aeronáuticas en la Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul. *Email:* j.aguiar@edu.pucrs.br

II. Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Doctorado en Microelectrónica por la Federal Universidad Federal de Rio Grande do Sul. *Email:* dario.eberhardt@pucrs.br

Recibido: 06/10/21

Aceptado: 15/09/21

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



on CONUS American region. The forecast quality for such occurrences is still poor, while society complacency associated to this subject is high, which further extends to the aviation, considering the potential damages.

**Keywords:** Space weather; ionosphere; GNSS; aviation.

## RESUMO

A atividade aérea mundial cresce de forma constante, o que aumenta a densidade de aeronaves em todo o território geográfico. Por esse motivo, existe uma tendência para novas tecnologias de navegação que, atendendo requisitos de integridade, precisão, disponibilidade e continuidade, vão permitir a manutenção da segurança aérea mesmo com o aumento do número de voos. Os meios de posicionamento mais utilizados hoje são dependentes de satélites, que abrangem o Sistema de Satélites de Navegação Global (GNSS). O sistema é dependente do equilíbrio geomagnético da Terra e do meio eletrônico da ionosfera. Ambos são alvo de bombardeamentos de radiação solar e cósmica, i.e. clima espacial. O presente trabalho tem como objetivo ser uma fonte informativa, ou review, da relação entre clima espacial e aviação, para auxiliar na conscientização dos leitores, principalmente àqueles pilotos, principais responsáveis pela segurança dos voos. Será apresentada uma forma simplificada da teoria dos fenômenos do clima espacial, como estes podem afetar a aviação e as tecnologias, o histórico de eventos que atingiram o planeta e as iniciativas que foram e estão sendo desenvolvidas para sua mitigação e seu monitoramento. Como metodologia, foram consultados artigos científicos, livros teóricos, manuais, reportagens, sites de agências de pesquisa e apresentações de organizações. Essas fontes permitiram concluir que os estudos são recentes, há pouca conscientização para os usuários destas tecnologias e, visto a complexidade da origem dos fenômenos do clima espacial, existe uma falta de qualidade na sua previsão. Essa falta de qualidade, atrelada à necessidade de tecnologias mais confiáveis para o futuro do espaço aéreo, eleva a pertinência do objetivo deste trabalho.

**Palavras-chave:** Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviação.

## 1 INTRODUÇÃO

La principal interferencia en los sistemas de posicionamiento y comunicaciones de las aeronaves proviene del equilibrio electrónico de la ionosfera

(OACI, 2019a). Esta capa de la atmósfera es un intermediario esencial de la vida social moderna, ya que influye en todas las tecnologías dependientes de los satélites, así como en las redes eléctricas y las comunicaciones. Las *Solar flares*, las eyecciones de masa coronal (CME) y la radiación cósmica - componentes de la meteorología espacial, siempre han estado presentes como fuente de este desequilibrio. Si los eventos golpean el planeta, dependiendo de su intensidad, es probable que influyan, en efecto cascada, en el equilibrio geomagnético de la Tierra, causando perturbaciones en la atmósfera, dañando la integridad de todas las señales de radio y pudiendo causar daños materiales y grandes pérdidas financieras. En la aviación, pueden afectar a los sistemas de comunicación de alta frecuencia (HF) y por satélite (SATCOM), a la navegación y a la vigilancia GNSS, y puede producirse un aumento de la radiación en las altitudes de vuelo (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a).

En una reunión del subcomité técnico científico de las Naciones Unidas (ONU) celebrada en 2013, se determinó que el clima espacial es una causa potencial de desastres naturales (UNITED NATIONS, 2013). Se están vigilando los fenómenos espaciales, analizando sus intensidades, así como las zonas de ocurrencia y los posibles daños. Existen varias iniciativas y estudios en curso para buscar una mayor precisión en la previsión de sucesos relacionados con la meteorología espacial, que se detallarán en este artículo. La conciencia de estos hechos es pequeña en la sociedad, especialmente en la aviación, porque las consecuencias de los eventos severos son raras, ocurriendo una o dos veces en 100 años (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Este trabajo pretende informar y sensibilizar a los usuarios que pueden verse afectados, como los pilotos, los despachadores de vuelo y los controladores. Se alerta de la falta de calidad en las previsiones, dada la complejidad del origen de los fenómenos meteorológicos espaciales. Es pertinente ya que el espacio aéreo, en condiciones de no contingencia, es cada vez más denso y requiere una mayor fiabilidad.

### 1.1 Histórico

El evento meteorológico espacial más grave del que se tiene registro, ocurrido el 1 de septiembre de 1859, tiene 160 años, según el Consejo Nacional de Investigación (2008). El evento se conoce como “Evento Carrington” porque fue observado por el astrónomo inglés Richard Carrington en Redhill, Reino Unido (SHEEHAN, 2014). Si la misma magnitud del fenómeno se produjera hoy en día, con las modernas y complejas infraestructuras

presentes en nuestra sociedad, las consecuencias serían “profundas”<sup>1</sup> (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 20). El evento, es decir, las explosiones solares, también fueron observadas por el astrónomo aficionado Richard Hodgson en Londres, Inglaterra, quien confirmó el descubrimiento de Carrington (HOCKEY, 2014). Las influencias de las explosiones solares se observaron ampliamente en el periodo de medianoche, la madrugada del día 2. El cielo adquirió colores distintos a los que se suelen ver en las auroras. Los tonos eran rojizos y verdes. La luminosidad también era mucho más intensa, con informaciones de personas que incluso pensaban que ya era de día. Este efecto se observó en varios lugares, como se muestra en la Figura 1, en latitudes en las que no se producen efectos ionosféricos visibles, como Cuba, Bahamas, Jamaica, El Salvador, Hawai y la Guayana Francesa, muy cerca del círculo máximo. También se observó en otras regiones de Sudamérica (hasta el norte de Chile), Europa, Asia y Australia (BARBOSA, 2015).

Los daños causados fueron de menor alcance, ya que los inventos eléctricos estaban en su etapa inicial. Sin embargo, los telégrafos de la época sufrieron grandes influencias, desde chispas espontáneas hasta mensajes con código Morse ilegibles. Si desconectaban el instrumento de la batería, los “códigos” persistían debido a la corriente inducida en los cables del sistema. Esta corriente también se conoce como corrientes de Foucault.

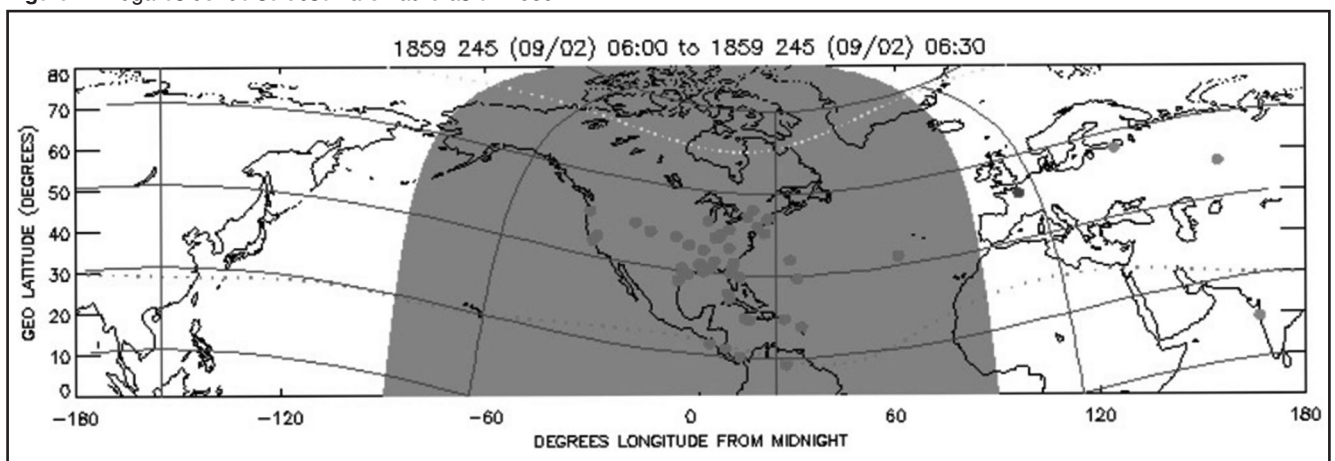
A partir de este considerable acontecimiento, los investigadores comenzaron, en la década de 1860, a relacionar el fenómeno de las auroras, las manchas solares y el magnetismo de la Tierra, considerándolos dependientes. Sin embargo, la comprensión de la naturaleza implicada no estaba clara. El mayor avance

científico en este sentido sólo se produjo durante la guerra fría, con la carrera espacial. En 1957, la Unificación de las Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) lanzó el primer satélite artificial llamado *Sputnik-1*, centrado en el estudio de la alta atmósfera. Luego, Estados Unidos lanzó el Explorer 1 en 1959 con los mismos objetivos que el *Sputnik-1*. Estos primeros satélites lanzados fueron esenciales para el estudio de los efectos de la radiación solar y cósmica, así como para la ciencia de la composición de la ionosfera. En los años 70 se descubrieron las eyecciones de masa coronal (GOSLING, 1993; HAPGOOD, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; TOUSEY, 1973).

Las consecuencias graves de la meteorología espacial son poco frecuentes. A modo de ejemplo, hay otros registros de fuertes influencias, como durante la Segunda Guerra Mundial. Las observaciones por radar se interrumpieron durante las emisiones de radiación solar, hecho que no se reconoció como causa solar hasta 1946 (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). En 1972, el estado de Illinois, en Estados Unidos, sufrió una pérdida de comunicaciones. El 13 de marzo de 1989, otro fuerte bombardeo solar causó varios daños en Norteamérica, principalmente en el ámbito de las redes eléctricas. Esto provocó fallos generales en generadores y transformadores. La provincia de Quebec, en Canadá, se quedó sin electricidad durante este evento.

En 2003, 2005, 2015 y 2017 también se produjeron eventos fuertes, con amplias influencias en las tecnologías, expuestas respectivamente en (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004), (BARBOSA, 2015), (BLAŠKOVIĆ, 2015) y (REDMON et al., 2018). Sus efectos en la aviación se detallará en este trabajo.

Figura 1 - Lugares donde se observaron auroras en 1859.



Fuente: (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 21).

<sup>1</sup> Traducción de “*profound*”.

## 2 CLIMA ESPACIAL

La OMM (Organización Meteorológica Mundial) define la meteorología espacial como: “El estado físico y fenomenológico del entorno espacial, que incluye el Sol y los entornos interplanetarios y planetarios”<sup>2</sup> (OACI, 2019a, p. 5 traducción nuestra). Por lo tanto, la meteorología espacial incluye el Sol y otras estrellas, como los eventos de supernova, que emiten radiación intergaláctica que llega al planeta Tierra, radiación conocida como cósmica, o GCR (*Galactic Cosmic Rays*) (OACI, 2019a).

### 2.1 Clima espacial: el Sol

El origen solar de la meteorología espacial incluye los vientos solares, las CME y *Solar flares*. Se trata de fenómenos originados en su atmósfera, que pueden generar grandes nubes de plasma magnetizado y/o radiación de partículas altamente energizadas, que se propagan por el espacio (HAPGOOD, 2017). Las CME y las *Solar flares* pueden interferir en la seguridad de la aviación.

Las partículas expulsadas de esta estrella se propagan por el espacio a través de líneas de campo magnético (BOWHILL, 1971), producidas a través del proceso de dinamo. La teoría de este proceso está presente para la explicación de la generación del campo magnético de todos los planetas, en el que el núcleo presenta un intenso calor que libera iones. Con esto, hay un fluido cargado eléctricamente que tiene un movimiento constante de rotación y convección, ocurriendo la producción de campo magnético.

Los vientos solares, las CME y las *Solar flares* se producen por un proceso llamado reconexión magnética. Este proceso se produce en la atmósfera solar cuando dos campos magnéticos con direcciones convergentes se cruzan, transformando y liberando repentinamente la energía magnética en energía cinética. Dicho proceso también puede ocurrir fuera de la atmósfera solar, entre los campos magnéticos de la Tierra y el espacio interplanetario opuesto al Sol (*Dungey Cycle*), contribuyendo a las tormentas geomagnéticas al enviar plasma de vuelta al planeta (HAPGOOD, 2017; HESSE; CASSAK, 2020).

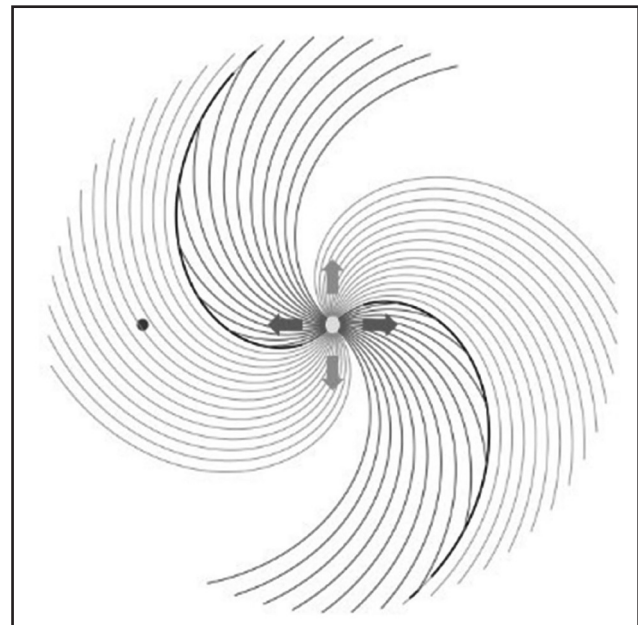
El campo magnético es transportado tanto por la CME como por los vientos solares. Esto ocurre de forma similar al proceso de fundación de la dinamo descrito anteriormente. El plasma tiene una alta conductividad hasta el punto para permitir la conducción del magnetismo a través del espacio.

El término “*frozen in*” se utiliza para el campo magnético cuando se transporta junto con la liberación de plasma (HAPGOOD, 2017, p. 17; MENK; WATERS, 2013, p. 2).

Los vientos solares son el plasma que escapa continuamente de la región coronal del Sol, ya que superan la gravitación debido a las altas temperaturas<sup>3</sup>, y no representan un riesgo de seguridad para la aviación. Tienen velocidades medias que oscilan entre los 500 y los 800 kilómetros por segundo y, cuando llegan a la Tierra, interactúan con el campo magnético terrestre a través de la fuerza de Lorentz, dándole forma y formando la magnetosfera (HAPGOOD, 2017; MENK; WATERS, 2013). Sin embargo, debido al proceso de reconexión magnética en la superficie solar, puede producirse la liberación de vientos solares de alta velocidad, perturbando el campo geomagnético de la Tierra (OACI, 2019a). En este contexto, son los principales responsables de las auroras, una manifestación de la meteorología espacial visible para el ojo, y que es la absorción y conducción de la energía solar por la ionosfera.

La rotación del Sol interfiere en la liberación de los vientos solares, de modo que, cuando salen de la atmósfera, ejecutan una trayectoria similar a la del agua de un aspersor de jardín, como se esquematiza en la figura 2. La forma de esta trayectoria también se conoce como “*Parker Spiral*” (MENK; WATERS, 2013). Este término apareció en los años 50, creado por Eugene Newman Parker al estudiar estos fenómenos solares.

**Figura 2** - Esquema de la trayectoria de los vientos solares.



**Fuente:** (HAPGOOD, 2017, p. 7).

<sup>2</sup> Traducción de: “The physical and phenomenological state of the natural space environment, including the Sun and the interplanetary and planetary environments”.

<sup>3</sup> Se cree que la liberación de energía cinética, a través de la reconexión magnética, es la causa del aumento de las temperaturas en la corona solar, que alcanzan un millón de Kelvins, frente a los 6000K de la superficie (HAPGOOD, 2017).



Las CME son vientos solares en forma de nubes de plasma que tienen una energía muy elevada, con masas que pueden ser de miles de millones de toneladas y velocidades de hasta 3.000 km/s. Pueden llegar a la Tierra en menos de un día, o incluso en más de 4 días, tras su salida de la corona. Las CME tienen una liberación dirigida y la posibilidad de alcanzar la Tierra es pequeña. Suponen un gran riesgo para la aviación y las tecnologías, ya que pueden desencadenar tormentas geomagnéticas, que son perturbaciones en el campo magnético de la Tierra debidas a la absorción de plasma en la magnetosfera, que generan ciclos de reconexión magnética en el lado del globo opuesto al Sol. Estos ciclos devuelven el plasma al planeta y pueden denominarse *Dungey Cycle* o subtormentas. Debido al proceso, una gran cantidad de energía se disipa en la ionosfera, contribuyendo a la alteración de las características físicas de las señales de los satélites cuando atraviesan dicha capa atmosférica. Esto reduce la precisión del posicionamiento de la aeronave (posiblemente causando la pérdida de posicionamiento) y perjudica los sistemas de comunicación HF y SATCOM (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a; MENK; WATERS, 2013; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

Otro proceso desencadenado por las tormentas geomagnéticas es la inducción de corrientes de tierra (GIC<sup>4</sup>), que pueden afectar a infraestructuras eléctricas como las redes eléctricas y los sistemas ferroviarios. Los daños en estos sistemas generarían grandes pérdidas, como se detalla en TAKAHASHI et al., (2015, p. 33).

Las *Solar flares* son liberaciones de energía a menor escala en forma de radiación electromagnética (longitudes de onda EUV y rayos X<sup>5</sup>). Los depósitos de energía son rápidos, llegando a la Tierra en cuestión de minutos. Su aparición está relacionada con las CME, ya que pueden ser un indicio que precede a la liberación de la eyección coronal, pero también pueden ocurrir por separado. Tienen el potencial de influir, sólo en las regiones iluminadas por el sol de la Tierra, en las comunicaciones de alta frecuencia y los sistemas de vigilancia, que utilizan frecuencias entre 1-20 Mhz; en los sistemas eléctricos de a bordo y en la salud de las tripulaciones. En las regiones polares, sus efectos son mayores, debido al comportamiento magnético de la Tierra que permite una mayor deposición de protones en las latitudes más altas. Por esta característica, la radiación alcanza altitudes más bajas e interfiere de forma más significativa en los sistemas de comunicación HF, principalmente en las rutas árticas, utilizadas para los vuelos entre América y Asia. También se puede recibir radiación en latitudes y altitudes

bajas<sup>6</sup>, debido a fenómenos ionosféricos ecuatoriales más complejos (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a).

El número de electrones depositados en la ionosfera, tras la llegada del plasma, tiene una unidad denominada TEC (*Total Electron Content*). Los valores del TEC se determinan por el número de electrones en una columna de 1m<sup>2</sup> entre la señal de un satélite y su receptor, que atraviesa la ionosfera. La variación del TEC provoca una variación proporcional en el equilibrio electrónico de la ionosfera, causando cambios en la velocidad, polarización, fase y amplitud (centelleo ionosférico) de las ondas de radio propagadas por el GPS. Los cambios pueden indicar una posición errónea del receptor, así como provocar la pérdida de la señal del satélite (AGUIAR, 2010; COSTER; KOMJATHY, 2008). Una unidad de TEC, equivalente a 10<sup>16</sup> electrones/m<sup>2</sup>, corresponde a 0,163 m de retraso en la medición de la posición del receptor, por lo que es un buen indicador de la calidad del posicionamiento. El TEC varía regularmente debido al ciclo de manchas solares, la época del año, la hora del día y la ubicación geográfica (KOMJATHY et al., 2003).

Estas eyecciones de energía solar se producen con mayor frecuencia en un periodo cíclico de la actividad del Sol, cuando hay mayor actividad. Este ciclo de mayor actividad dura aproximadamente 11 años (GOSLING, 1993; WEBB, 1991). La actividad solar es directamente proporcional a los grupos de manchas solares visibles, que son vigilados constantemente por observatorios, como los satélites de la agencia espacial NASA, SOHO y STEREO-A. Durante el periodo de máxima actividad, las solar flares se emiten una media de 25 veces al día y las CME 5 veces al día. La densidad de energía se libera de forma similar entre las solar flares y las CME, sin embargo, la posibilidad de que la Tierra sufra la influencia de una CME es menor, ya que tiene una liberación dirigida. Por el contrario, el daño sería mayor a través de las CME debido al fuerte campo magnético unido al plasma (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.f.]).

## 2.2 Clima espacial: radiación cósmica

Los rayos cósmicos, que provienen del exterior del sistema solar, golpean la Tierra constantemente, con una intensidad que varía poco con el tiempo. La interferencia de los rayos cósmicos en la Tierra es inversamente proporcional a la actividad solar, ya que las CME y las *Solar flares* interactúan con la radiación cósmica de manera que se reduce su interacción con la atmósfera terrestre.

<sup>4</sup> Sigla de *Ground-Induced Currents*.

<sup>5</sup> EUV es la sigla de Ultravioleta Extremo con un rango de longitud de onda de 10nm - 121nm (nanómetros). Los rayos X son de 1nm - 20nm.

<sup>6</sup> Cerca del nivel de vuelo 300 (10-12km).



Al igual que con la radiación solar, sus efectos serán mayores en latitudes más altas (a partir de 55° de latitud magnética), como en los polos, y aumentan con la altitud, alcanzando un máximo entre los 60-65.000 pies. Dependiendo de la intensidad, pueden ser perjudiciales para los equipos electrónicos de a bordo y, con una exposición prolongada, para la salud de la tripulación (OACI, 2019a; ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE OCEANOS Y ATMOSFÉRICOS, [s.f.]).

### 2.3 Clima espacial: Brasil

Brasil es una de las regiones del globo con mayores influencias ionosféricas, y mayores valores y variaciones de TEC. Se encuentra en una región ecuatorial y tiene parte del territorio cerca de la AMAS (Anomalía Magnética de América del Sur). El ecuador magnético presenta, junto con los polos, mayores irregularidades ionosféricas principalmente en los períodos posteriores a la puesta de sol local, produciéndose con mayor frecuencia centelleos en la frecuencia de las señales de los satélites. Las irregularidades son causadas por el aumento del campo eléctrico ionosférico en el período posterior a la puesta del sol, debido a un mayor movimiento del plasma (*Fountain Effect*), dando lugar también a burbujas de plasma (SPOGLI et al., 2013).

El AMAS es una región donde el campo geomagnético tiene los valores más bajos de intensidad, contribuyendo, al igual que los polos, al mayor depósito de radiación. Esta característica permite una mayor perturbación en la ionosfera, que también contribuye a los centelleos en las señales de los satélites GNSS (SPOGLI et al., 2013). Estos comportamientos de la ionosfera sobre Brasil son muy perjudiciales para la precisión del posicionamiento (KOMJATHY et al., 2003; MATSUOKA; DE OLIVEIRA CAMARGO; BATISTA, 2006).

### 3 TECNOLOGÍAS DE AVIACIÓN QUE MITIGAN LOS EFECTOS DEL CLIMA ESPACIAL

La OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) exige que los sistemas relacionados con la navegación aérea tengan precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en todas las fases del vuelo. Estos requisitos se recogen en el Anexo 10 del Convenio de Aviación Civil Internacional a través de los SARPS (Normas y Prácticas de Seguridad Recomendadas). Para satisfacer estas exigencias de rendimiento de la navegación, se han necesitado nuevas tecnologías gracias a los avances en la investigación relacionada con la meteorología espacial.

En 2003, Estados Unidos certificó su propio SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), llamado WAAS (*Wide Area Augmentation System*). Es un sistema de aumento del

posicionamiento, centrado en la corrección de los efectos ionosféricos presentes en el territorio americano, así como de los retrasos del reloj del satélite y de los errores de órbita. Su funcionamiento se compone de estaciones GPS en tierra, con sus posiciones definidas con precisión, y que miden continuamente las diferencias en relación con el aforo de los satélites. Estos datos se envían a una estación central, que genera los mensajes corregidos. Estos mensajes se transmiten a los satélites geoestacionarios que, en secuencia, los retransmiten a los receptores a bordo del avión. Con este sistema, las aeronaves pueden realizar procedimientos de precisión a través de LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*) en diversos lugares del territorio estadounidense, donde no existen radioayudas para la navegación (COSTER; KOMJATHY, 2008; FAA, 2019).

Al igual que WAAS, hay otros sistemas que componen el SBAS y que funcionan de la misma manera. En Japón, utilizan el sistema MSAS (*Satellite Augmentation System*), operativo desde 2007. En Europa se utiliza el sistema EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), que comenzó en 2011. En India, utilizan GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation*), certificado en 2014. Los 4 mencionados son operativos, mientras que hay otros sistemas que están en desarrollo, como el SDCM (*System for Differential Corrections and Monitoring*) de Rusia y el SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*) de China (DENNIS; HEMSTAD, 2016). Los sistemas operativos forman parte del IWG (*Interoperability Working Group*), cumpliendo los requisitos de la OACI, para ofrecer los servicios de aumento con transición libre entre ellos. De este modo, la tecnología de mejora de la precisión se unifica por el hemisferio (AGENCIA EUROPEA DEL ESPACIO, 2011).

El *ground-based augmentation system* (GBAS) es un segundo sistema de aumento del GNSS, desarrollado para mejorar la precisión del posicionamiento mediante correcciones diferenciales por parte de los equipos terrestres. Gracias a las correcciones de este sistema, los errores ionosféricos comunes se vuelven insignificantes. Cuando el sistema se instala en los aeropuertos, se pueden realizar aproximaciones y aterrizajes de precisión por instrumentos, denominados *GBAS Landing System* (GLS). Dependiendo del tipo de servicio de aproximación GBAS (GAST), las aproximaciones pueden realizarse con una precisión aún mayor (CAT II/III). Por ejemplo, en Estados Unidos los sistemas GBAS presentes son el LAAS (*Local Area Augmentation System*) y el SLS (*Satellite Landing System*) desarrollados por la Administración Federal de Aviación (FAA) y Honeywell, respectivamente. El primer GBAS se aprobó en 2012 en el aeropuerto internacional de Newark, en Estados Unidos (YOON et al., 2019).

Además de estas tecnologías de aumento, la gran mayoría de los aviones comerciales cuentan con un sistema de reversión en caso de que las señales GNSS fallen. La posición de la aeronave se determinará a partir de las señales combinadas del sistema inercial de la aeronave y de las señales de radio (VOR/DME). La tripulación puede hacer uso exclusivo de la navegación convencional o, si las señales de radio no están disponibles en la región, la tripulación puede solicitar la asistencia del ATC. Se trata de estrategias de mitigación, mientras que no existen procedimientos de contingencia adecuados para la ocasión (EUROCONTROL, 2020; OACI, 2018).

#### 4 INTERFERENCIAS DE AVIACIÓN RESTANTES

El 29 de octubre de 2003 comenzó el evento conocido como las tormentas de *Halloween*, que afectó a varias regiones de Estados Unidos. El suceso inutilizó el servicio de aproximación de precisión WAAS, que estuvo inutilizado durante 15 horas el día 29 y 11,3 horas el día 30 (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004).

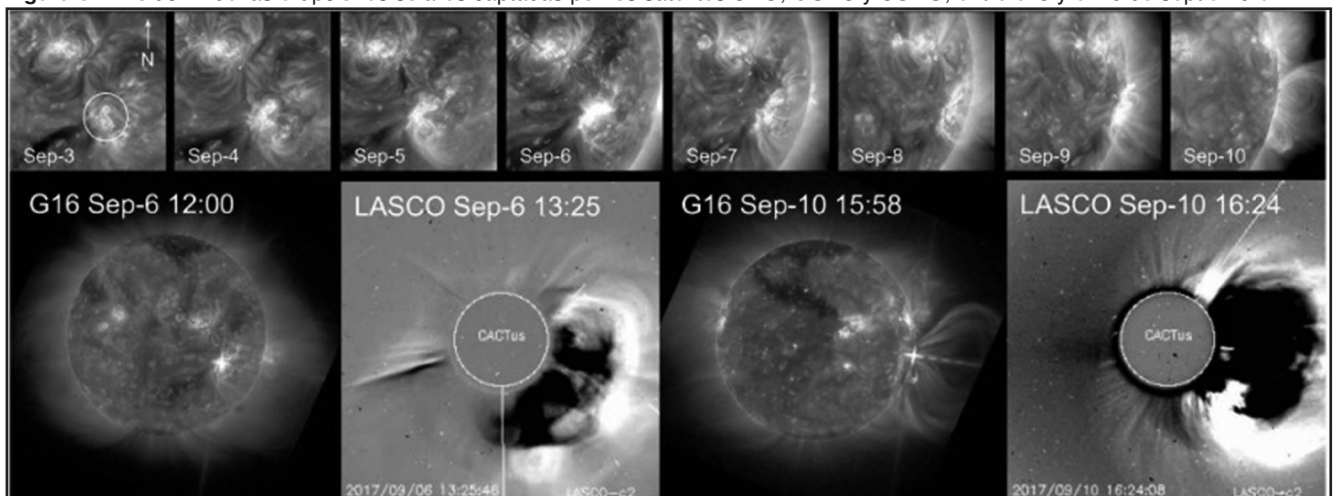
En diciembre de 2005, hubo una interrupción de los sistemas de navegación GPS que duró 10 minutos, desorientando a los aviones, barcos y plataformas petrolíferas (BARBOSA, 2015). El 4 de noviembre de 2015, el servicio de tráfico aéreo de Suecia informó de que los aviones no aparecían en sus radares. El problema duró aproximadamente 1 hora. La causa considerada fue una tormenta solar (BLAŠKOVIĆ, 2015).

El 3 de septiembre de 2017 se produjo un evento que solapó el SBAS estadounidense y el europeo. La región solar categorizada como región 46 del grupo Catania —

de la agencia estadounidense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), inició una actividad magnética más compleja, generando una serie de *Solar flares* y CMEs, cuyos efectos se hicieron sentir los días 6, 7 y 10 del mes (REDMON et al., 2018). En la figura 3 se muestran imágenes del desarrollo de esta actividad solar. La región emitió un viento solar de magnitud X 9,3<sup>7</sup>. El último más fuerte había ocurrido en septiembre de 2005, con intensidad X17<sup>7</sup> en el ciclo solar 23 (REDMON et al., 2018). En este evento de 2017, la NOAA emitió alertas con su escala más severa por riesgo de pérdida de comunicaciones, tormentas geomagnéticas y alta radiación de partículas. Se informó de la pérdida de comunicación HF en vuelo el día 6 y de la pérdida de capacidad para los procedimientos WAAS y EGNOS LPV el día 8 (REDMON et al., 2018). Además, durante este periodo, las comunidades del Caribe se enfrentaron al huracán José. Debido al evento meteorológico espacial, experimentaron dificultades en los servicios de comunicaciones para la respuesta de emergencia, reportados por HWN (*Hurricane Weather Net*) y DGAC (*French Civil Aviation Authority*) (REDMON et al., 2018).

El sistema de aumento europeo EGNOS sufrió una reducción considerable de su disponibilidad en 2017, conforme mostrado en la Figura 4. En el día 06 de septiembre, hubo pérdida de aproximadamente 10% de la tasa de disponibilidad, lo que afectó la seguridad de procedimientos LPV (BERDERMANN et al., 2018). Esa disminución ocurrió debido a CME que afectó el planeta, depositando plasma en la región de la ionosfera y aumentando los valores de TEC repentinamente. Esto dificulta los receptores de mantener correcciones de señal y, en la mayoría de los casos, ocurre pérdida de conexión entre el satélite. Esta pérdida se llama “*loss of lock*” (BERDERMANN et al., 2018).

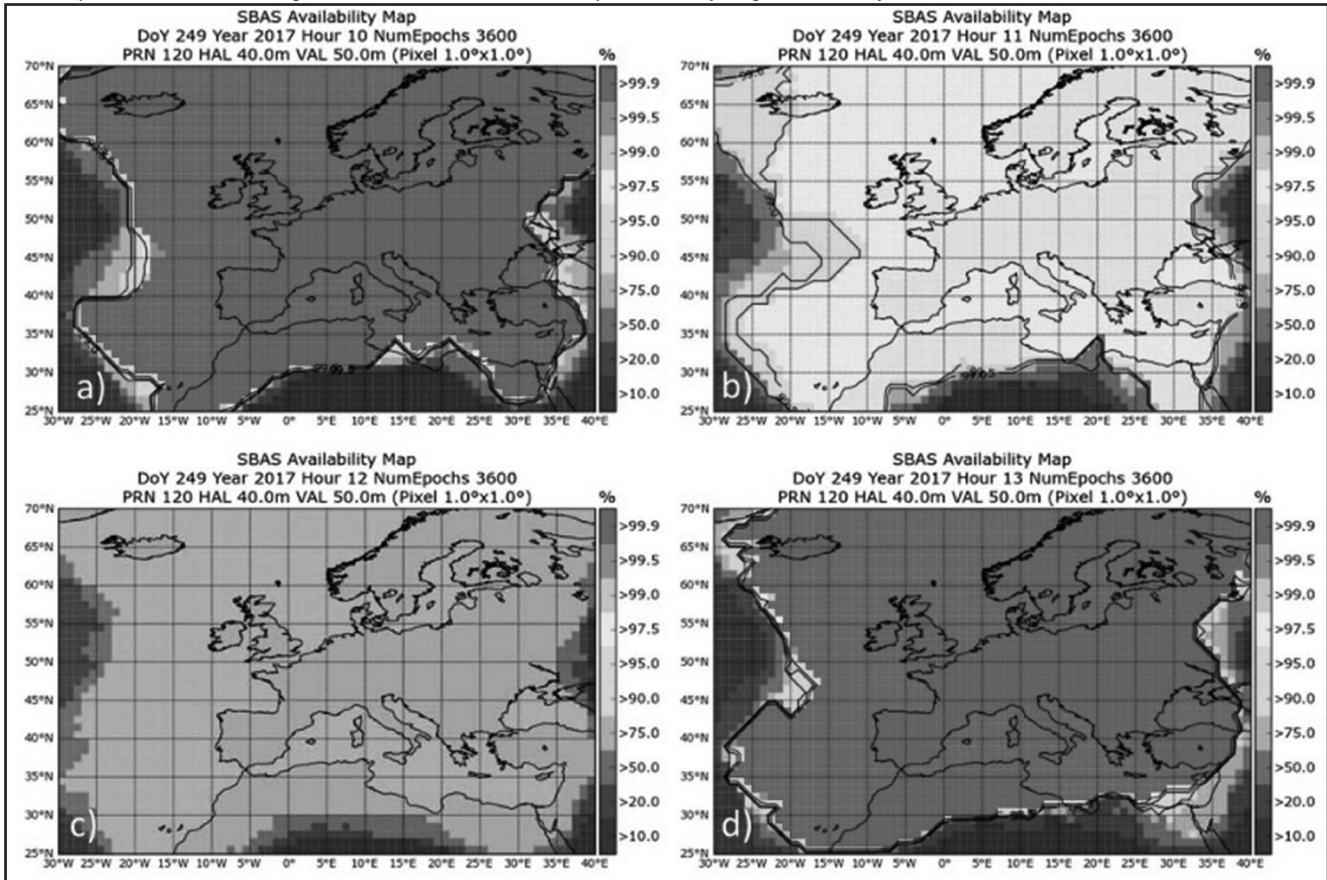
**Figura 3** - Evolución de las erupciones solares captadas por los satélites SDO, GOES y SOHO, entre el 3 y el 10 de septiembre.



Fuente: (REDMON et al., 2018, p. 4).

<sup>7</sup> Escala NOAA, disponible en el portal SWPC (Space Weather Prediction Center).

**Figura 4** - Mapa que escala la disponibilidad del SBAS europeo EGNOS en el intervalo de tiempo entre las 10:00 y las 13:00 (UTC) del 6 de septiembre de 2017. El gris más intenso indica alta disponibilidad y el gris claro, baja.



Fuente: (BERDERMANN et al., 2018, p. 9).

Nunca se ha repetido un evento meteorológico espacial similar al de 1859. El daño es desconocido en la práctica, aunque existen algunas predicciones de intensidad, como en (BAKER et al., 2013). Mediante un modelo de predicción, midieron los daños que una CME podría haber causado en el planeta en 2012. Esta CME no golpeó el globo en cuestión de una semana de rotación solar. Utilizando el método, los autores concluyeron que la intensidad de la eyección coronal había sido más intensa que el evento Carrington de 1859, y el daño similar a la analogía de (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008): que la sociedad seguiría “recogiendo los pedazos”<sup>8</sup> (BAKER et al., 2013, p. 590).

### 5 EL ALCANCE DEL MONITOREO CLIMÁTICO ESPACIAL ACTUAL

Los daños causados por la meteorología espacial, así como los daños potenciales, han generado iniciativas destinadas a comprender su origen, realizando observaciones, recoger datos y prever fenómenos.

<sup>8</sup> Traducción de “picking up the pieces”.

Actualmente, la organización mundial central para la aviación que realiza estudios al respecto es la OMM (Organización Meteorológica Mundial). Trabaja conjuntamente con la OACI, mejorando las previsiones mundiales emitidas por el WAFS (*World Area Forecast System*) y, actualmente, el objetivo principal es mitigar los impactos meteorológicos espaciales (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, [s.d.]).

En Estados Unidos hay algunas organizaciones que proporcionan información. Entre ellos se encuentra el SWPC (*Space Weather Prediction Center*) bajo la administración de la NOAA. En este centro están disponibles escalas diarias en su página web, <<https://www.swpc.noaa.gov>>, que muestran las tecnologías y sistemas que pueden verse afectados por los fenómenos meteorológicos espaciales. Hay tres escalas que miden: el impacto en los sistemas de radio (HF y satélites); los niveles de radiación de las tormentas solares y los niveles de las tormentas geomagnéticas (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [n.d.]).



En Europa, la ESA (*European Space Agency*) creó en 2009 un programa para mejorar la concienciación de los usuarios sobre los peligros del espacio. Se llamó SSA (*Space Situational Awareness*). A partir de la iniciativa, se creó un segmento vinculado a la seguridad global, denominado *Space Weather Office* (Oficina de Meteorología Espacial), para estudiar la meteorología espacial, con el objetivo de mitigar sus efectos. Dentro de este segmento, se está desarrollando el *Space Weather Service Network* de la ESA para proporcionar productos y servicios en cinco áreas diferentes para los usuarios. Estas cinco áreas son gestionadas por especialistas y se dividen en: clima solar, clima de la heliosfera, radiación espacial, clima ionosférico y condiciones geomagnéticas. Esta iniciativa tiene como uno de sus principales objetivos proporcionar productos más precisos y fiables (AGENCIA EUROPEA DEL ESPACIO, [s.d.]).

En Brasil, también ha habido algunas iniciativas de estudio y desarrollo de tecnologías para hacer frente a las influencias de la meteorología espacial. El INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales) creó en 2007 el programa EMBRACE (Estudio y Vigilancia de la Meteorología Espacial Brasileña), con el objetivo de proponer mecanismos de alerta y procedimientos de defensa para los sistemas de comunicación por satélite, GNSS, sistemas de seguridad de vuelo, sistemas de energía a gran escala, protección de satélites y sistemas de control de altitud, entre otros. En el sitio web del programa, <[www2.inpe.br/climaespacial/portal/es/](http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/es/)>, se ponen a disposición escalas diarias que demuestran el daño potencial a las tecnologías, de forma similar a la NOAA, a través de SWPC. El proyecto forma parte de la DIDAE (División de Aeronomía) del INPE, que también tiene otras iniciativas de investigación, como el proyecto EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*), centrado en la vigilancia y el estudio de la región ecuatorial (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, [s.d.]).

Brasil también cuenta con una sólida infraestructura de redes de estaciones que monitorean las señales GNSS, principalmente de las constelaciones GPS y GLONASS. Está compuesto por la Red Brasileña de Monitoreo Continuo GNSS (RBMC), la red de proyectos CIGALA y CALIBRA, LISN y GNSS-NavAer. Analizan y estudian los efectos que la ionosfera, cerca del ecuador magnético, impone al posicionamiento, con

el fin de comprender mejor sus características y desarrollar tecnologías más precisas y fiables, así como nuevos métodos de posicionamiento.

La Red Brasileña de Monitoreo Continuo de GNSS (RBMC), bajo la administración del IBGE, cuenta con estaciones GNSS desde 1996, que almacenan continuamente observaciones del código y la fase de las ondas portadoras transmitidas por los satélites de las constelaciones GPS o GLONASS (IBGE, [s.f.]). Sus datos se utilizan habitualmente en la investigación.

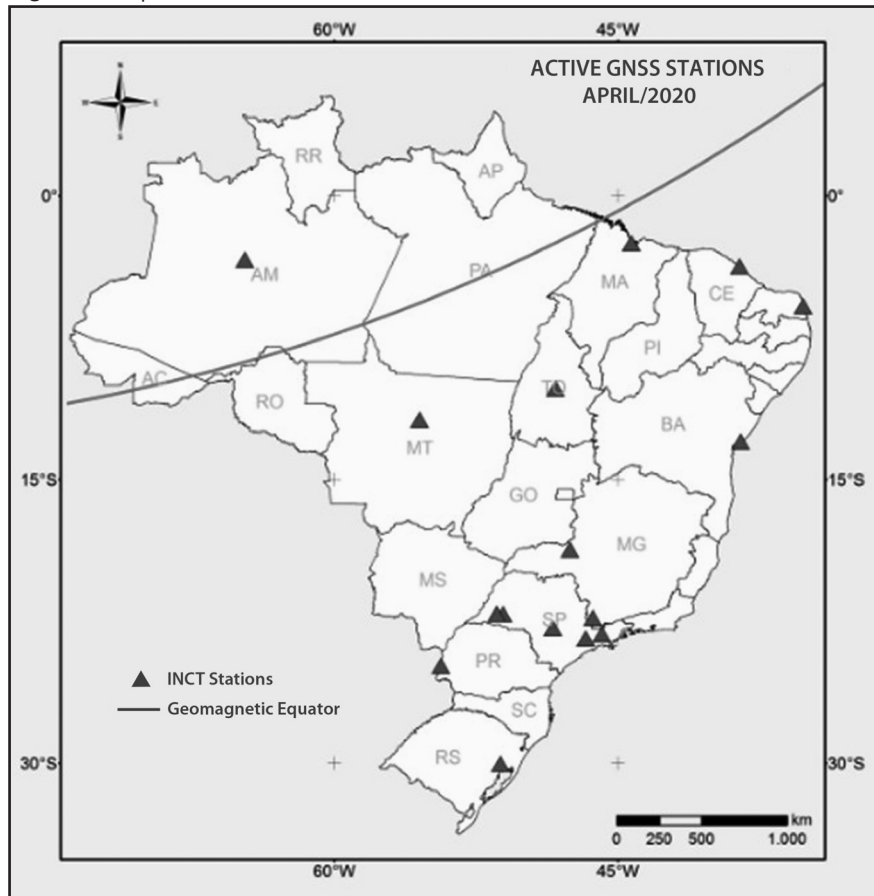
El proyecto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*), financiado por la Comisión Europea (CE) a través de la Agencia Europea del GNSS (GSA), se creó para desarrollar y probar tecnologías que mitiguen el centelleo ionosférico en Sudamérica a través de las estaciones terrestres del GNSS. Este proyecto se centró en el análisis de los posibles efectos del periodo de máxima actividad solar del año 2013. El proyecto comenzó en marzo de 2010 y concluyó en febrero de 2012, siendo continuado por el proyecto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL*). Este tuvo como objetivo evolucionar los algoritmos correctores de las técnicas de posicionamiento de alta precisión GNSS, ampliando el número de estaciones GNSS del anterior proyecto CIGALA, concluyéndose en febrero de 2015 (AGUIAR, 2010).

La LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*) es un proyecto internacional para el estudio de los fenómenos ionosféricos, con instrumentos geofísicos situados en América del Sur, cerca del ecuador magnético y hasta el meridiano 70°W. Cuenta con varias instituciones colaboradoras, con investigadores del INPE como representantes brasileños (INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, [s.d.]).

GNSS-NavAer fue creado por el INCT (Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología) en 2017. El objetivo principal de la iniciativa es mejorar el conocimiento teórico de las influencias ionosféricas en la señal del GNSS, para su aplicación segura en la navegación aérea. Dispone de una red de estaciones GNSS para la recogida de datos ionosféricos, denominada red GNSS NavAer, repartida por todo el territorio brasileño, como se ilustra en la Figura 5. Cuenta con varias instituciones colaboradoras, entre ellas la UNESP, el INPE, el ITA y la UFRGS (INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, [s.d.]).



Figura 5 - Mapa de las estaciones de la red NavAer GNSS.



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, [s.d.].

En junio de 2017, la OACI preguntó a los Estados sobre su interés en colaborar en la información meteorológica espacial. De los interesados, el Consejo de la OACI designó, en noviembre de 2018, tres centros mundiales: PECASUS (Finlandia, con socios de Bélgica, Austria, Italia, Inglaterra, Chipre, Polonia, Países Bajos, Alemania y Sudáfrica), SWPC (NOAA, Estados Unidos) y ACFJ (consorcio entre Australia, Canadá, Francia y Japón) (OACI, 2019b). Denominados SWXC, los centros, sin jerarquía, se dedicarían a vigilar y proporcionar información y recomendaciones, emitiendo avisos de fenómenos meteorológicos espaciales que puedan afectar a las comunicaciones, a la navegación basada en el GNSS y a los sistemas de vigilancia, así como a los casos de riesgo de radiación para la tripulación. Las recomendaciones deben seguir las normas internacionales del Convenio de Aviación Civil Internacional, establecidas en el Anexo 3 - *Meteorological Service for International Air Navigation*. Para los usuarios de la aviación específicamente, un material de orientación para el clima espacial - Documento 10100, *Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation* (OACI, 2019b) fue publicado en 2019 por la OACI.

Por lo tanto, tras la enmienda 78 del anexo 3 del Convenio, operativa en noviembre de 2018, la documentación requerida

en el prevuelo prevé el incremento de la presentación de eventos relevantes para la ruta, relacionados con la meteorología espacial, emitidos por los SWXC. El lenguaje de la información es abreviado, siendo los efectos sobre las comunicaciones HF, las comunicaciones por satélite (SATCOM), la degradación del GNSS y la exposición a la radiación, clasificados como HF COM, SATCOM, GNSS y RADIACIÓN, respectivamente. En términos de la intensidad de los fenómenos, MOD se utiliza para los moderados y SEV para los graves. En los cuadros I y II figuran ejemplos de los mensajes emitidos.

En consonancia con los cambios del Anexo 3, Brasil, mediante la Ordenanza 335 del 25 de enero de 2021, estableció una cooperación técnico-científica entre el INPE y el DECEA, a través de EMBRACE y CIMAER (Centro Integrado de Meteorología Aeronáutica) respectivamente. La cooperación tiene como objetivo mejorar el Servicio de Meteorología Espacial Aeronáutica, proporcionando información y asesoramiento sobre los fenómenos meteorológicos espaciales, de acuerdo con las recomendaciones del Anexo 3, con la intención de convertirse en un SWXC regional en América del Sur (BRASIL, 2021; INSTITUTO NACIONAL DE BÚSQUEDA ESPACIAL, 2021).

Tablas 1 e 2 - Ejemplos de avisos de eventos que puede emitir un SWXC.

<b>(communication header)</b>	
<b>SWX ADVISORY</b>	
<b>DTG:</b>	<b>20161108/0000Z</b>
<b>SWXC:</b>	<b>(to be determined)</b>
<b>SWX EFFECT:</b>	<b>RADIATION MOD</b>
<b>ADVISORY NR:</b>	<b>2016/2</b>
<b>FCST SWX:</b>	<b>20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +6 HR:</b>	<b>20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +12 HR:</b>	<b>20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +18 HR:</b>	<b>20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350</b>
<b>FCST SWX +24 HR:</b>	<b>20161109/0100Z NO SWX EXP</b>
<b>RMK:</b>	<b>RADIATION LEVELS HAVE EXCEEDED 100 PERCENT OF BACKGROUND LEVELS AT FL350 AND ABOVE. THE CURRENT EVENT HAS PEAKED AND LEVELS ARE SLOWLY RETURNING TO BACKGROUND LEVELS. SEE WWW.SPACEWEATHERPROVIDER.WEB</b>
<b>NXT ADVISORY:</b>	<b>NO FURTHER ADVISORIES</b>

<b>(communication header)</b>	
<b>SWX ADVISORY</b>	
<b>DTG:</b>	<b>20161108/0100Z</b>
<b>SWXC:</b>	<b>(to be determined)</b>
<b>SWX EFFECT:</b>	<b>GNSS MOD AND HF COM MOD</b>
<b>ADVISORY NR:</b>	<b>2016/1</b>
<b>OBS SWX:</b>	<b>20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +6 HR:</b>	<b>20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +12 HR:</b>	<b>20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +18 HR:</b>	<b>20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000</b>
<b>FCST SWX +24 HR:</b>	<b>20161109/0100Z NO SWX EXP</b>
<b>RMK:</b>	<b>LOW-LEVEL GEOMAGNETIC STORMING IS CAUSING INCREASED AURORAL ACTIVITY AND SUBSEQUENT MOD DEGRADATION OF GNSS AND HF COM AVAILABILITY IN THE AURORAL ZONE. THIS STORMING IS EXPECTED TO SUBSIDE</b>

Fuente: (RUTLEDGE, 2020).

A pesar de los avances y los sistemas disponibles, algunos acontecimientos siguen siendo imprevisibles. Las pérdidas de comunicación en HF, que se producen en las regiones diurnas de la Tierra, ocurren sin previo aviso. Las radiaciones más intensas, causadas por las tormentas solares, pueden predecirse, pero a veces son rápidas y golpean a las personas y los sistemas sin preparación previa (OACI, 2019a).

## 6 NUEVAS INICIATIVAS

Los avances en el estudio de la meteorología espacial y sus efectos en las tecnologías siguen caminos científicos y técnicos. La NASA y la ESA son agencias que profundizan en la línea de estudio científico, aportando conocimientos más teóricos, como a través de las misiones espaciales MMS y LaGrange. En Brasil,

la cooperación del INPE con DECEA constituye la principal fuente de investigación. A partir de estos conocimientos se producen avances en el ámbito técnico, como la creación del sistema SBAS DFMC de GNSS.

En la actualidad, el sistema de posicionamiento utilizado en una aeronave consta de una constelación de satélites y una frecuencia de señal. Para la constelación GPS se utiliza la frecuencia denominada L1 (1575 MHz), y debe haber al menos 4 satélites para el aforo tridimensional de la posición del receptor (OACI, 2017). Este sistema se utiliza en PBN (*Performance Based Navigation*), ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) y TAWS (*Terrain Avoidance Warning System*).

El sistema DFMC (*Dual-Frequency Multi-Constellation*) es un sistema futuro que pretende aumentar la robustez del actual GNSS SBAS. Añadirá una frecuencia al sistema, denominada L5 (1176,45 MHz), y permitirá la integración

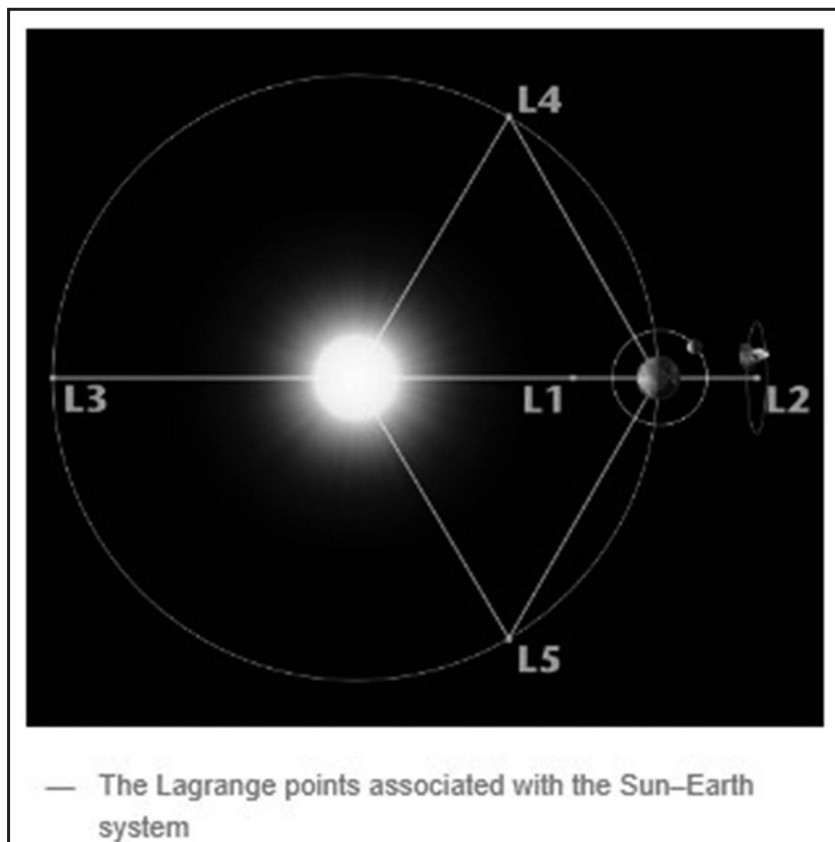
entre las constelaciones GPS, Galileo, GLONASS y BeiDou. Mediante estas implementaciones, este sistema contribuirá a proporcionar una mayor resistencia contra el centelleo ionosférico y a mejorar la geometría entre los satélites. El DFMC está en proceso de certificación. La OACI ha desarrollado el concepto de operación (CONOPS) del sistema, que describe cómo se utilizará en la aviación en los próximos años. Está previsto que los respectivos SARP se validen en el año 2022 (OACI, [s.f.]; RICARD, 2019).

En la línea científica, la misión espacial MMS de la NASA está compuesta por 4 aeronaves que navegan en formación por la magnetosfera, la región donde se encuentra el campo magnético de la Tierra. Su lanzamiento tuvo lugar en marzo de 2015 con el objetivo de estudiar el fenómeno de la reconexión magnética. Las 4 aeronaves forman un esquema piramidal que permite la visualización tridimensional del fenómeno magnético. A partir del éxito de la visualización, se estudia con mayor claridad lo que ocurre, con el objetivo de evaluar y evolucionar el conocimiento predictivo sobre la reconexión magnética (NASA, [s.f.]).

La misión *LaGrange* es un futuro concepto de exploración científica de la Agencia Espacial Europea

(ESA). En la página web de presentación del concepto (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]), la agencia afirma: “Las observaciones y las previsiones sólo son posibles si se dispone constantemente de suficientes datos de observación, mediante el suministro de información climática espacial precisa y oportuna”<sup>9</sup> (nuestra traducción). La misión tiene como objetivo los puntos de *LaGrange* del espacio, tal y como se presenta en la figura 6. Se trata de puntos en los que las fuerzas de gravedad del Sol y de la Tierra interactúan sobre ellos, de modo que crean estabilidad, es decir, en estas posiciones los objetos no orbitan. Hay cinco puntos con esta característica en la heliosfera, identificados como L1, L2, L3, L4 y L5. La misión consistirá en colocar aviones en los puntos L1 y L5. El objetivo del primer puesto es mejorar las observaciones interplanetarias para evaluar la velocidad de los vientos solares, sus densidades, temperatura y presión dinámica. El objetivo de la aeronave en la posición L5 será complementar las observaciones de la aeronave en L1, observando la propagación de las nubes de plasma emitidas por el Sol en un mejor ángulo, así como observar la cara del Sol precedente, antes de que se enfrente a la Tierra.

**Figura 6** - Diagrama de las posiciones de *LaGrange*.



Fuente: (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]).

<sup>9</sup> Traducción de: “Providing timely and accurate space weather information, nowcasts and forecasts is possible only if sufficient observation data are continuously available.”

## 7 CONCLUSIÓN

Se prevé que el sistema de navegación GNSS sea el principal recurso de la PBN (*Performance Based Navigation*) en 2030 (EUROCONTROL, 2020). En las reuniones de la OACI se definen los planes futuros del sistema, que incluyen el aumento continuo de la disponibilidad, la predicción y la integridad del posicionamiento (SMAOUI, 2017). Estas mejoras son necesarias ya que el espacio aéreo, en condiciones de no contingencia, es cada vez más denso y requiere una mayor fiabilidad.

Una de las principales amenazas para la precisión del GNSS tiene un origen complejo y es difícil de predecir. Los daños que se pueden causar en las más diversas redes tecnológicas son inconmensurables, ya que nunca se ha repetido un suceso como el de 1859. Sin embargo, es conocido entre los investigadores que los daños materiales serían graves, afectando profundamente la cuestión financiera de los países (BAKER et al., 2013; BERDERMANN et al., 2018; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Los sistemas de predicción actuales todavía no son fiables, ya que hay fenómenos solares que no son predecibles (OACI, 2019a). Durante los citados eventos de 2017, por ejemplo, la aviación no estaba al tanto, y solo recibió la alerta de que dicho servicio no estaba disponible (HF y LPV) (REDMON et al., 2018). La Unión Europea está exigiendo en los próximos años que los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP) creen procedimientos de contingencia en caso de que falle el único medio de navegación global común (GNSS). Estos procedimientos fueron ampliamente discutidos en EUROCONTROL (2020), detallando las acciones de reversión a los medios convencionales, como el VOR/DME, además de los procedimientos de responsabilidad del ATC. El documento ayudará a la creación de un segundo documento futuro, pero con carácter normativo.

Las nuevas misiones espaciales dirigidas por la NASA y la ESA pueden suponer un gran avance

teórico sobre el tema, mejorando las capacidades de predicción. Sin embargo, los nuevos estudios son recientes y otros están aún por llegar, como los de MMS y *LaGrange*, respectivamente.

Para aumentar la seguridad y reducir los daños que puede causar la meteorología espacial, es necesario que los principales usuarios de las tecnologías amenazadas, principalmente los aviadores, estén más concienciados sobre esta naturaleza. Existe el recurso entre algunas fuentes, como BERDERMANN et al. (2018), REDMON et al., (2018) y HAPGOOD, (2017, p. 3), quienes discuten sobre la necesidad de la mejora continua en el aprendizaje y el conocimiento predictivo sobre el tema.

Brasil no dispone de un sistema de mitigación de los efectos ionosféricos similar al SBAS y GBAS para la aviación. Sin embargo, hay varias investigaciones y proyectos, como los del INPE y el INCT, que pueden aportar nuevos métodos de posicionamiento a Brasil en el futuro.

En 2017, hubo una reunión entre DECEA y representantes de la FAA, el Boston College y las empresas Mirus, Honeywell, Boeing y las aerolíneas, para discutir y diseñar la certificación de GBAS en el aeropuerto Galeão de Río de Janeiro (GALEMBECK, 2017). En el trabajo de SURCO ESPEJO et al., (2020), se simuló la precisión de la fase de aproximación y aterrizaje de una aeronave en el aeropuerto de Galeão, en Río de Janeiro. Se llegó a la conclusión de que el sistema de aumento GBAS instalado en el lugar no puede certificarse para su uso, debido a los efectos ionosféricos ecuatoriales presentes, que reducen su precisión.

La ubicación geomagnética brasileña contribuye a que se produzcan mayores efectos negativos si se producen fenómenos meteorológicos espaciales (SPOGLI et al., 2013). Por lo tanto, la concienciación al respecto en el país debería existir con igual o mayor rigor, teniendo en cuenta los hechos. La falta de conocimiento sobre el tema existe en Brasil, así como en toda la sociedad, incluidos los usuarios de tecnologías susceptibles. Para HAPGOOD, (2017), este es un gran reto a resolver.



## REFERENCIAS

- AGUIAR, Claudinei. Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS. **Aleph**, [S. l.], 2010.
- BAKER, D. N.; LI, X.; PULKKINEN, A.; NGWIRA, C. M.; MAYS, M. L.; GALVIN, A. B.; SIMUNAC, K. D. C. A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios. **Space Weather**, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 585–591, 2013. DOI: 10.1002/swe.20097. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/swe.20097>. Acesso em: 16 jun. 2020.
- BARBOSA, Cássio. **Os 156 anos de Carrington I G1 - Ciência e Saúde - Observatório**. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/blog/observatorio/post/os-156-anos-de-carrington.html>. Acesso em: 16 maio. 2020.
- BERDERMANN, J.; KRIEGEL, M.; BANY, D.; HEYMANN, F.; HOQUE, M. M.; WILKEN, V.; BORRIES, C.; HESSELBARTH, A.; JAKOWSKI, N. Ionospheric Response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and Its Implication for Navigation Services Over Europe. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 10, p. 1604–1615, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001933. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2018SW001933>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- BLASKOVIC, Teo. **The Sweden Case: Airplanes disappear from radars due to “solar storm.”** 2015. Disponível em: <https://watchers.news/2015/11/05/the-sweden-case-aircrafts-disappear-from-radars-due-to-solar-storm/>. Acesso em: 23 set. 2021.
- BOWHILL, S. A. Introduction to ionospheric physics. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 301, 1971. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90209-1.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Portaria nº 335, de 25 de janeiro de 2021**. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=515&pagina=5&data=28/01/2021>.
- COSTER, Anthea; KOMJATHY, Attila. Space Weather and the Global Positioning System. **Space Weather**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. n/a-n/a, 2008. DOI: 10.1029/2008sw000400.
- DENNIS, Jed; HEMSTAD, Mark. Selecting among Dual Frequency Multiple Constellation (DFMC) Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS) during En-route and Non-Precision Flight Operations. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 65–83, 2016. DOI: 10.1002/navi.127.
- DOHERTY, Patricia; COSTER, Anthea J.; MURTAGH, William. Space weather effects of October–November 2003. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 267–271, 2004. DOI: 10.1007/s10291-004-0109-3.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **The “no name” space weather mission**. [s.d.]. Disponível em: [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Lagrange\\_mission2](https://www.esa.int/Safety_Security/Lagrange_mission2). Acesso em: 6 jun. 2020.
- EUROCONTROL. **European GNSS Contingency/ Reversion Handbook for PBN Operations**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [www.trainingzone.eurocontrol.int](http://www.trainingzone.eurocontrol.int). Acesso em: 28 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **SBAS Interoperability**. 2011. Disponível em: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Interoperability](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Interoperability). Acesso em: 31 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **Space Weather Office**. [s.d.]. Disponível em: [http://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Weather\\_Office](http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Weather_Office). Acesso em: 2 jun. 2020.
- FAA. **Satellite Navigation - WAAS - How It Works**. 2019. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/). Acesso em: 27 maio. 2020.
- GALEMBECK, Glória. **Cooperação entre Brasil e Estados Unidos fomenta pesquisa de GBAS para baixas latitudes**. 2017. Disponível em: [https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg\\_noticia&materia=cooperacao-entre-brasil-e-estados-unidos-fomenta-pesquisa-de-gbas-para-baixas-latitudes](https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=cooperacao-entre-brasil-e-estados-unidos-fomenta-pesquisa-de-gbas-para-baixas-latitudes). Acesso em: 8 set. 2020.
- GOSLING, J. T. The solar flare myth. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 98, n. A11, p. 18937–18949, 1993. DOI: 10.1029/93JA01896. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/93JA01896>.
- HAPGOOD, Mike. **Space Weather**. [S.l.]: IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/978-0-7503-1372-8. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1372-8>.
- HESSE, M.; CASSAK, P. A. Magnetic Reconnection in the Space Sciences: Past, Present, and Future. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 125, n. 2, p. 1–24, 2020. DOI: 10.1029/2018ja025935.
- HOCKEY, Thomas; HODGSON, Richard. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. [S.l.]: Springer New York, 2014. p. 989–989. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7\_9075.

Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7\\_9075](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9075). Acesso em: 23 jun. 2020.

IBGE. **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=sobre>. Acesso em: 25 ago. 2020.

ICAO. **Doc 9849 AN/457 - Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual**. Third ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **MID Doc 011 - Guidance on GNSS implementation in the MID region**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.icao.int/MID/MIDANPIRG/Pages/MID-Docs.aspx>.

ICAO. **DOC 10100 - Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation**. First ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **ICAO Space Weather Advisories**. Singapore. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/mission\\_support/ato\\_intl/cross\\_polar/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/). Acesso em: 3 jun. 2020b.

ICAO. **DFMC SBAS SARPS - Baseline draft for validation**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/DFMC-SBAS.aspx>. Acesso em: 8 jun. 2020.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Presentation**. [s.d.]. Disponível em: <http://lisn.igp.gob.pe/about/detail/presentation/>. Acesso em: 7 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O Projeto**. [s.d.]. Disponível em: <http://inct-gnss-nsaer.fct.unesp.br/pt/projeto.php>. Acesso em: 6 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Relatório Descritivo - EMBRACE**. São José dos Campos. Disponível em: [http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA\\_EMBRACE.pdf](http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA_EMBRACE.pdf). Acesso em: 23 set. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **O Programa Embrace**. [s.d.]. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-embrace/>. Acesso em: 30 jul. 2020.

KOMJATHY, Attila; SPARKS, Lawrence; MANNUCCI, Anthony J.; XIAOQING, Pi. An assessment of the current waas ionospheric correction algorithm in the South American region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 50, n. 3, p. 193–204, 2003. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2003.tb00329.x.

MATSUOKA, Marcelo Tomio; DE OLIVEIRA CAMARGO, Paulo; BATISTA, Inez Staciarini. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região Brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de Outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodesicas**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 315–334, 2006.

MENK, Frederick W.; WATERS, Colin L. **Magnetoseismology**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. DOI: 10.1002/9783527652051. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527652051>.

NASA. **The Magnetospheric Multiscale Mission**. [s.d.]. Disponível em: [https://mms.gsfc.nasa.gov/about\\_mms.html](https://mms.gsfc.nasa.gov/about_mms.html). Acesso em: 5 jun. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Coronal Mass Ejections**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>. Acesso em: 30 jul. 2020a.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Galactic Cosmic Rays**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/galactic-cosmic-rays>. Acesso em: 13 ago. 2020b.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA Space Weather Scales**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. Acesso em: 13 ago. 2020c.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2008. DOI: 10.17226/12507. Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog/12507>.

REDMON, R. J.; SEATON, D. B.; STEENBURGH, R.; HE, J.; RODRIGUEZ, J. V. September 2017's Geoeffective Space Weather and Impacts to Caribbean Radio Communications During Hurricane Response. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 9, p. 1190–1201, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001897.

RICARD, Nathalie. **Dual Frequency Multiconstellation SBAS Key Concepts**. Rome. Disponível em: [https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new\\_egnos\\_ops/sites/default/files/EWS19%20GSA%20-%20Introduction%20to%20EGNOS%20DFMC%20services.pdf](https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/EWS19%20GSA%20-%20Introduction%20to%20EGNOS%20DFMC%20services.pdf). Acesso em: 8 jun. 2020.

RUTLEDGE, Bob. **Space Weather Update**. Boulder, CO. Disponível em: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/mission\\_support/ato\\_intl/cross\\_polar/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/).

SHEEHAN, William. Carrington, Richard Christopher. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 373–375. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7\_9034. Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7\\_9034](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9034). Acesso em: 23 jun. 2020.

SMAOUI, Mohamed. **ICAO Global Provisions and Regional Developments related to GNSS**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 14 jun. 2020.

SPOGLI, Luca; ALFONSI, Lucilla; ROMANO, Vincenzo; DE FRANCESCHI, Giorgiana; JOAO FRANCISCO, Galera Monico; HIROKAZU SHIMABUKURO, Milton; BOUGARD, Bruno; AQUINO, Marcio. Assessing the GNSS scintillation climate over Brazil under increasing solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 105–106, n. November 2018, p. 199–206, 2013. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.003.

SURCO ESPEJO, Teddy M.; COSTA, Emanuel; DE MORAES, Alison O.; DE PAULA, Eurico R.; FRANCISCO GALERA MONICO, João. **Ionospheric Effects on Signal in Space and on Ground Based Augmentation System**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 30 ago. 2020.

TAKAHASHI, Directions Kazue; CHI, Peter J.; DENTON, Richard E.; EDS, Robert L. Lysak;

ABERCROMBIE, Faulting Rachel; MCGARR, Art; HYNDMAN, Processes David W.; DAY-, Frederick D. Geophysical Monograph Series. [S. l.], p. 1–4, 2015. DOI: 10.1029/164GM03.

TOUSEY, R. The solar corona. In: SPACE RESEARCH CONFERENCE 1973, **Anais [...]**. [S.l.: s.n.] p. 713–730.

UNITED NATIONS. **Preliminary draft report and proposed candidate guidelines of expert group C: Space Weather**. Vienna. Disponível em: [https://www.unoosa.org/pdf/limited/c1/AC105\\_C1\\_2013\\_CRP13E.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/limited/c1/AC105_C1_2013_CRP13E.pdf). Acesso em: 23 set. 2021.

WEBB, David F. The solar cycle variation of the rates of CMEs and related activity. **Advances in Space Research**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 37–40, 1991. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90086-Y. Acesso em: 17 jun. 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Aeronautical Meteorology Programme**. [s.d.]. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/programmes/aeronautical-meteorology-programme>. Acesso em: 1 jun. 2020.

YOON, Moonseok; KIM, Dongwoo; PULLEN, Sam; LEE, Jiyun. Assessment and mitigation of equatorial plasma bubble impacts on category I GBAS operations in the Brazilian region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 66, n. 3, p. 643–659, 2019. DOI: 10.1002/navi.328.

# Regulação para o ADS-B<sup>1</sup> no espaço aéreo brasileiro

*Regulation for ADS-B<sup>1</sup> in Brazilian airspace*

*Regulación para ADS-B<sup>1</sup> en el espacio aéreo brasileño*

Raul Sandoval Cerqueira <sup>1</sup>

## RESUMO

A Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) é uma tecnologia bastante conhecida, padronizada internacionalmente e reconhecida como uma forma barata de se realizar vigilância similar ao radar, inclusive sobre locais onde a vigilância por radar convencional não é adequada. A implementação desta tecnologia significa a introdução de novas configurações de espaço aéreo monitorado e novas capacidades operacionais. A regulamentação do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) deverá prover processos adequados para as operações da aviação civil de forma a fazer frente a esta etapa evolutiva. Este estudo cujo objetivo é contribuir para o fortalecimento da regulação que dará suporte ao ADS-B no Brasil foi desenvolvido com base no método hipotético-dedutivo, subsidiado por revisão bibliográfica, entrevistas não estruturadas do tipo focalizadas, estudos de casos de regulação internacional e estudo de caso de implantação nacional do ADS-B. Resultou na identificação de hipóteses de melhorias regulatórias com impacto positivo à implementação do ADS-B no espaço aéreo nacional, a serem submetidas à verificação e discussão posteriores.

**Palavras-chave:** ADS-B. Regulação. Vigilância. Aviação civil.

## ABSTRACT

*The Automatic Dependent Broadcasting Surveillance (ADS-B) is a well-known technology, internationally*

*standardized and recognized as an inexpensive way to carry out radar-like surveillance, even in places where conventional radar surveillance is not adequate. The implementation of this technology means the introduction of new monitored airspace configurations and new operational capabilities that should be understood by the aeronautical community and the regulation of the Department of Airspace Control (DECEA) and the National Civil Aviation Agency (ANAC) should provide adequate processes for civil aviation operations in order to face this evolutionary stage, improving concepts and adapting procedures. This study, whose objective is to contribute to the strengthening of the regulation that will support ADS-B in Brazil, was developed with a multi-methodological approach, including a literature review, expert consultation, international benchmark and case study, and resulted in the identification of 15 possible regulatory improvements with a positive impact on the implementation of ADS-B in national airspace.*

**Keywords:** ADS-B. Regulation. Surveillance. Civil Aviation.

## RESUMEN

*La vigilancia de Radiodifusión Dependiente Automática (ADS-B) es una tecnología bien conocida, estandarizada internacionalmente y reconocida como una forma económica de llevar a cabo vigilancia tipo radar, incluso en lugares donde la vigilancia por radar convencional no es adecuada. La implementación de*

I. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Rio de Janeiro/RJ - Brasil. Mestrado em Advanced Master Air Navigation System Engineering and Operations pela Ecole Nationale de l'Aviation Civile(ENAC). E-mail: raul.cerqueira@anac.gov.br  
Recebido: 18/08/21 Aceito: 14/10/21

<sup>1</sup> ADS-B: Vigilância automática dependente por radiodifusão (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*).



*esta tecnología significa la introducción de nuevas configuraciones del espacio aéreo monitoreado y nuevas capacidades operativas que deben ser entendidas por la comunidad aeronáutica y la regulación del Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA) y la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC) debe proporcionar procesos adecuados. para las operaciones de la aviación civil para afrontar esta etapa evolutiva, mejorando conceptos y adaptando procedimientos. Este estudio, cuyo objetivo es contribuir al fortalecimiento de la regulación que apoyará a ADS-B en Brasil, fue desarrollado con un enfoque multimetodológico, incluyendo revisión de literatura, consulta de expertos, benchmark internacional y estudio de caso, y resultó en el identificación de 15 posibles mejoras regulatorias con impacto positivo en la implementación de ADS-B en el espacio aéreo nacional.*

**Palabras clave:** ADS-B. Regulación. Vigilancia. Aviación Civil.

## 1 INTRODUÇÃO

A implementação da Vigilância Automática Dependente por Radiodifusão (ADS-B) no Brasil demanda que a regulação nacional seja aprimorada para acompanhar esse passo evolutivo e prover as condições necessárias para o uso seguro e eficiente dessa tecnologia.

Frente a esse problema, este estudo tem por objetivo identificar possibilidades de melhorias na regulamentação brasileira relativas à implementação do ADS-B.

Com base na metodologia hipotético-dedutiva acompanhada de técnicas de pesquisa, tais como revisão bibliográfica, entrevista não estruturada do tipo focalizada e estudos de casos, foram elaboradas tais hipóteses de melhoria da regulação.

## 2 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com base no método hipotético-dedutivo (LAKATOS, MARCONI, 2003), o qual foi subsidiado por múltiplas técnicas de pesquisa.

Inicialmente, por meio de revisão bibliográfica, buscou-se conhecimento para a identificação do problema e proposição de conjecturas para endereçá-lo.

Em seguida, procedeu-se a realização de entrevista não-estruturada do tipo focalizada (LAKATOS, MARCONI, 2003) com especialistas no assunto, seguido de estudo de casos de regulação internacional e estudo de caso de implantação do sistema em espaço aéreo nacional.

Tal abordagem permitiu o aprimoramento das conjecturas iniciais, chegando-se às hipóteses propostas

para a melhoria da regulação nacional no tocante ao uso do ADS-B no espaço aéreo nacional.

Observa-se que no âmbito deste trabalho, tais hipóteses não foram submetidas a testes que permitam corroborá-las e, por isso, entende-se que essas seriam úteis como subsídios iniciais para os processos de análise de impacto regulatório dos órgãos pertinentes.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Histórico

A evolução do uso da Comunicação por Enlace de Dados (*Data Link*) para fins de aviação vem desde a década de 1970, com os primeiros aplicativos ACARS - *“Aircraft Communication Addressing and Recording System”*. (SPITZER, et al., 2014).

Em 1983, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) estabeleceu o Comitê Especial sobre Futuros Sistemas de Navegação Aérea (FANS) para estudar o uso de *“Automatic Dependent Surveillance”* (ADS) para a aviação civil. (SPITZER, et al., 2014).

Em 1998, a RTCA publicou o documento DO 242, definindo os Padrões Mínimos de Desempenho do Sistema de Aviação de tecnologia ADS-B (MASPS), e em 2000, a RTCA publicou o documento DO 260, estabelecendo os Padrões Mínimos de Desempenho Operacional (MOPS) para o equipamento ADS-B aerotransportado de 1090 MHz. (RTCA, 1998, 2000).

Três tecnologias de transmissão foram desenvolvidas e encontram-se padronizadas pela OACI para ADS-B: UAT - *Universal Access Transceiver* (OACI Doc. 9861); VDL4 - *VHF Digital Link Mode 4* (OACI Doc. 9816); 1090 MHz ES (OACI Doc. 9871), contudo na Recomendação 1/7 da “AN Conf / 11” em 2003, o Conselho da OACI recomendou o ADS-B 1090 MHz ES como o padrão internacional a ser usado. (OACI, 2012, 2016).

Devido ao desenvolvimento dos padrões existem hoje em uso três versões distintas de ADS-B baseadas em 1090 MHz ES.

Adicionando passos importantes no caminho evolutivo do ADS-B, a AIREON, empresa criada em 2012, em parceria com a empresa Iridium, hospedou seus receptores ADS-B especialmente projetados em 66 satélites da *Iridium Next Constellation*, para fornecer cobertura ADS-B global (AIREON, 2019b, 2020).

### 3.2 Conceitos e definições relativos a ADS-B

A fim de estabelecer um padrão internacional para o conceito do ADS-B, no ANEXO 11, a OACI definiu ADS-B como:

Vigilância dependente automática por Radiodifusão (ADS-B). Um meio pelo qual aeronaves, veículos de aeródromo e outros objetos podem transmitir e / ou receber automaticamente dados como identificação, posição e dados adicionais, conforme apropriado, em um modo de transmissão por meio de um enlace de dados. (OACI, 2016, p. 1-5, tradução nossa).

Considerando as possibilidades a seu respeito, é importante destacar os dois conceitos distintos: ADS-B OUT, a capacidade primária, meio pelo qual a aeronave transmite suas informações de maneira padronizada e ADS-B IN, a capacidade de um veículo ou aeronave de receber e processar a informação veiculada por outrem. (OACI, 2014, p. 1-1, tradução nossa).

O ADS-B OUT requer a implementação de algum tipo de capacidade de recepção para obter resultados práticos, que pode ser terrestre, satélite ou ADS-B IN. Além disso, como a informação é originada pela aeronave transmissora, a quantidade de aeronaves equipadas no espaço aéreo é crítica para diversas aplicações ADS-B.

O diagrama na Figura 1 resume o sistema ADS-B considerando o padrão 1090 MHz ES.

Como características comuns a todas as configurações de ADS-B 1090MHz ES implementadas, é interessante destacar:

I. Informação transmitida

Os transponders ADS-B transmitem parâmetros da aeronave, como identificação (endereço de 24 bits e identificação de voo de acordo com o plano de voo), posição (latitude, longitude e altitude de pressão), velocidade tridimensional e integridade da posição, por meio de dados de modo de transmissão link em 1090 MHz. (CANSO, 2016, p. 13, tradução nossa).

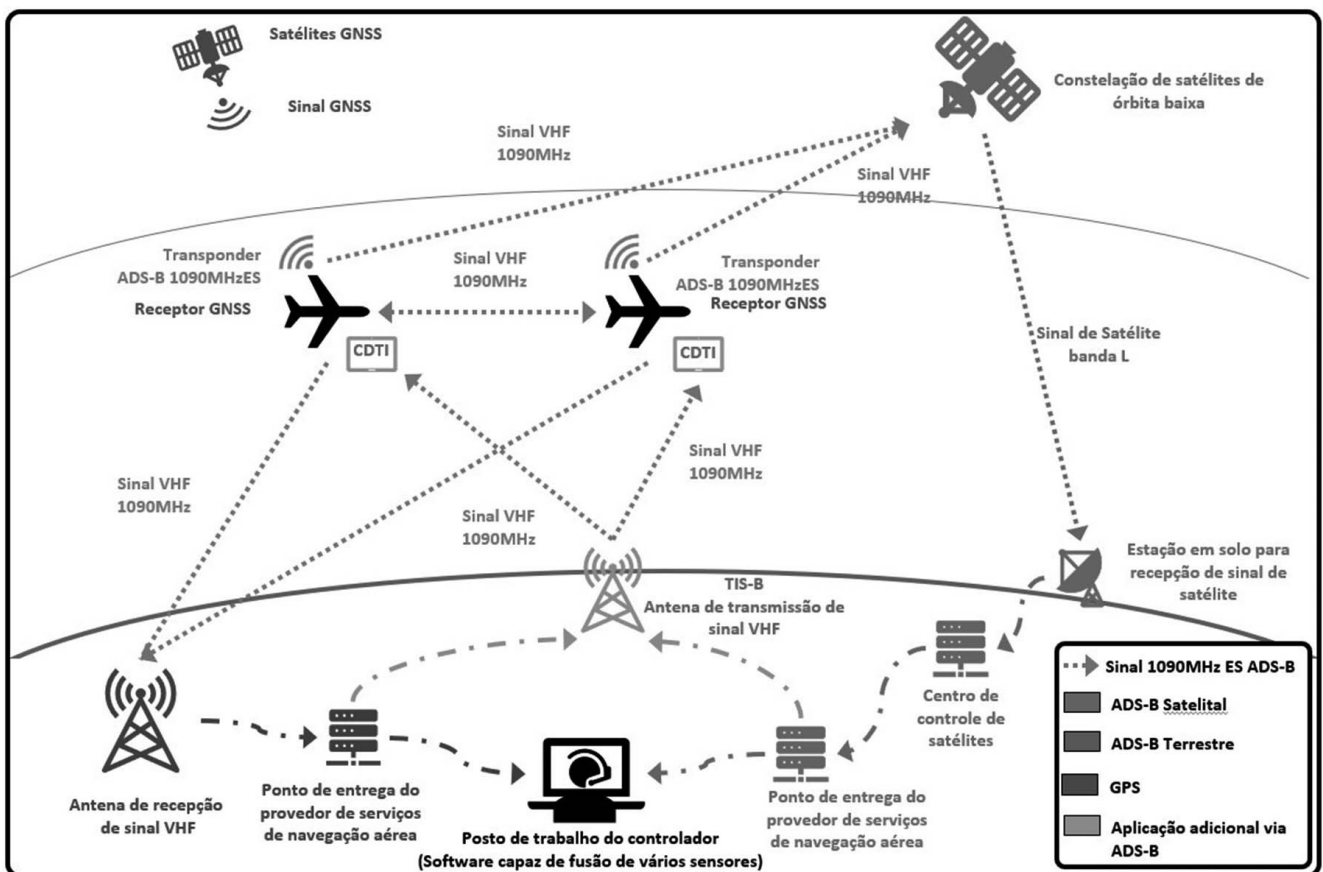
II. Tempo de atualização da transmissão

Duas vezes por segundo, geralmente referido como a taxa de atualização ADS-B, é a taxa de atualização para as informações de posição. (RTCA, 2000).

III. Aviônicos mínimos exigidos:

Sistema GNSS; Transponder 1090MHz ES; Quando em um sistema ADS-B baseado em satélite: transmissor de classe A1 e antena de aeronave de montagem superior. (AIREON, 2019b).

Figura 1 - Sistema ADS-B baseado em transponder 1090MHz ES.



Fonte: Adaptado de AIREON (2019a), RTCA (2002) e CANSO (2016).

IV. Infraestrutura mínima necessária:

Antena e receptor simples conectados a *links* de comunicação que entregam a informação ao *display* de situação que a mostra de maneira semelhante ao radar. (OACI, 2012).

O sistema baseado em satélite não requer infraestrutura de solo e as informações são entregues em um ponto de entrega especificado. (AIREON, 2019b).

V. Capacidades mínimas de vigilância

Separação de no mínimo cinco milhas náuticas (5 NM), sujeito ao cumprimento de certas condições.

Extensão da cobertura de vigilância para baixas altitudes. (OACI, 2012).

3.3 ADS-B na América Latina

Na estrutura multicamadas do Plano Global para a Navegação Aérea da OACI (GANP), Doc 9750 (OACI, 2019b), a terceira camada é o nível Regional. No escritório regional para a América Latina (SAM) a estratégia de implantação do ADS-B prevê abrangência de áreas em rota e terminais, envolvendo usuários e prestadores de serviço e estará concluída até 2023. (OACI, 2017a).

Os resultados alcançados em cada Estado contratante até 2019 estão resumidos na Figura 2.

Figura 2 - Situação da implementação de ADS-B na América Latina.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das informações disponíveis em OACI (2019a).

Complementarmente, foi realizado estudo sobre a possibilidade de se prover o ADS-B via satélite distribuindo-se o sinal por meio da rede digital de comunicações (REDDIG) existente na região e concluiu-se que seria possível de maneira econômica e eficiente (OACI, 2018).

Nesse estudo foi apresentada comparação de custos estimada para os diferentes sistemas de vigilância na região, o que pode ser observado na Tabela 1.

### 3.4 ADS-B no Brasil

Especificamente, no que se refere à implantação do ADS-B no Brasil, um resultado factual alcançado foi a implantação de um espaço aéreo totalmente operacional restrito apenas para aeronaves equipadas com ADS-B na TMA Macaé, Bacia de Campos. (OACI, 2019a).

Em 2017, o plano de implantação do ADS-B brasileiro previa a instalação para baixa altitude nas bacias oceânicas e a instalação de 62 estações terrestres, padrão RTCA DO 260, DO 260A e DO 260B, para cobertura do espaço aéreo continental abrangendo áreas homogêneas ATM e principais fluxos de tráfego aéreo. Além disso, previa-se que isso seria feito até 2021 e sem mandatos, dividido em 04 fases conforme pode ser visto na Figura 3. (OACI, 2017a).

No entanto, com o advento do ADS-B baseado no espaço, esse plano de implementação está sendo revisto e a nova estratégia ainda não foi publicada.

Um passo importante nessa direção foi a integração bem-sucedida dos dados ADS-B satelital no *software* utilizado pelo DECEA em suas rotinas de vigilância. (AIREON, 2019a).

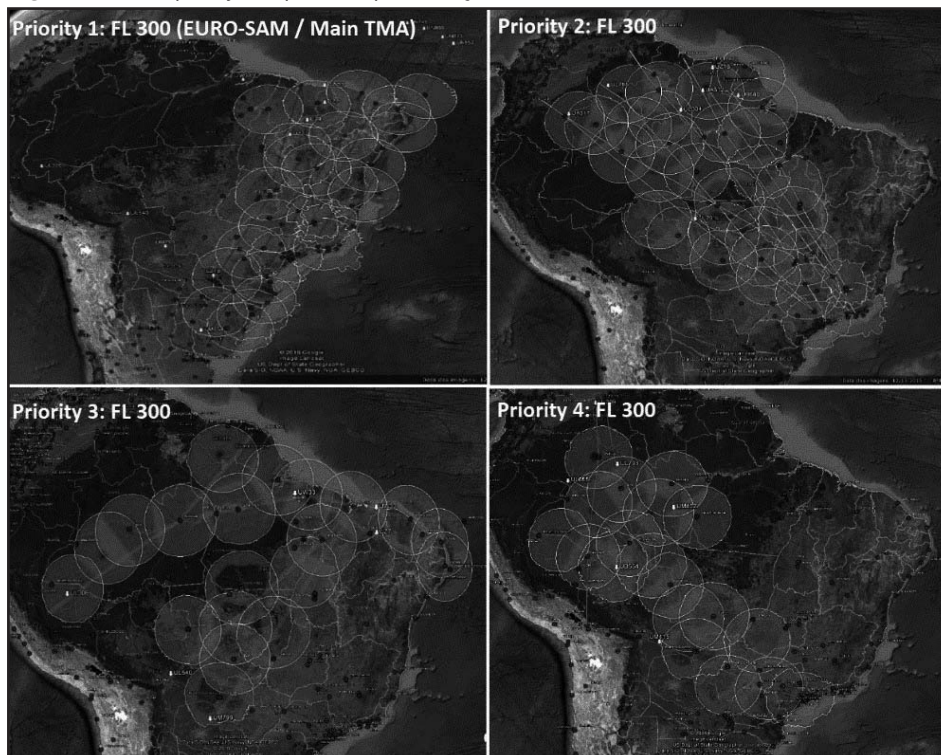
**Tabela 1** - Comparação de custo anual do sistema.

	% de cobertura		Custo anual / cobertura		
	ADS-B Sat.	SSR	ADS-B Sat.	SSR	ADS-B Terr.*
FL 100	100	27,86	0,53	4,25	1,27
FL 150	100	35,01	0,53	3,38	1,01
FL 250	100	46,26	0,53	2,56	0,77

\* Um número fictício de estações ADS-B terrestre foi adotado igual a locação das instalações de SSR atual.

Fonte: OACI (2018).

**Figura 3** - Fases planejadas para a implementação do ADS-B.



Fonte: OACI (2017a).



Adicionalmente, a cooperação técnica Brasil e AIREON consiste em um plano de duas fases cujo objetivo é avaliar o desempenho do sistema no espaço aéreo brasileiro, analisando parâmetros como: precisão; latência; intervalo de tempo de atualização; erros de posicionamento; disponibilidade; continuidade; e a avaliação de diferentes configurações de antenas, entre outras. Embora esse plano esteja em suas etapas finais seus resultados ainda não estão disponíveis (FAGUNDES, 2020).

### 3.5 Regulação de ADS-B existente

O arcabouço institucional da aviação civil brasileira é composto por diversas instituições com funções específicas. Duas dessas instituições se complementam na definição da regulamentação da aviação civil, são elas o DECEA e a ANAC. Em relação à tecnologia ADS-B, por ser o DECEA a ANSP brasileira e também o regulador ATS, ele estabelece quase toda a regulamentação. No entanto, existe uma interface regulatória com a ANAC no que diz respeito a aeronavegabilidade e aos padrões de voo.

No âmbito do DECEA o ADS-B encontra-se mencionado nas normas:

- DCA 351-2 Concepção operacional ATM nacional (BRASIL, 2011);
- ICA 100 31 Requisitos dos serviços de tráfego aéreo (BRASIL, 2017c);
- ICA 100 37 Serviços de tráfego aéreo (BRASIL, 2019b);
- CIRCEA 121-7 Inspeção em voo para Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) (BRASIL, 2017a);
- MCA 64-3 Manual de coordenação de busca e salvamento aeronáutico (BRASIL, 2019a);
- MCA 100-11 Preenchimento dos formulários de plano de voo (BRASIL, 2017b);
- AIC 40-17 Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) na TMA Macaé (BRASIL, 2018b);
- AIC 47-18 Reestruturação de espaço aéreo da área de controle terminal (TMA) de Macaé com aplicação do sensor ADS-B, aumento da cobertura VHF, implementação do conceito de espaço aéreo exclusivo ADS-B e provimento de produtos meteorológicos a partir de EMS-A (BRASIL, 2018a).

No âmbito da ANAC, menção direta ao ADS-B aparece apenas no documento IS 21-013 B “Instruções para obtenção de aprovação de instalação de equipamentos

GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) stand alone para operações VFR e IFR” (BRASIL, 2016).

A estrutura básica para a regulação de padrões operacionais na ANAC é estabelecida pelo documento RBAC 091 – “Requisitos gerais de operação para aeronaves civis” (BRASIL, 2019c), o qual é alinhado às provisões contidas na norma norte americana “*Code of Federal Regulations – CFR, Title 14, Chapter I, Subchapter F, part 91*” que é chamada “*General Operating and Flight Rules*”, a qual é a norma onde os requisitos de obrigatoriedade do ADS-B foram definidos, em seus itens 91.225 e 91.227. (ESTADOS UNIDOS, 2020).

Mas, na norma brasileira, os itens correspondentes encontram-se marcados como “Reservado” e nenhum requisito foi definido. Por sua vez, no requisito 91.215 é estabelecida instrução que viabiliza o uso, mas não define padrão específico:

91.215 (b) Quando o tipo de operação e/ou o espaço aéreo requerer, a aeronave deve ser equipada com um transponder, com aprovação OTP (TSO), mantido conforme a seção 91.413 deste Regulamento.

## 4 ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A análise da regulação existente resultou na identificação de lacunas ou temas não abordados pelo arcabouço normativo atual e que podem ser objeto de melhoria com vistas a subsidiar a implantação do ADS-B no espaço aéreo nacional:

- Novos tipos de espaço aéreo com vigilância: Hoje, existe apenas um tipo de vigilância ATS nos espaços aéreos continentais brasileiros que é baseada em radar.
- Padrão do transponder e restrição a outros tipos: A regulamentação não deixa claro qual é o modelo exigido no espaço aéreo ADS-B brasileiro e, também, como devem se comportar os demais tipos de aeronaves equipadas ao entrar no espaço aéreo ADS-B brasileiro.
- Capacidades esperadas e requisitos e limitações correspondentes: Não está claro quais são as aplicações ADS-B esperadas e os correspondentes requisitos e limitações de desempenho do sistema, incluindo os equipamentos aerotransportados.
- Frota equipada: Não há um esforço contínuo para atingir um nível mais alto de equipamentos ADS-B na frota e isso é um problema para várias aplicações.
- Objetivos específicos para a implementação ADS-B: Ganhos de segurança e capacidade estão associados à implantação de ADS-B próximo

a aeródromos ou helipontos e até mesmo ao monitoramento do movimento do solo.

- Contratos de concessão de aeroportos como oportunidade: Ao longo das subseqüentes rodadas de concessões realizadas pelo Governo Federal Brasileiro, os contratos evoluíram. Uma vez que os contratos buscam o aumento da segurança e da capacidade dos aeroportos, seria uma oportunidade de introduzir a obrigatoriedade de instalação de ADS-B no aeroporto.
- ADS-B Satelital ou ADS-B Terrestre: Espera-se que o ADS-B Satelital alcance um desempenho melhor do que o radar, embora pior do que o ADS-B Terrestre na maioria dos casos, se a infraestrutura apropriada for fornecida.

## 5 OPINIÃO DE ESPECIALISTAS

Por meio de entrevista não-estruturada do tipo focalizada (LAKATOS, MARCONI, 2003) com 7 especialistas, sendo 1 da INFRAERO, 2 de empresas privadas, 2 do DECEA e 2 da ANAC, que ocupam posições estratégicas no assunto e possuem experiência na implantação de tecnologias para o gerenciamento do espaço aéreo nacional, foram obtidos comentários para os temas do problema e esses foram organizados e consolidados no texto resumido, conforme segue:

- Novos tipos de espaço aéreo com vigilância: o sistema deve identificar automaticamente o melhor sinal em cada fase do voo e fornecer a informação de forma homogênea, ao controlador e à tripulação, transparente para o controlador em termos de sensores, com novas funcionalidades e benefícios. A equipe técnica do DECEA precisará de capacitação e novas regras do DECEA e da ANAC serão necessárias.
- Padrão do transponder e restrição a outros tipos: O ES 1090MHz (0, 1 ou 2) utilizado na Baía de Campos pode ser o padrão, uma vez que o DECEA já está utilizando e é um padrão internacional. Mais sistemas agregam complexidade à implementação. Não há limite planejado para os parâmetros de qualidade do sinal.
- Capacidades esperadas e requisitos e limitações correspondentes: A implementação deve buscar eficiência de custos. Onde a cobertura do radar já é fornecida, uma condição seria a desativação do radar após a implementação. Os radares primários são uma preocupação de soberania e não devem ser desativados. Será uma vigilância de melhor precisão com

melhores taxas de tempo de atualização. Fornece serviço de vigilância para o usuário, incluindo baixa altitude em espaços aéreos oceânicos. Não há planos para TIS-B, FIS-B, ADS-R ou ferramentas de monitoramento.

- Frota equipada: As companhias aéreas serão equipadas, uma vez que novas aeronaves já são equipadas e há mandatos internacionais. Os operadores de carga podem ser um problema devido à sua frota envelhecida e a aviação geral pode ser um desafio ainda maior. Equipar a aeronave será facultativo, quem estiver melhor equipado utilizará o serviço. Atualmente não há informações sobre o percentual da frota que está equipada. Espera-se que os usuários reconheçam o sistema e isso defina seu futuro. Não há mandatos planejados, embora provavelmente seja necessário.
- Objetivos específicos para a implementação ADS-B: A vigilância estendida a cobertura para baixas altitudes nas bacias oceânicas, onde o movimento *off-shore* é intenso, é um objetivo específico a ser realizado. Para a superfície do aeroporto seria outra opção a utilização do sinal ADS-B. O DECEA é orientado pelas necessidades operacionais e estas moldarão o sistema.
- Contratos de concessão de aeroportos como oportunidade: Normalmente, a infraestrutura de gestão do tráfego aéreo não faz parte de um contrato de concessão e, para casos específicos, provavelmente seria benéfico incluir o DECEA nos processos de consulta inicial. São possíveis utilizações aeroportuárias, como SMGCS, mas cabe ao gestor do aeroporto decidir se a implementa. O DECEA define a ICA 63-18 como referência.
- ADS-B Satelital ou ADS-B Terrestre: Uma combinação é considerada a solução ideal. Existem situações específicas onde se pode beneficiar de cada tipo. As condições que definirão a extensão do uso de um ou de outro dependem do resultado dos testes que ainda estão em andamento. Viabilidade de instalação, qualidade do sinal, redundância e segurança justificam a utilização de ambos os sistemas. O atual plano de implementação do ADS-B considera o ADS-B Terrestre com sensores estrategicamente posicionados para fornecer serviços de vigilância acima do FL245, os volumes do espaço aéreo da TMA e até a água sobre as bacias oceânicas de Santos / Espírito Santo / Campos (já implementados). Os testes

ADS-B baseados em satélite estão em curso, em ambiente controlado, onde é possível integrar os dados baseados no espaço e os dados do radar e comparar os resultados. Sabe-se que o parâmetro de latência ficou pior do que o esperado, mas isso aconteceu devido a rede utilizada.

## 6 ESTUDOS DE CASOS DE REGULAÇÃO INTERNACIONAL

Três Estados foram selecionados como uma amostra da regulamentação internacional sobre ADS-B e seus principais aspectos estão resumidos na Tabela 2 e na Figura 4.

Um caso de referência quanto às possibilidades do sistema, os Estados Unidos da América (EUA), realizaram uma implantação robusta, com 650 antenas, cobertura total

do espaço aéreo, 02 tipos de transponder em uso, serviços adicionais como TIS-B, FIS-B e ADS-R e um mandato que está em vigor desde janeiro de 2020 abrangendo todos os usuários, incluindo a Aviação Geral. Estados Unidos (2020) e Estados Unidos (2015, 2018, 2019).

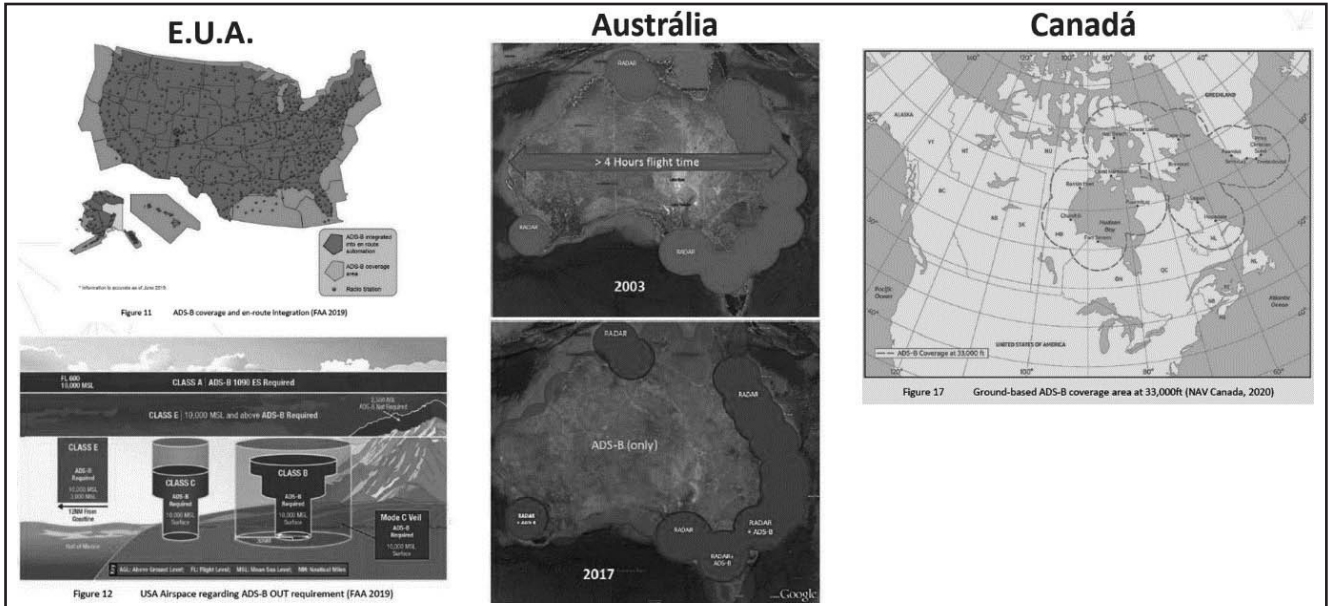
Destacando-se pela otimização dos sistemas de comunicação, navegação e vigilância alcançada com o uso do ADS-B, a Austrália também usa ADS-B em todo o seu espaço aéreo como sistema de vigilância primário desde 2009. Uma implementação otimizada com cerca de 70 antenas, cobertura total do espaço aéreo e 01 tipo de transponder em uso. Possibilitou desativar 179 auxílios à navegação. A Austrália também definiu questões regionais específicas no OACI DOC 7030 em relação ao ADS-B e tem mandatos para a aviação comercial, mas não para a Aviação Geral. Austrália (2015, 2020a, 2020b); OACI (2017b).

**Tabela 2** - Estudos de casos de regulação internacional - quadro resumo.

Aspecto	E.U.A.	Austrália	Canadá
Uso de ADS-B	Sistema de vigilância primário	Sistema de vigilância primário	Sistema de vigilância primário (onde disponível)
Cobertura	Todo o país	Todo o país	Espaço aéreo norte * (*plano para todo o país)
Infraestrutura (estações terrestres)	650	70	15
Serviços ADS-B adicionais	TIS-B; FIS-B; ADS-R; Sistema de monitoramento	Nenhum	Nenhum
Aplicações avançadas de ADS-B	CAVS; ITP; IM	Nenhum	Nenhum
Tipo de Transponder	1090 MHz ES 2 UAT 978MHz	1090 MHz ES 0,1 or 2	1090 MHz ES
Principais regulações	14 CFR § 91.225; 14 CFR § 91.227; AC 90 114 B; AC 20 165 B; SRT 47 Rev.4; TSO C166b; TSO C154c	CAO 20.18; AC 21-45; AC 91-23;	AC 700 009 e;
Mandato para equipar a frota	Sim	Sim	Não
Mandato inclui aviação geral	Sim	Não	-
Mandato inclui estrangeiros	Sim	Sim	-

**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir de informações dos documentos Estados Unidos (2015, 2018, 2020), Austrália (2015, 2020a, 2020b), NAVCanada (2020) e OACI (2017b).

Figura 4 - Representações do espaço aéreo de E.U.A., Austrália e Canadá quanto ao ADS-B.



Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de OACI (2017b).

Por fim, pelo porte de seu espaço aéreo e uso pioneiro da solução satelital a qual é uma possibilidade para o Brasil e também com um vasto espaço aéreo, o Canadá, utiliza o ADS-B desde 2010 no espaço aéreo nordeste, com um tipo de transponder e não tem mandato definido. É pioneiro no uso de ADS-B satelital, o qual está em teste para todo o país. NAVCanada (2020), Canadá (2011, 2018) e OACI (2017b).

7 ESTUDO DE CASO TMA ME

Trata-se do primeiro caso de implantação do sistema ADS-B no espaço aéreo brasileiro. Foi um projeto realizado de 2009 a 2018.

Alcançou resultados importantes e benéficos correspondentes:

- Separação IFR x IFR para aeronaves sob vigilância: 5NM (AIC 40/17);
- Atrasos reduzidos em 43% / Aumento na pontualidade dos voos em 16%;
- Busca e resgate mais eficazes (SAR);
- Redução do tempo de voo com economia de combustível estimada em até R\$ 1,31 milhão por ano; e
- 122 helicópteros equipados (CANSO, 2019).

O cenário inicial e após a implementação podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 - Principais aspectos do cenário do caso de implantação do ADS-B na TMA ME.

TMA ME		
Aspecto	Antes	Após
<b>Infraestrutura</b>	APP-Macaé: Radar PSR / SSR; 03 radios <i>offshore</i>	APP-Macaé: Radar PSR / SSR radar; 06 antenas ADS-B: 02 terra/ 04 <i>offshore</i> .
<b>Cobertura</b>	Setor 1: Radar; Setor 2: <u>Vigilância convencional</u> ; De 2,000' até FL145.	Setor 1 e 2: <u>Fusão ADS-B + Radar</u> ; Sector 3 a 8: ADS-B ( <u>sep. 5NM</u> ); Desde o solo até FL 145.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados extraídos de BRASIL (2018a, 2018b), OACI (2018a) e INFRAERO (2019a, 2019b).



## 8 PROPOSTAS PARA MELHORIA DA REGULÇÃO

Consolidando as informações obtidas na revisão, nas entrevistas, nos estudos de casos de regulação internacional, no estudo de caso da Terminal ME e

considerando as condições de implantação no Brasil, com vistas a endereçar os temas do problema da melhoria da regulação para subsidiar a implantação do ADS-B no espaço aéreo nacional, foram propostas as hipóteses identificadas na Tabela 3.

**Tabela 3** - Propostas de melhoria regulatória para o ADS-B.

Descrição	Motivação	Principais benefícios esperados
<b>Problema: Novos tipos de espaço aéreo com vigilância</b>		
<b>Proposta:</b> ADS-B obrigatório acima de FL290 e em espaço aéreo oceânico		
Estabelecer obrigatoriedade de que a aeronave esteja equipada quando acima de FL290 e em espaço aéreo oceânico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir regra clara para exigir o equipamento ADS-B visando a segurança operacional;</li> <li>Reduzir o esforço para a implementação: aeronaves melhor equipadas circulam no espaço aéreo RVSM (acima de FL290); Tráfego <i>off-shore</i> tem capacidade de promover a instalação de ADS-B nas aeronaves;</li> <li>Prover condições para novas funcionalidades e benefícios inerentes ao sistema ADS-B.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimizar interferências de aeronaves não equipadas em espaços aéreos onde os serviços ADS-B forem providos;</li> <li>Prover serviços ADS-B em uma porção do espaço aéreo brasileiro, com 100% das aeronaves usuárias equipadas;</li> </ul>
<b>Proposta:</b> Documento específico sobre ADS-B		
Elaborar documento específico contendo todos os aspectos de padrão de voo e aeronavegabilidade relativas ao ADS-B previstos para o uso no espaço aéreo nacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promover a conformidade do sistema;</li> <li>Facilitar a capacitação dos usuários e controladores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melhoria da segurança operacional por meio do conhecimento.</li> </ul>
<b>Problema: Padrão do transponder e restrição a outros tipos</b>		
<b>Proposta:</b> Padrão para o transponder ADS-B e zero sinais ruins		
Definir o 1090MHz ES 0,1 ou 2 como padrão brasileiro e exigir que outros padrões não transmitam.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimizar ocorrências de aeronave com equipamento não-conforme;</li> <li>Otimizar a complexidade do sistema;</li> <li>Prover um vetor de negócios para a indústria responsável por equipar as aeronaves;</li> <li>Banir sinais impróprios para o ADS-B nacional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alinhamento com padrão internacionalmente reconhecido;</li> <li>Ganho na disponibilidade de equipamento ADS-B na frota.</li> </ul>
<b>Proposta:</b> Qualidade mínima do sinal transmitido		
Definir limites para os parâmetros de qualidade que fazem parte do sinal transmitido: NUC, NIC, NAC, SIL.	Garantir as condições mínimas esperadas do sistema para as funções de vigilância pretendidas.	Melhoria da segurança e condições básicas para as aplicações do ADS-B.
<b>Proposta:</b> Transponder conforme e operacional é obrigado a transmitir		
Estabelecer obrigatoriedade de que aeronaves devidamente equipadas transmitam o sinal ADS-B durante todo o voo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximizar a qualidade do sinal disponível nos espaços aéreos ADS-B;</li> <li>Estabelecer condição para ações de repressão a condutas inseguras quando em espaço aéreo ADS-B.</li> </ul>	Reduzir riscos de aeronaves em voo não serem detectadas, contribuindo com a melhoria da segurança operacional.

Fonte: O autor.

**Tabela 3 - Propostas de melhoria regulatória para o ADS-B (continuação).**

<b>Proposta:</b> Procedimento para transponder não conforme, não operacional e exceções		
Estabelecer procedimentos para tratar os casos específicos relativos a voos sem a transmissão ADS-B apropriada.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Garantir condições de voo para aeronaves que não estejam devidamente equipadas;</li> <li>Garantir condições de voo para aeronaves que por motivos considerados válidos, não possam transmitir o sinal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solucionar as exceções e permitir os voos com segurança.</li> </ul>
<b>Problema:</b> Capacidades esperadas e requisitos e limitações correspondentes		
<b>Proposta:</b> Autorização requerida para aplicações avançadas de ADS-B IN		
Estabelecer obrigatoriedade de obtenção de autorização prévia para a utilização de aplicações avançadas de ADS-B IN.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Certificar-se de que manobras avançadas de ADS-B IN sejam realizadas com os devidos equipamentos e tripulação capacitada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prover condições para a realização segura das manobras avançadas de ADS-B IN no espaço aéreo brasileiro.</li> </ul>
<b>Proposta:</b> Declaração de que não há serviços de ADS-B complementares		
Documentar disposição específica para informar aos usuários do espaço aéreo que não há serviços como TIS-B; FIS-B; ADS-R.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evitar confusões com capacidades disponíveis em outros países.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melhoria da segurança.</li> </ul>
<b>Problema:</b> Frota equipada		
<b>Proposta:</b> Monitoramento da disponibilidade de ADS-B na frota de aeronaves		
Implementar rotina para monitorar a instalação de transponder ADS-B 1090MHz ES nas aeronaves usuárias do espaço aéreo nacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prover informação para o planejamento da implantação do ADS-B e implementação de políticas relativas a seu uso;</li> <li>Buscar alcance das condições necessárias para implementar aplicações ADS-B que requeiram 100% das aeronaves equipadas e transmitindo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ativo informacional para toda a indústria.</li> </ul>
<b>Problema:</b> Objetivos específicos para a implementação de ADS-B		
<b>Proposta:</b> Desativação de infraestrutura como parte do plano		
No planejamento de implantação, considerar a possibilidade de otimizar os recursos por meio da desativação de estações de radar e outros auxílios onde possível.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimizar a emissão de sinais de rádio na frequência 1090MHz e assegurar capacidade para os sistemas;</li> <li>Reduzir o custo operacional dos sistemas de comunicação, navegação e vigilância do espaço aéreo como um todo;</li> <li>Aumentar a eficiência dos serviços de comunicação, navegação e vigilância.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Otimização dos sistemas de comunicação, navegação e vigilância.</li> </ul>

**Tabela 3 - Propostas de melhoria regulatória para o ADS-B (continuação).**

<b>Proposta:</b> Banco de dados e ferramentas de monitoramento		
Na configuração do sistema, considerar a implementação de recursos para a coleta e armazenamento de forma estruturada dos dados provenientes do ADS-B.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promover o conhecimento e aprendizado a partir dos dados operacionais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Propiciar dados para a análise e melhoria da aviação nacional.</li> </ul>
<b>Problema: Contratos de concessão de aeroportos como oportunidade</b>		
<b>Proposta:</b> ADS-B em contratos de concessão de aeroportos		
Na implantação do sistema, considerar a possibilidade de que a instalação, comissionamento e manutenção de ADS-B próximo aos grandes aeroportos seja atribuído à iniciativa privada por meio do contrato de concessão de aeroporto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atribuir custos ao ente beneficiado pelos resultados do sistema, já que prover o ADS-B terrestre trará benefícios operacionais para o aeroporto;</li> <li>Reduzir o esforço para a implantação do sistema, por meio de investimentos privados, os quais mitigam problemas inerentes a obtenção de recursos públicos;</li> <li>Ampliar os recursos empregados nos contratos de concessão para buscar melhoria de segurança operacional e aumento da capacidade aeroportuária.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instalação mais rápida de ADS-B terrestre;</li> <li>Benefícios para a vigilância na superfície do aeroporto devido a capacidade de recepção de sinal ADS-B.</li> </ul>
<b>Problema: ADS-B Satelital ou ADS-B Terrestre</b>		
<b>Proposta:</b> Combinação de ADS-B terrestre e ADS-B satelital		
Na configuração do sistema, considerar a implantação de ADS-B Satelital em todo o espaço aéreo oceânico e no continente acima de FL 290 e o terrestre em 52 aeroportos (aeroportos com mais de 200.000 pax/ano).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzir o esforço para implementação, já que o ADS-B satelital não requer infraestrutura e a infraestrutura terrestre poderia utilizar-se de localidades próximas a grandes aeroportos;</li> <li>Garantir alta qualidade do sinal recebido nos locais mais movimentados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Custos operacionais menores;</li> <li>Melhor cobertura;</li> <li>Novas capacidades;</li> <li>Informação integrada.</li> </ul>

Fonte: O autor.

Figura 6 - Perfil do espaço aéreo brasileiro com relação ao ADS-B.

Configuração do espaço aéreo brasileiro quanto ao ADS-B			
ESPAÇO AÉREO SUPERIOR RVSM AIRSPACE	<p><b>Sistemas disponíveis:</b> ADS-B por satélite (Eventualmente) ADS-B terrestre</p> <p><b>Serviços disponíveis:</b> ADS-B IN capacidades avançadas (se autorizado) ADS-B IN consciência situacional (se equipado) Vigilância ATS - Separação long. 5NM</p> <p><b>Requisitos de equipamento para as Aeronaves:</b> 1090MHz ES ADS-B OUT (0, 1 or 2) Antenas com diversidade --&gt; <b>Obrigatório</b> &lt;--</p>		
	FL 290	<p><b>Sistemas disponíveis:</b> Nenhum.</p> <p><b>Serviços disponíveis:</b> ADS-B IN consciência situacional (se equipado)</p> <p><b>Requisitos de equipamento para as Aeronaves:</b> 1090MHz ES ADS-B OUT (0, 1 or 2) --&gt; <b>Opcional</b> &lt;--</p> <p><b>ESPAÇO AÉREO REMOTO</b></p>	<p><b>Sistemas disponíveis:</b> ADS-B terrestre</p> <p><b>Serviços disponíveis:</b> Vigil. ATS - Separação long. 5NM (se equipado) ADS-B IN consciência situacional (se equipado) Consc. Situacional no Aeroporto (se equipado)</p> <p><b>Requisitos de equipamentos para as Aeronaves:</b> 1090MHz ES ADS-B OUT (0, 1 or 2) --&gt; <b>Opcional</b> &lt;--</p> <p><b>TMA e AEROPORTOS</b></p>
ESPAÇO AÉREO INFERIOR	FL 245	<p><b>Sistemas disponíveis:</b> ADS-B por satélite (Eventualmente) ADS-B terrestre</p> <p><b>Serviços disponíveis:</b> ADS-B IN capacidades avançadas (se autorizado) ADS-B IN consciência situacional (se equipado) Vigilância ATS - Separação long. 5NM</p> <p><b>Requisitos de equipamento para as Aeronaves:</b> 1090MHz ES ADS-B OUT (0, 1 or 2) Antenas com diversidade --&gt; <b>Obrigatório</b> &lt;--</p> <p><b>ESPAÇO AÉREO OCEANICO</b></p>	
		Oceano Atlântico	

Fonte: O autor.

## 9 CONCLUSÕES

ADS-B é uma tecnologia que oferece cobertura de vigilância estendida, separação tipo radar, melhor tempo de atualização do que radar, possibilidades de aplicações aprimoradas, e é uma base para usos futuros que estão sendo desenvolvidos, tudo isso com um custo substancialmente menor.

Considerando que a implementação está em andamento e será concluída em breve, é necessário aprimorar a regulamentação, englobando, de certa forma, todos os aspectos relacionados à aviação civil para garantir o uso seguro e eficiente da tecnologia no espaço aéreo brasileiro.

Neste estudo, aspectos importantes foram identificados como melhorias regulatórias e, em uma etapa subsequente, espera-se que sejam bons subsídios para as discussões nos fóruns apropriados.

## 10 SIGLAS

ADS-B - Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão;  
 ADS-R - *Automatic Dependent Surveillance-Rebroadcast*;  
 ATM - *Air Traffic Management*;  
 FIS-B - *Flight Information Service - Broadcast*;  
 FL - *Flight Level*;  
 GNSS - *Global Navigation Satellite System*;  
 NAC - *Navigation Accuracy Category*;  
 NIC - *Navigation Integrity Category*;  
 NUC - *Navigation Uncertainty Category*;  
 PSR - *Primary Surveillance Radar*;  
 RVSM - *Reduced Vertical Separation Minima*;  
 SIL - *Source Integrity Level*;  
 SMGCS - *Surface Movement Guidance and Control System*;  
 SSR - *Secondary Surveillance Radar*;  
 TIS-B - *Traffic Information Service - Broadcast*.



## REFERÊNCIAS

AIREON. **AIREON data successfully integrated with ATECH Sagitario system**. AIREON website, 2019a. Disponível em: <https://aireon.com/2019/10/21/aireon-data-successfully-integrated-atech-sagitario-system/>. Acesso em 22 jul. 2020.

AIREON. **The Executive Reference Guide to Space-Based ADS-B**. AIREON website, 2019b. Disponível em: <https://www.aireon.com>. Acesso em 27 dez. 2019.

AIREON. **Timeline**. AIREON website, 2020. Disponível em: <https://aireon.com/timeline/>. Acesso em 22 jul. 2020.

AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **AC 21.45 Airworthiness approval of airborne automatic dependent surveillance broadcast equipment**. Canberra, ATC, Australia. 2015.

AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **AC 91.23 ADS-B for enhancing situational awareness**. Canberra, ATC, Australia. 2020a.

AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **CAO 20.18 Aircraft equipment - basic operational requirements**. Canberra, ACT, Australia. 2020b.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Concepção operacional ATM nacional (DCA 351-2)**. Brasília, DF, Brasil. 2011.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Inspeção em voo para Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) (CIRCEA 121-7)**. Brasília, DF, Brasil. 2017a.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Manual de Coordenação de Busca e Salvamento Aeronáutico (MCA 64-3)**. Brasília, DF, Brasil. 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Preenchimento dos formulários de plano de voo (MCA 100-11)**. Brasília, DF, Brasil. 2017c.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Reestruturação de espaço aéreo da área de controle terminal (TMA) de Macaé com aplicação do sensor ADS-B, aumento da cobertura VHF, implementação do conceito de espaço aéreo exclusivo ADS-B e prov. de prod. met. a partir de EMS-A (AIC 47/18)**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: 2018a.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Requisitos dos serviços de tráfego aéreo (ICA 100-31)**. Brasília, DF, Brasil. 2017b.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Serviços de Tráfego Aéreo (ICA 100-37)**. Brasília, DF, Brasil. 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) na TMA Macaé (AIC 40-17)**. Brasília, DF, Brasil. 2018b.

BRASIL. Ministério da infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Brazilian Civil Aviation Sector**. Sítio da ANAC. 2021. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/en/about-anac/brazilian-civil-aviation-sector>. Acesso em 28 abr. 2020.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Instruções para obtenção de aprovação de instalação de GNSS (IS 21-013)**. Ed. B. Brasília, DF, Brasil. 2016.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Requisitos gerais de operação para aeronaves civis. (RBAC 91)**. ed. EMD 01. Brasília, DF, Brasil. 2019.

CANADÁ. Transport Canada. **Automatic Dependent Surveillance – Broadcast**. 02 ed. Ottawa, ON, Canada. 2011.

CANADÁ. Transport Canada. **TP 6010 Canada's Airspace**. 3 ed. Ottawa, ON, Canada. 2018.

CANSO. **ANSP Guidelines for Implementing ATS Surveillance Services Using Space-Based ADS-B**. Vol. 1. Montréal, Quebec, Canada: 2016. Disponível em: <https://www.canso.org/>. Acesso em 16 jan. 2020.

CANSO. **SIRIUS written in the stars**. Airspace 1(47), p. 32. 2019. Disponível em: <https://www.canso.org/airspace-47-q4-2019>. Acesso em 16 jan. 2020.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **AC 20 165 B - Airworthiness Approval of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast OUT Systems**. Washington, DC, USA. 2015.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **AC 90 114 B - Automatic Surveillance-Broadcast Operations**. Ed. B. Washington, DC, USA. 2019.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **SRT 047 - Surveillance and Broadcast Services Description Document**. ed. 04. Washington, DC, USA. 2018.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Government Publishing Office. National Archives and Records Administration. Office of the Federal Register. **CFR Title 14 Chapter I Subchapter F Part 91 - General Operating and Flight Rules**. eCFR, USA, Editor. 2020. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=14:2.0.1.3.10>. Acesso em 06 ago. 2020.

FAGUNDES, Marcelo Mello. **DECEA ADS-B Satelital**. Sítio do DECEA. 2020. Disponível em DECEA: <https://www.decea.mil.br/>. Acesso em 11 fev. 2021.

INFRAERO. **Manual do controle de aproximação de Macaé**. Macaé, RJ, Brasil. 2019a.

INFRAERO. **Modelo operacional do controle de aproximação Macaé - APP ME**. Macaé, RJ, Brasil. 2019b.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. Ed. São Paulo: Atlas 2003.

NAV CANADA. NAV Canada Web Site. 2020. Disponível em <https://www.navcanada.ca/EN/products-and-services/Pages/Space-based-ADS-B.aspx>. Acesso em 12 de 08 de 2020,

OACI. **23 Meeting of the SAM Implementation Group** - Final report. Program follow up. ICAO, SAM office, Lima. 2019a.

OACI. **Annex 10 – Aeronautical Telecommunications**. Vol. IV - Surveillance and Collision Avoidance Systems. 5. Ed. Montréal, Quebec, Canada: 2014.

OACI. **Annex 11 - Air Traffic Services**. 14. Ed. Montréal, Quebec, Canada: OACI 2016.

OACI. **Assessment of ADS-B and Multilateration Surveillance to Support Air Traffic Services and Guidelines for Implementation (Cir 326)**. Montréal, Quebec, Canada: OACI 2012.

OACI. **Global Air Navigation Plan – GANP**. Doc 9750. GANP Portal. 2019b. Disponível em: <https://www4.icao.int/ganportal/>. Acesso em 16 jul. 2020.

OACI. **SAM meetings documents**. ICAO web site. 2017a. Disponível em: <https://www.icao.int/SAM/Documents/Forms/AllItems.aspx>. Acesso em 16 jul. 2020.

OACI. **Status of ADS-B implementation in Brasil (WP/08 Rev.2)**. Working paper, ICAO, SAMIG. Mexico city. 2018a.

OACI. **Study of the feasibility and convenience of using the satellite-based ADS-B service in the SAM region**. (WP/17 26/10/18). Lima. 2018.

OACI. **ICAO SAM regional group site**. GREPECAS SAM. 2017b. Disponível em <https://www.icao.int/SAM/Documents/Forms/AllItems.aspx>. Acesso em 20 jul. 2020.

RTCA. **Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) (DO-242)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 1998.

RTCA. **Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) (DO 242 A)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 2002.

RTCA. **Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for 1090MHz Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) (DO 260)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 2000.

SPITZER, Cary R.; FERRELL, Uma; FERREL, Thomas. **Digital Avionics Handbook**. 3. Ed. Boca Raton, FL, United States: CRC Press. 2014.

# Regulation for ADS-B<sup>1</sup> in Brazilian airspace

*Regulación para ADS-B<sup>1</sup> en el espacio aéreo brasileño*

*Regulação para o ADS-B<sup>1</sup> no espaço aéreo brasileiro*

Raul Sandoval Cerqueira<sup>1</sup>

## ABSTRACT

The Automatic Dependent Broadcasting Surveillance (ADS-B) is a well-known technology, internationally standardized and recognized as an inexpensive way to carry out radar-like surveillance, even in places where conventional radar surveillance is not adequate. The implementation of this technology means the introduction of new monitored airspace configurations and new operational capabilities. The regulation of the Department of Airspace Control (DECEA) and the National Civil Aviation Agency (ANAC) should provide adequate processes for civil aviation operations in order to face this evolutionary stage, improving concepts and adapting procedures. This study, whose objective is to contribute to the strengthening of the regulation that will support ADS-B in Brazil, was developed based on a hypothetical-deductive method, which included literature review, unstructured interviews of the focused type, international benchmarking and case study of ADS-B national implementation. The results showed the identification of possible regulatory improvements with a positive impact on the implementation of ADS-B in national airspace, to be subject to further verification and discussion.

**Keywords:** ADS-B. Regulation. Surveillance. Civil Aviation.

## RESUMEN

*La vigilancia de Radiodifusión Dependiente Automática (ADS-B) es una tecnología bien conocida, estandarizada internacionalmente y reconocida como una forma económica de llevar a cabo vigilancia tipo radar, incluso en lugares donde la vigilancia por radar convencional no es adecuada. La implementación de esta tecnología significa la introducción de nuevas configuraciones del espacio aéreo monitoreado y nuevas capacidades operativas que deben ser entendidas por la comunidad aeronáutica y la regulación del Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA) y la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC) debe proporcionar procesos adecuados para las operaciones de la aviación civil para afrontar esta etapa evolutiva, mejorando conceptos y adaptando procedimientos. Este estudio, cuyo objetivo es contribuir al fortalecimiento de la regulación que apoyará a ADS-B en Brasil, fue desarrollado con un enfoque multimetodológico, incluyendo revisión de literatura, consulta de expertos, benchmark internacional y estudio de caso, y resultó en la identificación de 15 posibles mejoras regulatorias con impacto positivo en la implementación de ADS-B en el espacio aéreo nacional.*

**Palabras clave:** ADS-B. Regulación. Vigilancia. Aviación Civil.

---

I. National Civil Aviation Agency (ANAC). Rio de Janeiro/RJ - Brazil. Mestrado em Advanced Master Air Navigation System Engineering and Operations pela Ecole Nationale de l'Aviation Civile(ENAC). E-mail: raul.cerqueira@anac.gov.br

Received: 08/18/21

Accepted: 10/14/21

The acronyms and abbreviations contained in this article correspond to the ones used in the original article in Portuguese.

---

<sup>1</sup> ADS-B: Vigilância automática dependente por radiodifusão (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*).

## RESUMO

*A Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) é uma tecnologia bastante conhecida, padronizada internacionalmente e reconhecida como uma forma barata de se realizar vigilância similar ao radar, inclusive sobre locais onde a vigilância por radar convencional não é adequada. A implementação desta tecnologia significa a introdução de novas configurações de espaço aéreo monitorado e novas capacidades operacionais. A regulamentação do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) deverá prover processos adequados para as operações da aviação civil de forma a fazer frente a esta etapa evolutiva. Este estudo cujo objetivo é contribuir para o fortalecimento da regulação que dará suporte ao ADS-B no Brasil foi desenvolvido com base no método hipotético-dedutivo, subsidiado por revisão bibliográfica, entrevistas não estruturadas do tipo focalizadas, estudos de casos de regulação internacional e estudo de caso de implantação nacional do ADS-B. Resultou na identificação de hipóteses de melhorias regulatórias com impacto positivo à implementação do ADS-B no espaço aéreo nacional, a serem submetidas à verificação e discussão posteriores.*

**Palavras-chave:** ADS-B. Regulação. Vigilância. Aviação civil.

## 1 INTRODUCTION

The implementation of Automatic Dependent Surveillance-Broadcasting (ADS-B) in Brazil demands that the national regulation be improved to accompany this evolutionary stage and provide the necessary conditions for the safe and efficient use of this technology.

Due to this problem, this study aims to identify possibilities for improvements in the Brazilian regulation regarding to the implementation of ADS-B.

Based on the hypothetical-deductive methodology and research techniques such as literature review, unstructured interviews of the focused type, and case studies, such hypotheses for improving regulation were developed.

## 2 METHODOLOGY

This work was developed based on the hypothetical-deductive method (LAKATOS, MARCONI, 2003), which was supported by several research techniques.

Initially, through literature review, theoretical foundation was sought in order to identify, have a clear purpose of the problem and a viable research proposal.

After that, a non-structured focused interview (LAKATOS, MARCONI, 2003) was conducted with

subject matter experts, followed by international benchmarking and a case study on the implementation of ADS-B in the national airspace. This method allowed the advancement of the initial conjectures, leading to the proposed hypotheses for the improvement of the national regulation regarding the use of ADS-B in the national airspace.

It can be observed that in this work, these hypotheses have not been subjected to tests that allow them to be validated and, therefore, it is understood that they would be useful as initial subsidies for the regulatory impact analysis processes of the relevant bodies.

## 3 LITERATURE REVIEW

### 3.1 History

The evolution of Data Link Communication (Data Link) for aviation purposes goes back to the 1970s, with the use of the first ACARS applications - "Aircraft Communication Addressing and Recording System". (SPITZER, et al., 2014).

In 1983, the International Civil Aviation Organization (ICAO) established the Special Committee on Future Air Navigation Systems (FANS) to study the use of "Automatic Dependent Surveillance" (ADS) for civil aviation. (SPITZER, et al., 2014).

In 1998, document DO 242 was published by RTCA, in which the Minimum Aviation System Performance Standards (MASPS) of ADS-B technology was set, and in 2000, document DO 260 was also published by RTCA, in which the Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for 1090 MHz airborne ADS-B equipment was set. (RTCA, 1998, 2000).

Three transmission technologies have been developed and are standardized by ICAO for ADS-B: UAT - Universal Access Transceiver (ICAO Doc. 9861); VDL4 - VHF Digital Link Mode 4 (ICAO Doc. 9816); 1090 MHz ES (ICAO Doc. 9871); however in Recommendation 1/7 of the "AN Conf / 11" in 2003, ADS-B 1090 MHz ES was recommended by the ICAO Council as the international standard to be used. (ICAO, 2012, 2016).

Due to the development of standards, there are three distinct versions of ADS-B in use today based on 1090 MHz ES.

Taking important steps to improve ADS-B evolutionary path, AIREON, an American company established in 2012, in partnership with the company Iridium, hosted its specially designed ADS-B receivers on 66 satellites from Iridium Next Constellation, to provide global ADS-B coverage (AIREON, 2019b, 2020).



### 3.2 Concepts and definitions relating to ADS-B

In order to establish an international standard for ADS-B concept, in ANNEX 11, ADS-B was defined by ICAO as:

Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). A means by which aircraft, aerodrome vehicles and other objects can automatically transmit and/or receive data such as identification, position and additional data, as appropriate, in a broadcast mode via a data link. (ICAO, 2016, p. 1-6).

Taking the possibilities about ADS-B into consideration, it is important to highlight the two distinct concepts: ADS-B OUT, a function on an aircraft or vehicle that periodically broadcasts its state vector (position and velocity) and other information derived from on-board systems in a format suitable for ADS-B IN capable receivers and ADS-B IN, a function that receives surveillance data from ADS-B OUT data sources. (ICAO, 2014, p. 1-1).

ADS-B OUT requires the implementation of some type of reception capability for practical results, which can be terrestrial, satellite, or ADS-B IN. Furthermore, since the information is originated from the transmitting

aircraft, the number of equipped aircraft in the airspace is critical for several ADS-B applications.

The diagram in Figure 1 summarizes the ADS-B system considering the 1090 MHz ES standard.

As common features to all implemented ADS-B 1090MHz ES configurations, it is important to emphasize:

#### I. Transmitted information

ADS-B transponders broadcast aircraft parameters, such as identification (24-bit address and flight identification as per the flight plan), position (latitude, longitude and pressure altitude), three-dimensional velocity and position integrity, via a broadcast-mode data link on 1090 MHz. (CANSO, 2016, p. 13).

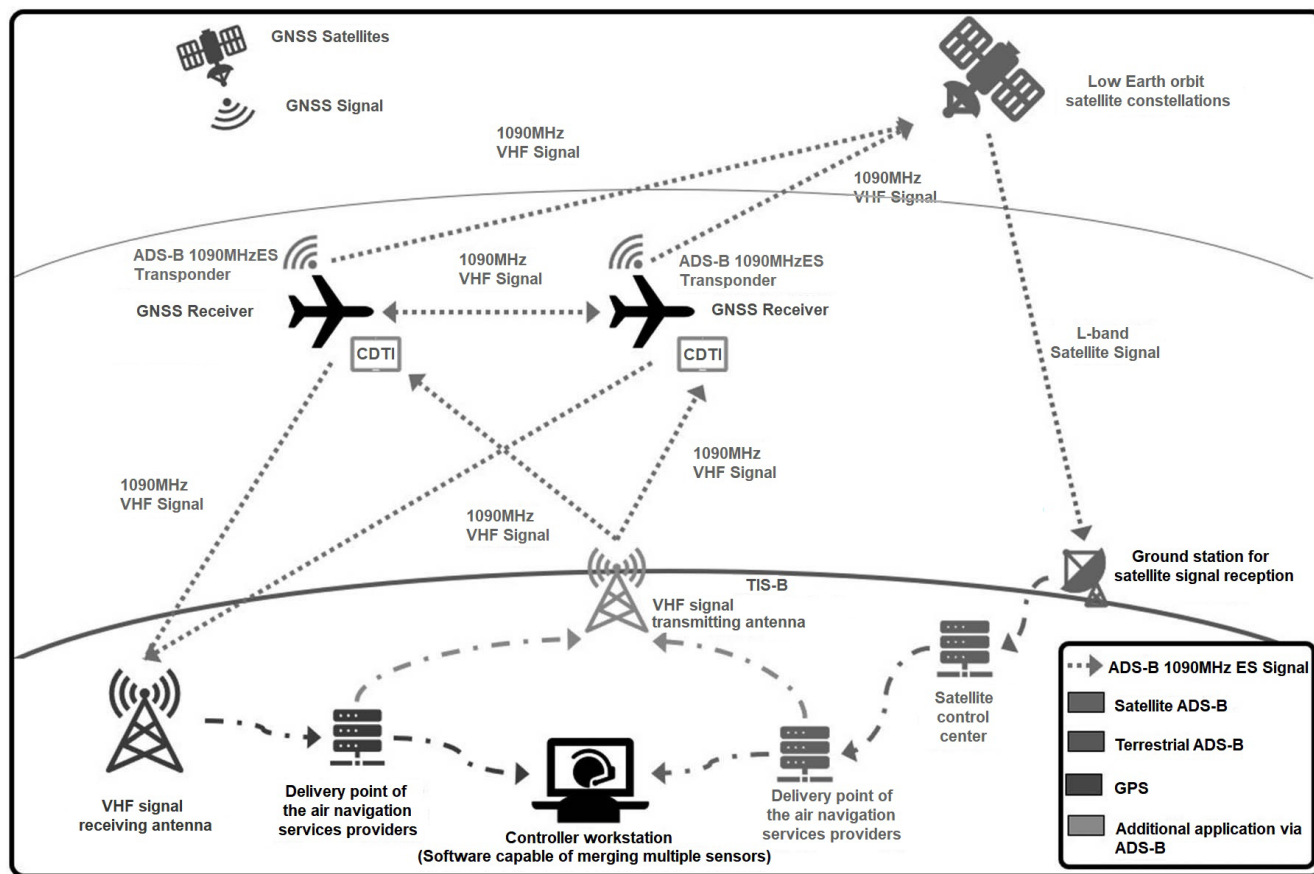
#### II. Transmission update time

Twice a second, commonly referred to as the ADS-B update rate, is the update rate for the position information. (RTCA, 2000).

#### III. Minimum avionics requirements:

GNSS system; 1090MHz ES transponder; in a satellite-based ADS-B system: A1 class transmitter and top mount aircraft antenna. (AIREON, 2019b).

Figure 1 - ADS-B system based on 1090MHz ES transponder.



Source: Adapted from AIREON (2019a), RTCA (2002) e CANSO (2016).

IV. Minimum infrastructure requirements:

Simple antenna and receiver connected to communication links that deliver the information to the situation display which shows it in a similar way to radar. (ICAO, 2012).

The satellite-based system requires no ground infrastructure and information is delivered at a specified delivery point. (AIREON, 2019b).

V. Minimum surveillance capabilities

Separation of at least five nautical miles (5 NM), subject to compliance with certain conditions.

Extension of surveillance coverage to low altitudes. (ICAO, 2012).

3.3 ADS-B in Latin America

In the multilayer structure of the ICAO Global Air Navigation Plan (GANP), Doc 9750 (ICAO, 2019b), the third layer is the Regional level. In the regional office for Latin America (SAM), the ADS-B implementation strategy foresees coverage of en-route and terminal areas, involving users and service providers, and will be completed by 2023. (ICAO, 2017a).

The results achieved in each contracting State until 2019 are summarized in Figure 2.

Figure 2 - Status of ADS-B implementation in Latin America.



Source: Prepared by the author based on information available in ICAO (2019a).

In addition, a study on the possibility of providing ADS-B via satellite was carried out. The signal was distributed through the existing digital communications network (REDDIG) in the region, and it was concluded that it would be possible in an economical and efficient manner (ICAO, 2018).

In this study, an estimated cost comparison was presented for the different surveillance systems in the region, according to Table 1.

### 3.4 ADS-B in Brazil

Specifically, with regard to ADS-B implementation in Brazil, a factual result was the establishment of a fully operational airspace restricted only to ADS-B equipped aircraft at TMA Macaé, Bacia de Campos. (ICAO, 2019a).

In 2017, the Brazilian ADS-B implementation plan foresaw low altitude installation in the ocean basins and the establishment of 62 ground stations, RTCA standard DO 260, DO 260A and DO 260B, for continental airspace coverage including homogeneous ATM areas and main air traffic flows. Furthermore, it was planned that this would be done until 2021 and without mandates, divided into 04 phases as it can be seen in Figure 3. (ICAO, 2017a).

However, with the advent of space-based ADS-B, this implementation plan is being revised and the new strategy has not been published yet.

An important step on this issue was the successful integration of satellite ADS-B data into the software used by DECEA in its surveillance routines. (AIREON, 2019a).

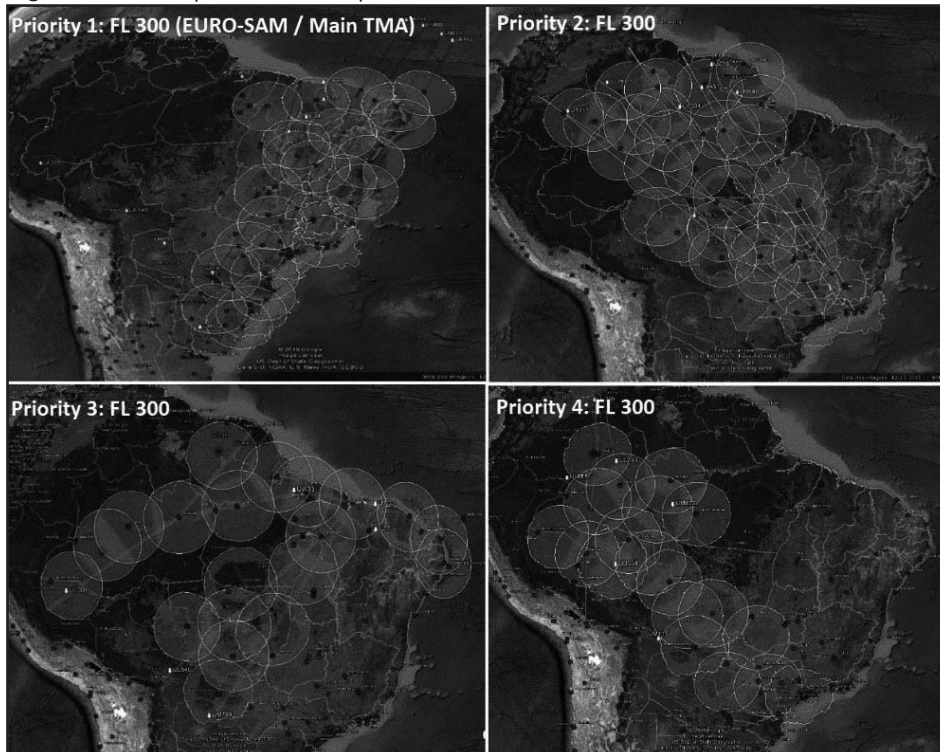
**Table 1** - Annual cost comparison of the systems.

	% de coverage		Annual cost / coverage		
	ADS-B Sat.	SSR	ADS-B Sat.	SSR	ADS-B Terr.*
FL 100	100	27,86	0,53	4,25	1,27
FL 150	100	35,01	0,53	3,38	1,01
FL 250	100	46,26	0,53	2,56	0,77

\* A fictitious number of ground ADS-B stations was adopted equal to the current SSR facility lease.

Source: ICAO (2018).

**Figure 3** - Planned phases for the implementation of ADS-B.



Source: ICAO (2017a).

Additionally, Brazil-AIREON technical cooperation consists of a two-phase plan whose objective is to evaluate the system performance in the Brazilian airspace, analyzing parameters such as: accuracy; latency; update time interval; positioning errors; availability; continuity; and evaluation of different antenna configurations, among others. Although this plan is in its final stages, the results are not available yet (FAGUNDES, 2020).

### 3.5 Regulation of current ADS-B

The institutional framework of Brazilian civil aviation consists of several institutions with specific roles. In two of these institutions, the definition of civil aviation regulation adopted by DECEA is complemented by the one adopted at ANAC when defining the civil aviation regulation. Regarding ADS-B technology, since DECEA is the Brazilian ANSP and also the ATS regulator, it sets almost all the regulations. However, there is a regulatory interface with ANAC regarding airworthiness and flight standards.

Within the scope of DECEA, ADS-B is mentioned in the following regulations:

- DCA 351-2 National ATM operational design (BRASIL, 2011);
- ICA 100 31 Air traffic service requirements (BRASIL, 2017c);
- ICA 100 37 Air traffic services (BRASIL, 2019b);
- CIRCEA 121-7 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Flight Inspection (BRASIL, 2017a);
- MCA 64-3 Aeronautical search and rescue coordination manual (BRASIL, 2019a);
- MCA 100-11 Completion of flight plan forms (BRASIL, 2017b);
- AIC 40-17 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) in TMA Macaé (BRASIL, 2018b);
- AIC 47-18 Airspace restructuring of Macaé Terminal Control Area (TMA) with ADS-B sensor application, increase of VHF coverage, implementation of ADS-B exclusive airspace concept and provision of meteorological products from EMS-A (BRASIL, 2018a).

Within the scope of ANAC, ADS-B is directly mentioned only in document IS 21-013 B “Instructions for obtaining approval for GNSS (Global Navigation Satellite Systems) stand alone

equipment installation for VFR and IFR operations” (BRASIL, 2016).

The basic structure for operational standard regulation at ANAC is established by the document RBAC 091 - “General Operating Requirements for Civil Aircraft” (Brasil, 2019c), which is on a par with the provisions in the North American standard “Code of Federal Regulations – CFR, Title 14, Chapter I, Subchapter F, part 91”, called “General Operating and Flight Rules”, the standard in which the ADS-B mandatory requirements were defined, in items 91.225 and 91.227. (ESTADOS UNIDOS, 2020).

However, according to the Brazilian standard, the items marked as “Reserved” and no requirements have been defined. On the other hand, in requirement 91.215 an instruction that enables the use is established, but it does not define a specific standard:

91.215 (b) When the type of operation and/or airspace requires, the aircraft shall be equipped with a transponder, with OTP approval (TSO), maintained in accordance with section 91.413 of this Regulation.

## 4 PROBLEM ANALYSIS AND IDENTIFICATION

The analysis of the existing regulation resulted in the identification of gaps or issues not addressed by the current regulatory framework. These gaps or issues may be improved in order to support the implementation of ADS-B in the national airspace:

- New types of airspace with surveillance: Today, there is only one type of ATS surveillance in the Brazilian continental airspace, which is radar-based.
- Transponder standard and restriction to other types: The regulation is not clear about the model that is required in the Brazilian ADS-B airspace. It is also not mentioned how other equipped types of aircraft should operate when entering the Brazilian ADS-B airspace.
- Expected capabilities and corresponding requirements and limitations: It is not clear what ADS-B applications are expected, the corresponding requirements, system performance limitations and the airborne equipment.
- Equipped fleet: There is no continuous effort to achieve a higher level of ADS-B equipment in the fleet and this is a problem for many applications.
- Specific goals for ADS-B implementation: Safety and capacity gains are associated with the implementation of ADS-B near airfields or helipads and even monitoring ground movement.



- Airport concession contracts as an opportunity: Throughout the subsequent rounds of concessions carried out by the Brazilian Federal Government, the contracts have evolved. Since the contracts seek to increase airport safety and capacity, it would be an opportunity to introduce the mandatory installation of ADS-B at the airport.
- Satellite ADS-B or Terrestrial ADS-B 1: Satellite ADS-B is expected to achieve better performance than the radar, although worse than Terrestrial ADS-B in most cases, if the appropriate infrastructure is provided.

## 5 EXPERT OPINION

This study was carried out through a non-structured focused interview (LAKATOS, MARCONI, 2003). Seven specialists, who occupy strategic positions, have expertise on the subject and experience in the implementation of technologies for the management of the national airspace were selected: 1 from INFRAERO, 2 from private companies, 2 from DECEA and 2 from ANAC. Comments about the problem were organized and consolidated in the summarized text, as follows:

- New types of airspace with surveillance: the system should automatically identify the best signal in each phase of the flight and provide information to the controller and the crew in a homogeneous way. Such information must be clear regarding the use of sensors, providing new features and benefits. DECEA technical staff will need training, and DECEA and ANAC new rules will be required.
  - Transponder standard and restriction to other types: ES 1090MHz (0, 1 or 2) used at Bacia de Campos may be the standard, since DECEA is already using it and it is an international standard. More systems add complexity to the implementation. There is no planned limit to the signal quality parameters.
  - Expected capabilities and corresponding requirements and limitations: The implementation should seek cost efficiency. The radar could be disabled after implementation where the radar coverage is already provided. Primary radars are a sovereignty concern and should not be disabled. It will be a better precision surveillance with better update time rates. It provides surveillance service to the user, including low altitude in oceanic
- airspace. There are no plans for TIS-B, FIS-B, ADS-R or monitoring tools.
- Equipped fleet: Airlines should be equipped since new aircraft already have the new system, besides international mandates, which require the use of this new equipment. Problems can be faced by the Air Cargo companies due to the fleet, which is old. Equipping the aircraft will be optional. However, the companies which is better equipped will use the system. Currently there is no information about the percentage of the fleet which is equipped. Users are expected to recognize the system, for it will define the future of the airlines. There are no planned mandates, although, probably, it will be soon a necessary demand.
  - Specific goals for ADS-B implementation: Surveillance extended to coverage for low altitudes in ocean basins, where off-shore movement is intense, is a specific goal to be achieved. For the airport surface, the use of ADS-B signal would be another option. DECEA is guided by operational needs which will shape the system.
  - Airport concession contracts as an opportunity: Usually, air traffic management infrastructure is not part of a concession agreement, and for specific cases it would probably be beneficial to include DECEA in the initial consultation processes. There are possible airport uses, such as SMGCS, but it is up to the airport manager to decide whether to implement it. ICA 63-18 is defined by DECEA.
  - ADS-B Satellite or ADS-B Terrestrial: A combination is considered the ideal solution. There are specific situations where you can benefit from each type. The conditions that will define the extent of the use of one or the other depend on the result of the tests that are still in progress. Installation feasibility, signal quality, redundancy, and security justify the use of both systems. The current ADS-B deployment plan considers Terrestrial ADS-B with strategically placed sensors to provide surveillance services above FL245, the TMA airspace volumes and down to the ocean basins over Santos / Espírito Santo / Campos (already deployed). Satellite-based ADS-B testing is ongoing, in a controlled environment, where space-based

and radar data can be integrated and the results compared. It is known that the latency parameter was worse than expected due to the network which was used.

## 6 INTERNATIONAL REGULATORY CASE STUDIES

Three States were selected as a sample of international regulation on ADS-B and their main aspects are summarized in Table 2 and Figure 4.

A reference case regarding the possibilities of the system, the United States of America (USA), carried out a robust deployment, with 650 antennas, total coverage of airspace, 02 types of transponder in use, additional services such as TIS-B, FIS-B, and ADS-R, and a mandate that has been in effect since

January 2020 covering all users, including General Aviation. The United States (2020) and the United States (2015, 2018, 2019).

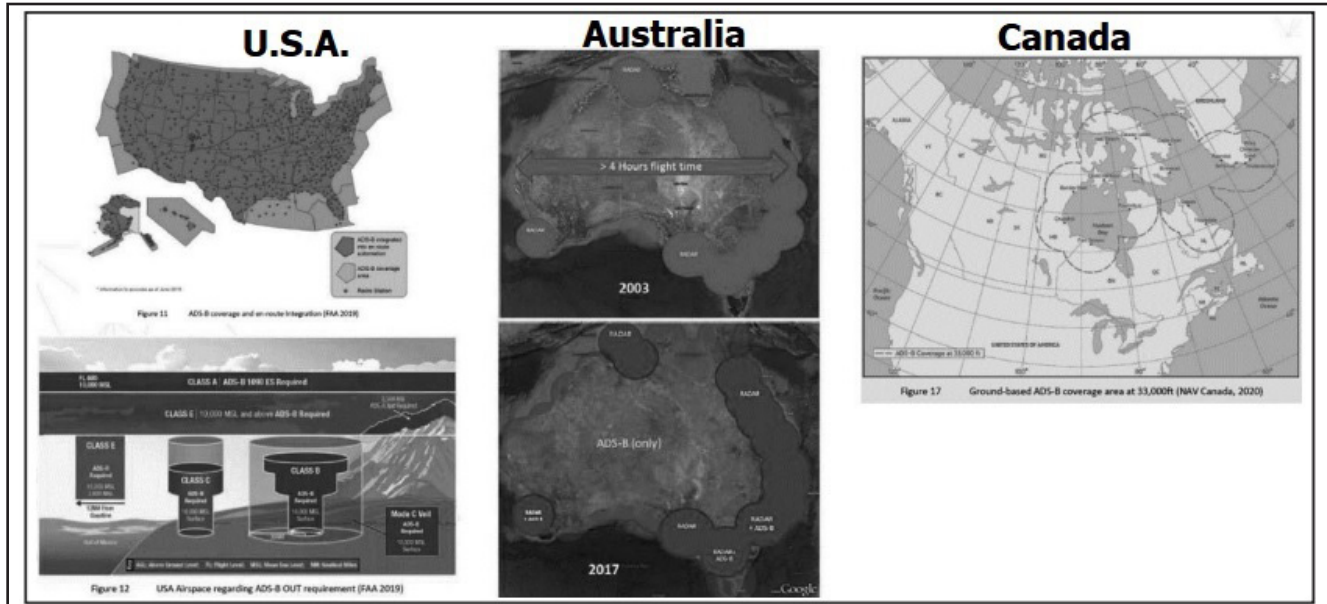
Australia has also been using ADS-B throughout its airspace as primary surveillance system since 2009 standing out for the optimization of communication, navigation and surveillance systems achieved through the use of ADS-B. Such deployment was optimized by using about 70 antennas, full airspace coverage, and 01 type of transponder in use. It made it possible to deactivate 179 aids to navigation. Australia has also defined specific regional issues in ICAO DOC 7030 in relation to ADS-B and has mandates for commercial aviation, but not for General Aviation. Australia (2015, 2020a, 2020b); ICAO (2017b).

**Table 2** - Case studies of international regulation - summary table.

Aspect	U.S.A.	Australia	Canada
ADS-B Use	Primary surveillance system	Primary surveillance system	Primary surveillance system (where available)
Coverage	Entire country	Entire country	Northern airspace * (*nationwide plan)
Infrastructure (ground stations)	650	70	15
Additional ADS-B services	TIS-B; FIS-B; ADS-R; Monitoring system	None	None
Advanced ADS-B Applications	CAVS; ITP; IM	None	None
Type of Transponder	1090 MHz ES 2 UAT 978MHz	1090 MHz ES 0,1 or 2	1090 MHz ES
Main regulations	14 CFR § 91.225; 14 CFR § 91.227; AC 90 114 B; AC 20 165 B; SRT 47 Rev.4; TSO C166b; TSO C154c	CAO 20.18; AC 21-45; AC 91-23;	AC 700 009 e;
Mandate to equip the fleet	Yes	Yes	No
Mandate includes general aviation	Yes	No	-
Mandate includes foreigners	Yes	Yes	-

**Source:** Elaborated by the author from the document information United States (2015, 2018, 2020), Australia (2015, 2020a, 2020b), NAVCanada (2020) and ICAO (2017b).

Figure 4 - Representations of Airspace from the USA, Australia, and Canada regarding ADS-B.



Source: Elaborated by the author adapted from ICAO (2017b).

Finally, due to the size of its airspace and pioneering use of the satellite solution which is a possibility for Brazil and also with a vast airspace, Canada has used ADS-B since 2010 in the northeastern airspace, with one type of transponder and has no defined mandate. It is pioneering in the use of satellite ADS-B, which is being tested in the whole country. NAVCanada (2020), Canada (2011, 2018) e ICAO (2017b).

7 CASE STUDY TMA ME

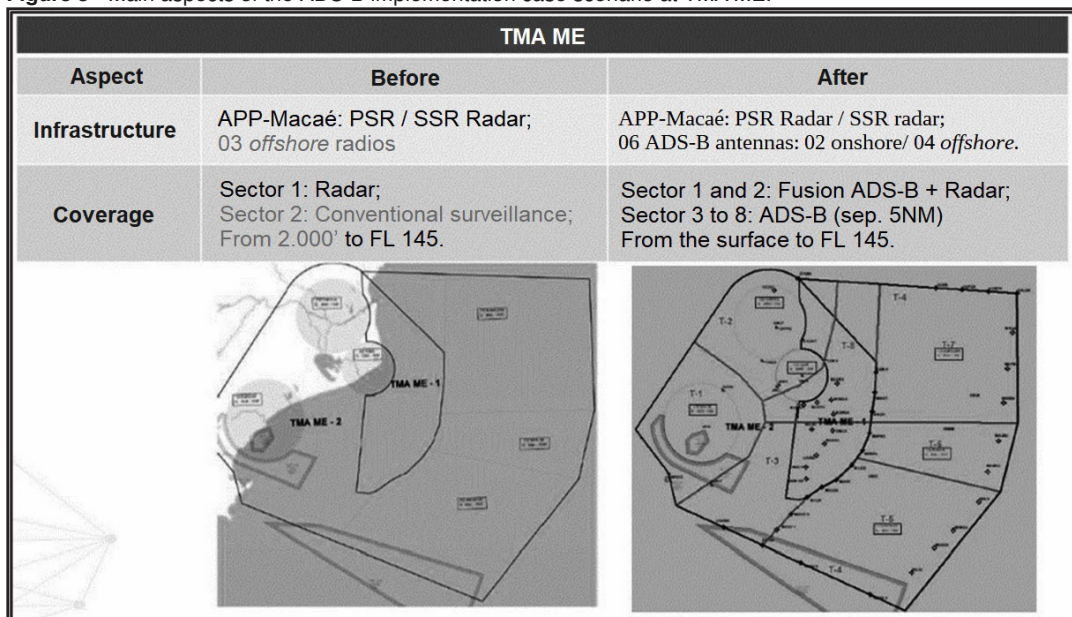
This is the first case of ADS-B system deployment in Brazilian airspace. It was a project carried out from 2009 to 2018.

It has achieved important results and corresponding benefits:

- IFR x IFR separation for aircraft under surveillance: 5NM (AIC 40/17);
- Delays reduced by 43% / Flight punctuality increased by 16%;
- More effective search and rescue (SAR);
- Flight time reduction with estimated fuel savings of up to R\$1.31 million per year; and
- 122 equipped helicopters (CANSO, 2019).

The initial and the post implementation scenario can be seen in Figure 5.

Figure 5 - Main aspects of the ADS-B implementation case scenario at TMA ME.



Source: Elaborated by the author from data extracted from Brazil (2018a, 2018b), ICAO (2018a) and INFRAERO (2019a, 2019b)

## 8 PROPOSALS FOR REGULATION IMPROVEMENT

Consolidating the information obtained in the review, in the interviews, in the international regulation case studies, in the Terminal ME

case study, and considering the implementation conditions in Brazil, in order to address the subjects of the problem of regulation improvement to subsidize the implementation of ADS-B in the national airspace, the hypotheses identified were proposed in Table 3.

**Table 3 - Proposals for ADS-B regulatory improvement.**

Description	Motivation	Main expected benefits
<b>Problem: New types of airspace with surveillance</b>		
<b>Proposal:</b> ADS-B required above FL290 and in oceanic airspace		
Establish a requirement that the aircraft be equipped when above FL290 and in oceanic airspace.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Set a clear rule to require the equipment ADS-B for operational safety;</li> <li>Reduce effort for implementation: better equipped aircraft move in RVSM airspace (above FL290); Traffic off-shore has the ability to promote ADS-B installation on aircraft;</li> <li>Provide conditions for new features and benefits inherent to the ADS-B system.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimize interference from non-equipped aircraft in airspace where ADS-B services are provided;</li> <li>Provide ADS-B services in a portion of the Brazilian airspace, with 100% of the user aircraft equipped;</li> </ul>
<b>Proposal:</b> ADS-B specific document		
Prepare a specific document containing all aspects of flight standards and airworthiness relating to ADS-B foreseen for use in the national airspace.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promote system compliance;</li> <li>Facilitate the training of users and controllers.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving operational safety through knowledge.</li> </ul>
<b>Problem: Standard transponder and restriction to other types</b>		
<b>Proposal:</b> Standard for ADS-B transponder and zero bad signals		
Set 1090MHz ES 0,1 or 2 as the Brazilian standard and require that other standards can't transmit.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimize occurrences of aircraft with non-compliant equipment;</li> <li>Optimize system complexity;</li> <li>Provide a business vector for the industry responsible for equipping the aircraft;</li> <li>Ban inappropriate signals for the national ADS-B.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alignment with internationally recognized standard;</li> <li>Gain in the availability of ADS-B equipment in the fleet.</li> </ul>
<b>Proposal:</b> Minimum quality of the transmitted signal		
Set limits for the quality parameters that are part of the transmitted signal: NUC, NIC, NAC, SIL.	Ensure the minimum expected system conditions for the intended surveillance functions.	Improved safety and basic conditions for ADS-B applications.
<b>Proposal:</b> Compliant and operational transponder is required to transmit		
Establish a requirement that properly equipped aircraft transmit the ADS-B signal throughout the flight.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximize the signal quality available in ADS-B airspaces;</li> <li>Establish condition for repress actions against unsafe conduct when in ADS-B airspace.</li> </ul>	Reduce risks of aircraft in flight going undetected, contributing to improved operational safety.

**Source:** The author.



**Table 3 - Proposals for ADS-B regulatory improvement (continued).**

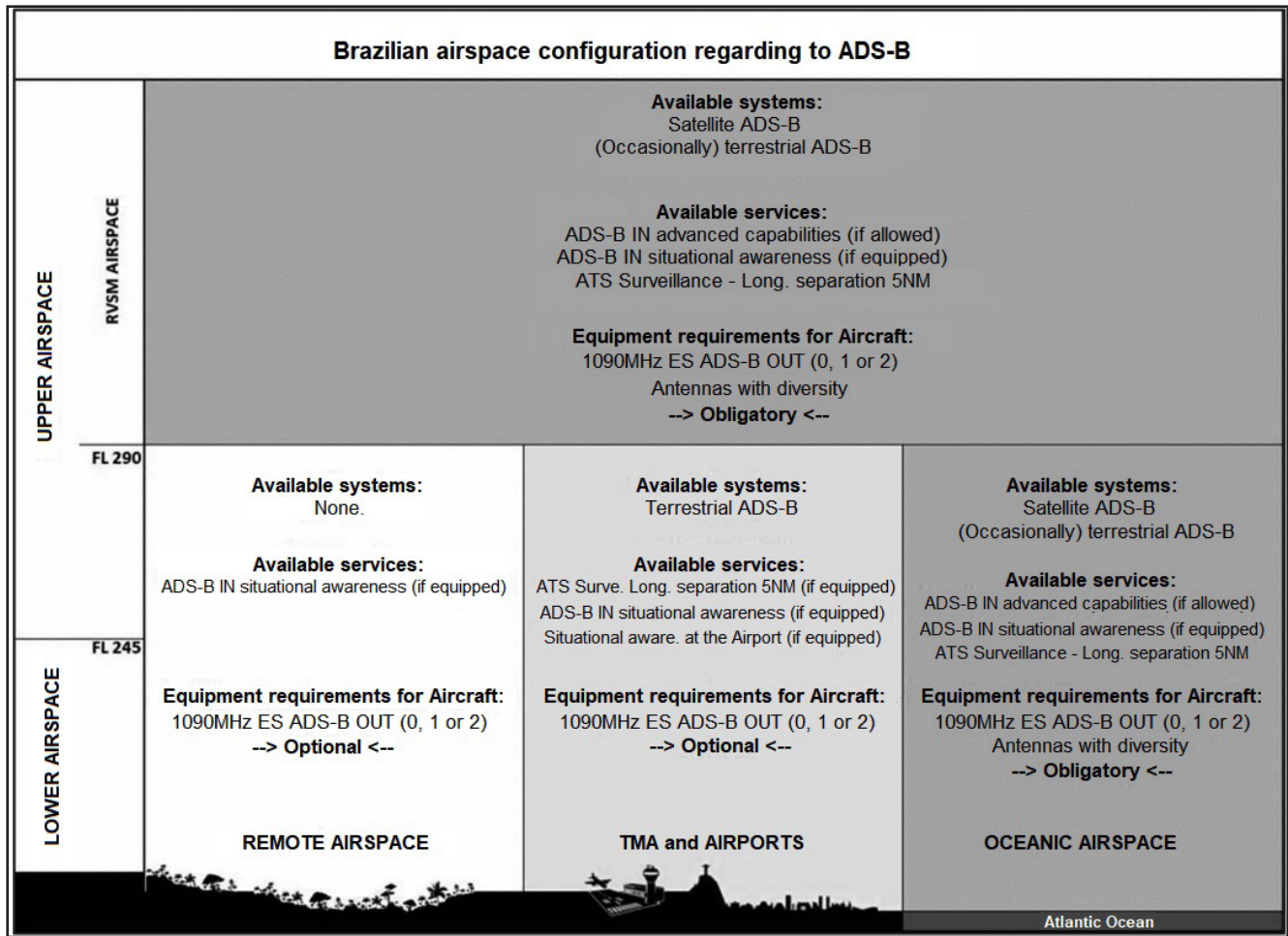
<b>Proposal:</b> Procedure for non-compliant, non-operational transponder and exceptions		
Establish procedures for handling specific cases concerning flights without the appropriate ADS-B transmission.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensure flight conditions for aircraft that are not properly equipped;</li> <li>• Ensure flight conditions for aircraft that for reasons deemed valid, cannot transmit the signal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solve the exceptions and allow the flights safely.</li> </ul>
<b>Problem:</b> Expected capabilities and corresponding requirements and limitations		
<b>Proposal:</b> Authorization required for advanced applications of ADS-B IN		
Establish requirement to obtain prior authorization for the use of advanced ADS-B IN applications.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Make sure that advanced ADS-B IN maneuvers are performed with the proper equipment and trained aircrew.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• To provide conditions for the safe performance of advanced ADS-B IN maneuvers in Brazilian airspace.</li> </ul>
<b>Proposal:</b> Statement that there are no complementary ADS-B services		
Document specific provision to inform airspace users that there are no services such as TIS-B; FIS-B; ADS-R.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avoid confusion with capacities available in other countries.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Safety improvement.</li> </ul>
<b>Problem: Equipped fleet</b>		
<b>Proposal:</b> Monitoring the availability of ADS-B in the aircraft fleet		
Implement routine to monitor the installation of ADS-B 1090MHz ES transponder on aircraft using the national airspace.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provide information for planning the deployment of ADS-B and implementing policies regarding its use;</li> <li>• Seek to achieve the necessary conditions to implement ADS-B applications that require 100% of of the aircraft equipped and transmitting.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informational asset for the entire industry.</li> </ul>
<b>Problem: Specific goals for ADS-B implementation</b>		
<b>Proposal:</b> Infrastructure deactivation as part of the plan		
In deployment planning, consider optimizing resources by deactivating radar stations and other aids where possible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimize the emission of radio signals in the 1090MHz frequency and ensure capacity for the systems;</li> <li>• Reduce the operational cost of communication, navigation and airspace surveillance systems as a whole;</li> <li>• Increase the efficiency of communication, navigation, and surveillance services.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimization of communication, navigation, and surveillance systems.</li> </ul>

**Table 3 - Proposals for ADS-B regulatory improvement (continued).**

<b>Proposal: Database and monitoring tools</b>		
When configuring the system, consider implementing resources for collecting and storing in a structured way the data from ADS-B.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promote knowledge and learning from operational data.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>To provide data for the analysis and improvement of national aviation.</li> </ul>
<b>Problem: Airport concession contracts as an opportunity</b>		
<b>Proposal: ADS-B in airport concession contracts</b>		
In implementing the system, consider the possibility that the installation, commissioning, and maintenance of ADS-B near major airports be assigned to the private sector through the airport concession contract.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Assign costs to the benefiting entity for the results of the system, since providing ground ADS-B will bring operational benefits to the airport;</li> <li>Reduce the effort to implement the system, through private investments, which mitigate problems inherent to obtaining public resources;</li> <li>Expand the resources employed in the concession contracts to seek improvements in operational safety and increase airport capacity.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faster installation of terrestrial ADS-B;</li> <li>Benefits for airport surface surveillance due to ADS-B signal reception capability.</li> </ul>
<b>Problem: ADS-B Satellite or ADS-B Terrestrial</b>		
<b>Proposal: Combination of ADS-B terrestrial and ADS-B satellite</b>		
In the system configuration, consider deploying Satellite ADS-B in all oceanic and mainland airspace above FL 290 and land-based in 52 airports (airports with more than 200,000 pax/year).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduce the effort for implementation, since satellite ADS-B doesn't require infrastructure and ground infrastructure could utilize locations near major airports;</li> <li>Ensuring high quality of the received signal in the busiest locations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lower operating costs;</li> <li>Better coverage;</li> <li>New capabilities;</li> <li>Integrated information.</li> </ul>

Source: The author.

Figure 6 - Profile of the Brazilian airspace with respect to ADS-B.



Source: The author.

## 9 CONCLUSION

ADS-B is a technology that offers extended surveillance coverage, radar-type separation, better update time than radar, enhanced application possibilities, and is a foundation for future uses that are being developed, all at a substantially lower cost.

Considering that the implementation is underway and will be completed soon, it is necessary to improve the regulation, encompassing, in a way, all aspects related to civil aviation to ensure the safe and efficient use of technology in Brazilian airspace.

In this study, important aspects have been identified as regulatory improvements and, in a subsequent step, it is expected that these improvements can be good inputs for discussions in the appropriate forums.

## 10 ACRONYMS

- ADS-B - Automatic Dependent Broadcast-Surveillance;
- ADS-R - Automatic Dependent Surveillance-Rebroadcast;
- ATM - Air Traffic Management;
- FIS-B - Flight Information Service - Broadcast;
- FL - Flight Level;
- GNSS - Global Navigation Satellite System;
- NAC - Navigation Accuracy Category;
- NIC - Navigation Integrity Category;
- NUC - Navigation Uncertainty Category;
- PSR - Primary Surveillance Radar;
- RVSM - Reduced Vertical Separation Minima;
- SIL - Source Integrity Level;
- SMGCS - Surface Movement Guidance and Control System;
- SSR - Secondary Surveillance Radar;
- TIS-B - Traffic Information Service - Broadcast.

## REFERÊNCIAS

- AIREON. **AIREON data successfully integrated with ATECH Sagitario system**. AIREON website, 2019a. Disponível em: <https://aireon.com/2019/10/21/aireon-data-successfully-integrated-atech-sagitario-system/>. Acesso em 22 jul. 2020.
- AIREON. **The Executive Reference Guide to Space-Based ADS-B**. AIREON website, 2019b. Disponível em: <https://www.aireon.com>. Acesso em 27 dez. 2019.
- AIREON. **Timeline**. AIREON website, 2020. Disponível em: <https://aireon.com/timeline/>. Acesso em 22 jul. 2020.
- AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **AC 21.45 Airworthiness approval of airborne automatic dependent surveillance broadcast equipment**. Canberra, ATC, Australia. 2015.
- AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **AC 91.23 ADS-B for enhancing situational awareness**. Canberra, ATC, Australia. 2020a.
- AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **CAO 20.18 Aircraft equipment - basic operational requirements**. Canberra, ACT, Australia. 2020b.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Concepção operacional ATM nacional (DCA 351-2)**. Brasília, DF, Brasil. 2011.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Inspeção em voo para Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) (CIRCEA 121-7)**. Brasília, DF, Brasil. 2017a.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Manual de Coordenação de Busca e Salvamento Aeronáutico (MCA 64-3)**. Brasília, DF, Brasil. 2019.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Preenchimento dos formulários de plano de voo (MCA 100-11)**. Brasília, DF, Brasil. 2017c.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Reestruturação de espaço aéreo da área de controle terminal (TMA) de Macaé com aplicação do sensor ADS-B, aumento da cobertura VHF, implementação do conceito de espaço aéreo exclusivo ADS-B e prov. de prod. met. a partir de EMS-A (AIC 47/18)**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: 2018a.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Requisitos dos serviços de tráfego aéreo (ICA 100-31)**. Brasília, DF, Brasil. 2017b.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Serviços de Tráfego Aéreo (ICA 100-37)**. Brasília, DF, Brasil. 2019.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) na TMA Macaé (AIC 40-17)**. Brasília, DF, Brasil. 2018b.
- BRASIL. Ministério da infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Brazilian Civil Aviation Sector**. Sítio da ANAC. 2021. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/en/about-anac/brazilian-civil-aviation-sector>. Acesso em 28 abr. 2020.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Instruções para obtenção de aprovação de instalação de GNSS (IS 21-013)**. Ed. B. Brasília, DF, Brasil. 2016.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Requisitos gerais de operação para aeronaves civis. (RBAC 91)**. ed. EMD 01. Brasília, DF, Brasil. 2019.
- CANADÁ. Transport Canada. **Automatic Dependent Surveillance – Broadcast**. 02 ed. Ottawa, ON, Canada. 2011.
- CANADÁ. Transport Canada. **TP 6010 Canada's Airspace**. 3 ed. Ottawa, ON, Canada. 2018.
- CANSO. **ANSP Guidelines for Implementing ATS Surveillance Services Using Space-Based ADS-B**. Vol. 1. Montréal, Quebec, Canada: 2016. Disponível em: <https://www.canso.org/>. Acesso em 16 jan. 2020.
- CANSO. **SIRIUS written in the stars**. Airspace 1(47), p. 32. 2019. Disponível em: <https://www.canso.org/airspace-47-q4-2019>. Acesso em 16 jan. 2020.
- ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **AC 20 165 B - Airworthiness Approval of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast OUT Systems**. Washington, DC, USA. 2015.
- ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **AC 90 114 B - Automatic Surveillance-Broadcast Operations**. Ed. B. Washington, DC, USA. 2019.



ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **SRT 047 - Surveillance and Broadcast Services Description Document**. ed. 04. Washington, DC, USA. 2018.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Government Publishing Office. National Archives and Records Administration. Office of the Federal Register. **CFR Title 14 Chapter I Subchapter F Part 91 - General Operating and Flight Rules**. eCFR, USA, Editor. 2020. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=14:2.0.1.3.10>. Acesso em 06 ago. 2020.

FAGUNDES, Marcelo Mello. **DECEA ADS-B Satelital**. Sítio do DECEA. 2020. Disponível em DECEA: <https://www.decea.mil.br/>. Acesso em 11 fev. 2021.

INFRAERO. **Manual do controle de aproximação de Macaé**. Macaé, RJ, Brasil. 2019a.

INFRAERO. **Modelo operacional do controle de aproximação Macaé - APP ME**. Macaé, RJ, Brasil. 2019b.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. Ed. São Paulo: Atlas 2003.

NAV CANADA. NAV Canada Web Site. 2020. Disponível em <https://www.navcanada.ca/EN/products-and-services/Pages/Space-based-ADS-B.aspx>. Acesso em 12 de 08 de 2020,

OACI. **23 Meeting of the SAM Implementation Group** - Final report. Program follow up. ICAO, SAM office, Lima. 2019a.

OACI. **Annex 10 – Aeronautical Telecommunications**. Vol. IV - Surveillance and Collision Avoidance Systems. 5. Ed. Montréal, Quebec, Canada: 2014.

OACI. **Annex 11 - Air Traffic Services**. 14. Ed. Montréal, Quebec, Canada: OACI 2016.

OACI. **Assessment of ADS-B and Multilateration Surveillance to Support Air Traffic Services and Guidelines for Implementation (Cir 326)**. Montréal, Quebec, Canada: OACI 2012.

OACI. **Global Air Navigation Plan – GANP**. Doc 9750. GANP Portal. 2019b. Disponível em: <https://www4.icao.int/ganportal/>. Acesso em 16 jul. 2020.

OACI. **SAM meetings documents**. ICAO web site. 2017a. Disponível em: <https://www.icao.int/SAM/Documents/Forms/AllItems.aspx>. Acesso em 16 jul. 2020.

OACI. **Status of ADS-B implementation in Brasil (WP/08 Rev.2)**. Working paper, ICAO, SAMIG. Mexico city. 2018a.

OACI. **Study of the feasibility and convenience of using the satellite-based ADS-B service in the SAM region**. (WP/17 26/10/18). Lima. 2018.

OACI. **ICAO SAM regional group site**. GREPECAS SAM. 2017b. Disponível em <https://www.icao.int/SAM/Documents/Forms/AllItems.aspx>. Acesso em 20 jul. 2020.

RTCA. **Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) (DO-242)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 1998.

RTCA. **Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) (DO 242 A)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 2002.

RTCA. **Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for 1090MHz Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) (DO 260)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 2000.

SPITZER, Cary R.; FERRELL, Uma; FERREL, Thomas. **Digital Avionics Handbook**. 3. Ed. Boca Raton, FL, United States: CRC Press. 2014.

# Regulación para ADS-B<sup>1</sup> en el espacio aéreo brasileño

*Regulation for ADS-B<sup>1</sup> in Brazilian airspace*

*Regulação para o ADS-B<sup>1</sup> no espaço aéreo brasileiro*

Raul Sandoval Cerqueira <sup>1</sup>

## RESUMEN

La vigilancia de Radiodifusión Dependiente Automática (ADS-B) es una tecnología bien conocida, estandarizada internacionalmente y reconocida como una forma económica de llevar a cabo vigilancia tipo radar, incluso en lugares donde la vigilancia por radar convencional no es adecuada. La implementación de esta tecnología significa la introducción de nuevas configuraciones del espacio aéreo monitoreado y nuevas capacidades operativas que deben ser entendidas por la comunidad aeronáutica y la regulación del Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA) y la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC) debe proporcionar procesos adecuados para las operaciones de la aviación civil para afrontar esta etapa evolutiva, mejorando conceptos y adaptando procedimientos. Este estudio, cuyo objetivo es contribuir al fortalecimiento de la regulación que apoyará a ADS-B en Brasil, fue desarrollado con un enfoque multimetodológico, incluyendo revisión de literatura, consulta de expertos, benchmark internacional y estudio de caso, y resultó en la identificación de 15 posibles mejoras regulatorias con impacto positivo en la implementación de ADS-B en el espacio aéreo nacional.

**Palabras clave:** ADS-B. Regulación. Vigilancia. Aviación Civil.

## ABSTRACT

*The Automatic Dependent Broadcasting Surveillance (ADS-B) is a well-known technology, internationally standardized and recognized as an inexpensive way to carry out radar-like surveillance, even in places where conventional radar surveillance is not adequate. The implementation of this technology means the introduction of new monitored airspace configurations and new operational capabilities. The regulation of the Department of Airspace Control (DECEA) and the National Civil Aviation Agency (ANAC) should provide adequate processes for civil aviation operations in order to face this evolutionary stage, improving concepts and adapting procedures. This study, whose objective is to contribute to the strengthening of the regulation that will support ADS-B in Brazil, was developed based on a hypothetical-deductive method, which included literature review, unstructured interviews of the focused type, international benchmarking and case study of ADS-B national implementation. The results showed the identification of possible regulatory improvements with a positive impact on the implementation of ADS-B in national airspace, to be subject to further verification and discussion.*

**Keywords:** ADS-B. Regulation. Surveillance. Civil Aviation.

I. Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC). Rio de Janeiro/RJ - Brasil. Mestrado em Advanced Master Air Navigation System Engineering and Operations pela Ecole Nationale de l'Aviation Civile(ENAC). E-mail: raul.cerqueira@anac.gov.br

Recibido: 18/08/21

Aceptado: 14/10/21

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

<sup>1</sup> ADS-B: Vigilância automática dependiente por radiodifusão (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*).

## RESUMO

*A Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) é uma tecnologia bastante conhecida, padronizada internacionalmente e reconhecida como uma forma barata de se realizar vigilância similar ao radar, inclusive sobre locais onde a vigilância por radar convencional não é adequada. A implementação desta tecnologia significa a introdução de novas configurações de espaço aéreo monitorado e novas capacidades operacionais. A regulamentação do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) deverá prover processos adequados para as operações da aviação civil de forma a fazer frente a esta etapa evolutiva. Este estudo cujo objetivo é contribuir para o fortalecimento da regulação que dará suporte ao ADS-B no Brasil foi desenvolvido com base no método hipotético-dedutivo, subsidiado por revisão bibliográfica, entrevistas não estruturadas do tipo focalizadas, estudos de casos de regulação internacional e estudo de caso de implantação nacional do ADS-B. Resultou na identificação de hipóteses de melhorias regulatórias com impacto positivo à implementação do ADS-B no espaço aéreo nacional, a serem submetidas à verificação e discussão posteriores.*

**Palavras-chave:** ADS-B. Regulação. Vigilância. Aviação civil.

## 1 INTRODUCCIÓN

La implantación de la Vigilancia Dependiente Automática (ADS-B) en Brasil exige que la reglamentación nacional sea mejorada para acompañar este paso evolutivo y proporcionar las condiciones necesarias para el uso seguro y eficiente de esta tecnología.

Frente a este problema, este estudio pretende identificar las posibilidades de mejora de la normativa brasileña en cuanto a la aplicación de reglamento relacionado con la implantación de ADS-B.

A partir de la metodología hipotético-deductiva, acompañada de técnicas de investigación como la revisión bibliográfica, las entrevistas no estructuradas de tipo focalizado y los estudios de caso, se elaboraron dichas hipótesis de mejora de la regulación.

## 2 METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló con base en el método hipotético-deductivo (LAKATOS, MARCONI, 2003), el cual fue subsidiado por múltiples técnicas de investigación.

Inicialmente, mediante la revisión de la literatura, se buscó el conocimiento para identificar el problema y proponer conjeturas para abordarlo. A continuación,

se realizó una entrevista no estructurada (LAKATOS, MARCONI, 2003) con expertos en la materia, seguida de un estudio de casos sobre la normativa internacional y un estudio de casos sobre la aplicación del sistema en el espacio aéreo nacional.

Este enfoque permitió mejorar las conjeturas iniciales, llegando a las hipótesis propuestas mejorar la reglamentación nacional sobre el uso de ADS-B en el espacio aéreo nacional.

Se advierte que en el ámbito de este trabajo, tales hipótesis no fueron sometidas a pruebas que permitan corroborarlas y, por lo tanto, se entiende que las mismas serían útiles como subsidios iniciales para los procesos de análisis de impacto regulatorio de las agencias pertinentes.

## 3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Historial

La evolución del uso de la comunicación de enlace de datos (Data Link) para fines de aviación se remonta a la década de 1970, con el primer ACARS - "Aircraft Communication Addressing and Recording System". (SPITZER, et al., 2014).

En 1983, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) creó el Comité Especial sobre Futuros Sistemas de Navegación Aérea (FANS) para estudiar el uso de "Automatic Dependent Surveillance" (ADS) para la aviación civil. (SPITZER, et al., 2014).

En 1998, la RTCA publicó el documento DO 242, en el que se definen las Normas Mínimas de Rendimiento para el Sistema Tecnológico de Aviación ADS-B (MASPS), y en 2000, la RTCA publicó el documento DO 260, en el que se establecen las Normas Mínimas de Rendimiento Operativo (MOPS) para los equipos ADS-B de 1090 MHz en el aire. (RTCA, 1998, 2000).

Se han desarrollado tres tecnologías de transmisión que están estandarizadas por la OACI para la ADS-B: UAT - Universal Access Transceiver (OACI Doc. 9861); VDL4 - VHF Digital Link Mode 4 (OACI Doc. 9816); 1090 MHz ES (OACI Doc. 9871), sin embargo en la Recomendación 1/7 de la "AN Conf / 11" en 2003, el Consejo de la OACI recomendó ADS-B 1090 MHz ES como el estándar internacional a utilizar. (OACI, 2012, 2016).

Debido al desarrollo de los estándares, existen tres versiones distintas de ADS-B basadas en 1090 MHz ES en uso hoy en día.

Añadiendo pasos importantes en el camino evolutivo de ADS-B, AIREON, una empresa creada en 2012, en asociación con la empresa Iridium, alojó sus receptores ADS-B especialmente diseñados en 66 satélites Iridium Next Constellation para proporcionar una cobertura ADS-B global (AIREON, 2019b, 2020).

### 3.2 Conceptos y definiciones relativos a la ADS-B

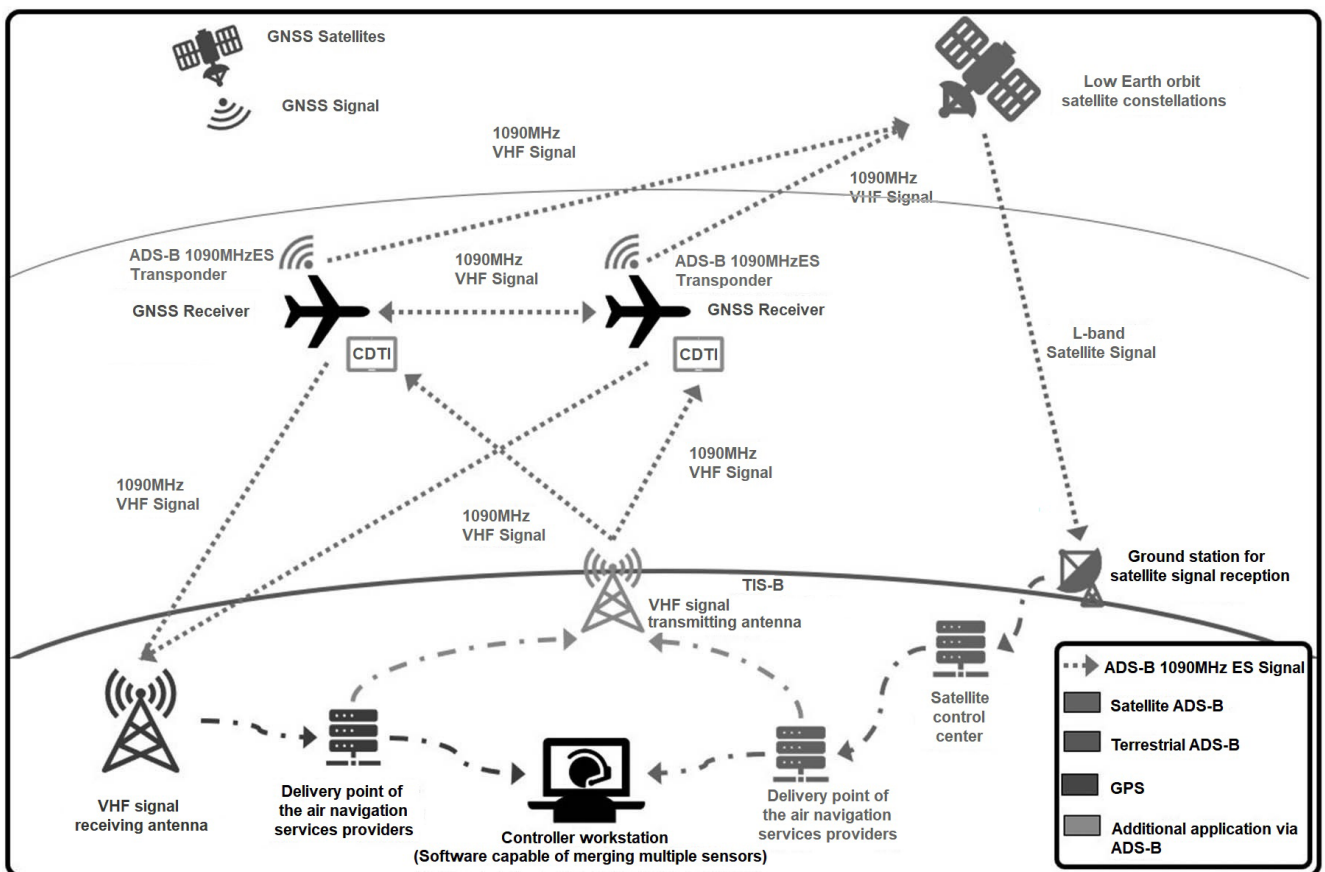
Para establecer un estándar internacional para el concepto de ADS-B, en el ANEXO 11, la OACI ha definido ADS-B como:

Vigilancia Dependiente Automática (ADS-B). Medio por el cual las aeronaves, los vehículos de aeródromo y otros objetos pueden transmitir y/o recibir automáticamente datos tales como la identificación, la posición y otros datos adicionales, según proceda, en un modo de transmisión a través de un enlace de datos. (OACI, 2016, p. 1-5, nuestra traducción al español).

Teniendo en cuenta las posibilidades al respecto, es importante destacar los dos conceptos distintos: ADS-B OUT, la capacidad principal, el medio por el cual la aeronave transmite su información de manera estandarizada y ADS-B IN, la capacidad de un vehículo o aeronave para recibir y procesar la información transmitida por otro. (OACI, 2014, p. 1-1, nuestra traducción al español).

ADS-B OUT requiere la implementación de algún tipo de capacidad de recepción para obtener resultados prácticos, que puede ser terrestre, por satélite o ADS-B IN. Además, como la información se origina en la aeronave transmisora, el número de aeronaves equipadas en el espacio aéreo es crítico para varias aplicaciones ADS-B.

Figura 1 - Sistema ADS-B basado en el transpondedor 1090MHz ES.



Fuente: Adaptado de AIREON (2019a), RTCA (2002) y CANSO (2016).

El diagrama de la Figura 1 resume el sistema ADS-B teniendo en cuenta la norma ES de 1090 MHz.

Como características comunes de todas las configuraciones ADS-B 1090MHz ES implementadas, es interesante destacar:

#### I. Información transmitida

Los transpondedores ADS-B transmiten los parámetros de la aeronave, como la identificación (dirección de 24 bits e identificación de vuelo según el plan de vuelo), la posición (latitud, longitud y altitud de presión), la velocidad tridimensional y la integridad de la posición, a través de los datos del modo de transmisión de enlace a 1090 MHz. (CANSO, 2016, p. 13, nuestra traducción al español).

#### II. Tiempo de actualización de la transmisión

La frecuencia de actualización de la información de posición es de dos veces por segundo, lo que se denomina comúnmente la frecuencia de actualización de ADS-B. (RTCA, 2000).

#### III. Requisitos de aviónica mínimos:

Sistema GNSS; transpondedor ES de 1090MHz; cuando se trata de un sistema ADS-B por satélite: transmisor de clase A1 y antena de avión montada en la parte superior. (AIREON, 2019b).



IV. Infraestructura mínima necesaria:

Una simple antena y un receptor conectados a enlaces de comunicación que entregan la información a la pantalla de situación que la muestra de forma similar a un radar. (OACI, 2012).

El sistema basado en satélites no requiere infraestructura terrestre y la información se entrega en un punto de entrega específico. (AIREON, 2019b).

V. Capacidades mínimas de vigilancia

Separación de al menos cinco millas náuticas (5 NM), sujeta al cumplimiento de ciertas condiciones.

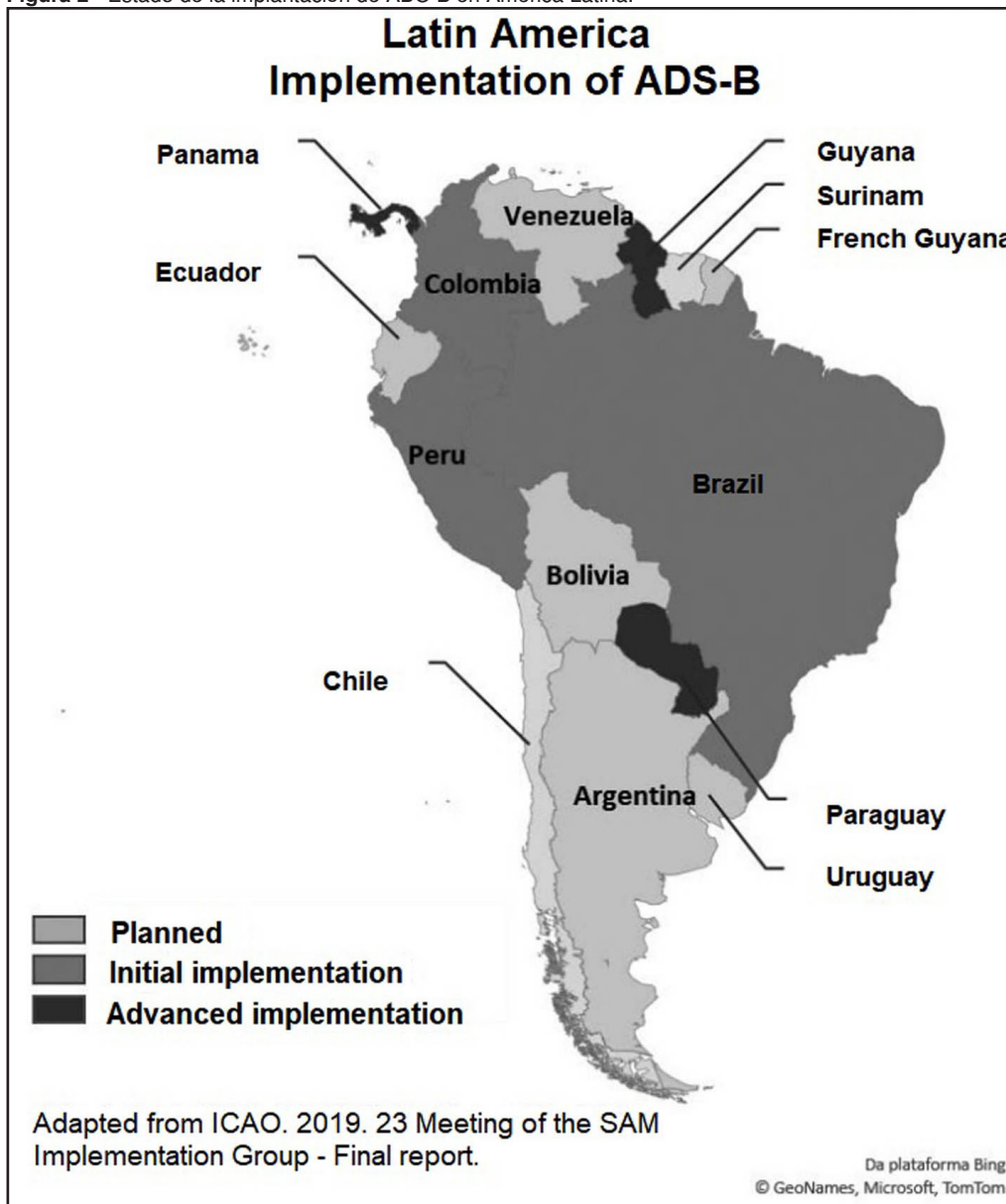
Ampliación de la cobertura de vigilancia a las bajas altitudes. (OACI, 2012).

3.3 ADS-B en América Latina

(GANP) de la OACI, Doc 9750 (OACI, 2019b), el tercer nivel es el regional. En la Oficina Regional para América Latina (SAM), la estrategia de despliegue de ADS-B prevé la cobertura de las áreas en ruta y terminales, con la participación de los usuarios y los proveedores de servicios, y se completará en 2023. (OACI, 2017a).

Los resultados alcanzados en cada estado contratante para 2019 se resumen en la Figura 2.

Figura 2 - Estado de la implantación de ADS-B en América Latina.



Fuente: Elaborado por el autor a partir de la información disponible en OACI (2019a).

Además, se realizó un estudio sobre la posibilidad de proporcionar ADS-B vía satélite, distribuyendo la señal a través de la red de comunicaciones digitales (REDDIG) existente en la región, y se concluyó que sería posible de forma económica y eficiente (OACI, 2018).

En este estudio se ha presentado una comparación de los costes estimados para los diferentes sistemas de vigilancia de la región, que puede verse en la Tabla 1.

### 3.4 ADS-B en Brasil

En concreto, en lo que respecta al despliegue de ADS-B en Brasil, un resultado factual conseguido fue el despliegue de un espacio aéreo plenamente operativo y restringido únicamente a las aeronaves equipadas con ADS-B en el TMA Macaé, en la cuenca de Campos. (OACI, 2019a).

En 2017, el plan de despliegue de ADS-B en Brasil preveía la instalación para baja altitud en las cuencas oceánicas y la instalación de 62 estaciones terrestres, norma RTCA DO 260, DO 260A y DO 260B, para la cobertura del espacio aéreo continental cubriendo áreas ATM homogéneas y principales flujos de tráfico aéreo. Además, se preveía que se hiciera antes de 2021 y sin mandatos, dividido en 04 fases como se puede ver en la Figura 3. (OACI, 2017a).

Sin embargo, con la llegada de la ADS-B basada en el espacio, este plan de implementación está siendo revisado y la nueva estrategia aún no ha sido publicada.

Un paso importante en esta dirección fue la exitosa integración de los datos ADS-B del satélite en el software utilizado por DECEA en sus rutinas de vigilancia. (AIREON, 2019a).

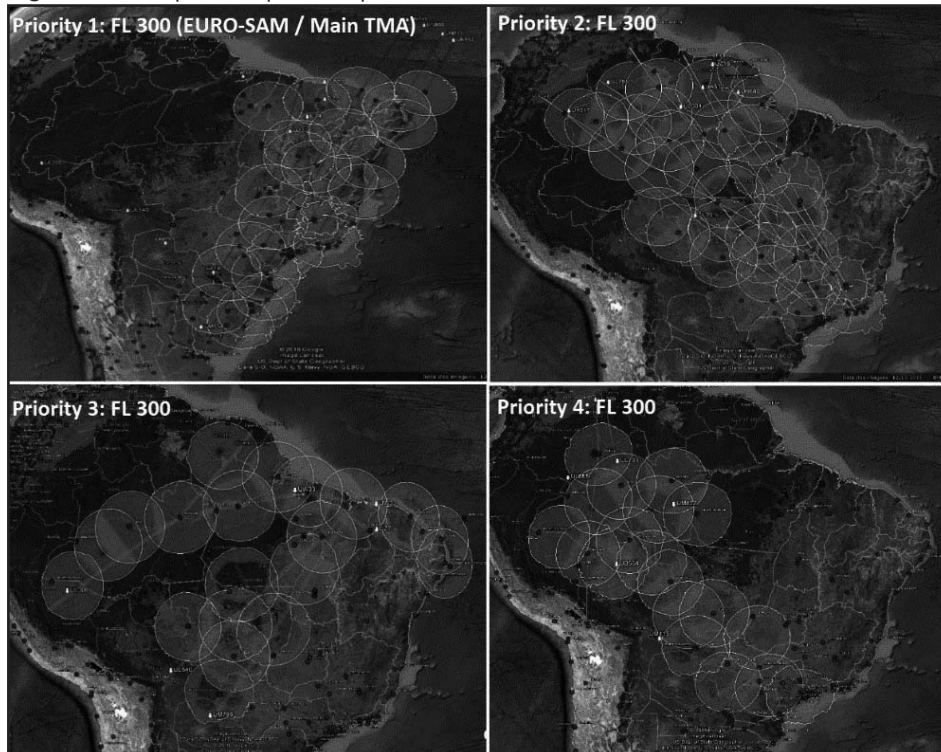
**Tabla 1** - Comparación del coste anual del sistema.

	% de cobertura		Coste anual/cobertura		
	ADS-B Sat.	SSR	ADS-B Sat.	SSR	ADS-B Terr.*
FL 100	100	27,86	0,53	4,25	1,27
FL 150	100	35,01	0,53	3,38	1,01
FL 250	100	46,26	0,53	2,56	0,77

\* Se adoptó un número ficticio de estaciones terrestres ADS-B igual al alquiler de las instalaciones SSR actuales.

Fuente: OACI (2018).

**Figura 3** - Fases previstas para la implantación de ADS-B.



Fuente: ICAO (2017a).

Además, la cooperación técnica entre Brasil y AIREON consiste en un plan de dos fases cuyo objetivo es evaluar el rendimiento del sistema en el espacio aéreo brasileño, analizando parámetros como: la precisión; la latencia; el intervalo de tiempo de actualización; los errores de posicionamiento; la disponibilidad; la continuidad; y la evaluación de diferentes configuraciones de antenas, entre otros. Aunque este plan está en su fase final, sus resultados aún no están disponibles (FAGUNDES, 2020).

### 3.5 Regulación de la ADS-B existente

El marco institucional de la aviación civil brasileña está compuesto por varias instituciones con funciones específicas. Dos de estas instituciones se complementan en la definición de la regulación de la aviación civil, son la DECEA y la ANAC. En relación con la tecnología ADS-B, dado que DECEA es el ANSP brasileño y también el regulador ATS, establece casi toda la normativa. Sin embargo, existe una interfaz normativa con la ANAC en lo que respecta a la aeronavegabilidad y las normas de vuelo.

En el marco de DECEA se menciona el ADS-B en las normas:

- DCA 351-2 Concepto operativo de la ATM nacional (BRASIL, 2011);
- ICA 100 31 Requisitos de los servicios de tráfico aéreo (BRASIL, 2017c);
- ICA 100 37 Servicios de tráfico aéreo (BRASIL, 2019b);
- CIRCEA 121-7 Inspección en vuelo para la vigilancia dependiente automática por radiodifusión (ADS-B) (BRASIL, 2017a);
- MCA 64-3 Manual de coordinación de búsqueda y rescate aeronáutico (BRASIL, 2019a);
- MCA 100-11 Cumplimentación de los formularios del plan de vuelo (BRASIL, 2017b);
- AIC 40-17 Vigilancia Automática Dependiente por Radiodifusión (ADS-B) en el TMA Macaé (BRASIL, 2018b);
- Reestructuración del espacio aéreo del Área de Control Terminal (TMA) de Macaé con la aplicación del sensor ADS-B, aumento de la cobertura VHF, implementación del concepto de espacio aéreo exclusivo ADS-B y provisión de productos meteorológicos del EMS-A (BRASIL, 2018a)).

Dentro de la ANAC, la referencia directa a la ADS-B sólo aparece en el documento IS 21-013 B “Instrucciones para obtener la aprobación para

la instalación de equipos GNSS(*Global Navigation Satellite Systems*)stand alone para las operaciones VFR e IFR”(BRASIL,2016).

La estructura básica para la reglamentación de las normas operacionales en la ANAC es establecida por el documento RBAC 091 - “Requisitos generales de operación para aeronaves civiles” (BRASIL, 2019c), que se alinea con las disposiciones contenidas en la norma norteamericana “Code of Federal Regulations - CFR, Title 14, Chapter I, Subchapter F, part 91” que se denomina “General Operating and Flight Rules”, que es la norma donde fueron definidos los requisitos obligatorios del ADS-B, en sus ítems 91.225 y 91.227. (ESTADOS UNIDOS, 2020).

Sin embargo, en la norma brasileña, los elementos correspondientes están marcados como “reservados” y no se ha definido ningún requisito. Por su parte, el requisito 91.215 establece una instrucción que permite el uso, pero no define una norma específica:

91.215 (b) Cuando el tipo de operación y/o el espacio aéreo lo requieran, la aeronave estará equipada con un transpondedor, con aprobación OTP (TSO), mantenido de acuerdo con la sección 91.413 de este Reglamento.

## 4 ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El análisis de la normativa vigente dio lugar a la identificación de lagunas o cuestiones que no se abordan en el marco normativo actual y que pueden ser objeto de mejora con vistas a apoyar la implantación de ADS-B en el espacio aéreo nacional:

- Nuevos tipos de vigilancia del espacio aéreo: En la actualidad, sólo existe un tipo de vigilancia ATS en el espacio aéreo continental brasileño, que está basado en el radar.
- Norma de transpondedor y restricción a otros tipos: La normativa no aclara qué modelo es obligatorio en el espacio aéreo brasileño ADS-B, ni tampoco cómo deben comportarse otros tipos de aeronaves equipadas al entrar en el espacio aéreo brasileño ADS-B.
- Capacidades previstas y requisitos y limitaciones correspondientes: No está claro qué aplicaciones ADS-B se esperan y los correspondientes requisitos y limitaciones de rendimiento del sistema, incluidos los equipos aéreos.
- Flota equipada: No hay un esfuerzo continuo para lograr un mayor nivel de equipos ADS-B en la flota y esto es un problema para varias aplicaciones.
- Objetivos específicos para la implantación de ADS-B: El despliegue de ADS-B se asocia a un aumento de la seguridad y la capacidad cerca

de los aeródromos o helipuertos e incluso a la vigilancia de los movimientos en tierra.

- Los contratos de concesión aeroportuaria como oportunidad: A lo largo de las sucesivas rondas de concesiones emprendidas por el Gobierno Federal de Brasil, los contratos han evolucionado. Como los contratos pretenden aumentar la seguridad y la capacidad del aeropuerto, sería una oportunidad para introducir la instalación obligatoria de ADS-B en el aeropuerto.
- ADS-B Satélite o ADS-B Terrestre: se espera que la ADS-B Satélite logre un mejor rendimiento que el radar, aunque peor que la ADS-B Terrestre en la mayoría de los casos, si se proporciona la infraestructura adecuada.

## 5 OPINIÓN DE LOS EXPERTOS

A través de entrevistas no estructuradas de tipo focalizado (LAKATOS, MARCONI, 2003) con 7 especialistas, siendo 1 de INFRAERO, 2 de empresas privadas, 2 de DECEA y 2 de ANAC, que ocupan posiciones estratégicas en el tema y tienen experiencia en la implementación de tecnologías para la gestión del espacio aéreo nacional, se obtuvieron comentarios para los temas del problema y se organizaron y consolidaron en el texto resumido, como sigue:

- Nuevos tipos de espacio aéreo con vigilancia: el sistema debe identificar automáticamente la mejor señal en cada fase de vuelo y proporcionar la información de forma homogénea, al controlador y a la tripulación, transparente para el controlador en términos de sensores, con nuevas funcionalidades y beneficios. El personal técnico de DECEA necesitará formación y se necesitarán nuevas normas de DECEA y ANAC.
- Estándar del transpondedor y restricción de otros tipos: el ES 1090MHz (0, 1 o 2) utilizado en la Cuenca de Campos puede ser el estándar, ya que DECEA ya lo utiliza y es un estándar internacional. Más sistemas añaden complejidad a la aplicación. No hay límite previsto para los parámetros de calidad de la señal.
- Capacidades previstas y requisitos y limitaciones correspondientes: La aplicación debe buscar la rentabilidad. En los casos en que la cobertura de radar ya está prevista, una condición sería el desmantelamiento del radar tras su implantación. Los radares primarios son una preocupación de la soberanía y no debe ser desactivada. Será una vigilancia de mayor precisión con mejora de los tiempos de actualización. Proporciona servicio de

vigilancia al usuario, incluso a baja altura en espacios aéreos oceánicos. No hay planes para TIS-B, FIS-B, ADS-R o herramientas de supervisión.

- Flota equipada: las compañías aéreas estarán equipadas, ya que los nuevos aviones ya están equipados y existen mandatos internacionales. Los operadores de carga pueden ser un problema debido al envejecimiento de su flota y la aviación general puede ser un reto aún mayor. El equipamiento de los aviones será opcional, quien esté mejor equipado utilizará el servicio. Actualmente no hay información sobre qué porcentaje de la flota está equipado. Se espera que los usuarios reconozcan el sistema y esto defina su futuro. No está previsto ningún mandato, aunque probablemente sea necesario.
- Objetivos específicos para la implantación de ADS-B: La ampliación de la cobertura de la vigilancia a bajas altitudes en las cuencas oceánicas, donde el movimiento off-shore es intenso, es un objetivo específico a realizar. Para la superficie del aeropuerto sería otra opción utilizar la señal ADS-B. DECEA se rige por las necesidades operativas y éstas darán forma al sistema.
- Los contratos de concesión aeroportuaria como oportunidad: las infraestructuras de gestión del tráfico aéreo no suelen formar parte de un contrato de concesión y para casos concretos probablemente sería beneficioso incluir a DECEA en los procesos de consulta iniciales. Los usos aeroportuarios como el SMGCS son posibles, pero es el gestor aeroportuario el que debe decidir si lo aplica. DECEA define la ICA 63-18 como una referencia.
- ADS-B por satélite o ADS-B terrestre: Se considera que la solución ideal es una combinación. Hay situaciones específicas en las que uno puede beneficiarse de cada tipo. Las condiciones que definirán el alcance del uso de uno u otro dependen de los resultados de las pruebas que aún están en curso. La viabilidad de la instalación, la calidad de la señal, la redundancia y la seguridad justifican el uso de ambos sistemas. El actual plan de implementación de ADS-B considera el ADS-B terrestre con sensores estratégicamente posicionados para proporcionar servicios de vigilancia por encima de FL245, los volúmenes del espacio aéreo TMA e incluso el agua sobre las cuencas oceánicas de Santos / Espírito Santo / Campos (ya implementado). Las pruebas



ADS-B por satélite están en curso, en un entorno controlado, donde es posible integrar los datos espaciales y los del radar y comparar los resultados. Se sabe que el parámetro de latencia fue peor de lo esperado, pero esto se debió a la red utilizada.

## 6 ESTUDIOS DE CASOS DE REGULACIÓN INTERNACIONAL

Se seleccionaron tres estados como muestra de la normativa internacional sobre ADS-B y sus principales aspectos se resumen en la Tabla 2 y la Figura 4.

Un caso de referencia en cuanto a las posibilidades del sistema, Estados Unidos de América (EEUU), ha realizado un robusto despliegue, con 650 antenas, cobertura total del espacio aéreo, 02 tipos de

transpondedores en uso, servicios adicionales como TIS-B, FIS-B y ADS-R y un mandato que está en vigor desde enero de 2020 que cubre a todos los usuarios, incluida la Aviación General. Estados Unidos (2020) y Estados Unidos (2015, 2018, 2019).

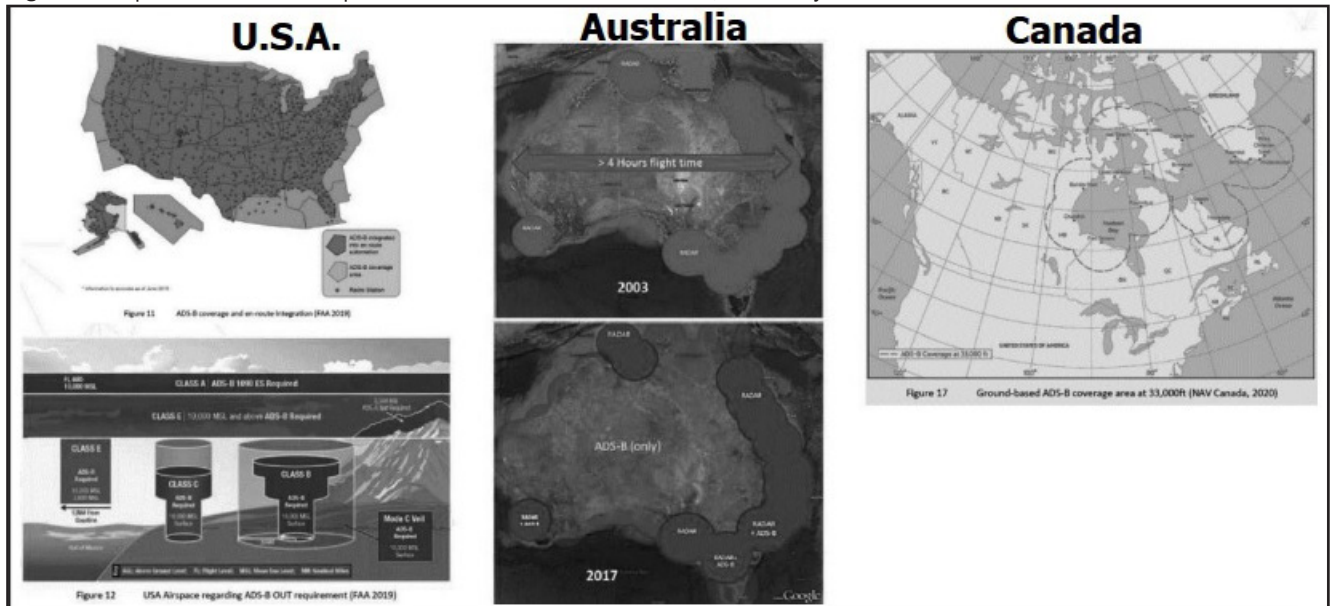
Australia, que destaca por la optimización de los sistemas de comunicación, navegación y vigilancia lograda mediante el uso de ADS-B, también utiliza ADS-B en todo su espacio aéreo como sistema principal de vigilancia desde 2009. Un despliegue optimizado con unas 70 antenas, cobertura total del espacio aéreo y 01 tipo de transpondedor en uso. Ha permitido la desactivación de 179 ayudas a la navegación. Australia también ha definido cuestiones regionales específicas en el DOC 7030 de la OACI en relación con el ADS-B y tiene mandatos para la aviación comercial, pero no para la aviación general. Australia (2015, 2020a, 2020b); OACI (2017b).

**Tabla 2** - Casos prácticos de reglamentación internacional - cuadro resumen.

Aspecto	E.U.A.	Australia	Canadá
Uso de ADS-B	Sistema de vigilancia primario	Sistema de vigilancia primario	Sistema de vigilancia primario (donde esté disponible)
Cobertura	Todo el país	Todo el país	Espacio aéreo del norte* (*plan nacional)
Infraestructura(estaciones terrestres)	650	70	15
Servicios ADS-Badicionales	TIS-B; FIS-B; ADS-R;	None	None
Aplicaciones avanzadas deADS-B	CAVS; ITP; IM	No hay	No hay
Tipo de Transponder	1090 MHz ES 2 UAT 978MHz	1090 MHz ES 0,1 o 2	1090 MHz ES
Reglamentos principales	14 CFR § 91.225; 14 CFR § 91.227; AC 90 114 B; AC 20 165 B; SRT 47 Rev.4; TSO C166b; TSO C154c	CAO 20.18; AC 21-45; AC 91-23;	AC 700 009 e;
Mandato para equipar la flota	Sí	Sí	No
El mandato incluye la aviación general	Sí	No	-
Mandato incluye a los extranjeros	Sí	Sí	-

**Fuente:** Elaborado por el autor a partir de información de documentos de Estados Unidos (2015, 2018, 2020), Australia (2015, 2020a, 2020b), NAVCanada (2020) y OACI (2017b)).

Figure 4 - Representaciones del espacio aéreo ADS-B de Estados Unidos, Australia y Canadá.



Fuente: Elaborado por el autor adaptado de OACI (2017b).

Por último, debido al tamaño de su espacio aéreo y al uso pionero de la solución satelital que es una posibilidad para Brasil y también con un vasto espacio aéreo, Canadá utiliza ADS-B desde 2010 en el espacio aéreo del noreste, con un tipo de transpondedor y no tiene un mandato definido. Es pionera en el uso de ADS-B por satélite, que está en pruebas para todo el país. NAVCanada (2020), Canadá (2011, 2018) y OACI (2017b).

### 7 ESTUDIO DE CASO TMA ME

Este es el primer caso de despliegue del sistema ADS-B en el espacio aéreo brasileño. Fue un proyecto realizado entre 2009 y 2018.

Logró importantes resultados y los correspondientes beneficios:

- Separación IFR x IFR para aeronaves bajo vigilancia: 5NM (AIC 40/17);
- Reducción de los retrasos en un 43% / Aumento de la puntualidad de los vuelos en un 16%;
- Búsqueda y rescate (SAR) más eficaces;
- Reducción del tiempo de vuelo con un ahorro de combustible estimado en hasta 1,31 millones de reales al año; y
- 122 helicópteros equipados (CANSO, 2019).

El escenario inicial y después de la aplicación se puede ver en la Figura 5.

Figura 5 - Principales aspectos del caso de implantación de ADS-B en TMA ME.

TMA ME		
Aspect	Before	After
<b>Infrastructure</b>	APP-Macaé: PSR / SSR Radar; 03 <i>offshore</i> radios	APP-Macaé: PSR Radar / SSR radar; 06 ADS-B antennas: 02 onshore/ 04 <i>offshore</i> .
<b>Coverage</b>	Sector 1: Radar; Sector 2: Conventional surveillance; From 2.000' to FL 145.	Sector 1 and 2: Fusion ADS-B + Radar; Sector 3 to 8: ADS-B (sep. 5NM) From the surface to FL 145.

Fuente: Elaborado por el autor a partir de datos extraídos de BRASIL (2018a, 2018b), OACI (2018a) e INFRAERO (2019a, 2019b).

## 8 PROPUESTAS PARA MEJORAR EL REGLAMENTO

Consolidando la información obtenida de la revisión, las entrevistas, los estudios de caso de la regulación internacional, el estudio de

caso de Terminal ME y Teniendo en cuenta las condiciones de despliegue en Brasil, con el fin de abordar las cuestiones de una mejor regulación para subvencionar el despliegue de ADS-B en el espacio aéreo nacional, se propusieron las hipótesis identificadas en la Tabla 3.

**Tabla 3 - Propuestas de mejora regulatoria para ADS-B.**

Descripción	Motivación	Principales beneficios esperados
<b>Problema: Nuevos tipos de espacio aéreo con vigilancia</b>		
<b>Propuesta:</b> ADS-B obligatorio por encima de FL290 y en el espacio aéreo oceánico		
Establecer el requisito de que las aeronaves estén equipadas cuando estén por encima de FL290 y en el espacio aéreo oceánico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir regla clara para exigir o equipamiento ADS-B visando a segurança operacional;</li> <li>Reducir el esfuerzo de implantación: las aeronaves mejor equipadas circulan por el espacio aéreo RVSM (por encima de FL290); el tráfico <i>off-shore</i> puede promover la instalación de ADS</li> <li>Prover condições para novas funcionalidades e benefícios inerentes ao sistema ADS-B.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimizar las interferencias de las aeronaves no equipadas en el espacio aéreo donde se prestan los servicios ADS-B;</li> <li>Proporcionar servicios ADS-B en una parte del espacio aéreo brasileño, con el 100% de las aeronaves usuarias equipadas;</li> </ul>
<b>Propuesta:</b> Documento específico ADS-B		
Preparar un documento específico que contenga todos los aspectos de las normas de vuelo y aeronavegabilidad relacionados con el ADS-B previstos para su uso en el espacio aéreo nacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promover el cumplimiento del sistema;</li> <li>Facilitar la formación de usuarios y controladores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejorar la seguridad operativa mediante el conocimiento.</li> </ul>
<b>Problem: norma de transpondedor y restricción a otros tipos</b>		
<b>Propuesta:</b> Norma para el transpondedor ADS-B y cero señales malas		
Establecer 1090MHz ES 0,1 o 2 como norma brasileña y exigir que otras normas no transmitan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir al mínimo los casos de aeronaves con equipos no conformes;</li> <li>Optimizar la complejidad del sistema;</li> <li>Proporcionar un vector de negocio para la industria responsable del equipamiento de las aeronaves;</li> <li>Prohibición de señales inadecuadas para el ADS-B nacional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alineación con la norma internacionalmente reconocida;</li> <li>Aumento de la disponibilidad de equipos ADS-B en la flota.</li> </ul>
<b>Propuesta:</b> Calidad mínima de la señal transmitida		
Establezca los límites de los parámetros de calidad que forman parte de la señal transmitida: NUC, NIC, NAC, SIL.	Garantizar las condiciones mínimas previstas del sistema para las funciones de vigilancia deseadas.	Mejora de la seguridad y de las condiciones básicas para las aplicaciones ADS-B.
<b>Propuesta:</b> El transpondedor que cumpla con los requisitos y esté operativo debe transmitir		
Hacer obligatorio que las aeronaves adecuadamente equipadas transmitan la señal ADS-B durante todo el vuelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximizar la calidad de la señal disponible en los espacios aéreos ADS-B;</li> <li>Establecer la condición para las acciones de aplicación contra la conducta insegura en el espacio aéreo ADS-B.</li> </ul>	Reducir los riesgos de que las aeronaves en vuelo no sean detectadas, contribuyendo a la mejora de la seguridad operativa.

Fuente: El autor.

**Tabla 3 - Propuestas de mejoras reglamentarias para ADS-B (continuación).**

<b>Propuesta:</b> Procedimiento para transpondedores no conformes, no operativos y excepciones		
Establecer procedimientos para tratar casos específicos relativos a vuelos sin la correspondiente transmisión ADS-B.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar las condiciones de vuelo de las aeronaves que no están debidamente equipadas;</li> <li>Garantizar las condiciones de vuelo de las aeronaves que, por razones válidas, no pueden transmitir la señal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resolver las excepciones y permitir los vuelos con seguridad.</li> </ul>
Problema: Capacidades previstas y requisitos y limitaciones correspondientes		
<b>Propuesta:</b> Se requiere autorización para las aplicaciones avanzadas de ADS-B IN		
Establecer el requisito de obtener una autorización previa para el uso de aplicaciones avanzadas de ADS-B IN.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Certificando que o ADS-B IN avançado da ADS-B IN são realizados com o equipamento apropriado e tripulação treinada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proporcionar condiciones para la realización segura de maniobras avanzadas ADS-B IN en el espacio aéreo brasileño.</li> </ul>
<b>Propuesta:</b> Declaración de que no hay servicios ADS-B complementarios		
Disposición específica del documento para informar a los usuarios del espacio aéreo de que no hay servicios como TIS-B; FIS-B; ADS-R.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evite la confusión con las capacidades disponibles en otros países.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejora de la seguridad.</li> </ul>
<b>Problema: flota equipada</b>		
<b>Propuesta:</b> Seguimiento de la disponibilidad de ADS-B en la flota de aviones		
Implementar una rutina para controlar la instalación del transpondedor ADS-B 1090MHz ES en las aeronaves que utilizan el espacio aéreo nacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proporcionar información para planificar el despliegue de ADS-B y aplicar políticas relacionadas con su uso;</li> <li>Tratar de conseguir las condiciones necesarias para implantar aplicaciones ADS-B que requieran el 100% de la aviones equipados y transmitiendo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Activo informativo para toda la industria.</li> </ul>
<b>Problema: Objetivos específicos para la implantación de ADS-B</b>		
<b>Propuesta:</b> Desmantelamiento de la infraestructura como parte del plan		
En la planificación del despliegue, considere la posibilidad de optimizar los recursos mediante el desmantelamiento de estaciones de radar y otras ayudas cuando sea posible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimizar la emisión de señales de radio en la frecuencia de 1090MHz y garantizar la capacidad de los sistemas;</li> <li>Reducir el coste operativo de los sistemas de comunicación, navegación y vigilancia del espacio aéreo en su conjunto;</li> <li>Aumentar la eficacia de los servicios de comunicación, navegación y vigilancia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimización de los sistemas de comunicación, navegación y vigilancia.</li> </ul>

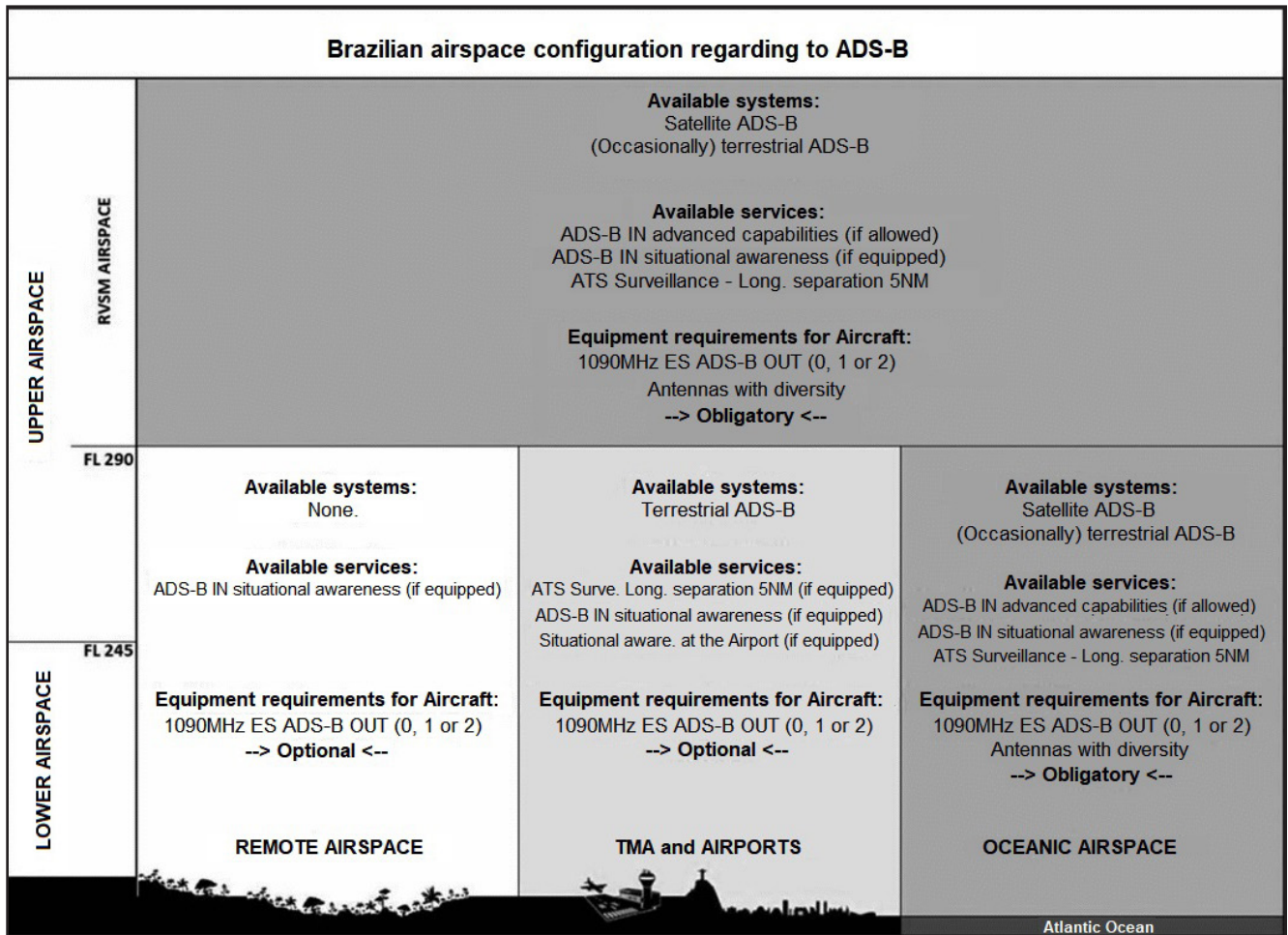


**Tabla 3 - Mejoras reglamentarias propuestas para ADS-B (continuación).**

<b>Propuesta:</b> Base de datos y herramientas de supervisión		
A la hora de configurar el sistema, hay que tener en cuenta la implementación de recursos para la recogida y el almacenamiento estructurado de datos procedentes de ADS-B.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promover el conocimiento y el aprendizaje a partir de los datos operativos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proporcionar datos para el análisis y la mejora de la aviación nacional.</li> </ul>
<b>Problema:</b> los contratos de concesión de aeropuertos como oportunidad		
<b>Propuesta:</b> los contratos de concesión de aeropuertos como oportunidad		
A la hora de implantar el sistema, considere la posibilidad de que la instalación, la puesta en marcha y el mantenimiento del ADS-B cerca de los grandes aeropuertos se asigne al sector privado a través del contrato de concesión del aeropuerto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asignar los costes a la entidad beneficiaria de los resultados del sistema, ya que el suministro de ADS-B en tierra aportará beneficios operativos al aeropuerto;</li> <li>Reducir el esfuerzo para la implantación del sistema, mediante inversiones privadas, que mitiguen los problemas inherentes a la obtención de recursos públicos;</li> <li>Aumentar los recursos empleados en los contratos de concesión para mejorar la seguridad operativa y aumentar la capacidad aeroportuaria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instalación más rápida de ADS-B terrestre;</li> <li>Beneficios para la vigilancia de la superficie del aeropuerto gracias a la capacidad de recepción de la señal ADS-B.</li> </ul>
<b>Problema:</b> ADS-B Satélite o ADS-B Terrestre		
<b>Propuesta:</b> Combinación de ADS-B terrestre y ADS-B por satélite		
En la configuración del sistema, considere el despliegue de ADS-B por satélite en todo el espacio aéreo oceánico y continental superior a de FL 290 y la terrestre en 52 aeropuertos (aeropuertos con más de 200.000 pax/año).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir el esfuerzo de implantación, ya que el ADS-B por satélite no requiere infraestructura y la infraestructura terrestre podría aprovechar las ubicaciones cercanas a los principales aeropuertos;</li> <li>Garantizar la alta calidad de la señal recibida en los lugares más concurridos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menores costes de explotación;</li> <li>Una mejor cobertura;</li> <li>Nuevas capacidades;</li> <li>Información integrada.</li> </ul>

**Fuente:** El autor.

Figura 6 - Perfil del espacio aéreo brasileño en relación con la ADS-B.



Fuente: The author.

## 9 CONCLUSIONES

ADS-B es una tecnología que ofrece una cobertura de vigilancia ampliada, una separación similar a la de un radar, un tiempo de actualización mejor que el de un radar, posibilidades de aplicación mejoradas y una base para futuros usos que se están desarrollando, todo ello a un coste sustancialmente menor.

Teniendo en cuenta que la implementación está en curso y se completará pronto, es necesario mejorar la regulación, abarcando, de alguna manera, todos los aspectos relacionados con la aviación civil para garantizar el uso seguro y eficiente de la tecnología en el espacio aéreo brasileño.

En este estudio se identificaron aspectos importantes como mejoras normativas y, en una etapa posterior, se espera que sean buenas aportaciones para los debates en los foros adecuados.

## 10 SIGLAS

- ADS-B - Vigilancia Automática Dependiente por Radiodifusión;
- ADS-R - Automatic Dependent Surveillance-Rebroadcast;
- ATM - Air Traffic Management;
- FIS-B - Flight Information Service - Broadcast;
- FL - Flight Level;
- GNSS - Global Navigation Satellite System;
- NAC - Navigation Accuracy Category;
- NIC - Navigation Integrity Category;
- NUC - Navigation Uncertainty Category;
- PSR - Primary Surveillance Radar;
- RVSM - Reduced Vertical Separation Minima;
- SIL - Source Integrity Level;
- SMGCS - Surface Movement Guidance and Control System;
- SSR - Secondary Surveillance Radar;
- TIS-B - Traffic Information Service - Broadcast.

## REFERENCIAS

AIREON. **AIREON data successfully integrated with ATECH Sagitario system.** AIREON website, 2019a. Disponível em: <https://aireon.com/2019/10/21/aireon-data-successfully-integrated-atech-sagitario-system/>. Acesso em 22 jul. 2020.

AIREON. **The Executive Reference Guide to Space-Based ADS-B.** AIREON website, 2019b. Disponível em: <https://www.aireon.com>. Acesso em 27 dez. 2019.

AIREON. **Timeline.** AIREON website, 2020. Disponível em: <https://aireon.com/timeline/>. Acesso em 22 jul. 2020.

AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **AC 21.45 Airworthiness approval of airborne automatic dependent surveillance broadcast equipment.** Canberra, ATC, Australia. 2015.

AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **AC 91.23 ADS-B for enhancing situational awareness.** Canberra, ATC, Australia. 2020a.

AUSTRÁLIA. Civil Aviation Agency Authority. **CAO 20.18 Aircraft equipment - basic operational requirements.** Canberra, ACT, Australia. 2020b.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Concepção operacional ATM nacional (DCA 351-2).** Brasília, DF, Brasil. 2011.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Inspeção em voo para Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) (CIRCEA 121-7).** Brasília, DF, Brasil. 2017a.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Manual de Coordenação de Busca e Salvamento Aeronáutico (MCA 64-3).** Brasília, DF, Brasil. 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Preenchimento dos formulários de plano de voo (MCA 100-11).** Brasília, DF, Brasil. 2017c.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Reestruturação de espaço aéreo da área de controle terminal (TMA) de Macaé com aplicação do sensor ADS-B, aumento da cobertura VHF, implementação do conceito de espaço aéreo exclusivo ADS-B e prov. de prod. met. a partir de EMS-A (AIC 47/18).** 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: 2018a.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Requisitos dos serviços de tráfego aéreo (ICA 100-31).** Brasília, DF, Brasil. 2017b.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Serviços de Tráfego Aéreo (ICA 100-37).** Brasília, DF, Brasil. 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão (ADS-B) na TMA Macaé (AIC 40-17).** Brasília, DF, Brasil. 2018b.

BRASIL. Ministério da infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Brazilian Civil Aviation Sector.** Sítio da ANAC. 2021. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/en/about-anac/brazilian-civil-aviation-sector>. Acesso em 28 abr. 2020.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Instruções para obtenção de aprovação de instalação de GNSS (IS 21-013).** Ed. B. Brasília, DF, Brasil. 2016.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Agência Nacional de Aviação Civil. **Requisitos gerais de operação para aeronaves civis. (RBAC 91).** ed. EMD 01. Brasília, DF, Brasil. 2019.

CANADÁ. Transport Canada. **Automatic Dependent Surveillance – Broadcast.** 02 ed. Ottawa, ON, Canada. 2011.

CANADÁ. Transport Canada. **TP 6010 Canada's Airspace.** 3 ed. Ottawa, ON, Canada. 2018.

CANSO. **ANSP Guidelines for Implementing ATS Surveillance Services Using Space-Based ADS-B.** Vol. 1. Montréal, Quebec, Canada: 2016. Disponível em: <https://www.canso.org/>. Acesso em 16 jan. 2020.

CANSO. **SIRIUS written in the stars.** Airspace 1(47), p. 32. 2019. Disponível em: <https://www.canso.org/airspace-47-q4-2019>. Acesso em 16 jan. 2020.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **AC 20 165 B - Airworthiness Approval of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast OUT Systems.** Washington, DC, USA. 2015.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **AC 90 114 B - Automatic Surveillance-Broadcast Operations.** Ed. B. Washington, DC, USA. 2019.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **SRT 047 - Surveillance and Broadcast Services Description Document**. ed. 04. Washington, DC, USA. 2018.

ESTADOS UNIDOS. U.S. Government Publishing Office. National Archives and Records Administration. Office of the Federal Register. **CFR Title 14 Chapter I Subchapter F Part 91 - General Operating and Flight Rules**. eCFR, USA, Editor. 2020. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=14:2.0.1.3.10>. Acesso em 06 ago. 2020.

FAGUNDES, Marcelo Mello. **DECEA ADS-B Satelital**. Sítio do DECEA. 2020. Disponível em DECEA: <https://www.decea.mil.br/>. Acesso em 11 fev. 2021.

INFRAERO. **Manual do controle de aproximação de Macaé**. Macaé, RJ, Brasil. 2019a.

INFRAERO. **Modelo operacional do controle de aproximação Macaé - APP ME**. Macaé, RJ, Brasil. 2019b.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. Ed. São Paulo: Atlas 2003.

NAV CANADA. NAV Canada Web Site. 2020. Disponível em <https://www.navcanada.ca/EN/products-and-services/Pages/Space-based-ADS-B.aspx>. Acesso em 12 de 08 de 2020,

OACI. **23 Meeting of the SAM Implementation Group** - Final report. Program follow up. ICAO, SAM office, Lima. 2019a.

OACI. **Annex 10 – Aeronautical Telecommunications**. Vol. IV - Surveillance and Collision Avoidance Systems. 5. Ed. Montréal, Quebec, Canada: 2014.

OACI. **Annex 11 - Air Traffic Services**. 14. Ed. Montréal, Quebec, Canada: OACI 2016.

OACI. **Assessment of ADS-B and Multilateration Surveillance to Support Air Traffic Services and Guidelines for Implementation (Cir 326)**. Montréal, Quebec, Canada: OACI 2012.

OACI. **Global Air Navigation Plan – GANP**. Doc 9750. GANP Portal. 2019b. Disponível em: <https://www4.icao.int/ganpportal/>. Acesso em 16 jul. 2020.

OACI. **SAM meetings documents**. ICAO web site. 2017a. Disponível em: <https://www.icao.int/SAM/Documents/Forms/AllItems.aspx>. Acesso em 16 jul. 2020.

OACI. **Status of ADS-B implementation in Brasil (WP/08 Rev.2)**. Working paper, ICAO, SAMIG. Mexico city. 2018a.

OACI. **Study of the feasibility and convenience of using the satellite-based ADS-B service in the SAM region**. (WP/17 26/10/18). Lima. 2018.

OACI. **ICAO SAM regional group site**. GREPECAS SAM. 2017b. Disponível em <https://www.icao.int/SAM/Documents/Forms/AllItems.aspx>. Acesso em 20 jul. 2020.

RTCA. **Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) (DO-242)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 1998.

RTCA. **Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) (DO 242 A)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 2002.

RTCA. **Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for 1090MHz Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) (DO 260)**. Washington, DC, USA: RTCA Inc. 2000.

SPITZER, Cary R.; FERRELL, Uma; FERREL, Thomas. **Digital Avionics Handbook**. 3. Ed. Boca Raton, FL, United States: CRC Press. 2014.



# 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<sup>I</sup>

Pedro Arthur Linhares Lima<sup>II</sup>

## 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 km<sup>2</sup>, 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 km<sup>2</sup>, 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)
$\alpha_n$	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 ( $\alpha_n$ ) 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  $\alpha_n$

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:

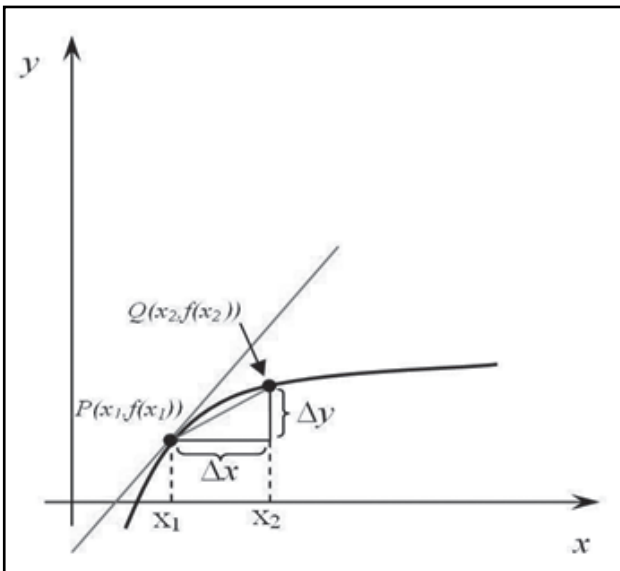
**Modelo 1 - Cálculo do  $N_{ref}$ .**

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

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 $N_{ref}$

$TTS = 135,65$  segundos;

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

$T = 6987,6$  segundos.

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

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 ( $\alpha n$ ), 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 $N_{pico}$

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

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

$T_{máx} = 9290,4$  segundos

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

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

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

# The recovery of air traffic growth in the South Atlantic after the COVID-19 pandemic and air traffic flow management: calculating airspace capacity using 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*

*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<sup>I</sup>

Pedro Arthur Linhares Lima<sup>II</sup>

## ABSTRACT

Brazil geostrategic situation is extremely relevant in the decision-making process of development policies in South America. With the approval of the European Union-Mercosur Free Trade Agreement, a considerable growth is expected in the air transportation of cargo and passengers. Although the impacts caused by the COVID-19 pandemic have been catastrophic for the global aviation, the recovery of air operations along with the stagnant growth of the industry could cause traffic congestion in the airspace. This propositional scenario could be even more severe in the 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 suitable for the international standards. The accurate results of the calculations will provide the creation

of quality indicators which will guide investments in technologies, equipment and human resources, in order to improve the efficiency of the air traffic flow management system with regard to the growth of air traffic in the South Atlantic airspace.

**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*

I. University of the Air Force (UNIFA). Rio de Janeiro/RJ – Brazil. Master in Master's Degree in Aerospace Sciences Department by University of the Air Force (UNIFA). *E-mail:* eliseucavalcanti@yahoo.com.br

II. University of the Air Force (UNIFA). Rio de Janeiro/RJ – Brazil. Doctor Science in Industrial Engineering by Universidade Federal do Rio de Janeiro(UFRJ). *E-mail:* linharespall@fab.mil.br

Received: 11/19/20

Accepted: 09/15/21

The acronyms and abbreviations contained in this article correspond to the ones used in the original article in Portuguese.

*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.

## 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. Crecimiento. Gerenciamento. Atlântico Sul.

## 1 INTRODUCTION

Brazil geostrategic position in South America directly influences the countries of the Region in political decision-making processes for South America development, according to the National Defense Policy (BRASIL, 2020, p. 77). One of the dominant elements of this scenario, which interferes in the international relations in South American strategic environment, is the Brazilian airspace, which, according to the Department of Airspace Control (DECEA, 2021),

[...] extends beyond its borders. It exceeds the area over its territory and reaches a significant portion of the Atlantic Ocean, totaling 22 million km<sup>2</sup>, over land and sea, as agreed in International Treaties.

This range makes Brazil responsible for managing flights in the main oceanic air corridor in South America, in which commercial and cargo flights between Europe and South America pass through. There is an expectation of growth in the number of air operations, considering the approval of the Free Trade Agreement between Mercosur and the European Union for this corridor. According to Agência Brasil,

Mercosur and European Union countries will constitute one of the largest free trade areas on the planet from the Agreement announced on June 28, 2019, in Brussels. Together, the two blocks represent about 25% of the world economy and a market of 780 million people (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

The economic upturn, stimulated by the Agreement between the European Union and Mercosur should increase the growth of air cargo and passenger aviation in the oceanic airspace of the South Atlantic, which was affected by the COVID-19 health emergency. This prognosis raises the necessity of assessing the aircraft absorption capacity in the main oceanic air corridor in South America, under the responsibility of Brazil, in which all the air traffic between Europe and South America is addressed.

According to the Publication of Aeronautical Information (DECEA, 2020), the Brazilian airspace, due to its huge air space, is divided into smaller portions, which are called sectors. The Publication of Aeronautical Information (DECEA, 2020) also emphasizes that air traffic services in the oceanic airspace sectors are provided by Controller–Pilot Data Link Communication (CPDLC) and Automatic



Dependent Surveillance-Contract (ADS-C), without the aid of radars. As a result, there are greater inaccuracies in relation to the aircraft positions on air routes, for monitoring purposes.

Considering this operational situation, the International Civil Aviation Organization (ICAO, 2016) provides for the application of longitudinal separations of 80 nautical miles, approximately 148 km, and lateral separations of 50 nautical miles, approximately 93 km, between aircraft which occupy the same altitudes and the same flight routes. Due to these characteristics, the geographic coordinates established in the Publication of Aeronautical Information – Brazil (DECEA, 2020) define large sectors for the Brazilian oceanic airspace.

In order to manage the air traffic flow, to ensure fairness and quality in the provision of air traffic services, it is essential to establish the capacities of these sectors to achieve balance between air traffic demands and capacities. DECEA, through the Air Navigation Management Center (CGNA), developed a methodology for calculating the capacity of sectors, detailed in the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014), based on the international standards.

This model, used in Brazil, allows to assess airspace sector capacities; however, the accuracy of the measurement results is adjusted for sectors in which the mean flight times — measured from the entry to the exit of the sector aircraft — is not longer than 28 minutes. Above this time, the values may be full of discrepant effects, as admitted by the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13-14): “The convergence factor has the function of minimizing discrepant effects in large sectors [...]”.

In view of the situation and considering the importance of accurate measurement of the oceanic airspace sector capacity for the air traffic flow management, due to the growth expectation of the air traffic over the South Atlantic, this article is intended to propose a new mathematical model with the objective of nullifying the distortions caused by long flight times in the sector. Considering that the current formula cannot solve such distortions, this proposal is necessary to produce sector capacity values within the limits established in international standards.

Since this scientific investigation has already been contextualized, the research problem and the general and specific objectives will be conducted, in order to guide the development of this work.

## 1.1 Research problem

The research problem aims to know how the new mathematical model will be able to reduce the discrepant effects caused by long flight times in the control sector and limit the calculated capacity values to those established in standards.

## 1.2 Hypothesis

It is expected that the new mathematical model will be able to nullify the discrepant effects caused by long flight times in the sector and generate capacity results that are within the limits of the regulations in force.

## 1.3 Objectives

### 1.3.1 General objective

This work aims to analyze the current and a proposed mathematical model, which are used to measure airspace sector capacity. These models are used to identify the discrepant effects of the current model and the mathematical devices created for the proposed model. The distortions of the capacity results, caused by long flight times in the sector, could be nullified.

### 1.3.2 Specific objectives

- 1) Examine the characteristics and identify the distortions of the current mathematical model adopted by DECEA, used to measure airspace capacity;
- 2) Detail the calculations of the current and the proposed models; and
- 3) Calculate the sector capacity, using the new mathematical model and real data.

## 1.4 Justification

The academic and professional proposal of the project is to develop a mathematical model capable of measuring the capacities of the large sectors of the airspace, since the current mathematical formula, approved by DECEA, established in the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13-14), presents discrepant effects for sectors in which the average flight time is longer than 28 minutes.

Therefore, developing a new mathematical model, capable of nullifying the undesirable effects arising from the current formula, will contribute

to the achievement of more accurate results and indicators that can guide investments in technologies, equipment, human resources and procedures for better efficiency of the flow management in the South Atlantic oceanic airspace.

## 1.5 Methodology

### 1.5.1 Approach

This study was carried out through a quantitative research method, because calculations were performed based on real data from large control sectors, using the current mathematical model and the proposed one.

### 1.5.2 Research objective

Starting from the objective, the research was explanatory, for real data of the operation. This procedure aimed to identify the discrepancies produced by the current mathematical model, used to calculate the capacity of the sectors. Subsequently, the same data were inserted into the new mathematical model and the results were compared.

### 1.5.3 Research type

This study was a documentary research. Documents from the Brazilian Aeronautics Command and the International Civil Aviation Organization that deal with this subject were chosen to comprise the documentary corpus, as well as texts that address the possible economic effects arising from the agreement between Mercosur and the European Union. These texts also emphasize the importance of the oceanic air corridor in South America, considering the growth expectation in air operations in the region.

### 1.5.4 Validation

Real data of the operation were collected *in loco*, at the Atlantic Area Control Center, so that the capacity values of sectors of the Brazilian oceanic airspace were calculated, by using the proposed mathematical formula. The results were carefully analyzed by the air traffic controllers of the Atlantic Area Control Center, who considered the technical operational criteria for the validation of the results with the use of the proposed model.

## 1.6 Research structure

This research is divided into four chapters: Introduction, Economic Development and Strategic Environment, Brazilian Airspace, Analysis of Mathematical Models for Capacity Calculation, and Conclusion.

Chapter 1 briefly discusses Brazil geostrategic position in South America and the future economic situation in the region, with regard to the agreement approval between Mercosur and the European Union, as well as the expected growth recovery in air operations.

Chapter 2 is dedicated to addressing the expected economic development in South America, the importance of recovering air operations for the countries in the strategic surroundings of South America and the impacts caused by the COVID-19 health emergency.

Chapter 3 presents the structures of the Brazilian airspace and the singularities of the oceanic airspace sectors.

Chapter 4 discusses the capacity methodology adopted in Brazil to establish the sector abilities, as well as the in-depth analyses of the mathematical models.

Finally, in the conclusion, the relevant highlights that led to deep investigations and provided enough data for the main issues raised in this research, are presented.

## 2 ECONOMIC DEVELOPMENT AND THE STRATEGIC ENVIRONMENT

The Free Trade Agreement approval between Mercosur and the European Union signals that the country should be prepared for strong economic growth, since, as highlighted by Agência Brasil,

[...] the Agreement is second only to the African Continental Free Trade Area Agreement, which involves 44 countries in Africa and was signed in March 2019. Even so, the European Union and Mercosur signed the greatest Agreement among the economic blocs in history, which should strongly boost trade between the two continents. (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

The European Union-Mercosur Free Trade Agreement is expected to boost Europe and South America economies and, consequently, will foster the air transportation sector, demanded by the country parties to the agreement, in order to meet the cargo and passenger transportation growth. The COVID-19

sanitary emergency, in this context, slowed down the growth projection of air operations, in addition to decreasing air traffic in April 2020 to the equivalent to 30% of air operations in 2019, according to the Air Traffic Comparative Report (DECEA, 2021). However, with the decrease of the COVID-19 pandemic, resulting from the vaccination campaign, data from the Air Traffic Comparative Report (DECEA, 2021) which indicate the recovery of airline operations with sustainable growth since May 2021 were observed.

The post-COVID-19 recovery of air operations interest every country in the world, especially those in the South American strategic environment that will be directly influenced by the economic activity growth, arising from the European Union-Mercosur Free Trade Agreement. The future economic scenario presents characteristics that can strengthen international relations between the entities involved and arise the collaborative interest of investing in improvements to the air traffic control systems in the Region, in order to expand the air traffic in the South Atlantic.

According to the guidelines of the National Defense Policy (BRASIL, 2020, p. 17),

at the regional level, the convergence of interests contributes to increase cooperation among South American countries, which may promote the consolidation of mutual trust and the execution of defense projects, aiming — among others goals — at technological and industrial development, in addition to strategies for solving common problems.

In this context, due to the identification of a common problem, the Brazilian oceanic airspace, responsible for the air traffic management in the corridor that connects Europe to South America, constitutes a strategic environment for the countries of the region, and the aircraft measurement capacity in the oceanic air corridor, in this sense, is extremely important to determine the technical and operational weaknesses that restrict the provision of air navigation services over the South Atlantic.

### 3 BRAZILIAN AIRSPACE

The Brazilian airspace, which covers the entire national territory, extends beyond its borders, including territorial and jurisdictional waters, as well as the airspace that has been included in the Regional Air Navigation Agreement. According to the Department of Airspace Control (DECEA, 2021), the Brazilian airspace

[...]extends beyond its borders. It exceeds the area over its territory and reaches a significant portion of the Atlantic Ocean, totaling 22 million km<sup>2</sup>, over land and sea, agreed in international treaties.

Due to the extensive area, DECEA divided the Brazilian airspace into smaller portions called FIR — Flight Information Region —, airspace of defined dimensions, under the responsibility of the Integrated Centers for Air Defense and Air Traffic Control (CINDACTA), as detailed in the Department of Airspace Control (DECEA, 2021).

- CINDACTA I (Brasília-DF) Responsible for FIR Brasília, which covers the central region of Brazil;
- CINDACTA II (Curitiba-PR) Responsible for FIR Curitiba, which covers the south and part of the central-south of Brazil;
- CINDACTA III (Recife-PE) Responsible for FIR Recife and FIR Atlântico, which cover the Northeast and the area over the Atlantic;
- CINDACTA IV (Manaus-AM) Responsible for FIR Manaus, which extends over a large part of the Amazon region.

The oceanic airspace, object of this study, is under the responsibility of CINDACTA III and, according to the Publication of Aeronautical Information — Brazil (DECEA, 2020), it is operationally monitored by the Atlantic Area Control Center (ACC-AO), which provides air traffic service in the area over the South Atlantic.

#### 3.1 Brazilian oceanic airspace

According to the ATM Performance Report of the Brazilian Airspace Control System (DECEA, 2019), CINDACTA III is

responsible for the airspace controlling and management of an area totaling 14.3 million square kilometers, with 12.2 million square meters of FIR Atlântico and 2.1 million square meters of FIR-RE.

The Brazilian oceanic airspace, due to its extension area of 12.2 million square meters, is divided into sectors, organized in the operational environment of the Atlantic Area Control Center, according to the Publication of Aeronautical Information – Brazil (DECEA, 2020).

The sectors are registered in the Integrated Air Movement Management System (SIGMA, 2020), software developed by the company ATECH for CGNA. According to research carried out by using SIGMA, the aircraft took between 1 hour and 2 hours and 40 minutes long to leave the sectors of the Brazilian oceanic airspace.

## 4 MATHEMATICAL MODEL ANALYSIS FOR CAPACITY CALCULATION

### 4.1 Brazilian model for sector capacity calculation

The ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014) used for calculating the airspace sector capacity was established by DECEA, based on the air traffic controller workload. This variable will comprise all the tasks performed by the controllers in the air traffic control service provision. According to the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 9), workload

is the time used by the air traffic controller to process all the tasks that a control position requires, in a specific period of time, to keep the traffic safe and orderly.

Air traffic controllers perform communication tasks with pilots, make telephone contacts with other control agencies and use the air traffic control system tools for data entry and planning. Statistical data are periodically collected by CGNA, in accordance with the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014) on: the mean time of communication between controllers and pilots (*Tcom*); the mean time of secondary tasks (*TTS*), which represent telephone contacts with other control agencies and the use of system tools; and the mean time of ATC stay in the sector (*T*), which corresponds to the time in which the aircraft remain in the sector. These data are collected in loco, in the control agency, considering the actual operation and, after that, the variables are entered into the Brazilian mathematical model adopted for the sector capacity calculation, according to the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13), as shown in Table 1.

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

**Table 1** – Parameters of the mathematical model.

<i>Nref</i>	Calculated ATC Sector Capacity
<i>T</i>	Mean time of aircraft stay in the sector (in seconds)
<i>Tcom</i>	Average time of the controller communication (transmission and reception) with the aircraft (in seconds)
<i>TTS</i>	Average time spent by the controller in secondary tasks (in seconds)
<i>αn</i>	Convergence factor
<i>1,30</i>	Cognitive factor

Source: DECEA (2014).

According to the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13), the Number of Reference (*Nref*) is

the optimal number of aircraft in simultaneous control that a given ATC sector is able to maintain for a period of time, without causing work overload for the air traffic controller. It should be noted that the calculated capacity of a sector is the *Nref*.

The Cognitive Factor, according to the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 14), represented by the constant 1.30

is the addition of 30% of the time spent on *TCom* and *TTS* tasks. It refers to the air traffic controller thinking state (cognitive factor) during the time spent in the planning, traffic organization and radar surveillance functions.

The Convergence Factor (*αn*) presented in the modeling was created in order to restrain the accelerated growth of the linear function, when the mean times of aircraft stay in the sector are longer than 900 seconds. *αn* is defined by the ATC Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13) as

a factor of mean time reduction of the traffic stay in the sector (*T*). The convergence factor has the function of minimizing the discrepant effects in large sectors so that the *Nrefis* not greater than 18 traffics.

Application of the convergence factor, according to the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 14), reduces the discrepant effects of capacity values for sectors where the mean flight times do not exceed 1700 seconds (approximately 28 minutes). Over this time, there is a considerable increase in the calculation margin of error, which makes the convergence factor unable to adjust the mathematical model for flight times longer than 1 hour, so that the capacity values do not exceed the limits established in the regulations.



The sector capacity studies carried out in Brazil were fundamental for the establishment of important time parameters to be considered in the development of the Brazilian methodology of the sector capacity analysis. However, the country, as an ICAO signatory, confirmed the capacity limits established by the Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ICAO, 2018, p. 133).

The formula is based on two hypotheses: first, sectors work better when they do not manage more than 25 aircraft during a 15-minute period; and, second, sectors work better when they manage a maximum of 18 aircraft during a one-minute period. The 25 aircraft hypothesis led to the determination that each aircraft requires 36 seconds of a controller work time.

Although Brazil adopts the same sector capacity limits defined by ICAO, due to the peculiarities of the Brazilian airspace, the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014) establishes a methodology for collecting the time allocated to tasks performed by air traffic controllers. This is a point of divergence between Brazil and ICAO in terms of the Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ICAO, 2018).

In this context, it is observed that the first limit established by the Brazilian methodology is called number of reference (Nref), which is defined as the “optimal number of aircraft in simultaneous control within an ATC sector” by the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 9). The second limit adopted in Brazil is called number of picoo of the ATC sector (Npico), which, according to the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 100),

is the simultaneous control capacity that a given ATC sector is able to maintain, for a maximum of 19 (nineteen minutes) in one hour, continuous or not, in order to meet an increase of short-term demand.

To find the Npico, it is necessary to calculate the standard deviations of T, Tcom, and TTS, so that the following variables are created for Npico calculations:

$$T_{max} = T \text{ mean added to the standard deviation;}$$

$$TTS_{min} = TTS \text{ mean subtracted from the standard deviation; and}$$

$$Tcom_{min} = Tcom \text{ mean subtracted from the standard deviation.}$$

The values of these variables are used in this mathematical modeling for Npico calculation.

$$Npico = \frac{Tmax}{(Tcom_{min} + TTS_{min}) \times 1,30}$$

Another important measure that must be calculated is the Hourly Sector Capacity (HSC), which, as recommended by the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 15),

[...] is the number of aircraft to which a sector is capable of providing air traffic control service during one hour. It is calculated by using the following formula:

$$HSC = \frac{3600 \times (0,683 \times Nref + 0,317 \times Npico)}{T}$$

This formula is currently used for HSC calculations; however, as it can be seen, this mathematical model operates, in a Cartesian way, the Nref and Npico values, without taking into account the interval between these numbers. For this reason, the calculation results may be overestimated.

#### 4.2 Mathematical models proposed for sector capacity calculations

The convergence factors of the current model operate in the reduction of the flight times growth in the sector (T), in order to avoid that sector capacity values are above those established in standards. It is stated by the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13) that the calculation results may be contaminated when the current mathematical model is used to calculate the capacities of large airspace sectors.

In view of the problem, this article is intended to propose a new mathematical model that could reduce the discrepant effects caused by long flight times in the control sector, and limit the calculated capacity values to those established in standards, by means of a continuous but controlled growth with the aid of the logarithmic function.

In the proposal, Nref calculations will be performed with the Basic Formula (Bf), which is a linear function, and with the Logarithmic Formula (Lf), as shown below:

$$Nref = Bf = \frac{T}{(Tcom + TTS) \times 1,30} ,$$

equation used for sectors with mean time of stay of up to 900 seconds.

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

where B' is equal to  $\frac{900}{(T_{com} + TTS) \times 1,30}$  and base  $n$

is equal to  $8160^{1/(18-Bf')}$ , which is an equation used for large sectors. The number 8160 (adjustable) of base  $n$  will be used to ensure that  $N_{ref}$  will reach its maximum value of 18 aircraft for the mean time of stay in the sector ( $T$ ) equal to or longer than 9000 seconds. Thus, model 1 which was proposed for calculating the Number of Reference for large sectors is:

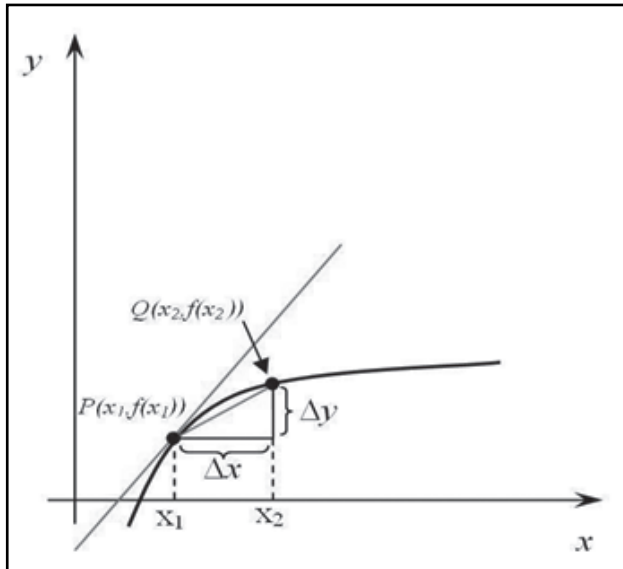
**Model 1 -  $N_{ref}$  Calculation.**

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

**Source:** The author.

The new function growth graph will be formed by the intersection of linear and logarithmic functions graph, as shown in Figure 1.

**Figure 1 - Linear and logarithmic functions.**



**Source:** Stewart (2005).

With the new mathematical model,  $N_{pico}$  capacity calculations will be performed with the Basic Formula ( $BF$ ) and with the Logarithmic Formula ( $LF$ ), as shown below:

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

equation used for sectors with mean time of stay of up to 900 seconds.

$$N_{pico} = LF = BF' + \log_n (T_{max} - 840),$$

in which  $BF'$  is equal to  $\frac{900}{(T_{com_{min}} + TTS_{min}) \times 1,30}$  and

capacity of base  $n$  is equal to  $9960^{1/(25-BF')}$ , which is an equation used for large sectors. The number 9960 (adjustable) of base  $n$  will be used to ensure that  $N_{pico}$  will reach its maximum value of 25 aircraft for the mean time of stay in the sector ( $T$ ) equal to or longer than 10800 seconds.

Thus, model 2, which was proposed for the PicoNumber capacity calculation for large sectors is:

**Model 2 -  $N_{pico}$  Calculation.**

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

**Source:** The author.

In order to reduce the overestimated hourly sector capacity values (HSC) generated by the current formula established in the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 15),

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

and considering that the Number of Reference ( $N_{ref}$ ) expresses the optimal number of aircraft in simultaneous control in the sector, model 3 below, was proposed for HSC calculation.

**Model 3 - HSC Calculation.**

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

**Source:** The author.

### 4.3 MATHEMATICAL MODEL VALIDATION

In order to validate the proposed mathematical models, real data were used from  $T_{com}$ ,  $TTS$  and  $T$ , and were collected *in loco*, at ACC-AO, by CGNA team, from March 12 to 23, 2018. At that time, the capacity values of the group of sectors S2B/S2C/S3, with the new models, which constitute part of the air corridor that connects Europe to South America were calculated. These values were validated through the Operational Board, formed by CGNA team and by CINDACTA III air traffic controllers.

#### 4.3.1 Data collected by CGNA for $N_{ref}$ calculation

$TTS = 135,65$  seconds;

$T_{com} = 105,43$  seconds; and

$T = 6987,6$  seconds.

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

in which base  $n$  is equal to  $8160^{1/(18-Fb)}$ , with

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

Therefore,  $N_{ref} = 17$ . The capacity value is within the limit established by the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13) and by the Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ICAO, 2018, p. 133).

Order to use the current mathematical model for the calculations, the convergence factor ( $\alpha n$ ), for  $T > 1700$  seconds, is 0.65, as highlighted by the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 14). Thus, the following result is:

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

Therefore,  $N_{ref} = 22$ , which is a value above the limit established in standards.

#### 4.3.2 Data collected by CGNA for $N_{pico}$ calculation

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

$T_{com_{min}} = 24,16$  seconds; and

$T_{max} = 9290,4$  seconds

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

in which base  $n$  is equal to  $9960^{1/(25-FB)}$ ,

with  $Bf' = \frac{900}{(T_{com_{min}}+TTS_{min}) \times 1,30}$ . Therefore,  $N_{pico} = 21$ .

The capacity value is within the limit established by the Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ICAO, 2018, p. 133).

In order to use the current mathematical model for calculations, the convergence factor ( $\alpha n$ ), for  $T_{max} > 1700$  seconds, is 0.65, as highlighted by the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 14).

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

Therefore,  $N_{pico} = 49$ , a value above the limit established in international standards.

After the presentation of the values calculated by both mathematical models, the Operational Board of CINDACTA III decided to approve, in minutes of meeting, the capacity values expressed by the new mathematical models, which are currently used by ACC-AO.

## 4.4 Mathematical Model Implementation

In order to implement the use of the new formulas, the equations, available in the following tutorial (DOUTORES DO EXCEL, 2020), can be entered into an Excel spreadsheet to carry out the conditional tests and generate results, according to the following syntax.

IF(logical\_test;value\_if\_true;value\_if\_false).

#### 4.4.1 $N_{ref}$ Calculation

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

in which base  $n$  is equal to  $8160^{1/(18-Fb)}$ , with

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

#### 4.4.2 $N_{pico}$ Calculation

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

in which base  $n$  is equal to  $9960^{1/(25-FB)}$ , with

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

## 5 CONCLUSION

The opening of international borders, enabled by the reduced intensity of the COVID-19 health emergency, and the expected economic growth from the approval of the Free Trade Agreement between Mercosur and the European Union create an optimistic scenario for the international air transport industry, especially for users that plan to increase their air operations in the oceanic corridor, under

the responsibility of Brazil, which is traversed by air traffic demands in the Europe/South America axis.

In view of the geostrategic importance of the Brazilian airspace for the countries around the South American region, it is in the interest of the region that the capacity of the main oceanic air corridor in South Atlantic is adequate for the air operation growth in the coming years. To this end, measuring the capacities of the Brazilian oceanic airspace sectors with some precision is extremely important to create indicators, which can guide investments in technologies, equipment, human resources and procedures to improve air traffic control systems, making air traffic flow management in the oceanic airspace more efficient.

The air traffic flow management service is not limited to congested airspaces. Accordingly, in order to use the South Atlantic airspace to the fullest extent possible, it is necessary that the Air Navigation Service Providers (ANSP) in the region know the capacities of their respective airspace sectors, so as to ensure the balance between demand and sector capacity.

According to the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13), Brazil has developed a mathematical model to calculate airspace sector capacity; however, the ATC Sector Capacity Manual (DECEA, 2014, p. 13) states that the results, by using the current model, may present inconsistencies for large sectors. Due to this weakness, a new mathematical model was developed, by the joints of linear and logarithmic functions. During the validation process, such joint proved to be efficient and, definitely, eliminated the discrepant effects caused by long flight times in the sector, generating the referential capacities, peaks and schedules of the sectors, adequate and adjusted according to the standards. This is a response for the concern of the research problem.

With improved calculation of the oceanic airspace sector capacities, air traffic flow management specialists will be able to adopt the most optimized measures to ensure that air traffic volumes are compatible with the capacities declared by the competent authorities and to promote studies aimed at expanding airspace sector capacities and enhancing the aerospace power of the region.

## REFERENCES

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](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](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](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.



# 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 <sup>I</sup>

Pedro Arthur Linhares Lima <sup>II</sup>

## 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 Univesidad de la Fuerza Aerea(UNIFA). *Email:* eliseucavalcanti@yahoo.com.br

II. Universidad de la Fuerza Aérea(UNIFA). Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Doctor en Ingenieria de Produccion 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 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup> 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)
$\alpha_n$	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 ( $\alpha_n$ ) 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  $\alpha_n$

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:

$$T_{\text{máx}} = T \text{ medio sumado a la desviación;}$$

$$TTS_{\text{mín}} = TTS \text{ medio sustraído de la desviación estándar; y}$$

$$Tcom_{\text{mín}} = Tcom \text{ medio sustraído de la desviación estándar.}$$

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

$$Npico = \frac{T_{\text{máx}}}{(Tcom_{\text{mín}} + TTS_{\text{mín}}) \times 1,30}$$

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:

$$CHS = \frac{3600 \times (0,683 \times Nref + 0,317 \times Npico)}{T}$$

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:

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

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:

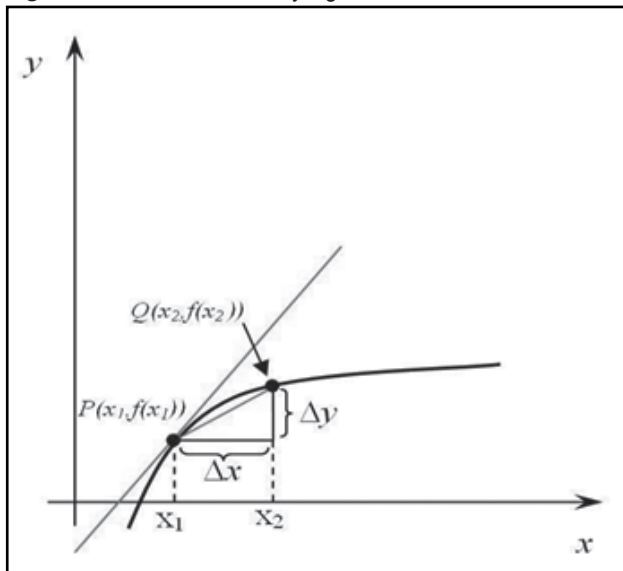
**Modelo 1 - Cálculo do  $N_{ref}$ .**

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

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 ( $\alpha n$ ), 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 ( $\alpha n$ ), 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](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](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](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.

# O impacto da redução do esforço aéreo na formação do piloto instrutor entre os anos 2012 e 2015

*The impact of reduced air effort on training the instructor pilot between 2012 and 2015*

*El impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la formación del piloto instructor entre 2012 y 2015*

Renato Russo Guimarães<sup>1</sup>

## RESUMO

O presente estudo analisou a elevação operacional dos pilotos instrutores com foco na quantidade de horas previstas no programa de instrução e manutenção operacional (PIMO). Com isso, o objetivo é identificar o impacto da redução do esforço aéreo destinado ao 1º/2º Grupo de Transporte (GT) na quantidade de horas para formação do piloto instrutor de voo em aeronave C-99 entre os anos de 2012 e 2015. Utilizou-se uma pesquisa descritiva com base documental. As informações de esforço aéreo, obtidas no Sistema Ópera, e das horas voadas pelos pilotos até o momento do conselho de voo operacional a instrutor, encontradas na ata do conselho, foram apresentadas por meio de tabelas, feitas as análises, e, após, correlacionadas pelo coeficiente linear de Pearson ( $r = -0,15$ ). Com o resultado, é possível verificar que há uma relação negativa fraca entre as variáveis, ou seja, a redução do esforço aéreo não impactou na formação do piloto instrutor pois, os pilotos atingiram o mínimo de 600 horas estabelecidos pelo PIMO. Diante disso, fundamentado pela Teoria das Restrições de Goldratt, na sua primeira etapa de identificar a restrição, pode-se concluir que a redução do esforço aéreo não foi o gargalo no processo de formação do instrutor.

**Palavras-chave:** Esforço Aéreo. Treinamento. Experiência. Piloto Instrutor. Teoria das Restrições.

## ABSTRACT

*This study analyzed the operating elevation of instructor pilots focused on the amount of hours in the operational training and maintenance program (PIMO). Thus, the*

*goal is to identify the impact of the reduction in air efforts for the 1st / 2nd Transport Group in the amount of hours for training the flight instructor pilot in C-99 aircraft between the years 2012 and 2015. It was used one descriptive research with documentary base. Based on air effort of information and hours flown by pilots until the time of operational flight instructor advice were presented through tables, made the analysis, and, after correlated by linear Pearson coefficient ( $r = -0,15$ ). With the result, you can see that there is a negative relationship between the variables, is the reduction did not affect air effort in training instructor pilot as pilots reached a minimum of 600 hours set by PIMO. Thus, based on Goldratt's Theory of Constraints in its first step to identify the restriction, it can be concluded that the reduction of air effort was not the bottleneck in the instructor training process.*

**Keywords:** Flight Effort. Training. Experience. Instructor Pilot. Theory of Constraints.

## RESUMEN

*Este estudio analizó la elevación operativa de los pilotos instructores con un enfoque en la cantidad de horas previstas en el programa de instrucción y mantenimiento operativo (PIMO). Con esto, el objetivo es identificar el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo destinado al 1er/2 do Grupo de Transporte (GT) en el número de horas de formación del piloto instructor de vuelo en aeronaves C-99 entre los años 2012 y 2015. Realizar una investigación descriptiva con base documental. La información de esfuerzo*

I. Sétimo Serviço Regional de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (SERIPA VII). Manaus/AM – Brasil. Mestrado em Ciências Aeroespaciais pela Universidade da Força Aérea (UNIFA). E-mail: renatoctt@gmail.com

Recebido: 04/03/21

Aceito: 01/12/21

*aéreo, obtenida del Sistema Opera, y las horas voladas por los pilotos hasta el momento del tablero de vuelo operativo al instructor, que se encuentran en las actas del tablero, se presentaron a través de tablas, se realizaron los análisis y luego se correlacionaron por Coeficiente lineal de Pearson ( $r = -0,15$ ). Con el resultado, se puede verificar que existe una relación negativa débil entre las variables, es decir, la reducción del esfuerzo aéreo no afectó la formación del piloto instructor, ya que los pilotos alcanzaron el mínimo de 600 horas establecido por PIMO. Por lo tanto, con base en la Teoría de las restricciones de Goldratt, en su primera etapa de identificación de la restricción, se puede concluir que la reducción del esfuerzo aéreo no fue el cuello de botella en el proceso de formación del instructor.*

**Palabras clave:** Esfuerzo aéreo. Capacitación. Experiencia. Piloto Instructor. Teoría de las Restricciones.

## 1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Quinta Força Aérea (V FAE), responsável pela aviação de transporte dentro do Comando da Aeronáutica (COMAER), tem como unidade subordinada o Primeiro Esquadrão do Segundo Grupo de Transporte (1º/2º GT), esquadrão CONDOR que opera as aeronaves modelo Embraer 145, denominadas C-99A pelo COMAER. Criado em 1959, tem a missão de realizar as ações específicas de transporte aéreo logístico, são elas: exfiltração aérea, infiltração aérea, logística, transporte aéreo logístico, além de realizar ações complementares como transporte especial, assim como dar continuidade à formação e adestramento das suas equipagens operacionais e equipes de manutenção, capacitando-as ao emprego em combate, e supervisionar o planejamento e execução das atividades técnico administrativas da Unidade (BRASIL, 2015). No cumprimento de seus objetivos operacionais, o 1º/2º GT dispõe de militares pertencentes ao quadro de tripulantes (QT) com as seguintes funções a bordo: pilotos, mecânicos de voo, mantenedores de aviônicos e comissários de bordo, ressaltando que a função de piloto é desempenhada somente por oficiais aviadores.

O Programa de Instrução e Manutenção Operacional (PIMO) do 1º/2º GT é o documento formal que planeja as atividades aéreas dimensionadas em treinamentos específicos a serem realizados por todos os tripulantes do QT para se manterem

adestrados e com padrão de eficiência capaz de operar a aeronave em condições de voo visual (VFR) e por instrumentos (IFR) tanto em território nacional como estrangeiro (BRASIL, 2015).

Após análise do PIMO 2015 e observação dos critérios de formação e elevação operacional dos pilotos instrutores de voo do 1º/2º GT, percebe-se que as marcas atingíveis para elevação dos níveis de classificação operacional são pautadas principalmente pelas provas teóricas e quantidade de horas voadas na aeronave. Com isso, o piloto começa a operacionalidade como aluno, progride para piloto básico (PB) com 80 horas, posteriormente, piloto operacional (PO), com 300 horas, e por fim instrutor de voo (IN), com 600 horas.

Comparando-se as marcas operacionais com o tempo de permanência do militar no esquadrão, é possível visualizar que o piloto atinge a máxima operacionalidade de instrutor de voo quando as seguintes marcas são atingidas: ser piloto operacional e ter no mínimo um ano nessa operacionalidade; estar preferencialmente no quarto ano de UAe; possuir, no mínimo, 600 horas de voo em aeronave C-99; possuir, preferencialmente, o Curso de Padronização de Instrutores de Voo; concluir, com aproveitamento, a prova dos sistemas da aeronave; simulador de voo; prática aérea e ser homologado pelo conselho de voo operacional<sup>1</sup> (CVO). Com isso ele será responsável por passar seu conhecimento aos outros pilotos.

As horas de voo disponíveis para a UAe são regidas pela Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 55-87 - Programa de atividades operacionais do COMGAR e atualizada anualmente. No período de 2012 a 2015, percebeu-se uma redução gradativa do esforço aéreo comparada com a quantidade recebida desde 2008 até o presente ano, acentuando ainda mais o seu impacto a partir no ano de 2015. Com isso, a unidade aérea deparou-se com uma perda significativa e foi necessário ajustar o planejamento da distribuição de horas por tripulante.

A partir do exposto acima, este artigo busca analisar a redução contínua do esforço aéreo com a consequente possibilidade de afetar a elevação operacional dos pilotos, bem como o treinamento e a experiência. Ao analisar o treinamento como fator dependente das orientações contidas no PIMO, torna-se esperado e previsível que a restrição de horas de voo diminua o treinamento e a experiência dos pilotos. Mager (1979) diz que o treinamento é uma solução, um remédio que implica transmitir informações de modo a modificar

<sup>1</sup> CVO: Órgão consultivo do Comandante do 1º/2º GT que tem a finalidade de avaliar o desempenho das equipagens de voo, qualificando-as de acordo com os requisitos estabelecidos, e de assessorar o Comandante nos assuntos pertinentes ao cumprimento da missão da Unidade Aérea (UAe).



o conhecimento ou a habilidade de um indivíduo para fazer alguma coisa. Ou seja, o instrutor deve estar treinado para que possa ensinar e tomar as decisões corretas em momentos de maior carga de trabalho durante o voo.

O Curso de Formação de Instrutor de Voo estabelece o mínimo de 600 horas de voo na aeronave. Ocorre que, a contínua redução de horas de voo alocadas no esquadrão pode afetar esse requisito prejudicando diretamente a formação dos pilotos instrutores. Nesse sentido, este trabalho visa examinar como a redução do esforço aéreo pode interferir na quantidade de horas para elevação operacional e qualificação de instrutor de voo.

Diante do exposto, surge o seguinte questionamento da pesquisa: Qual o impacto da redução do esforço aéreo na quantidade de horas para formação do piloto instrutor de voo em aeronave C-99A do 1º/2º GT entre os anos de 2012 e 2015?

Para orientar esta pesquisa e responder a questão acima, foram elaboradas as seguintes Questões Norteadoras (QN):

QN1: Qual o esforço aéreo destinado ao esquadrão nos anos de 2012 a 2015?

QN2: Quantas horas de voo na aeronave possuía cada piloto, no momento da elevação operacional a instrutor, entre 2012 e 2015?

Com o intuito de responder o problema de pesquisa, fica estabelecido o objetivo geral que é identificar o impacto da redução do esforço aéreo na quantidade de horas para elevação operacional a instrutor de voo de C-99A no piloto do 1º/2º GT.

Para responder as questões norteadoras foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

OE1: Identificar o esforço aéreo destinado ao esquadrão nos anos de 2012 a 2015.

OE2: Identificar a quantidade de horas de voo na aeronave que cada piloto possuía no momento da elevação operacional a instrutor entre 2012 e 2015.

Esta pesquisa analisou cientificamente os parâmetros de elevação operacional a instrutor de voo dos pilotos em anos passados e à vista disso possibilita ao esquadrão direcionar os esforços para adequar o PIMO e se preparar melhor para a tendência do cenário para os próximos anos. Além disso, este estudo servirá para nortear outros trabalhos voltados para a segurança dos voos, em que as tripulações com menos horas de voo deverão ter uma consciência situacional mais apurada e um treinamento em simulador de voo mais frequente que o utilizado atualmente, podendo também ser aplicado em outras unidades aéreas da Força Aérea.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A pesquisa foi baseada nos conceitos do físico israelense Eliyahu M. Goldratt que desenvolveu a Teoria das Restrições (TOC - *Theory of Constraints*) com a proposta de melhoria contínua por meio do aprimoramento dos processos baseada na análise e tratamento das restrições, eliminar os obstáculos a fim de atingir uma meta e assim melhorar o planejamento e controle das organizações.

Cox III e Spencer (2002) dizem que sistema de produção consiste em uma série de etapas sucessivas desempenhadas por diferentes recursos. Para que a Teoria das Restrições possa ser utilizada como ferramenta científica, é necessário identificar o sistema a ser estudado nesta pesquisa. Considerando a necessária demanda do 1º/2ºGT em realizar a formação de instrutores de voo em aeronave C-99, todo o processo que envolve esta meta (GOLDRATT, 2002) deve ser avaliado.

Os requisitos operacionais explicitados no PIMO da UAe são partes do processo que tornam possíveis a elevação operacional do piloto, portanto, são itens interdependentes do conjunto. A TOC equaciona essa relação numa comparação com o funcionamento de uma corrente, na qual o elo mais fraco determina a restrição de todos os demais. Este estudo foca em um dos requisitos constantes para a formação do instrutor que é possuir o mínimo de horas de voo, enfatizando que a dificuldade em se atingir esta condição é definida como uma restrição no sistema ora abordado. Com isso, direcionar os esforços para o elo mais fraco, estudá-lo e adequá-lo para que a corrente seja fortalecida contribuirá para verificar qual o impacto da redução do esforço aéreo na elevação operacional a piloto instrutor de voo em aeronave C-99 do 1º/2º GT, possibilitando a melhoria do processo ao atingir a primeira etapa da TOC.

A fim de melhor explicar a teoria, Goldratt a divide em cinco etapas, quais sejam:

1 - identificar a restrição do sistema: apontar o que pode impedir a organização de obter sua meta. Nesta pesquisa foram elencados os requisitos necessários para a formar o instrutor, a fim de identificar o sistema. Após, será verificada a restrição que compromete a formação do instrutor de voo, concluindo, desta forma, a etapa 1;

2 - decidir como explorar a restrição do sistema: significa aproveitar a capacidade existente na restrição, adotar práticas de manutenção preventiva, ações de curto prazo, para não estagnar a formação do IN, sem ignorar os outros requisitos;

3 - subordinar tudo à restrição do sistema: fazer o alinhamento de todo sistema ou organização para seguir o ritmo da restrição, os outros requisitos da elevação operacional devem reforçar o mais fraco;

4 - elevar a restrição do sistema: deve-se implementar mudanças para que, mesmo com a restrição, a capacidade seja aumentada. Investir no elo mais fraco para que a formação do IN seja continuada;

5 - se a restrição for quebrada, voltar ao início: ocorrendo a anulação da restrição, outro item poderá ser uma nova restrição, voltar a etapa 1 para identificar se outra restrição poderá causar inércia no processo.

O planejamento da UAe ficou mais trabalhoso. Dividir as horas de voo entre os tripulantes igualmente de modo que todos consigam voar um mínimo de horas desejável para manter um treinamento constante foi uma tarefa difícil devido as reduções de esforço aéreo ocorridas anualmente.

Segundo Mager (1979) quando uma habilidade diminui sensivelmente com o tempo, uma solução adequada é um programa de manutenção da habilidade, considerando o exercício da prática uma forma de aprimoramento. Com isso, é importante que o esquadrão volte a receber maiores quantidades de esforço aéreo para que os pilotos mantenham a prática e o treinamento e conseqüentemente atingirão maiores níveis de treinamento, pois, de acordo com Taylor, Kannedy, Noda & Yesavage (2007), experiência pode ser categorizada em três tipos: menor, moderada e maior. Os autores explicam que cada categoria requer progressivamente treinamento avançado e mais horas de experiência em voo. Completam ainda que os mais altos níveis de experiência estão associados com mais horas totais de voo (tradução nossa).

### 3 METODOLOGIA

Baseado na classificação de Gil (2002), a fim de atingir o objetivo geral proposto, esta pesquisa científica classifica-se como descritiva, tendo como foco estabelecer uma relação entre duas variáveis: o esforço aéreo destinado ao esquadrão e a quantidade de horas para formação operacional do piloto instrutor de voo.

Para delinear os procedimentos técnicos, seguindo a linha do mesmo autor, o tipo de pesquisa deste trabalho é documental. As fontes primárias para análise serão manuais e documentos do COMAER, especificamente dentro na OM.

A pesquisa consultou 3 (três) diferentes fontes de dados. A primeira foi o PIMO, um documento que contém os requisitos para elevação operacional. A segunda fonte utilizou o Sistema Ópera<sup>2</sup>, que possui e o esforço aéreo alocado para cada ano. A terceira foi a subseção de instrução do 1º/2º GT que forneceu a quantidade de horas de voo que cada piloto possuía no momento do CVO.

A delimitação deste estudo foi apresentar as reduções das horas de voo destinadas ao esquadrão e não o motivo desse fato ter acontecido, pois necessitaria de um estudo mais aprofundado. No entanto, vale ressaltar que o país passava por crises econômicas e políticas que não serão discutidas neste contexto.

A Teoria das Restrições publicada no Manual da Teoria das Restrições (Cox e Spencer, 2002) foi pesquisada para embasar os conceitos apresentados no referencial teórico do trabalho.

Assim, a linha de pesquisa é a Educação na Força Aérea, pois estudou a formação e a especialização de oito oficiais que concluíram a formação operacional de piloto instrutor no quarto ano de UAe entre os anos de 2012 e 2015.

A fim de responder a primeira QN, foi feita uma consulta documental no Sistema Ópera para saber a quantidade de horas voadas pela OM em cada ano no período entre 2012 e 2015.

Para responder a segunda QN, a quantidade de horas de voo que cada piloto possuía no momento da elevação operacional foi encontrada na ata de conselho operacional na Subseção de Instrução do esquadrão, localizada na Base Aérea do Galeão.

Os dados foram inseridos no programa *Microsoft Office Excel 2011* para possibilitar a criação de gráficos e planilhas que, apresentados ao leitor, facilita o entendimento. As horas relacionados ao esforço aéreo voado pelo esquadrão anualmente, serviram para elaborar um gráfico da gradativa redução do esforço aéreo. As horas voadas por piloto até a data em que ocorreu a elevação operacional a instrutor de voo foram transformados em uma tabela. No mesmo programa, a função estatística Pearson foi utilizada, fornecendo um resultado numérico chamado de coeficiente de correlação ( $r$ ) no qual associa duas variáveis quantitativas mensurando a direção e o grau da relação linear entre elas, o resultado poderá ser entre -1 e 1. Este número será o grau de correlação existente, a saber:

<sup>2</sup> Sistema interno utilizado para registro dos voos do esquadrão.

$r = 1$  significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.

$r = -1$  significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, o que significa se uma aumenta, a outra sempre diminui.

$r = 0$  significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra ou pode existir uma dependência não linear. Assim, esse resultado deve ser investigado por outros meios

Por fim, entende-se que valores positivos do coeficiente, ou seja, entre 0 e 1, indicam uma correlação positiva e verdadeira entre as variáveis estudadas e então a identificação do gargalo. Valores negativos do coeficiente, entre 0 e -1, indicam não correlação entre as variáveis, negando existência da restrição. Assim, foi possível finalizar a primeira etapa da TOC e apresentar o impacto da redução do esforço aéreo na progressão operacional do piloto instrutor de voo, bem como apontar os efeitos no treinamento e experiência dos pilotos do esquadrão.

#### 4 APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

Os dados analisados possibilitaram apresentar os resultados de modo que fosse possível identificar

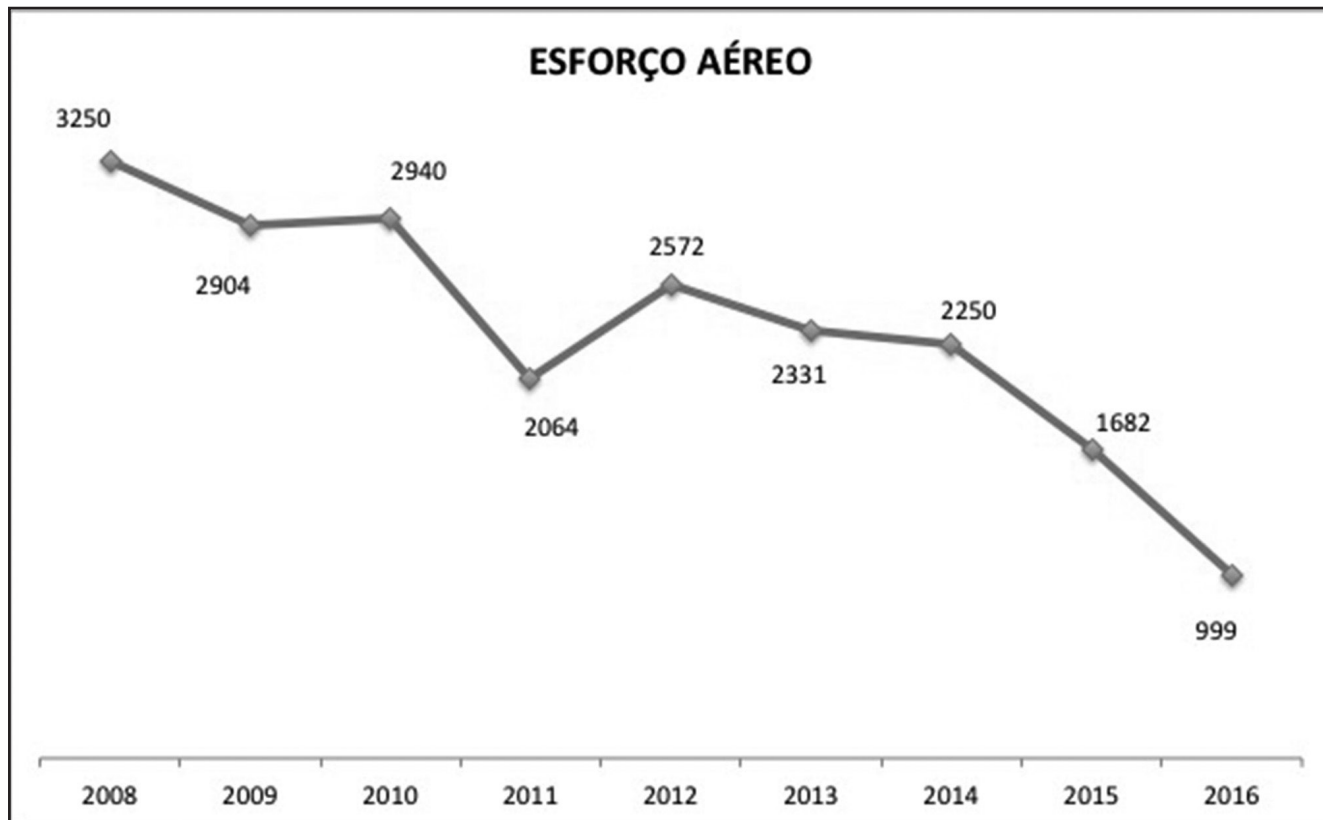
o impacto da redução do esforço aéreo na quantidade de horas para progressão operacional do piloto instrutor de voo, levando em consideração o período pesquisado.

Para responder a primeira QN, foi elaborada a Figura 1 que apresenta o esforço aéreo anual do esquadrão, obtidos no Sistema Ópera, entre os anos 2008 e 2016. As horas disponibilizadas ao esquadrão para cumprir suas missões, preparar e manter a operacionalidade das tripulações sofreram um decréscimo de 34,6% entre os anos de 2012 e 2015, cumprindo o OE1. Vale ressaltar que, o piloto formado instrutor em 2012 iniciou a atividade aérea em 2009. É possível afirmar que o esforço aéreo vem diminuindo desde 2008, ao fato que, em 2016, é três vezes menor.

Goldratt (2002) afirma que o objetivo do processo de focalização das cinco etapas consiste em permitir que o sistema possa ser submetido a um processo de aprimoramento contínuo por meio da identificação e do gerenciamento das restrições.

Para responder a segunda QN foi confeccionado a Figura 2, que mostra as horas voadas pelos pilotos no momento do conselho operacional de voo e a média dessas horas por ano.

Figura 1 - Esforço Aéreo Anual.



Fonte: O autor.

**Figura 2** - Ano de formação de IN, pilotos, hora de voo no CVO, média no CVO anual e esforço aéreo anual.

<b>ANO IN</b>	<b>PILOTO</b>	<b>HR</b>	<b>MÉDIA</b>	<b>ESFORÇO AÉREO</b>
2012	1	792:25	792:25	2572
2013	2	690:10	701:25	2331
	3	712:40		
2014	4	734:10	713:32	2250
	5	692:55		
2015	6	772:45	767:50	1682
	7	810:00		
	8	720:45		

Fonte: O autor.

A Figura 2 apresenta na primeira coluna o ano em que ocorreu a elevação a instrutor. A segunda coluna refere-se aos pilotos que participaram da pesquisa e a terceira coluna contém a quantidade de horas voadas até o momento do conselho de voo operacional a instrutor. Percebe-se que a média anual aumentou entre 2013 e 2015 e o esforço aéreo diminuiu com o passar dos anos. O motivo desse aumento não foi pesquisado e poderá ser objeto de estudo futuro, visto que o número de pilotos que voaram entre 2008 e 2015 variou muito a cada ano. Essas variáveis necessitariam não foram tratadas neste artigo.

Foram inseridas a quarta e quinta colunas na Figura 2, respectivamente, média das horas voadas da coluna 3 e esforço aéreo. As horas existentes na coluna 4 foram transformadas em números absolutos e, com isso, criado a tabela apresentada na Figura 3.

**Figura 3** - Esforço aéreo e média no CVO anual.

<b>ESF AÉREO</b>	<b>HR</b>
2572,00	792,41
2331,00	701,41
2250,00	713,53
1682,00	767,83

Fonte: O autor.

A partir desta última tabela, foi possível utilizar a fórmula estatística de Pearson, relacionando a primeira coluna com a segunda. O resultado encontrado foi  $r = -0,0291$ . Dancey e Reidy (2005 apud Figueiredo Filho; Silva Junior, 2009), explica que os valores de  $r = 0,1$  até  $0,30$  indica fraco grau de correlação, juntamente com sinal negativo fornece uma condição de direção negativa da relação. Logo, o resultado encontrado revela uma fraca relação acrescentado à condição negativa entre as duas variáveis.

Frente às análises feitas, os pilotos exerceram a prática de voo continuada durante os anos e atingiram o mínimo estabelecido no esquadrão para formação do instrutor e de forma a ilustrar o contexto apresentado, evidenciam-se alinhados aos dizeres de Taylor, Kannedy, Noda & Yesavage (2007), de que a experiência de voo é proporcional à quantidade de horas de voo e ao espaço temporal que a pessoa exerce a pilotagem.

À luz da TOC, em sua primeira etapa, foi identificado que a redução de horas disponíveis para o esquadrão não foi uma restrição na quantidade de horas para progressão operacional do piloto a instrutor, portanto não se tratando do elo mais fraco da corrente dentre os requisitos estabelecidos no PIMO. Sendo assim, a primeira etapa da teoria está concluída baseada nessa identificação, porém deve ser considerada a existência dos outros requisitos na formação passíveis de análise por outras pesquisas visando detectar esse gargalo.

De acordo com Mager (1979), é possível afirmar que a habilidade do piloto instrutor formado foi exercitada por meio da prática e que estão com treinamento adequado pois, é necessário que a função continue sendo desempenhada com frequência.



## 5 CONCLUSÃO

Os números apresentados na análise desenham um cenário de redução de horas disponíveis destinadas à unidade aérea e, mesmo assim, a demanda operacional do 1º/2º GT exige a continuação do treinamento, formação e capacitação operacional dos tripulantes.

A diminuição continuada das horas de voo disponíveis para a o 1º/2º GT levou este pesquisador a identificar o impacto da redução do esforço aéreo na quantidade de horas para formação do piloto instrutor de voo em aeronave C-99 entre os anos de 2012 e 2015, devido à possibilidade de não atingir o mínimo de 600 horas de voo estabelecidos no PIMO.

A fim de responder o objetivo geral proposto foram criados os seguintes objetivos específicos: 1 - Identificar a quantidade de horas voadas pelo esquadrão nos anos de 2012 a 2015; 2 - Identificar a quantidade de horas de voo na aeronave cada piloto possuía no momento da elevação operacional a instrutor entre 2012 e 2015. A reposta do objetivo específico 1 mostrou que houve uma contínua redução no esforço aéreo da UAe desde o ano de 2008. O segundo objetivo específico forneceu as horas voadas pelos pilotos até o momento do CVO, no qual percebe-se um incremento a partir de 2013. Todos os dados coletados foram inseridos no programa *Microsoft Excel* para que seja possível aplicar o cálculo estatístico de Pearson e nos fornecer o resultado da correlação entre o esforço aéreo e horas voadas pelos pilotos, além de possibilitar a elaboração das planilhas.

Com isso, foi possível identificar que, no processo de formação de instrutor de voo, sob a ótica da primeira etapa da Teoria das Restrições que o gargalo não foi a gradativa redução do esforço aéreo pois, não impactou diretamente na quantidade de horas necessárias para a elevação operacional dos tripulantes visto que, mesmo com redução do esforço aéreo, as horas voadas por piloto mantiveram-se acima do requisito mínimo estabelecido no PIMO.

A importância da pesquisa se deu em função de reunir dois fatores essenciais para um piloto instrutor: treinamento e experiência. O instrutor de voo deverá ser capaz de ministrar ao segundo piloto<sup>3</sup>, ou seja, ao aluno aprendiz, a forma correta e segura de conduzir uma aeronave e além disso, conseguir passar informações e experiência adquirida, a fim de perpetuarem esses ensinamentos para as próximas gerações que passarão pela UAe e que também participarão do cumprimento da missão do 1º/2º GT.

Dessa forma o presente estudo permite abrir caminhos para outros trabalhos analisarem as competências necessárias ao piloto instrutor de voo, com o objetivo de adequar o PIMO e, ainda, a influência da diminuição de horas na consciência situacional dos instrutores ou a motivação dos pilotos frente ao cenário de redução de esforço aéreo. Assim o conhecimento gerado por esta pesquisa ficará a disposição para ser utilizado como apoio para decisões futuras nas quais a otimização dos processos da Força Aérea consiga, mesmo com menos recursos, ter suas tripulações adestradas e prontas para o pronto emprego quando necessário.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Primeiro Esquadrão do Segundo Grupo de Transporte. **Programa de Instrução e Manutenção Operacional do 1º/2º GT Grupo de Transporte**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, J. A. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje. Vol. 18, n.1, art. 2009. Disponível em <http://www.revista.ufpe.br/politica hoje/index.php/politica/article/viewFile/6/6>. Acesso em: 14/08/2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDRATT, E. M.; COX III, J. F.; SPENCER, M. S. **Manual da Teoria das Restrições**. 2 ed. São Paulo: Bookman, 2002.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta: um processo de melhoria contínua**. São Paulo: Nobel, 2002.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

MAGER, R. F., PIPE, P. Trad. Maria Ângela Vinagre de Almeida. **Análise de Problemas de Desempenho**. 2 ed. Porto Alegre: Globo, 1979.

TAYLOR, J. L.; KENNEDY, Q.; NODA, A. & YESAVAGE, J. A. **PILOT AGE AND EXPERTISE PREDICT FLIGHT SIMULATOR PERFORMANCE**. A 3-year longitudinal study. *Neurology*, 2007. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2907140/>. Acesso em 24/08/2016.

<sup>3</sup> Considerando que a aeronave é tripulada por dois pilotos, um é o instrutor e o outro é o segundo piloto.

# The impact of air effort reduction on instructor pilot training between 2012 and 2015

*El impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la formación del piloto instructor entre 2012 y 2015*

*O impacto da redução do esforço aéreo na formação do piloto instrutor entre os anos 2012 e 2015*

Renato Russo Guimarães<sup>1</sup>

## ABSTRACT

This study analyzed the operational elevation of instructor pilots focusing on the number of estimated hours in the operational instruction and maintenance program (OIMP). Thus, the objective is to identify the impact of the air effort reduction for the 1st/2nd Transport Group (TG) regarding the amount of hours for the flight instructor pilot training in C-99 aircraft between 2012 and 2015. Descriptive research based on document analysis was used. The air effort information was obtained from the Opera System and the hours flown by the pilots up to the time of the operational flight board, in which the training pilot becomes an instructor, found in the board minutes. Such information were presented through tables, which were analyzed and correlated with Pearson's linear coefficient ( $r = -0.15$ ). Considering the result, it is possible to verify that there is a weak negative relation between the variables, that is, the air effort reduction did not impact the training of the pilot instructor because the pilots reached a minimum of 600 hours established at OIMP. Therefore, based on the Theory of Constraints by Goldratt, in its first stage of identifying the restriction, it is possible to conclude that the air effort reduction was not the constraint in the instructor's training process.

**Keywords:** Air Effort. Training. Experience. Instructor Pilot. Theory of Constraints.

## RESUMEN

*Este estudio analizó la elevación operativa de los pilotos instructores con un enfoque en la cantidad de horas previstas en el programa de instrucción y mantenimiento operativo (PIMO). Con esto, el objetivo es identificar el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo destinado al 1er/2 do Grupo de Transporte (GT) en el número de horas de formación del piloto instructor de vuelo en aeronaves C-99 entre los años 2012 y 2015. Realizar una investigación descriptiva con base documental. La información de esfuerzo aéreo, obtenida del Sistema Opera, y las horas voladas por los pilotos hasta el momento del tablero de vuelo operativo al instructor, que se encuentran en las actas del tablero, se presentaron a través de tablas, se realizaron los análisis y luego se correlacionaron por Coeficiente lineal de Pearson ( $r = -0,15$ ). Con el resultado, se puede verificar que existe una relación negativa débil entre las variables, es decir, la reducción del esfuerzo aéreo no afectó la formación del piloto instructor, ya que los pilotos alcanzaron el mínimo de 600 horas establecido por PIMO. Por lo tanto, con base en la Teoría de las restricciones de Goldratt, en su primera etapa de identificación de la restricción, se puede concluir que la reducción del esfuerzo aéreo no fue el cuello de botella en el proceso de formación del instructor.*

**Palabras clave:** Esfuerzo aéreo. Capacitación. Experiencia. Piloto Instructor. Teoría de las Restricciones.

## RESUMO

*O presente estudo analisou a elevação operacional dos pilotos instrutores com foco na quantidade de horas previstas no programa de instrução e manutenção operacional (PIMO). Com isso, o objetivo*

<sup>1</sup> Seventh Regional Aeronautical Accident Investigation and Prevention Service (SERIPA VII). Manaus/AM – Brazil. Master's degree in Aerospace Sciences from the University of the Air Force (UNIFA). E-mail: renatoctt@gmail.com

Received: 03/04/21

Accepted: 12/01/21

The acronyms and abbreviations contained in this article correspond to the ones used in the original article in Portuguese.

*é identificar o impacto da redução do esforço aéreo destinado ao 1º/2º Grupo de Transporte (GT) na quantidade de horas para formação do piloto instrutor de voo em aeronave C-99 entre os anos de 2012 e 2015. Utilizou-se uma pesquisa descritiva com base documental. As informações de esforço aéreo, obtidas no Sistema Ópera, e das horas voadas pelos pilotos até o momento do conselho de voo operacional a instrutor, encontradas na ata do conselho, foram apresentadas por meio de tabelas, feitas as análises, e, após, correlacionadas pelo coeficiente linear de Pearson ( $r = -0,15$ ). Com o resultado, é possível verificar que há uma relação negativa fraca entre as variáveis, ou seja, a redução do esforço aéreo não impactou na formação do piloto instrutor pois, os pilotos atingiram o mínimo de 600 horas estabelecidos pelo PIMO. Diante disso, fundamentado pela Teoria das Restrições de Goldratt, na sua primeira etapa de identificar a restrição, pode-se concluir que a redução do esforço aéreo não foi o gargalo no processo de formação do instrutor.*

**Palavras-chaves:** Esforço Aéreo. Treinamento. Experiência. Piloto Instrutor. Teoria das Restrições.

## 1 CONTEXTUALIZATION

The First Squadron of the Second Transport Group (1st/2nd TG) is subordinated to the Fifth Air Force (V FAE), responsible for air transport within the Aeronautical Command (COMAER). That unit, named CONDOR squadron, operates Embraer 145 model aircraft, called C-99A by COMAER. V FAE was created in 1959 and aims to carry out the specific actions of logistics air transport, such as: air exfiltration, air infiltration, logistics, logistical air transport, besides complementary actions such as special transportation. It also aims to continue the training and instruction of its operational and maintenance teams, enabling its staff to work in combat and supervising the planning and execution of the technical-administrative activities of the Unit (BRASIL, 2015). The 1st/2nd TG has military personnel belonging to the crew scheduling (CS) on board: pilots, flight mechanics, avionics maintainers and flight attendants. It must be emphasized that only aviator officers can be pilots.

The Operational Instruction and Maintenance Program (OIMP), under the responsibility of the 1st/2nd TG is the formal document that plans the air activities sized in specific training to be carried out by

all crew members, in order to keep them trained and efficiently standard capable of operating the aircraft in visual flight conditions (VFR) and by instruments (IFR) for both domestic and international flights (BRASIL, 2015).

After analysis of OIMP 2015 and observation of the training and operational elevation criteria of pilot flight instructors of the 1st/2nd TG, it is noticed that the marks attainable for raising the levels of operational classification are mainly guided by the theoretical tests and the number of flight hours. Thus, the pilot begins the operability as a student, moves on to basic pilot (BP) after reaching 80 flight hours, operational pilot (OP) after reaching 300 flight hours and, finally, flight instructor (FI) after reaching 600 flight hours.

Comparing the operational requirements with the length of stay of the military personnel in the squadron, it is possible to verify that the pilot reaches the maximum flight instructor operability when the following requirements are reached: being an operational pilot; performing for at least one year as an operational pilot; attending preferably the fourth year of the AU; having at least 600 hours flight hours on the C-99 aircraft; having preferably taken the Flight Instructor Standardization Course; successfully concluding the aircraft system test; flight simulator; aerial practice and being approved by the operational flight board<sup>1</sup> (OFB). From this on, the pilot will be responsible for passing on knowledge to other pilots.

The flight hours available for the AU are ruled by the Aeronautical Command Instruction (ICA) 55-87- COMGAR operational activities program, which are updated annually. From 2012 to 2015, there was a gradual reduction in the air effort compared to the amount of instructor hours from 2008 to the present year, further enhancing the air effort starting from 2015. Hence, the air unit faced a significant loss and it was necessary to adjust the distribution planning of hours per crew member.

Considering the facts mentioned above, this article aims to analyze the relation between the continuous air effort reduction and the consequent possibility of affecting the operational elevation, training and experience of pilots. When analyzing training as a dependent factor of the guidelines included in OIMP, it is expected and predictable that flight hours restriction will decrease pilot training and experience. Mager (1979) says that training is a solution, a remedy that

<sup>1</sup> OFB: Advisory body of the Commander of the 1st/2nd TG whose purpose is to evaluate the performance of flight crews, qualifying them in accordance with the established requirements, and to assist the Commander in matters pertaining to the fulfillment of the Air Unit (AU) mission.

involves information transmission in order to modify the knowledge or ability of an individual to do something, that is, the instructor must be trained so that he can teach and make the right decisions at times of increased workload during the flight.

It is established by the Flight Instructor Training Course a minimum of 600 flight hours on the aircraft. As it happens the continuous reduction of flight hours allocated in the squadron can affect this requirement, directly impairing the training of pilot instructors. In this sense, this work aims to examine how the air effort reduction can interfere in the number of hours for operational elevation and the qualification of the flight instructor.

Considering the facts mentioned above, the following question arises from the research: What is the impact of reducing the air effort in relation to the number of hours for the flight instructor pilot training on the C-99A aircraft of the 1st/2nd TG between 2012 and 2015?

To guide this research and answer the above inquiry, the following Guiding Questions were elaborated (GQ):

GQ1: What is the air effort for the squadron from 2012 to 2015?

GQ2: How many flight hours on the aircraft did each pilot have, at the time of the operational elevation to instructor, between 2012 and 2015?

In order to answer the research problem, the general objective is to identify what happens to the pilot of the 1st/2nd TG when the impact of the air effort reduction occurs in relation to the number of hours for operational elevation to C-99A flight instructor.

The following specific objectives (SO) have been drawn up in order to answer the guiding questions:

SO1: Identify the air effort allocated to the squadron from 2012 to 2015.

SO2: Identify the amount of flight hours on the aircraft that each pilot had at the time of the operational elevation to instructor, between 2012 and 2015.

This research has scientifically analyzed the parameters of operational elevation to flight instructor of pilots between 2012 and 2015 and enables the squadron to direct efforts to adapt the OIMP and better prepare for the scenario trend for years to come. In addition, this study will serve to guide other works aimed at the flight safety, in which crews with less flight hours should have a more accurate situational awareness and more frequent flight simulator training than the currently one, which may also be applied to other air units of the Air Force.

## 2 THEORETICAL REFERENCE

The research was based on the concepts of the Israeli physicist Eliyahu M. Goldratt who developed the Theory of Constraints (TOC) with the proposal of continuous improvement of the processes based on the analysis and treatment of the constraints, to eliminate obstacles in order to achieve a goal and, thus, improve the planning and the control of the organizations.

Cox III and Spencer (2002) say that production system consists of a series of successive steps performed through different resources. It is necessary to identify the system to be studied in this research so that the Theory of Constraints can be used as a scientific tool. Considering the necessary demand of the 1st/2<sup>o</sup>TG to carry out the training of flight instructors in the C-99 aircraft, the whole process that involves this goal (GOLDRATT, 2002) should be evaluated.

The operational requirements established at OIMP of the AU are parts of the process that make it possible the pilot operational elevation. Such requirements are interdependent elements of the whole process. TOC equates this relation in comparison with a chain operation, in which the weakest link determines the restriction of all the others. This study focuses on one of the constant requirements for instructor training which is to have the minimum number of flight hours, emphasizing that the difficulty in achieving this condition is defined as a constraint in the system mentioned above. Thus, one must direct efforts to the weakest link, study it and adapt it so that the chain is strengthened and will contribute to check the impact of air effort reduction on the operational elevation to pilot flight instructor on the aircraft C-99 of the 1st/2nd TG, enabling the improvement of the process when reaching the first stage of the TOC.

In order to better explain the theory, Goldratt divides it into five steps:

1 - to identify the system restriction: point out what can prevent the organization from achieving its goal. In this research, the necessary requirements to train the instructor were listed in order to identify the system. After that, the restriction that compromises the flight instructor training will be verified, completing step 1;

2 - to decide how to exploit the system restriction: it means taking advantage of existing capacity in the restriction, adopt preventive maintenance practices, short-term actions, in order not to stagnate the formation of the FI, without ignoring the other requirements;



3 - to make everything subject to system restriction: align the entire system or organization to follow the pace of the constraint. The other requirements of operational elevation should strengthen the weakest;

4 - to raise the system restriction: changes must be implemented so that, even with the restriction, the capacity is increased. Invest in the weakest link so that the formation of the FI is continued;

5 - if the constraint is broken, go back to the beginning: if the restriction is voided, another item may be a new restriction; go back to step 1 to identify whether another constraint may cause the process to become inert.

The AU planning has become more laborious. Dividing flight hours between crew members equally so that everyone can fly a minimum of desirable hours to maintain constant training was a difficult task due to the air effort reductions that occurred annually.

According to Mager (1979) when a skill decreases appreciably as time passes, a suitable solution would be a skill maintenance program, considering the exercise of practice as a form of improvement. Thus, it is important that the squadron again receives greater amounts of aerial effort again so that pilots maintain practice and training and, consequently, achieve higher levels of training, because, according to Taylor, Kannedy, Noda & Yesavage (2007), experience can be categorized into three types: minor, moderate and larger. The authors explain that each category progressively requires advanced training and more flight hours experience. They also state that the highest levels of experience are associated with greater total flight hours (our translation).

### 3 METHODOLOGY

Based on Gil's classification (2002), in order to achieve the general objective, this scientific research is classified as descriptive, focusing on establishing a relation between two variables: the air effort destined to the squadron and the number of hours for operational training of the flight instructor pilot.

This is a documentary research, following the line of the same author to outline technical procedures. The primary sources for analysis will be manuals and documents from COMAER, specifically within the Military Organization (MO).

Three different data sources were consulted. The first one was OIMP, a document that includes

the requirements for operational elevation. The second source was the Opera System<sup>2</sup>, which has the allocated air effort for each year. The third one was the instruction subsection of the 1st/2nd TG, which provided the amount of flight hours each pilot had at the time of the OFB.

This study was intended to present the reductions in the flight hours destined to the squadron and the reason why this did not happen, because it would require further in-depth study. However, it is worth mentioning that Brazil was going through economic and political crises that will not be discussed.

The Theory of Constraints published in the Manual of The Theory of Constraints (Cox and Spencer, 2002) was researched to support the concepts presented in the theoretical reference of the work.

Thus, the line of research is Education in the Air Force, because the training and specialization of eight officers who completed the operational training of pilot instructor in the fourth year of the UAe between 2012 and 2015 was studied.

In order to answer the first GQ, a documentary consultation was made in the Opera System to know the number of hours flown by MO each year between 2012 and 2015.

To answer the second GQ, the amount of flight hours each pilot had at the time of operational elevation was found at the operational board minutes in the squadron's Instruction Subsection, located at Galeão Air Base.

The data were inserted in the Microsoft Office Excel 2011 program to enable the creation of charts and spreadsheets which facilitated the reader understanding. The hours related to the air effort flown by the squadron annually, were used to draw up a graph of the gradual air effort reduction. The hours flown per pilot up to the date on which the operational elevation to flight instructor occurred have been transformed into a table. In the same program, Pearson statistical function was used, providing a numerical result called correlation coefficient ( $r$ ) in which it associates two quantitative variables measuring the direction and degree of the linear relation between them, and the result can be between -1 and 1. This number will be the degree of correlation, that is:

$r = 1$  means a perfect positive correlation between the two variables.

<sup>2</sup> Internal system used to record squadron flights.

$r = -1$  means a perfect negative correlation between the two variables, which means that if one increases, the other always decreases.

$r = 0$  means that the two variables do not depend linearly on each other or there may be a nonlinear dependency. Thus, this result should be investigated by other means.

Finally, it is understood that positive values of the coefficient, i.e., between 0 and 1, indicate a positive and true correlation between the variables and, then, the identification of the constraint. Negative coefficient values, between 0 and -1, indicate no correlation between the variables, denying the existence of the restriction. Thus, it was possible to finish the first stage of TOC and present the impact of air effort reduction on the operational progression of the flight instructor pilot, as well as pointing out the effects on training and experience of the squadron pilots.

#### 4 DATA PRESENTATION AND INTERPRETATION

The analyzed data made it possible to present the results so that it was attainable to identify the

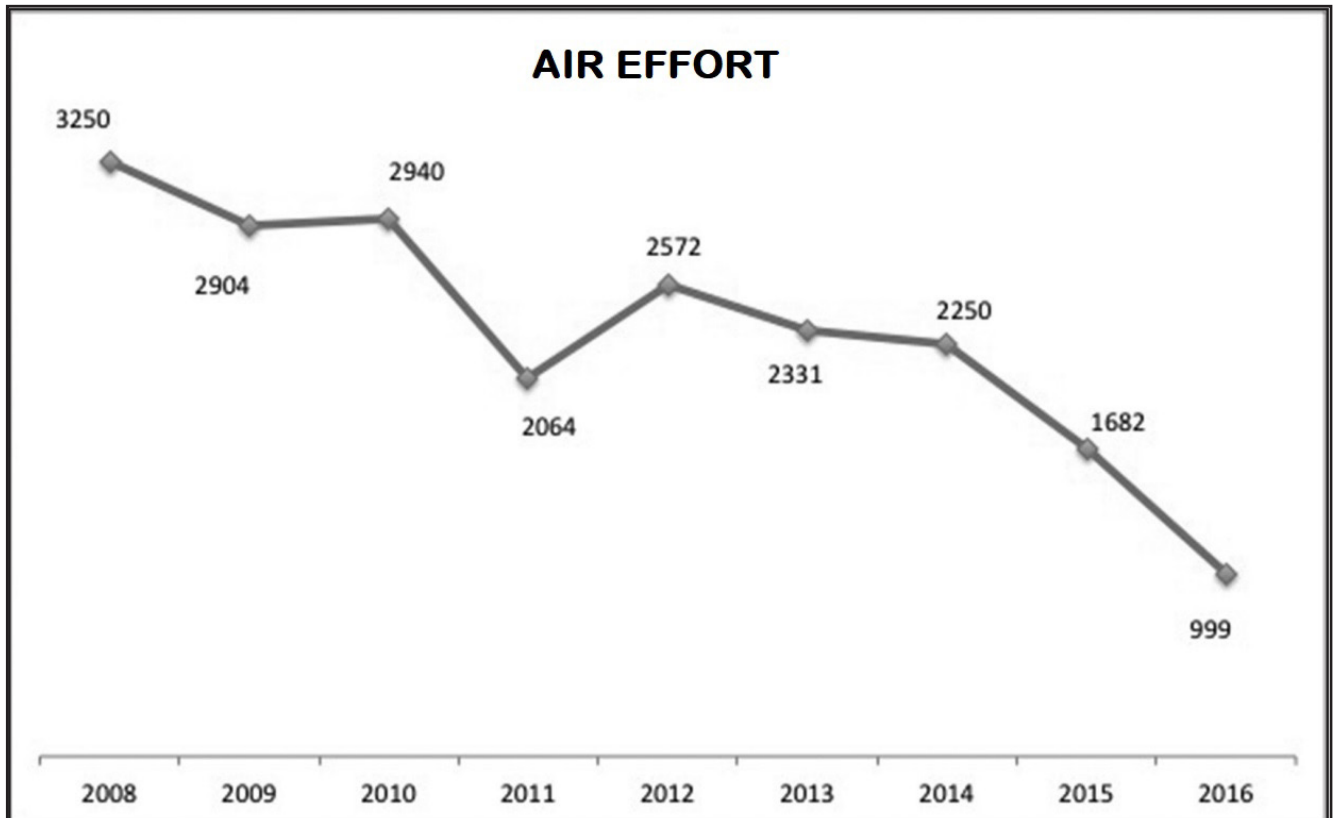
impact of the air effort reduction on the number of hours for operational progression of the flight instructor pilot, taking into account the period which was researched.

Figure 1 was elaborated to answer the first GQ. It presents the annual air effort of the squadron, obtained in the Opera System, between 2008 and 2016. The hours made available for the squadron to fulfill their missions, to prepare and maintain the operability of the crews decreased 34.6% between 2012 and 2015, fulfilling the SO1. It is noteworthy that the pilot who became an instructor in 2012 started the air activity in 2009. It is possible to affirm that the air effort has been decreasing since 2008, and in 2016, it was three times lower.

Goldratt (2002) states that the goal of the five steps focusing process consists in allowing that the system can undergo a process of continuous improvement through the constraint identification and management.

Figure 2 was made to answer the second GQ, which shows the hours flown by pilots at the time of the operational flight board and the average of those hours per year.

Figure 1 - Annual Air Effort.



Source: The author.

**Figure 2** - IN training per year, pilots, flight hours at OFB, annual average at OFB and annual air effort.

YEAR IN	PILOT	HR	AVERAGE	AIR EFFORT
2012	1	792:25	792:25	2572
2013	2	690:10	701:25	2331
	3	712:40		
2014	4	734:10	713:32	2250
	5	692:55		
2015	6	772:45	767:50	1682
	7	810:00		
	8	720:45		

Source: The author.

Figure 2 shows in the first column the year in which the elevation to instructor occurred. The second column refers to the pilots who participated in the survey and the third column includes the number of hours flown up to the time of the operational flight board to be an instructor. It is noticed that the annual average increased between 2013 and 2015 and the air effort has decreased over the years. The reason for this increase has not been researched and may be the subject of future studies, as the number of pilots who flew between 2008 and 2015 varied greatly each year. These variables were not necessarily addressed in this article.

The fourth and fifth columns were inserted in Figure 2, respectively, average of the hours flown from column 3 and aerial effort. The hours in column 4 were transformed into absolute numbers and so the table was created as it can be seen in Figure 3.

From the last table, it was possible to use Pearson statistical formula, relating the first

**Figure 3** - Air effort and annual average at OFB.

AIR EFFORT	HR
2572,00	792,41
2331,00	701,41
2250,00	713,53
1682,00	767,83

Source: The author.

column to the second one. The result was  $r = -0.0291$ . Dancy and Reidy (2005 apud Figueiredo Filho; Silva Junior, 2009), explains that the values of  $r = 0.1$  to  $0.30$  indicates a weak degree of correlation and together with negative signal, provides a negative direction condition of the relationship. Therefore, the result reveals a weak relation added to the negative condition between the two variables.

In view of the analyses made, the pilots exercised the practice of continuous flight between 2012 and 2015 and reached the minimum set in the squadron for instructor training. Such context is aligned with Taylor, Kannedy, Noda & Yesavage (2007), which states that the flight experience is proportional to the amount of flight hours and the time lapse that pilots fly aircraft.

In the first stage, in accordance with TOC, it was identified that the reduction of hours available to the squadron was not a restriction on the number of hours for operational progression from pilot to instructor. Therefore this is not the weakest link in the chain among the requirements established at OIMP. Thus, the first stage of the theory is concluded based on this observation. However, it should be considered other requirements in the formation that can be analyzed by other researches aimed at detecting this constraint.

According to Mager (1979), it is possible to state that the skill of the instructor pilot was exercised through practice and that are adequately trained because it is necessary that the function continues to be performed frequently.

## 5 CONCLUSION

The figures presented in the analysis show a scenario for available hour reduction to the air unit and, even so, the operational demand of the 1st/2nd TG requires the continuation of the training, formation and operational capacitation of the crew members.

The continuous decrease in flight hours available for the 1st/2nd TG led to the identification of the impact of the air effort reduction on the number of hours for training the pilot flight instructor on the C-99 aircraft between 2012 and 2015, due to the possibility of not reaching the minimum of 600 flight hours established at OIMP.

In order to meet the general goal, the following specific objectives have been set up: 1 - Identify the number of hours flown at the squadron between 2012 and 2015; 2 - Identify the number of flight hours on the aircraft each pilot had at the time of the instructor operational elevation between 2012 and 2015. The specific objective 1 showed that there has been a continuous reduction in the air effort of the AU since 2008. The second specific objective provided the hours flown by the pilots up to the time of the OFB, in which an increase is noticed from 2013. All collected data has been entered in the Microsoft Excel program so that one can apply Pearson statistical calculation and provide the result of the correlation between the air effort and hours flown by the pilots, besides enabling the preparation of the spreadsheets.

Thus, it was possible to identify that, during the flight instructor training process, from the perspective of the first stage of the Theory of Constraints, that the constraint was not the gradual reduction of air effort because it did not directly impact the number of hours required for the operational elevation of the crew members since, even with the air effort reduction, the hours flown per pilot remained above the minimum requirement established at OIMP.

This research is important because it gathers two essential factors for an instructor pilot: training and experience. The flight instructor should be able to train the second pilot<sup>3</sup>, that is, to the learning student, the correct and safe way to fly an aircraft and, in addition, to be able to pass on information and experience, in order to perpetuate these teachings for the next generations who will work at the AU and will also participate in the fulfillment of the mission of the 1st/2nd TG.

Thus, this study allows that others studies analyze the necessary skills for the flight instructor pilot, in order to adapt OIMP and the influence of the decrease of hours on the situational awareness of the instructors or the motivation of pilots in relation to the scenario of the air effort reduction. Thus, the knowledge generated by this research will be available to be used as support for future decisions in which the optimization of the Air Force processes, even with fewer resources, have the crews trained and ready for the immediate deployment when necessary.

## REFERENCES

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Primeiro Esquadrão do Segundo Grupo de Transporte. **Programa de Instrução e Manutenção Operacional do 1º/2º GT Grupo de Transporte**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, J. A. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje. Vol. 18, n.1, art. 2009. Disponível em <http://www.revista.ufpe.br/politica/hoje/index.php/politica/article/viewFile/6/6>. Acesso em: 14/08/2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDRATT, E. M.; COX III, J. F.; SPENCER, M. S. **Manual da Teoria das Restrições**. 2 ed. São Paulo: Bookman, 2002.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta: um processo de melhoria contínua**. São Paulo: Nobel, 2002.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

MAGER, R. F., PIPE, P. Trad. Maria Ângela Vinagre de Almeida. **Análise de Problemas de Desempenho**. 2 ed. Porto Alegre: Globo, 1979.

TAYLOR, J. L.; KENNEDY, Q.; NODA, A. & YESAVAGE, J. A. **PILOT AGE AND EXPERTISE PREDICT FLIGHT SIMULATOR PERFORMANCE**. A 3-year longitudinal study. Neurology, 2007. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2907140/>. Acesso em 24/08/2016.

<sup>3</sup> Considering that the aircraft is manned by two pilots, one is the instructor and the other one is the second pilot.



## El impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la formación del piloto instructor entre 2012 y 2015

*The impact of reduced air effort on training the instructor pilot between 2012 and 2015*

*O impacto da redução do esforço aéreo na formação do piloto instrutor entre os anos 2012 e 2015*

Renato Russo Guimarães<sup>1</sup>

### RESUMEN

Este estudio analizó la elevación operativa de los pilotos instructores con un enfoque en la cantidad de horas previstas en el programa de instrucción y mantenimiento operativo (PIMO). Con esto, el objetivo es identificar el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo destinado al 1er/2 do Grupo de Transporte (GT) en el número de horas de formación del piloto instructor de vuelo en aeronaves C-99 entre los años 2012 y 2015. Realizar una investigación descriptiva con base documental. La información de esfuerzo aéreo, obtenida del Sistema Opera, y las horas voladas por los pilotos hasta el momento del tablero de vuelo operativo al instructor, que se encuentran en las actas del tablero, se presentaron a través de tablas, se realizaron los análisis y luego se correlacionaron por Coeficiente lineal de Pearson ( $r = -0,15$ ). Con el resultado, se puede verificar que existe una relación negativa débil entre las variables, es decir, la reducción del esfuerzo aéreo no afectó la formación del piloto instructor, ya que los pilotos alcanzaron el mínimo de 600 horas establecido por PIMO. Por lo tanto, con base en la Teoría de las restricciones de Goldratt, en su primera etapa de identificación de la restricción, se puede concluir que la reducción del esfuerzo aéreo no fue el cuello de botella en el proceso de formación del instructor.

**Palabras clave:** Esfuerzo aéreo. Capacitación. Experiencia. Piloto Instructor. Teoría de las Restricciones.

### ABSTRACT

*This study analyzed the operating elevation of instructor pilots focused on the amount of hours in the operational*

*training and maintenance program (PIMO). Thus, the goal is to identify the impact of the reduction in air efforts for the 1st / 2nd Transport Group in the amount of hours for training the flight instructor pilot in C-99 aircraft between the years 2012 and 2015. It was used one descriptive research with documentary base. Based on air effort of information and hours flown by pilots until the time of operational flight instructor advice were presented through tables, made the analysis, and, after correlated by linear Pearson coefficient ( $r = -0,15$ ). With the result, you can see that there is a negative relationship between the variables, is the reduction did not affect air effort in training instructor pilot as pilots reached a minimum of 600 hours set by PIMO. Thus, based on Goldratt's Theory of Constraints in its first step to identify the restriction, it can be concluded that the reduction of air effort was not the bottleneck in the instructor training process.*

**Keywords:** Flight Effort. Training. Experience. Instructor Pilot. Theory of Constraints.

### RESUMO

*O presente estudo analisou a elevação operacional dos pilotos instrutores com foco na quantidade de horas previstas no programa de instrução e manutenção operacional (PIMO). Com isso, o objetivo é identificar o impacto da redução do esforço aéreo destinado ao 1º/2º Grupo de Transporte (GT) na quantidade de horas para formação do piloto instrutor de voo em aeronave C-99 entre os anos de 2012 e 2015. Utilizou-se uma pesquisa descritiva*

I. Séptimo Servicio Regional de Investigación y Prevención de Accidentes Aeronáuticos (SERIPA VII). Manaus/AM – Brasil. Maestría en Ciencias Aeroespaciales por la Universidad de la Fuerza Aerea (UNIFA). Email: renatoct@gmail.com

Recibido: 04/03/21

Aceito: 01/12/21

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

*com base documental. As informações de esforço aéreo, obtidas no Sistema Ópera, e das horas voadas pelos pilotos até o momento do conselho de voo operacional a instrutor, encontradas na ata do conselho, foram apresentadas por meio de tabelas, feitas as análises, e, após, correlacionadas pelo coeficiente linear de Pearson ( $r = -0,15$ ). Com o resultado, é possível verificar que há uma relação negativa fraca entre as variáveis, ou seja, a redução do esforço aéreo não impactou na formação do piloto instrutor pois, os pilotos atingiram o mínimo de 600 horas estabelecidos pelo PIMO. Diante disso, fundamentado pela Teoria das Restrições de Goldratt, na sua primeira etapa de identificar a restrição, pode-se concluir que a redução do esforço aéreo não foi o gargalo no processo de formação do instrutor.*

**Palavras-chave:** Esforço Aéreo. Treinamento. Experiência. Piloto Instrutor. Teoria das Restrições.

## 1 CONTEXTUALIZACIÓN

La Quinta Fuerza Aérea (V FAE), responsable de la aviación de transporte dentro del Comando de la Fuerza Aérea (COMAER), tiene como unidad subordinada el Primer Escuadrón del Segundo Grupo de Transporte (1°/2° GT), Escuadrón CONDOR que opera aviones Embraer 145, llamados C-99A por el COMAER. Creada en 1959, su misión es realizar acciones específicas de transporte aéreo logístico, incluyendo: exfiltración aérea, infiltración aérea, logística, transporte aéreo logístico, así como realizar acciones complementarias como el transporte especial, y continuar el entrenamiento de sus equipos operativos y de mantenimiento, capacitándolos para su utilización en combate, y supervisar la planificación y ejecución de las actividades técnicas y administrativas de la Unidad (BRASIL, 2015). En cumplimiento de sus objetivos operativos, el 1°/2° GT cuenta con personal militar perteneciente al cuadro de tripulación (QT) con las siguientes funciones a bordo: pilotos, mecánicos de vuelo, mantenedores de aviónica y auxiliares de vuelo.

El Programa de Instrucción Operativa y Mantenimiento (PIMO) del 1°/2° GT es el documento formal que planifica las actividades aéreas dimensionadas en el entrenamiento específico que deben realizar todos los miembros de la tripulación del QT para mantenerse

entrenado y con un estándar de eficiencia capaz de operar la aeronave en condiciones de vuelo visual (VFR) y por instrumentos (IFR) tanto en territorio nacional como extranjero (BRASIL, 2015).

Tras analizar el PIMO 2015 y observar los criterios de formación y elevación operativa de los pilotos instructores de vuelo del 1°/2° GT, es posible advertir que las notas alcanzables para la elevación de los niveles de clasificación operativa se guían principalmente por las pruebas teóricas y el número de horas voladas en la aeronave. Con ello, el piloto comienza la operatividad como estudiante, progresa a Piloto Básico (BP) con 80 horas, luego a Piloto Operativo (OP), con 300 horas, y finalmente a Instructor de Vuelo (IN), con 600 horas.

Comparando las marcas operativas con el tiempo de permanencia del militar en el escuadrón, es posible visualizar que el piloto alcanza la máxima operatividad de instructor de vuelo cuando se alcanzan las siguientes marcas: ser piloto operacional y tener al menos un año en esta operatividad; estar preferentemente en el cuarto año de la UAe; tener al menos 600 horas de vuelo en aeronaves C-99; tener, preferentemente, el curso de estandarización de instructor de vuelo; completar con éxito la prueba de sistemas de la aeronave; el simulador de vuelo; la práctica aérea y ser aprobado por el consejo de vuelo operacional<sup>1</sup> (CVO). Con ello se encargará de transmitir sus conocimientos a otros pilotos.

Las horas de vuelo disponibles para la UAe se rigen por la Instrucción del Mando Aeronáutico (ICA) 55-87 - Programa de Actividades Operativas de la COMGAR y se actualizan anualmente. En el periodo que va de 2012 a 2015, se notó una reducción gradual del esfuerzo aéreo, en comparación con la cantidad recibida desde 2008 hasta el presente año, y su impacto fue aún más acentuado a partir de 2015. Con esto, la unidad aérea se enfrentó a una pérdida significativa y fue necesario ajustar la planificación de la distribución de horas por miembro de la tripulación.

Sobre la base de lo anterior, este documento pretende analizar la continua reducción del esfuerzo aéreo con la consiguiente posibilidad de afectar a la elevación operativa de los pilotos, así como a su formación y experiencia. Al analizar la formación como factor dependiente de las directrices contenidas en el PIMO, resulta esperable y previsible que la restricción de las horas de vuelo disminuya la formación y la experiencia de los pilotos. Mager (1979) afirma que la formación es una solución, un remedio que consiste en

<sup>1</sup> CVO: Órgano consultivo del Comandante del 1°/2° GT, que tiene por objeto evaluar el desempeño de las tripulaciones de vuelo, calificándolas de acuerdo con los requisitos establecidos, y asesorar al Comandante en los asuntos relativos al cumplimiento de la misión de la Unidad Aérea (UAe).

transmitir información para modificar el conocimiento o la capacidad de un individuo para hacer algo. En otras palabras, el instructor debe estar capacitado para poder enseñar y tomar las decisiones correctas en momentos de mayor carga de trabajo durante el vuelo.

El curso de formación de instructor de vuelo establece un mínimo de 600 horas de vuelo en la aeronave. Sucede que, la continua reducción de horas de vuelo asignadas en el escuadrón puede afectar a este requisito perjudicando directamente la formación de los pilotos instructores. En este sentido, este trabajo pretende examinar cómo la reducción del esfuerzo aéreo puede interferir en la cantidad de horas de elevación operativa y de cualificación del instructor de vuelo.

A la vista de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la cantidad de horas de formación de pilotos instructores de vuelo en aviones C-99A del 1°/2° GT entre los años 2012 y 2015?

Para orientar esta investigación y responder a la pregunta anterior, se elaboraron las siguientes preguntas orientativas (PN):

PN1: ¿Cuál es el esfuerzo aéreo asignado al escuadrón en los años 2012 a 2015?

PN2: ¿Cuántas horas de vuelo en la aeronave tenía cada piloto, en el momento de la elevación operativa a instructor, entre 2012 y 2015?

Para responder al problema de investigación, se establece el objetivo general, que es identificar el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la cantidad de horas de elevación operativa a instructor de vuelo C-99A en el piloto del 1°/2° GT.

Para responder a las preguntas orientadoras, los objetivos específicos eran los siguientes se elaboraron los siguientes objetivos específicos:

OE1: Identificar el esfuerzo aéreo asignado al escuadrón en los años 2012 a 2015.

OE2: Identificar la cantidad de horas de vuelo en la aeronave que tenía cada piloto en el momento de la elevación operativa a instructor entre 2012 y 2015.

Esta investigación analizó científicamente los parámetros de las calificaciones de los instructores de vuelo operativos de los pilotos en años pasados y, en vista de ello, permite al escuadrón orientar los esfuerzos para adecuar la PIMO y preparar mejor la tendencia del escenario para los próximos años. Además, este estudio servirá para orientar otros trabajos dirigidos a la seguridad de vuelo, en los que las tripulaciones con menos horas de vuelo deberían tener un conocimiento de la situación más preciso y un entrenamiento en simulador de vuelo más frecuente que el que se utiliza actualmente, y también puede aplicarse en otras unidades aéreas de la Fuerza Aérea.

## 2 MARCO TEÓRICO

Esta investigación se basó en los conceptos del físico israelí Eliyahu M. Goldratt, quien desarrolló la Teoría de las Restricciones (TOC) con la propuesta de mejora continua mediante el perfeccionamiento de los procesos a partir del análisis y tratamiento de las restricciones, eliminando los obstáculos para alcanzar un objetivo y así mejorar la planificación y el control de las organizaciones.

Cox III y Spencer (2002) afirman que los sistemas de producción consisten en una serie de pasos sucesivos realizados por diferentes recursos. Para que la Teoría de las Restricciones pueda utilizarse como herramienta científica, es necesario identificar el sistema que se va a estudiar en esta investigación. Teniendo en cuenta la necesaria demanda del 1°/2°GT para la formación de instructores de vuelo en aviones C-99, se debe evaluar todo el proceso que implica este objetivo (GOLDRATT, 2002).

Los requisitos operativos detallados en el PIMO de la UAe son partes del proceso que hacen posible el levantamiento operativo del piloto, por lo que son elementos interdependientes del conjunto. El COT equipara esta relación con el funcionamiento de una cadena, en la que el eslabón más débil determina la restricción de todos los demás. Este estudio se centra en uno de los requisitos constantes para la formación de instructores que es tener un mínimo de horas de vuelo, destacando que la dificultad para alcanzar esta condición se define como una restricción en este sistema. Así, dirigir los esfuerzos al eslabón más débil, estudiarlo y adaptarlo para fortalecer la cadena contribuirá a verificar el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la elevación operativa al piloto instructor de vuelo en aviones C-99 del 1°/2° GT, permitiendo la mejora del proceso al llegar a la primera etapa del TOC.

Para explicar mejor la teoría, Goldratt la divide en cinco etapas, que son:

1 - Identificar la restricción del sistema: señalar qué puede impedir que la organización obtenga su objetivo. En esta investigación, se enumeraron los requisitos necesarios para formar al instructor, con el fin de identificar el sistema. A continuación, se verificará la restricción que dificulta la formación del instructor de vuelo, concluyendo, de esta manera, el paso 1;

2 - decidir cómo explotar la restricción del sistema: esto significa aprovechar la capacidad existente en la restricción, adoptar prácticas de mantenimiento preventivo, acciones a corto plazo, para no estancar la formación de la IN, sin ignorar los otros requisitos;

3 - subordinar todo a la restricción del sistema: hacer que todo el sistema u organización se alinee para seguir el ritmo de la restricción, los demás requisitos del ascensor operativo deben reforzar el más débil;

4 - aumentar la restricción del sistema: deben aplicarse cambios para que, incluso con la restricción, aumente la capacidad. Invertir en el eslabón más débil para que la formación de los NI sea continuada;

5 - si la restricción se rompe, vuelva al principio: si la restricción se anula, otro elemento podría ser una nueva restricción, vuelva al paso 1 para identificar si otra restricción podría causar inercia en el proceso.

La planificación de la UAe se ha vuelto más laboriosa. Dividir las horas de vuelo entre la tripulación de forma equitativa para que todos puedan volar el mínimo de horas deseable para mantener una formación constante ha sido una tarea difícil debido a las reducciones del esfuerzo aéreo que se han producido anualmente.

Según Mager (1979) cuando una habilidad disminuye sensiblemente con el tiempo, una solución adecuada es un programa de mantenimiento de la habilidad, considerando el ejercicio de la práctica como una forma de mejora. Con esto, es importante que el escuadrón vuelva a recibir mayores cantidades de esfuerzo aéreo para que los pilotos mantengan la práctica y el entrenamiento y, en consecuencia, alcancen mayores niveles de capacitación, ya que según Taylor, Kannedy, Noda & Yesavage (2007), la experiencia puede clasificarse en tres tipos: menor, moderada y mayor. Los autores explican que cada categoría requiere progresivamente una formación avanzada y más horas de experiencia de vuelo. También añaden que los niveles más altos de experiencia se asocian con más horas de vuelo totales).

### 3 METODOLOGÍA

Con base en la clasificación de Gil (2002), para lograr el objetivo general propuesto, esta investigación científica se clasifica como descriptiva, centrándose en establecer una relación entre dos variables: el esfuerzo aéreo asignado al escuadrón y la cantidad de horas de entrenamiento operacional del piloto instructor de vuelo.

Para esbozar los procedimientos técnicos, siguiendo la línea del mismo autor, el tipo de investigación de este trabajo es documental. Las principales fuentes de análisis serán los manuales y los documentos de la COMAER, concretamente en la OM.

La investigación consultó tres (3) fuentes de datos diferentes. El primero fue el PIMO, un documento que contiene los requisitos para el ascensor operativo. La segunda fuente utilizó el Sistema Opera2, que tiene y esfuerzo aéreo asignado para cada año. La tercera era la subsección de instrucción del 1°/2° GT que proporcionaba la cantidad de horas de vuelo que tenía cada piloto en el momento del CVO.

La delimitación de este estudio fue presentar las reducciones en las horas de vuelo asignadas al escuadrón y no la razón de que este hecho haya ocurrido, ya que requeriría un estudio más profundo. Sin embargo, cabe mencionar que el país estaba atravesando crisis económicas y políticas que no se discutirán en este contexto.

Para fundamentar los conceptos presentados en el marco teórico del trabajo se investigó la Teoría de las Restricciones publicada en el Handbook of Theory of Constraints (Cox y Spencer, 2002).

Así, la línea de investigación es la Educación en el Ejército del Aire, ya que se estudió la formación y especialización de ocho oficiales que completaron la formación operativa de piloto instructor en el cuarto año de la UAe entre los años 2012 y 2015.

Para responder a la primera PN, se realizó una consulta documental en el Sistema Opera para conocer la cantidad de horas voladas por OM en cada año en el periodo comprendido entre 2012 y 2015.

Para responder a la segunda PN, la cantidad de horas de vuelo que cada piloto tenía en el momento del levantamiento operacional fue encontrada en las actas del consejo operacional en la Subsección de Instrucción del Escuadrón, ubicada en la Base Aérea de Galeão.

Los datos se introdujeron en el programa *Microsoft Office Excel 2011* para permitir la creación de gráficos y hojas de cálculo que, presentados al lector, faciliten su comprensión. Las horas relacionadas con el esfuerzo aéreo volado por el escuadrón anualmente se utilizaron para dibujar un gráfico de la reducción gradual del esfuerzo aéreo. Las horas voladas por piloto hasta la fecha en que se produjo la elevación operativa a instructor de vuelo se transformaron en una tabla. En el mismo programa se utilizó la función estadística Pearson, proporcionando un resultado numérico llamado coeficiente de correlación ( $r$ ) en el que se asocian dos variables cuantitativas midiendo la dirección y el grado de la relación lineal entre ellas, el resultado puede estar entre -1 y 1. Este número será el grado de correlación existente, es decir:

<sup>2</sup> Sistema interno utilizado para registrar los vuelos del escuadrón.



$r = 1$  significa una correlación positiva perfecta entre las dos variables.

$r = -1$  significa una correlación negativa perfecta entre las dos variables, lo que significa que si una aumenta, la otra siempre disminuye.

$r = 0$  significa una correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, o que significa que se uma variável aumenta, a outra diminui sempre.

Por último, se entiende que los valores positivos del coeficiente, es decir, entre 0 y 1, indican una correlación positiva y verdadera entre las variables estudiadas y, por tanto, la identificación del cuello de botella. Los valores negativos de los coeficientes, entre 0 y -1, indican que no hay correlación entre las variables, negando la existencia de la restricción. De este modo, fue posible finalizar la primera etapa del COT y presentar el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la progresión operativa del piloto instructor de vuelo, así como señalar los efectos en la formación y experiencia de los pilotos del escuadrón.

#### 4 PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Los datos analizados permitieron presentar los resultados de tal manera que fue posible identificar el

impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la cantidad de horas de progresión operativa del piloto instructor de vuelo, teniendo en cuenta el período investigado.

Para responder a la primera PN, se elaboró la Figura 1, que presenta el esfuerzo aéreo anual del escuadrón, obtenido en el Sistema Opera, entre los años 2008 y 2016. Las horas puestas a disposición del escuadrón para cumplir con sus misiones, preparar y mantener la operatividad de las tripulaciones sufrieron un descenso del 34,6% entre los años 2008 y 2016, cumpliendo el OE1. Cabe mencionar que, el piloto formado como instructor en 2012 comenzó su actividad aérea en 2009. Se puede afirmar que el esfuerzo aéreo ha ido disminuyendo desde 2008, hasta el punto de que, en 2016, es tres veces menor.

Goldratt (2002) afirma que el objetivo del proceso de enfoque en cinco pasos es permitir que el sistema se someta a un proceso de mejora continua a través de la identificación y gestión de las limitaciones.

Para responder a la segunda PN, se elaboró la Figura 2, que muestra las horas voladas por los pilotos en el momento del aviso de vuelo operativo y la media de estas horas por año.

Figura 1 - Esfuerzo aéreo anual.



Fuente: El autor.

**Figura 2** - Año de formación IN, pilotos, hora de vuelo en CVO, media en CVO anual y esfuerzo aéreo anual.

<b>AÑO</b>	<b>PILOTO</b>	<b>HR</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>ESFUERZO AÉREO</b>
<b>2012</b>	<b>1</b>	<b>792:25</b>	<b>792:25</b>	<b>2572</b>
<b>2013</b>	<b>2</b>	<b>690:10</b>	<b>701:25</b>	<b>2331</b>
	<b>3</b>	<b>712:40</b>		
<b>2014</b>	<b>4</b>	<b>734:10</b>	<b>713:32</b>	<b>2250</b>
	<b>5</b>	<b>692:55</b>		
<b>2015</b>	<b>6</b>	<b>772:45</b>	<b>767:50</b>	<b>1682</b>
	<b>7</b>	<b>810:00</b>		
	<b>8</b>	<b>720:45</b>		

Fuente: El autor.

La figura 2 presenta en la primera columna el año en que se produjo la elevación a instructor. La segunda columna se refiere a los pilotos que participaron en la investigación y la tercera columna contiene la cantidad de horas voladas hasta el momento del asesoramiento de vuelo operacional al instructor. Se puede observar que la media anual aumentó entre 2013 y 2015 y el esfuerzo de vuelo disminuyó a lo largo de los años. La razón de este aumento no se investigó y puede ser objeto de un estudio futuro, ya que el número de pilotos que volaron entre 2008 y 2015 varió mucho cada año. Estas variables requerirían no fueron abordadas en este documento.

En la cuarta y quinta columnas se insertaron, respectivamente, la media de las horas de vuelo de la columna 3 y el esfuerzo aéreo. Las horas existentes en la columna 4 se transformaron en números absolutos y así se creó la tabla presentada en la Figura 3.

**Figura 3** - Esfuerzo aéreo y media en CVO anual.

<b>ESFUERZO AÉREO</b>	<b>HR</b>
<b>2572,00</b>	<b>792,41</b>
<b>2331,00</b>	<b>701,41</b>
<b>2250,00</b>	<b>713,53</b>
<b>1682,00</b>	<b>767,83</b>

Fuente: El autor.

A partir de esta última tabla, fue posible utilizar la fórmula estadística de Pearson, relacionando la primera columna con la segunda. El resultado encontrado fue  $r = -0,0291$ . Dancey y Reidy (2005 apud Figueiredo Filho; Silva Junior, 2009), explica que los valores de  $r = 0,1$  a  $0,30$  indican un grado débil de correlación, junto con el signo negativo proporciona una condición de dirección negativa de la relación. Por lo tanto, el resultado encontrado revela una relación débil añadida a la condición negativa entre las dos variables.

Frente a los análisis realizados, los pilotos ejercieron la práctica de vuelo continuo durante los años y alcanzaron el mínimo establecido en la escuadra para la formación de instructores y para ilustrar el contexto presentado, se alinean con las afirmaciones de Taylor, Kannedy, Noda & Yesavage (2007), que la experiencia de vuelo es proporcional a la cantidad de horas de vuelo y al espacio de tiempo que la persona ejerce el pilotaje.

A la luz del COT, en su primera etapa, se identificó que la reducción de horas disponibles para el escuadrón no era una restricción en la cantidad de horas para la progresión operativa del piloto a instructor, por lo que no era el eslabón más débil de la cadena entre los requisitos establecidos en el PIMO. Por lo tanto, la primera etapa de la teoría se concluye a partir de esta identificación, pero hay que considerar la existencia de otros requisitos de formación que pueden ser analizados por otras investigaciones que pretenden detectar este cuello de botella.

Según Mager (1979), se puede afirmar que la habilidad del piloto instructor entrenado se ha ejercitado a través de la práctica y que están con formación adecuada, ya que la función debe seguir realizándose con frecuencia.

## 5 CONCLUSIÓN

Las cifras presentadas en el análisis dibujan un escenario de reducción de las horas disponibles asignadas a la unidad aérea y, aun así, la demanda operativa del 1º/2º GT requiere la continuación del entrenamiento, la formación y la capacitación operativa de los tripulantes.

La continua disminución de las horas de vuelo disponibles para el 1º/2º GT llevó a este investigador a identificar el impacto de la reducción del esfuerzo aéreo en la cantidad de horas de formación de pilotos instructores de vuelo en aviones C-99 entre los años 2012 y 2015, debido a la posibilidad de no alcanzar el mínimo de 600 horas de vuelo establecido en el PIMO.

Para responder al objetivo general propuesto se crearon los siguientes objetivos específicos: 1 - Identificar la cantidad de horas voladas por el escuadrón entre 2012 y 2015; 2 - Identificar la cantidad de horas de vuelo en la aeronave que tenía cada piloto al momento de la elevación operativa a instructor entre 2012 y 2015. La respuesta del objetivo específico 1 mostró que hubo una reducción continua del esfuerzo aéreo de la UAe desde el año 2008. El segundo objetivo específico proporcionó las horas voladas por los pilotos hasta el CVO, que muestra un aumento a partir de 2013. Todos los datos recogidos se introdujeron en *Microsoft Excel* para permitir la aplicación del cálculo estadístico de Pearson y proporcionar la correlación entre el esfuerzo aéreo y las horas de vuelo de los pilotos, además de permitir la preparación de hojas de cálculo.

Con ello, se pudo identificar que, en el proceso de formación de instructores de vuelo, bajo la primera etapa de la Teoría de las Restricciones, el cuello de botella no era la reducción gradual del esfuerzo aéreo porque no impactaba directamente en la cantidad de horas necesarias para la elevación operativa de los tripulantes ya que, aún con la reducción del esfuerzo aéreo, las horas voladas por piloto se mantenían por encima del requerimiento mínimo establecido en el PIMO.

La importancia de esta investigación se debe a que reúne dos factores esenciales para un piloto instructor: la formación y la experiencia. El instructor de vuelo debe ser capaz de enseñar al segundo piloto<sup>3</sup>, es decir, al alumno aprendiz, la forma correcta y segura de volar una aeronave y, además de eso, ser capaz de transmitir la información y la experiencia adquirida, para perpetuar esas enseñanzas a las próximas generaciones que pasarán por la UAe y que también participarán en el cumplimiento de la misión del 1º/2º GT. De este modo, el presente estudio permite abrir vías para que otros estudios analicen las competencias necesarias al piloto instructor de vuelo, con el fin de adaptar el PIMO y, también, la influencia de la reducción de horas en la conciencia situacional de los instructores o la motivación de los pilotos ante el escenario de reducción del esfuerzo aéreo. Así, el conocimiento generado por esta investigación estará disponible para ser utilizado como apoyo a futuras decisiones en las que la optimización de los procesos de la Fuerza Aérea puede, incluso con menos recursos, tener sus tripulaciones entrenadas y listas para el empleo inmediato cuando sea necesario.

## REFERENCIAS

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Primeiro Esquadrão do Segundo Grupo de Transporte. **Programa de Instrução e Manutenção Operacional do 1º/2º GT Grupo de Transporte**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, J. A. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje. Vol. 18, n.1, art. 2009. Disponível em <http://www.revista.ufpe.br/politica hoje/index.php/politica/article/viewFile/6/6>. Acesso em: 14/08/2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDRATT, E. M.; COX III, J. F.; SPENCER, M. S. **Manual da Teoria das Restrições**. 2 ed. São Paulo: Bookman, 2002.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta: um processo de melhoria contínua**. São Paulo: Nobel, 2002.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

MAGER, R. F., PIPE, P. Trad. Maria Ângela Vinagre de Almeida. **Análise de Problemas de Desempenho**. 2 ed. Porto Alegre: Globo, 1979.

TAYLOR, J. L.; KENNEDY, Q.; NODA, A. & YESAVAGE, J. A. **PILOT AGE AND EXPERTISE PREDICT FLIGHT SIMULATOR PERFORMANCE**. A 3-year longitudinal study. *Neurology*, 2007. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2907140/>. Acesso em 24/08/2016.

<sup>3</sup> Teniendo en cuenta que la aeronave está tripulada por dos pilotos, uno es el instructor y el otro es el segundo piloto.

## PARECERISTAS DAS EDIÇÕES DE 2021

Afonso Farias de Sousa Junior

Universidade da Força Aérea (UNIFA)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Anderson Matos Teixeira

Universidade Federal da Fronteira Sul(UFFS)

Chapecó/SC – Brasil

André Barbosa Fraga

Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Andrea Costa da Silva

Universidade Federal Fluminense (UFF)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Bruno de Melo Oliveira

Universidade da Força Aérea (UNIFA)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Bruno Ferraz Nobre

Universidade da Força Aérea (UNIFA)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Carolina Fuzaro Bercho

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Franca/SP – Brasil

Claudia Musa Fay

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS)

Porto Alegre/RS – Brasil

Daniel Alberto Pamplona

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

São José dos Campos/SP – Brasil

Edinaldo Pinheiro Nunes Filho

Universidade Federal do Amapá (UFAP)

Macapá/AP – Brasil

Edson Atallah Monreal

Universidade da Força Aérea (UNIFA)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Flavio Neri Hadmann Jasper

Universidade da Força Aérea (UNIFA)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Humberto César Machado

Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO)

Goiania/GO – Brasil

Jairo Afonso Henkes

Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL)

Florianópolis/SP – Brasil

Leonardo Luiz Barbosa Vieira Cruciol

Universidade de Brasília (UnB)

Brasília/DF – Brasil

Luiz Gustavo Schenk

Escola de Comando e Estado-Maior da Aeronáutica (ECEMAR)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Luis Eduardo Pombo Celles Cordeiro

Estado-Maior da Aeronáutica (EMAER)

Brasília/DF – Brasil

Luiz Tirre Freire

Universidade da Força Aérea (UNIFA)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Paulo Roberto Batista

Universidade da Força Aérea (UNIFA)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Rejane de Souza Fontes

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Rodrigo Octavio Leão Rocha

Escola de Comando e Estado-Maior da Aeronáutica (ECEMAR)

Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Tania Regina Pires de Godoy

Academia da Força Aérea

Pirassununga/SP – Brasil

Wilson Fernando Nogueira dos Santos

Instituto nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Cachoeira Paulista/SP – Brasil



### ORIENTAÇÕES PARA SUBMISSÃO

A Revista da Universidade da Força Aérea é uma publicação científica de periodicidade semestral que tem por finalidade publicar as contribuições sobre Estudos de Defesa, com ênfase em Poder Aeroespacial, bem como temas relevantes para o Comando da Aeronáutica. O processo de submissão é por fluxo contínuo e as normas podem ser acessadas no seguinte endereço eletrônico:

**[https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/documentos/Norma\\_para\\_publicacao.pdf](https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/documentos/Norma_para_publicacao.pdf)**

### GUIDELINES FOR SUBMISSION

The Journal of the Air Force University is a scientific biannually publication which aims to publish contributions on defense studies, with an emphasis on Aerospace Power as well as relevant topics to the Air Force Command. The submission process is a continuous flow and the rules can be accessed at the following address:

**[https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/documentos/Rules\\_for\\_publishing.pdf](https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/documentos/Rules_for_publishing.pdf)**

### ORIENTACIONES PARA SOMETIMIENTO

La Revista da Universidade da Força Aérea es una publicación científica de periodicidad semestral que tiene como objetivo publicar las contribuciones sobre Estudios de Defensa, con énfasis en Poder Aeroespacial y cuestiones relacionadas al Comando da Aeronáutica. El proceso de sometimiento es por flujo contínuo y las normas pueden ser accesadas en el siguiente sitio:

**[https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/documentos/Normas\\_para\\_publicacion.pdf](https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/documentos/Normas_para_publicacion.pdf)**



Portão da Guarda da UNIFA/Guard Gate of UNIFA/Porton de la Guardia de la UNIFA.

**UNIVERSIDADE DA FORÇA AÉREA (UNIFA)**  
**PRÓ-REITORIA DE APOIO À PESQUISA E AO ENSINO (PROAPE)**  
**COORDENADORIA DA EDITORA DA UNIFA (ED-UNIFA)**

Av. Marechal Fontenelle, 1000 - Campo dos Afonsos

Rio de Janeiro - RJ

CEP 21740-000

Telefone/Telephone number/Teléfono: +055 21 21572753

Site/Website/Sitio Web: [www.fab.mil.br/unifa/revistadaunifa](http://www.fab.mil.br/unifa/revistadaunifa)

E-mail/E-mail/Email: [revistadaunifa@gmail.com](mailto:revistadaunifa@gmail.com)



# UNIVERSIDADE DA FORÇA AÉREA



ED - UNIFA