

A MODERNIZAÇÃO DO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO: A IMPLANTAÇÃO DA NAVEGAÇÃO BASEADA EM PERFORMANCE (PBN) E OS IMPACTOS NA EMISSÃO DE CO₂ NA ATMOSFERA¹

THE BRAZILIAN AIRSPACE MODERNIZATION: THE IMPLEMENTATION OF PERFORMANCE BASED NAVIGATION (PBN) AND THE IMPACTS ON CO₂ EMISSIONS IN THE ATMOSPHERE

João Vitor Montes Melo²

Kátia Ferreira de Oliveira³

Marcus Vinícius de Mello Takahashi⁴

RESUMO

O aumento significativo do fluxo de aeronaves ao redor do mundo influencia diretamente as demandas relacionadas à aviação e ao espaço aéreo. Com isso, novas tecnologias foram desenvolvidas para garantir uma maior segurança das operações aéreas e proporcionar, cada vez mais, a efetividade das operações. Este estudo tem como objetivo inferir em que medida a implantação do novo método de navegação PBN, impulsionado em virtude do avanço das tecnologias de geoposicionamento, impactou no consumo de CO₂ gerado pelas aeronaves em rotas aéreas nacionais entre os anos de 2008 e 2019. Propõe-se, assim, apresentar o conceito de *Performance Based Navigation* (PBN) criado através da *International Civil Aviation Organization* (ICAO), como uma das soluções aos problemas relacionadas a eficiência da navegação aérea mundial, e expor os modelos matemáticos que foram usados para calcular em que medida os novos meios de navegação diminuíram a emissão de partículas poluentes. Foi utilizada uma metodologia descritiva documental, como também pesquisas quantitativas de consumo de combustível e emissão de Dióxido de Carbono (CO₂). Em termos de resultados, foram analisados os aumentos nos fluxos de passageiros e cargas no território nacional, além da comparação do consumo de combustível entre rotas convencionais e rotas de navegação de área (RNAV), bem como as diferenças entre suas taxas de emissões de CO₂ entre os anos de 2008 e 2019, antes da pandemia do COVID-19. Por fim, foram apresentadas as dimensões da economia de emissões, seus percentuais e as conclusões obtidas ao término dos cálculos.

Palavras-chave: PBN; Espaço Aéreo; Navegação; CO₂.

¹ Artigo de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Formação de Oficiais Aviadores (CFOAv) da Academia da Força Aérea (AFA).

² Cadete Aviador do 4^o Esquadrão (Turma Orthrus, 2023).

³ 2^o Ten QOCon Magistério Matemática Superior. Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas. Academia da Força Aérea. E-mail: katiakfo@fab.mil.br.

⁴ Coronel Aviador da Reserva Remunerada. *Master in Sciences of Management* pela *Naval Postgraduate School*. E-mail: takahashimvmt@fab.mil.br

ABSTRACT

The significant increase in aircraft traffic around the world directly impacts demands related to aviation and airspace. As a result, new technologies have been developed to ensure enhanced operational safety and to further improve the effectiveness of operations. This study aims to ascertain to what extent the implementation of the new Performance-Based Navigation (PBN) method, driven by advancements in geopositioning technologies, has influenced the CO₂ consumption generated by aircraft on domestic air routes between the years 2008 and 2019. Thus, the objective is to present the concept of Performance-Based Navigation (PBN) established by the International Civil Aviation Organization (ICAO) as one of the solutions to challenges related to global air navigation efficiency, and to outline the mathematical models that were utilized to calculate the extent to which the new navigation methods reduced the emission of pollutants. A descriptive documentary methodology was employed, as well as quantitative research on fuel consumption and Carbon Dioxide (CO₂) emissions. In terms of results, the increases in passenger and cargo flows within the national territory were analyzed, along with a comparison of fuel consumption between conventional routes and Area Navigation (RNAV) routes, as well as the differences in their CO₂ emission rates between the years 2008 and 2019, before the COVID-19 pandemic. Finally, the dimensions of emission savings, their percentages, and the conclusions drawn from the calculations were presented.

Keywords: PBN; Airspace; Navigation; CO₂.

INTRODUÇÃO

Na última década, a aviação mundial vivenciou um crescimento elevado. Segundo dados da *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2019), até 2040, a quantidade de passageiros transportados crescerá para 10 bilhões e o número de decolagens anuais será de aproximadamente 90 milhões. De acordo com o *Global Market Forecast*, da *Airbus*, o tráfego de passageiros crescerá em média 4,5% ao ano, levando à necessidade de mais de 33.000 novas aeronaves acima de 100 assentos (32.425 para passageiros e 645 cargueiros acima de 10 toneladas) no valor total de US\$ 5,2 trilhões (AIRBUS, 2019).

A crescente demanda faz aumentar a quantidade de aeronaves, aeroportos e pessoal qualificado, bem como exige a necessidade de um melhor gerenciamento da navegação aérea aliada a sensores atualizados de vigilância, que visam modernizar e otimizar a estrutura do espaço aéreo nacional. Segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), observou-se um aumento de 87% na quantidade de voos nacionais e internacionais, entre os anos de 2004 e 2014 (ANAC, 2014).

“A organização prática do espaço aéreo inclui a estrutura de rotas ATS, mínimos de separação, espaçamento entre rotas, separação de obstáculos e uso flexível do espaço aéreo.”

(BRASIL, 2021). Entende-se por rotas *Air Traffic Service* (ATS), rotas padronizadas onde são prestados os serviços de tráfego aéreo. Dessa forma, o espaço aéreo se organiza para atender, de maneira eficiente, o fluxo demandado de aeronaves que circulam em suas limitações. A área compreendida dentro desses limites é organizada em aerovias, cuja definição é: “Área de Controle, ou parte dela, disposta em forma de corredor” (BRASIL, 2018). Estes corredores, em sua concepção convencional, eram balizados exclusivamente por auxílios em forma de antenas rádio, já existentes em locais específicos do território nacional, o que gerava rotas mais distantes, uma vez que não havia auxílios suficientes para se definir linhas diretas entre destinos no espaço aéreo.

Posto isso, o estudo se ampara na seguinte indagação: em que medida a implantação do novo método de navegação PBN, impulsionado em virtude do avanço das tecnologias de geoposicionamento, impactou na emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) gerado pelas aeronaves em rotas aéreas nacionais entre os anos de 2008 e 2019?

Segundo o painel intergovernamental das mudanças climáticas, estabelecido pela *World Meteorological Organization* (WMO, 2014), as aeronaves emitem altas concentrações de partículas diretamente na alta troposfera e na baixa estratosfera, o que aumenta a concentração de poluentes na atmosfera na forma de Ozônio (O₃), Metano (CH₄), e principalmente (CO₂). Segundo dados da ICAO (2019), a aviação internacional consumiu, no ano de 2015, aproximadamente 160 Mt de combustível, e a agência prevê que até o ano de 2050 esse consumo cresça até 3,1 vezes. Dessa forma, torna-se clara a capacidade poluidora da aviação e evidencia-se a necessidade de formas mais eficientes de se navegar pelo espaço aéreo.

Os avanços tecnológicos vivenciados nos últimos tempos proporcionaram novos métodos e conceitos que estão sendo aplicados em todo o espaço aéreo mundial. A proposta de modernização intitulada *Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management* (CNS/ATM) estabelecido pela ICAO, no início da década de 80, tem por finalidade a modernização do Controle do Espaço Aéreo em âmbito mundial e "se fundamenta na integração de tecnologias, processos e recursos humanos, destinados a suportar a evolução do transporte aéreo mundial de forma segura e eficiente" (BRASIL, 2011).

Estabeleceu-se, em 1955, o sistema GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite). O sistema é utilizado para a determinação de coordenadas, onde uma constelação de satélites, além de determinar o posicionamento e localização de um ponto no globo, permite a introdução e a utilização dos Procedimentos Baseados em Performance – PBN. O conceito

PBN se refere aos requisitos de performance a serem aplicados a: rota de tráfego aéreo, procedimento por instrumento ou um espaço aéreo definido. Englobam este conceito os procedimentos RNAV (*Area Navigation*) e RNP (*Required Navigation Performance*) (NOLAN, 2010).

Tais procedimentos substituem os métodos convencionais de navegação rádio, ao criar pontos preexistentes que reformulam a malha de aerovias, gerando rotas mais diretas e ampliando, dessa forma, a eficiência e a capacidade do espaço aéreo. Além disso, segundo estimativas da *International Air Transport Association* (IATA), as novas rotas podem reduzir a emissão de CO₂ em até 13 milhões de toneladas por ano no mundo.

O surgimento do conceito PBN, portanto, transformou o espaço aéreo em um ambiente operacional mais seguro e eficiente. Este trabalho tem por finalidade inferir em que medida a implantação do novo método de navegação PBN, impulsionado em virtude do avanço das tecnologias de geoposicionamento, impactou no consumo de CO₂ gerado pelas aeronaves em rotas aéreas nacionais entre os anos de 2008 e 2019. O período inicial dos dados analisados é justificado pela publicação da Circular de Informações Aeronáuticas A 24/09, confeccionada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). O documento, publicado em 2009, implantou pela primeira vez rotas continentais RNAV 5 nos principais terminais brasileiros.

Nesse contexto, através de uma metodologia descritiva documental e pesquisas quantitativas de consumo de combustível e emissão de CO₂, a proposta deste estudo tem como objetivos específicos: verificar o aumento do fluxo de tráfego aéreo de rotas nacionais entre os anos de 2008 e 2019, identificar a redução em termos de tempo de voo das principais rotas nacionais, analisar a redução do consumo de combustível nas principais rotas nacionais e, por fim, calcular a emissão estimada de CO₂ pelas aeronaves nas rotas consideradas.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 HISTÓRICO E CONCEITUAÇÃO DO SISTEMA CNS/ATM

À medida que a tecnologia avança, novos sistemas e conceitos são criados com o intuito de solucionar problemas ou aumentar a eficiência de processos e procedimentos. Com o crescimento acelerado da indústria aeronáutica e projeções cada vez maiores para o tráfego aéreo mundial, criou-se, através da ICAO, o *Special Committee on Future Air Navigation*

Systems (FANS) que foi encarregado de estudar, identificar e avaliar novas tecnologias, incluindo o uso de satélites, e fazer recomendações para o desenvolvimento da navegação aérea. Através disso, o comitê FANS determinou que seria necessário desenvolver novos sistemas que superassem as limitações dos sistemas aéreos convencionais.

De acordo com a ICAO (2002) o conceito CNS/ATM reúne a modernização de 4 elementos principais: Comunicação Aeronáutica, Navegação Aérea, Vigilância e Gerenciamento de Tráfego Aéreo. Dentro da comunicação, as tecnologias digitais e os bancos de dados integrados complementaram ou substituíram as comunicações por voz, reduzindo a carga de trabalho dos controladores, o congestionamento dos canais de comunicação e reduzindo os erros causados por ruídos internos ou externos. A navegação aérea, por sua vez, iniciou o uso intensivo do GNSS - *Global Navigation Satellite Systems* em detrimento dos auxílios rádio terrestres convencionais (que eram limitados devido à necessidade da existência de estruturas físicas fixas em pontos do território nacional), o que promoveu a criação do conceito de *Performance Based Navigation* (PBN), que engloba os procedimentos de *Area Navigation* (RNAV) e *Required Navigation Performance* (RNP).

A implantação e a operação de um Sistema ATM seguro e eficiente, considerando seus princípios básicos e as expectativas da Comunidade ATM, devem gerar benefícios para todos os interessados tradicionais e possibilitar o acesso de novos usuários do espaço aéreo (DCA 351-2, 2021, p. 20).

No âmbito nacional, foi publicada a Concepção Operacional ATM Nacional (DCA 351-2) de 2011, título elaborado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) que estabeleceu as padronizações baseadas no documento da ICAO.

1.2 NAVEGAÇÃO BASEADA EM PERFORMANCE

A Navegação Baseada em Performance (PBN) nasceu da criação de novas tecnologias e da necessidade de se ampliar a eficiência do espaço aéreo devido à crescente alta do setor aeronáutico. O conceito de PBN especifica os requisitos de desempenho do sistema RNAV da aeronave. Esses requisitos são definidos em termos de precisão, integridade, disponibilidade, continuidade e funcionalidade necessária para as operações no contexto de um espaço aéreo (BRASIL, 2018). O cerne da implantação desse sistema é “priorizar a otimização das trajetórias por meio do uso da PBN no espaço aéreo brasileiro, considerando todas as fases de voo” (BRASIL, 2021).

A navegação baseada na performance pode utilizar-se do sistema global de posicionamento por satélites (GNSS), que provê, de forma precisa, as principais informações para a navegação. Atualmente, as redes de satélites usadas são o Sistema Global de Posicionamento (GPS), dos Estados Unidos da América, e o Sistema Global de Navegação por Satélite (GLONASS), da Rússia. Além deles, mais duas constelações foram recentemente implantadas: o GALILEO, pela União Europeia, e o COMPASS pela China.

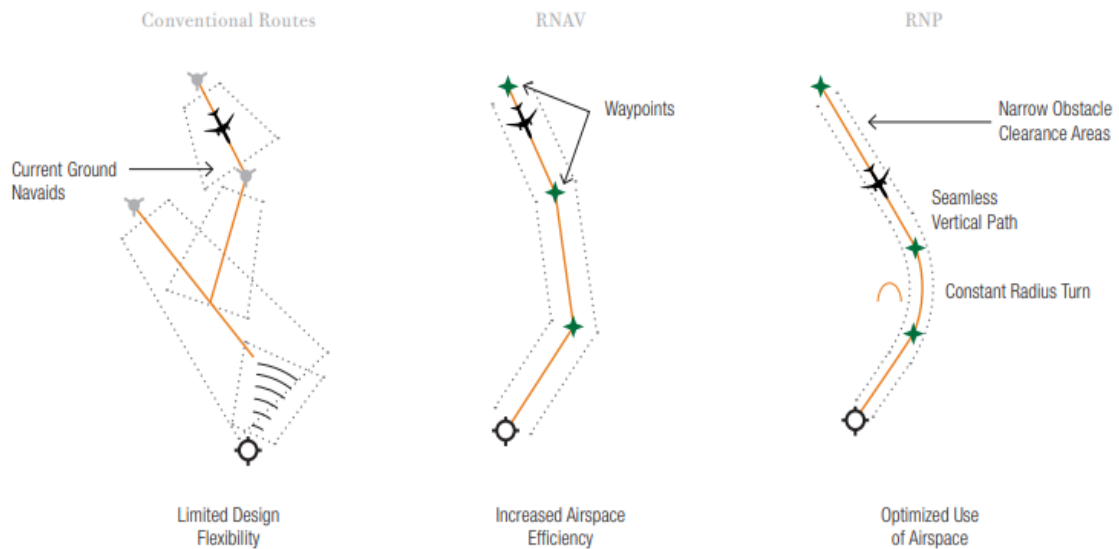


Figura 1 Comparação dos tipos de rotas

Fonte: Nakamura (2008)

A navegação na concepção PBN engloba os conceitos de *Area Navigation* (RNAV) e *Required Navigation Performance* (RNP) que são definidos através dos equipamentos e sensores no solo, no espaço e a bordo de cada aeronave. Estes, por sua vez, definem qual o tipo de conceito a aeronave poderá utilizar em sua navegação, sendo o RNP uma especificação que compreende o requisito da aeronave contar com um sistema de monitoração e alerta de performance a bordo da aeronave.

A classificação deste sistema é caracterizado como RNP X, onde “X” indica a precisão de posicionamento horizontal, em milhas náuticas, provido durante a navegação aérea, por pelo menos 95% do tempo de voo. Uma especificação RNAV, por sua vez, não prevê os requisitos de monitoração e alerta de desempenho a bordo da aeronave e é caracterizada da mesma forma que o RNP. A Concepção Operacional ATM Nacional (DCA 351-2) estabelece como um dos principais benefícios do PBN a “Redução do tempo de voo

das aeronaves, a partir da implementação de trajetórias ótimas de voo, gerando economia de combustível e, em consequência, uma redução das emissões nocivas ao meio ambiente.”

1.3 DIÓXIDO DE CARBONO

O dióxido de carbono, mais conhecido por gás carbônico, é um composto químico de fórmula CO_2 formado por átomos de carbono e oxigênio. Este gás é imprescindível para a vida na terra, sendo a matéria prima essencial da fotossíntese e principal produto de diversas atividades metabólicas (IPCC, 1999). Entretanto, o CO_2 é integrante dos GEE – Gases do efeito estufa - responsáveis pela problemática do aquecimento global.

O transporte aéreo mundial é um dos setores que menos contribui com os índices de emissões de CO_2 na atmosfera. Por outro lado, de acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1999), as emissões causadas pelas aeronaves possuem um impacto maior na atmosfera pois os poluentes são lançados diretamente nas grandes altitudes (alta troposfera e baixa estratosfera), potencializando os efeitos negativos do dióxido de carbono, incidindo diretamente sobre a concentração de gases nocivos à atmosfera e contribuindo com as mudanças climáticas.

No Brasil, as emissões do setor aéreo representam 1,8% das derivadas da queima de combustíveis fósseis (MCTI, 2010).

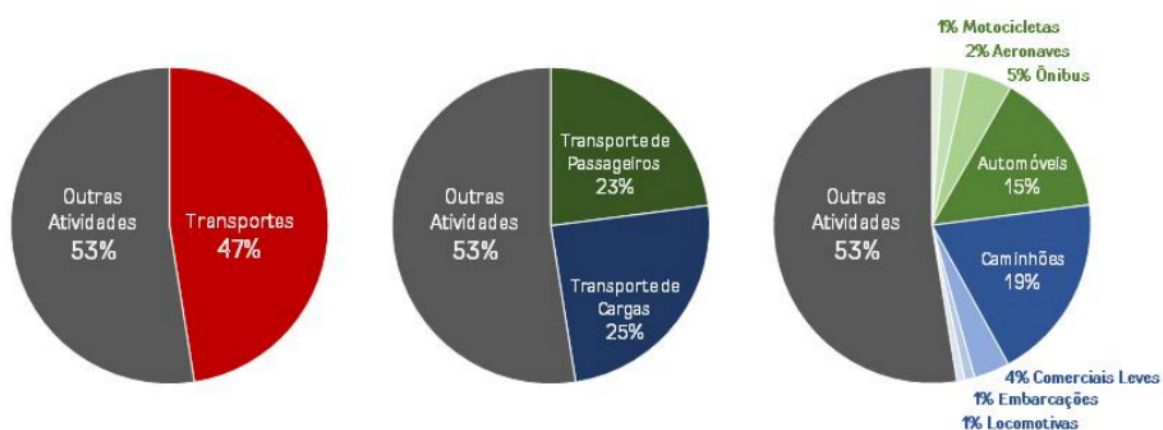


Figura 2 Emissões do setor de Energia em 2019 com destaque para a atividade de transportes

Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2020)

Os motores aeronáuticos se baseiam no princípio da combustão e utilizam-se de combustíveis fósseis para transformar energia térmica em energia mecânica, produzindo empuxo suficiente para deslocar grandes massas de ar e propiciar o movimento das aeronaves.

O principal combustível utilizado nos motores aeronáuticos à reação é o querosene (JET-A1 ou QAV) disposto em diversas classificações dado seu setor de uso e especificidades de composição. Possui ainda características lubrificantes, baixo ponto de congelamento e baixa volatilidade (ANP, 2019).

A medição do consumo de combustível dos motores em geral é feita em Kg/h ou L/h, estabelecendo o volume ou o peso de combustível que é queimado por unidade de hora e sendo a densidade do combustível de 0,81 kg/L (QAV ou JET-A1) (GLOBAL AVIATION, 2006). Considerando o fator de emissão do combustível, que é de, aproximadamente, 2,4733 kgCO₂/L de combustível (GHG BRASIL, 2013) é possível calcular, através de relatórios estatísticos anuais disponibilizados pela ANAC que engloba os voos em território nacional, o nível das emissões nos períodos pré e pós PBN.

Este cálculo se justifica pela proposta criada através da Concepção Operacional ATM Nacional, que tornou possível voar direto entre *waypoints*⁵ sem limitações físicas proporcionadas por equipamentos e antenas em solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi de natureza quantitativa, através de uma pesquisa explicativa utilizando bancos de dados na forma de relatórios estatísticos anuais disponibilizados pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Além disso, para a definição de termos e métodos de cálculos, foram utilizadas fontes de pesquisas secundárias, embasando-se em referências documentais, manuais técnicos e artigos.

A finalidade foi, inicialmente, esclarecer como o conceito de navegação baseada em performance se relaciona com a emissão de CO₂ na atmosfera por aeronaves. Após o delineamento teórico, o modelo de cálculo utilizado se concretizou por meio de ferramentas estabelecidas pelo programa brasileiro *GHG Protocol*, que tem por finalidade o desenvolvimento de métodos de cálculo para estimativas de emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Para a análise do proposto, foram selecionados dos bancos de dados as informações relativas ao tempo de voo, quantidade de carga transportada e número de passageiros por voo nas rotas propostas. Calculou-se a média dos dados por cada voo dividindo os dados anuais

⁵ Ponto fixo definido por coordenadas geográficas e identificadas por nomes específicos através do uso do GNSS.

pela quantidade de decolagens nos respectivos anos. Optou-se por selecionar apenas as rotas da companhia GOL nos anos de 2008 e 2019 disponibilizados pelo relatório anual da ANAC. Dessa forma, a companhia GOL foi escolhida para que a utilização dos mesmos equipamentos (Boeing 737NG) entre os anos analisados tornassem os cálculos mais precisos, eliminando o fator de troca do equipamento entre os anos.

Visando maior precisão dos dados, foram selecionados apenas os voos regulares. O ano de 2008, por sua vez, foi escolhido por anteceder a publicação da AIC A 24/09 que implantou em 2009, pela primeira vez, rotas continentais RNAV 5 nos principais terminais brasileiros. Já o ano de 2019 foi optado dada a anomalia nos dados causados pela pandemia da COVID-19, a partir do ano de 2020.

Dentre as rotas listadas no banco de dados, analisou-se as 10 rotas com maior quantidade de decolagens nos anos propostos, sendo elas: SBGL – SBBR, SBBR – SBGL, SBGL – SBSP, SBSP – SBGL, SBRJ – SBSP, SBSP – SBRJ, SBGR – SBSV, SBSV – SBGR, SBSP – SBPA, SBPA – SBSP. As rotas foram dispostas em forma de tabela e, por fim, as diferenças anuais em termos de consumo e tempo de voo entre as rotas, bem como a diferença no consumo de CO₂ para que fosse possível verificar e estimar em que medida a implantação do PBN diminuiu as emissões de CO₂ por aeronaves na atmosfera, em âmbito nacional. O consumo de combustível do equipamento Boeing 737-800NG foi estimado através de uma entrevista informal feita pelo autor com um piloto da aeronave analisada, que utiliza as informações dadas diretamente pelo setor de manutenção do equipamento. Verificou-se assim, uma média de 3.600 kg/h na primeira hora de voo e 2.200 kg/h na segunda hora.

A partir disso, foram computadas as economias de combustível e reduções na emissão de CO₂ baseados exclusivamente na redução do tempo de voo em cada rota. Considerou-se a densidade de 0,81 kg/L (QAV ou JET-A1) (GLOBAL AVIATION, 2006) e o fator de emissão do combustível, que é de 2,4733 kgCO₂/L de combustível (GHG BRASIL, 2013) para as conversões. Por fim, estimou-se as variações de emissão baseadas no tempo de voo e consumo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparando-se os dados de 2008 e 2019 dispostos abaixo, o número de decolagens dos voos comerciais, regulares e nacionais aumentou em 24,68%. Na empresa GOL, este aumento foi de 20,47% no período considerado. Os resultados das análises foram dispostos

em tabelas a partir dos dados originais obtidos do banco de dados da ANAC⁶. Para os cálculos de consumo foram utilizados os parâmetros obtidos através de entrevista com um piloto operacional da aeronave estudada.

Na rota entre Galeão e Brasília (Tabela 1) houve uma redução de 52,97% no número de decolagens, o que representou 1565 voos a menos em 2019 em relação ao ano de 2008. A quantidade total de passageiros e carga transportada no trecho reduziu 29,91% e 40,45% respectivamente. Esses números representam uma redução significativa no número de voos entre as localidades. Analisando o Tempo Médio de Voo (TMV) e a redução em consumo, pôde-se perceber que houve uma redução média de 10 minutos por voo, o que representa uma diminuição de 437,53 litros de combustível em cada voo e de 607.729,17 litros de combustível em 2019, considerando as 1389 decolagens registradas no mesmo ano. Com isso, a diminuição relativa estimada de emissão de CO₂ no ano foi de 1.503.096,55 KgCO₂, representando 6,1% de redução.

Tabela 1 Dados relacionados ao voo entre Rio de Janeiro e Brasília

SBGL-SBBR	Variação (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	-52,97%	-1565
Passageiros transportados	-29,91%	-89.608
Carga transportada (Kg)	-40,45%	-531.022 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-8,38%	-10 minutos/voo
Redução em consumo	-6,1%	-437,53 L/voo
Emissão de CO ₂ /ano		-1.503.096,55 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Tabela 2 Dados relacionados ao voo entre Brasília e Rio de Janeiro

SBBR - SBGL	Variação (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	-52,16%	-1.531
Passageiros transportados	-27,15%	-78.255
Carga transportada (Kg)	-68,65%	-623.675 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-5,94%	-6 minutos/voo
Redução em consumo	-4,5%	-271,6 L/voo
Emissão de CO ₂ /ano		-943.020,18 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

⁶ Disponível em:

<https://sistemas.anac.gov.br/dadosabertos/Voos%20e%20opera%C3%A7%C3%B5es%20a%C3%A9reas/Dados%20Estat%C3%ADsticos%20do%20Transporte%20A%C3%A9reo/> Acesso em: 16 jul, 2022.

Na rota oposta, entre Brasília e Galeão (Tabela 2), a redução no número de decolagens foi de 52,16%, enquanto a quantidade de passageiros e carga transportados decresceu 27,15% e 68,65%, respectivamente. O Tempo Médio de Voo foi reduzido em 6 minutos em cada voo, representando uma redução de 5,94% em relação ao ano de 2008. O consumo diminuiu 271,6 litros por voo e 381.326,4 litros no ano, resultando em 943.020,18 KgCO₂ a menos na atmosfera, relativamente. A redução na emissão para o segundo trecho foi de 4,5%.

Tabela 3 Dados relacionados ao voo entre Rio de Janeiro e São Paulo

SBGL – SBSP	Varição (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	+41,59%	+668
Passageiros transportados	+113,85%	+158.051
Carga transportada (Kg)	-32,44%	-221.022 Kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-2,34%	-1 minuto/voo
Redução em consumo	-1,5%	-76,04 L/voo
Emissão de CO ₂ /ano		-302.003,35 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4 Dados relacionados ao voo entre São Paulo e Rio de Janeiro

SBSP – SBGL	Varição (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	+34,87%	+588
Passageiros transportados	+110,04%	+15.9964
Carga transportada (Kg)	+42,86%	+363.831 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-12,70%	-9 minutos/voo
Redução em consumo	-8,27%	-404,69 L/voo
Emissão de CO ₂ /ano		-1.687.346,05 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Entre o Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (Galeão) e São Paulo (Tabela 3), houve um aumento de 41,59% no número de decolagens, o que corresponde a 668 voos a mais em 2019 em relação a 2008. A quantidade total de passageiros nesse trajeto aumentou consideravelmente em 113,85%, enquanto o volume de carga transportada diminuiu 32,44%. Ao analisar o Tempo Médio de Voo (TMV) e a redução no consumo de combustível, notou-se que houve, em média, um decréscimo de 1 minuto por voo, representando uma diminuição de 76 litros de combustível em cada voo e um total de 122.120,24 litros de combustível em 2019,

considerando as 1606 decolagens registradas no ano de 2008. Como resultado, estima-se que houve uma redução relativa de 302.003,35 KgCO₂ nas emissões durante o ano, o que equivale a uma redução de 1,5%.

Já na rota inversa, de São Paulo para o aeroporto do Galeão (Tabela 4), o aumento no número de decolagens foi de 34,87%. Além disso, a quantidade de passageiros e carga transportados nesse trajeto aumentou em 110,04% e 42,86%, respectivamente. O Tempo Médio de Voo, por sua vez, foi reduzido em 9 minutos em cada voo, representando uma redução de 12,7% em relação a 2008. Houve, portanto, uma diminuição no consumo de combustível de 404,69 litros por voo e de 682.307,34 litros no ano, considerando as 1686 decolagens em 2008, o que resultou em uma redução relativa de 1.687.346,05 KgCO₂ nas emissões anuais. Essa diminuição representou uma economia de 8,27%.

Tabela 5 Dados relacionados ao voo entre Rio de Janeiro e São Paulo

SBRJ – SBSP	Variação (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	+45,71%	+2.125
Passageiros transportados	+105,73%	+466.030
Carga transportada (Kg)	+284,81%	+413.491 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-4,60%	-3 minutos/voo
Redução em consumo	-2,93%	-138,51 L/voo
Emissão de CO ₂		-1.592.103,74 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 Dados relacionados ao voo entre São Paulo e Rio de Janeiro

SBSP – SBRJ	Variação (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	+46,85%	+2.166
Passageiros transportados	+100,36%	+434.662
Carga transportada (Kg)	+78,36%	+223.470 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-9,02%	-6 minutos/voo
Redução em consumo	-6,2%	-266,17 L/voo
Emissão de CO ₂		-3.043.036,16 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Na análise dos voos que partem do aeroporto de Santos Dumont, no Rio de Janeiro, com destino a São Paulo (Tabela 5), houve um acréscimo de 45,71% no número de decolagens e um aumento considerável na quantidade de passageiros e cargas transportadas. Esses aumentos foram de 105,73% e 284,81%, respectivamente. O tempo médio de voo na

rota reduziu 4,6%, o que representa 3 minutos a menos em cada voo. Essa diminuição representou uma economia de 138,51 litros por voos que partem na rota. Considerando as decolagens do ano de 2008, que foram 4648, houve uma redução anual de 643.794,48 litros de combustível, emitindo 1.592.103,74 KgCO₂ a menos na atmosfera em relação a 2008. A redução relativa de emissão, em termos percentuais, foi de 2,93%.

Na rota entre o Rio de Janeiro, aeroporto de Santos Dumont e São Paulo (Tabela 6), a quantidade de voos aumentou em 46,85% e o volume de passageiros e carga transportada obteve um acréscimo de 100,36% e 78,36% respectivamente. O tempo médio de voo reduziu 9,02%, 6 minutos a menos em cada voo de 2019 em relação a 2008. Essa redução no tempo de voo resultou numa economia de 266,17 litros de combustível por viagem e 1.230.503,91 por ano, considerando o número de decolagens de 2008, que foi de 4623. Emitindo, portanto, 3.043.036,16 KgCO₂ relativos a menos. A porcentagem dessa diminuição foi de 6,2%.

Tabela 7 Dados relacionados ao voo entre São Paulo e Salvador

SBGR – SBSV	Varição (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	-38,17%	-826
Passageiros transportados	-25,33%	-68.440
Carga transportada (Kg)	-60,50%	-1.805.080 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-1,70%	-3 minutos/voo
Redução em consumo	-1,3%	-105,9 L/voo
Emissão de CO ₂		-350.409,75 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 Dados relacionados ao voo entre Salvador e São Paulo

SBSV – SBGR	Varição (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	-38,43%	-824
Passageiros transportados	-23,08%	-61.253
Carga transportada (Kg)	-10,34%	-129.405 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-6,86%	-11 minutos/voo
Redução em consumo	-5,54%	-516,04 L/voo
Emissão de CO ₂		- 1.684.540,33 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar a tabela 7, que mostra os voos partindo do aeroporto internacional de Guarulhos, em São Paulo com destino a Salvador, é possível notar uma diminuição de 38,17%

no número de decolagens, bem como uma redução notável no transporte de passageiros e cargas, com valores de 25,33% e 60,5%, respectivamente. O tempo médio de voo nesta rota foi reduzido em 1,7%, o que representa uma diminuição de 3 minutos por voo. Essa redução no tempo de voo possibilitou uma economia de 105,9 litros de combustível por voo, totalizando uma redução anual de 141.694,2 litros de combustível, considerando o número de decolagens de 1338 em 2019. A redução no tempo médio de voo resultou na diminuição de 350.409,75 KgCO₂ na atmosfera, equivalente a uma redução de emissão relativa de 1,3%.

Já na tabela 8, que mostra a rota inversa, ou seja, de Salvador para o aeroporto de Guarulhos, em São Paulo, é possível notar uma diminuição de 38,43% no número de voos e uma redução de 23,08% e 6,86% no transporte de passageiros e cargas, respectivamente. O tempo médio de voo foi reduzido em 6,86%, o que representa 11 minutos a menos em cada voo de 2019 em relação a 2008. Essa redução no tempo de voo possibilitou uma economia de 516,04 litros de combustível por viagem, totalizando uma redução anual de 681.172,8 litros de combustível, considerando o número de decolagens de 2019, registrado em 1320. O cálculo resultou em uma diminuição de 1.684.540,33 KgCO₂ na atmosfera, equivalente a uma redução relativa de emissão de 5,54%.

Tabela 9 Dados relacionados ao voo entre São Paulo e Porto Alegre

SBSP – SBPA	Varição (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	+98,24%	+1.624
Passageiros transportados	+173,88%	+314.308
Carga transportada (Kg)	+101,02%	+749.106 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-8,35%	-9 minutos/voo
Redução em consumo	-6,17%	-407,4 L/voo
Emissão de CO ₂		-1.665.397,83 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 Dados relacionados ao voo entre Porto Alegre e São Paulo

SBPA – SBSP	Variação (%)	Comparação (2008-2019)
Decolagens	+108,75%	+1.677
Passageiros transportados	+204,52%	+329.410
Carga transportada (Kg)	+50,80%	+226.932 kg
Tempo Médio de Voo (TMV)	-5,65%	-6 minutos/voo
Redução em consumo	-4,05%	-244,44 L/voo
Emissão de CO ₂		-932.139,18 KgCO ₂

Fonte: Elaboração própria

Por fim, foram analisados os voos partindo do aeroporto de Congonhas, em São Paulo, com destino a Porto Alegre (Tabela 9). Nesta rota houve um aumento significativo de 98,24% na quantidade de voos, bem como um acréscimo de 173,88% no número de passageiros transportados e de 101,03% no volume de cargas. O tempo médio de voo da rota foi reduzido em 8,35%, 9 minutos, culminando na economia média de 407,4 litros de combustível por voo e 673.432,2 litros de combustível por ano, considerando o número de decolagens de 1653 durante o ano de 2008. A redução relativa na emissão de CO₂ foi de 1.665.397,83 KgCO₂, 6,17% em porcentagem.

Já nas viagens entre Porto Alegre e Congonhas, em São Paulo (Tabela 10), o número de decolagens aumentou em 108,75% e o de passageiros transportados 204,52%. Demonstrando um acréscimo significativo. O volume de cargas transportadas variou em um acréscimo de 50,8%.

O tempo médio de voo para a rota foi reduzido em 5,65%, 6 minutos a menos em relação a 2008. Esse fato proporcionou a economia de 244,44 litros de combustível por voo, em média. No ano, essa economia representou 376.926,48 litros considerando o número de voos de 1542, em 2008. Portanto, a redução relativa na emissão de CO₂ foi de 932.139,18 KgCO₂, 4,05%.

Após a análise específica de cada rota, pode-se notar que muitas rotas lograram um aumento significativo na demanda e no volume de passageiros e cargas. Entretanto, foi observado sempre uma redução no tempo de voo médio, que variou entre 1 e 11 minutos nos trechos analisados. Tendo em vista o consumo horário do equipamento analisado, todas essas reduções resultaram em decréscimos no consumo de combustível por voo. Pode-se concluir que a implantação das novas rotas baseadas em performance, trouxeram reduções no consumo de combustível e, conseqüentemente, na emissão de CO₂. Essas reduções se mostraram por

vezes muito significativas, por outras pouco eficientes. Foi observado que os voos que possuem como destino a cidade de São Paulo, obtiveram menor economia em relação aos demais analisados. O motivo deve ser analisado em estudos posteriores em virtude de outros fatores que geram esperas e atrasos, como a limitação de slots nos aeroportos da localidade.

Os cálculos puderam mostrar de forma mais clara os impactos causados no meio ambiente pela implantação do PBN. Nas análises, a redução na emissão de CO₂ chegou à casa de 3000 toneladas de CO₂ em apenas uma rota. O equivalente, segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), à emissão anual de mais de 606 veículos a gasolina.

Apesar dos benefícios já evidenciados, a implementação do PBN no Brasil ainda enfrenta desafios. Um dos principais problemas é a falta de capacitação técnica e de equipamentos adequados por parte dos profissionais envolvidos na operação das aeronaves. Além disso, como observado, os voos para São Paulo obtiveram menores taxas de economia mesmo com a implantação do PBN, fato possivelmente explicado pela necessidade de investimentos em infraestrutura aeroportuária e aérea e na capacitação de recursos humanos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implantação da navegação baseada em performance (PBN) é uma das principais medidas de modernização do espaço aéreo brasileiro. A tecnologia, que permite a utilização de rotas mais eficientes e diretas, trouxe diversos benefícios para a aviação civil no Brasil, como a redução dos tempos de voo, dos custos operacionais e, principalmente, da emissão de gases poluentes na atmosfera. Posto isso, o estudo se amparou na seguinte indagação: em que medida a implantação do novo método de navegação PBN, impulsionado em virtude do avanço das tecnologias de geoposicionamento, impactou no consumo de CO₂ gerado pelas aeronaves em rotas aéreas nacionais entre os anos de 2008 e 2019?

Com base nos estudos realizados, podemos afirmar que a implementação do PBN no Brasil tem tido um impacto significativo na redução das emissões de CO₂. Diversos estudos, bem como as bases legais do CNS/ATM apontam para uma diminuição expressiva das emissões de gases poluentes na atmosfera decorrente da utilização de rotas mais eficientes e diretas. Dos trechos analisados, a redução chegou a ser de 6,2% em relação às rotas convencionais.

Com isso, atingiu-se os objetivos específicos propostos de verificar o aumento do fluxo de tráfego aéreo de rotas nacionais entre os anos de 2008 e 2019, identificar a redução

em termos de tempo de voo das principais rotas nacionais, analisar a redução do consumo de combustível nas principais rotas nacionais e, por fim, calcular a emissão estimada de CO₂ pelas aeronaves nas rotas consideradas.

Vale ressaltar, que além dos benefícios ambientais, a implantação do PBN também tem trazido vantagens econômicas para as companhias aéreas. Com a utilização de rotas mais eficientes, há uma redução nos tempos de voo e no consumo de combustível, o que se traduz em economia de custos operacionais. Estima-se que essa economia possa chegar a milhões de dólares por ano.

Contudo, apesar dos benefícios previamente constatados, a implementação do PBN no território brasileiro ainda enfrenta desafios de ordem técnica e operacional. Dentre os desafios mais preponderantes, destaca-se a carência de capacitação especializada e equipamentos adequados por parte dos profissionais que atuam na operação das aeronaves. Ademais, apurou-se que os voos com destino a São Paulo experimentaram reduções inferiores de consumo de combustível mesmo após a introdução do PBN. Tal resultado, provavelmente, é resultado da demanda por investimentos em infraestrutura aeroportuária e aeronáutica, bem como na qualificação de recursos humanos para minimizar o congestionamento em decorrência do grande fluxo de aeronaves no terminal. Recomenda-se, portanto, que tais questões sejam alvo de investigações futuras a fim de aprimorar a efetividade do PBN no contexto nacional.

Para superar esses desafios e maximizar os benefícios da modernização do espaço aéreo, é necessário que o governo, as empresas e os profissionais da aviação trabalhem em conjunto. É preciso investir em tecnologia, equipamentos e capacitação para garantir a operação segura e eficiente do sistema de navegação aérea.

Em conclusão, a implantação da navegação baseada em performance (PBN) tem sido uma das principais medidas de modernização do espaço aéreo brasileiro. Os benefícios já evidenciados incluem a redução dos tempos de voo, dos custos operacionais e, principalmente, da emissão de gases poluentes na atmosfera. No entanto, para maximizar esses benefícios, é necessário que haja investimentos em tecnologia, equipamentos e capacitação de recursos humanos. A modernização do espaço aéreo brasileiro é um desafio, mas também uma oportunidade para o país se tornar mais eficiente e sustentável no setor da aviação.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). (2014). **Anuário do Transporte Aéreo - 2014**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/publicacoes/anuarios-de-transporte-aereo>. Acesso em 13 de agosto de 2022

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. Dispõe sobre os critérios para obtenção do registro de graxas e óleos lubrificantes. Resolução nº 804, de 20 de dezembro de 2019. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, páginas 956 a 958, 30 de dezembro de 2019.

Airbus. (2019). **Global Market Forecast 2019-2038**. Disponível em: <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcpta136/files/2021-07/GMF-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book.pdf>. Acesso em: 18 de julho de 2022.

BRASIL. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Concepção operacional ATM nacional**: DCA 351-2. 4. ed. Brasília, DF: Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2021.

BRASIL. Ministério da Defesa. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. (2011). **CNS/ATM - Conceito e Visão Geral**. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/index.cfm?i=utilidades&p=glossario&single=2199>. Acesso em 10 de abril de 2023.

Dados Estatísticos do Transporte Aéreo. In: Gerência De Acompanhamento De Mercado, SAS/GEAC. **Dados Estatísticos do Transporte Aéreo**. [S. l.], 22 de juho de 2022. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas/dados-estatisticos-do-transporte-aereo/48-dados-estatisticos-do-transporte-aereo>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

Environmental Protection Agency (EPA). **Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References: Vehicles**. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references#vehicles>. Acesso em: 6 de maio de 2023.

Fundação Getúlio Vargas. **Programa brasileiro GHG protocol**. Disponível em: <https://registropublicodeemissoes.fgv.br/>. Acesso em: 22 de setembro de 2022.

Global Aviation. **Jet Fuel Density**. 2006. Disponível em: <http://www.globalaviationfuel.com/fuel-prices/standard-fuel-pricing/>. Acesso em: 5 de maio de 2023.

International Civil Aviation Organization (ICAO). 2019. **Air Transport Monthly Monitor**. Disponível em: <https://www.icao.int/sustainability/Documents/Air%20Transport%20Monthly%20Monitor%20-%20February%202019.pdf>. Acesso em: 5 de maio de 2023.

International Civil Aviation Organization (ICAO). **Communication, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management (CNS/ATM) Systems**. Montréal, 2002.

International Civil Aviation Organization (ICAO). 2018. **Procedimentos para Navegação Aérea**. Disponível em:

<https://www.icao.int/publications/DOC%2010012%20-%20PORT%20UGUESE%20-%20Procedimentos%20para%20Navega%C3%A7%C3%A3o%20A%C3%A9rea.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Aviation and the Global Atmosphere: Summary for Policymakers**. 1999. Disponível em:

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/av-en-1.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2023.

International Civil Aviation Organization (ICAO). 2019. **Aviation Benefits**. Disponível em:

<https://www.icao.int/annual-report2019/Pages/aviationbenefits.aspx>. Acesso em: 30 de novembro de 2022.

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2019). **Environmental Report 2019 - Aviation and Climate Change**. Disponível em:

<https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvRep2019.pdf>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2023.

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2021). **Manual de Organização Prática do Espaço Aéreo**. Disponível em:

<https://www.icao.int/publications/DOC%2010044%20-%20PORT%20UGUESE%20-%20Manual%20de%20Organiza%C3%A7%C3%A3o%20Pr%C3%A1tica%20do%20Espa%C3%A7o%20A%C3%A9reo.pdf>. Acesso em: 25 de janeiro de 2023.

MCTI - MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, 2010. 280p

NAKAMURA, David; ROYCE, William. **Operational Benefits of Performance-Based Navigation**. Aero, [s. l.], 20 abr. 2008. Disponível em:

https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_2_08/AERO_Q208_article3.pdf. Acesso em: 3 abr. 2023.

NOLAN, M. S. **Fundamentals of air traffic control**. Cengage Learning. 2010.

SCUSSEL, Marcelo. **Navegação Aérea Baseada Em Performance (PBN): Vantagens Frente À Navegação Aérea Convencional**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes. 2018. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de Brasília, [S. l.], 2018.

Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/33874/1/2018_MarceloScussel.pdf. Acesso em: 14 de outubro de 2022.

The National Academies Press. (2010). **The Future of Air Traffic Control - Human Operators and Automation**. Disponível em:

<https://www.nap.edu/catalog/13163/the-future-of-air-traffic-control-human-operators-and-automation>. Acesso em: 3 de junho de 2023.

World Meteorological Organization - WMO. (2014). **Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRCCS_Final_Annexes_LowRes.pdf. Acesso em: 19 de março de 2023.