ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS DA UTILIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS BASEADOS EM DESEMPENHO E DA UTILIZAÇÃO DE APROXIMAÇÕES DE DESCIDA CONTÍNUAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO EM TEMPO ACELERADO (*FAST-TIME)* NA ROTA GALEÃO-GUARULHOS

Daniel Alberto Pamplona
pamplonadefesa@hotmail.com

João Luiz de Castro Fortes
jlfortes@gmail.com

Claudio Jorge Pinto Alves
claudioj@ita.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
Departamento de Transporte Aéreo
Grupo de Engenharia de Tráfego Aéreo - GETA
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12.228-900
São José dos Campos – SP – Brasil

RESUMO

A introdução dos procedimentos PBN (*Performance-Based Navigation*) representa a busca pela otimização e melhor utilização do espaço aéreo e a sua implantação é considerada fundamental para os programas de modernização da navegação aérea em andamento em vários países, inclusive no Brasil. A implantação desse novo tipo de procedimento introduziu mudanças na operação das aeronaves, na inserção de novos procedimentos para controladores e pilotos e na introdução de sistemas de automação para suporte das operações aéreas e no solo. O objetivo desse artigo é analisar os benefícios da realização de Procedimentos de Navegação Baseados em Desempenho (PBN) e da utilização de Aproximações de Descida Contínua (CDA) na rota Galeão-Guarulhos. O estudo aplicou a simulação em tempo acelerado (*fast-time*) com o *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM) e considerou nove modelos diferentes de aeronaves. Utilizou como parâmetro de desempenho o combustível consumido. Os resultados mostraram os benefícios da aplicação dessas técnicas.

Palavras-chaves: PBN, CDA, TAAM, Desempenho, *Performance-Based Navigation*.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do emprego do avião como meio de transporte nas últimas décadas fez surgir a necessidade de uma melhor utilização do espaço aéreo. Uma das maneiras encontradas para a melhor utilização foi a introdução dos procedimentos PBN (*Performance-Based Navigation*), representando uma mudança da navegação baseada em sensores para uma navegação baseada em desempenho.

Aliado a esse aumento de necessidade, os sistemas de navegação aérea tornaram-se mais precisos, possibilitando uma maior precisão da trajetória de voo e permitindo uma melhor eficiência operacional, ao viabilizar uma trajetória de voo direta e precisa da localização da aeronave em relação a rota de voo planejada (ICAO, 2013).

Esse avanço permitiu as aeronaves voarem direto entre pontos sem terem a necessidade de dependerem de auxílios a navegação baseados no solo (NDB, VOR) e sim usando a navegação baseada em satélite. (ICAO, 2013).

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 o conceito os procedimentos RNAV (*Area Navigation*) e RNP (*Required Navigation Performance*) (Nolan, 2010).

Os procedimentos RNAV e RNP são considerados como fatores fundamentais para a melhora na eficiência e capacidade do sistema de espaço aéreo. Sua introdução é considerada como fator fundamental para a implantação do programa NextGen nos Estados Unidos, SESAR na Europa e SIRIUS no Brasil. Com a introdução dos procedimentos RNP e aumento da confiabilidade na exatidão da localização, permitiu-se ao planejador do espaço aéreo o uso mais eficiente do espaço aéreo.

O objetivo do artigo é mensurar os benefícios da implantação do PBN no espaço aéreo, em particular na rota ligando os Aeroportos do Galeão e de Guarulhos, tendo como parâmetro de eficiência o consumo de combustível.

Esse artigo está estruturado em cinco seções, além desta introdutória. A segunda seção apresenta o conceito da Navegação Baseada em Desempenho (PBN), seu histórico e suas principais características atuais. A terceira seção descreve a metodologia empregada, através da utilização da simulação em tempo acelerado com o software TAAM, da escolha das aeronaves utilizadas e dos procedimentos de voo analisados. Na quarta seção são apresentados os resultados comparando os vários consumos de combustível por procedimento e aeronave. Na quinta seção serão apresentadas as conclusões do estudo.

2. NAVEGAÇÃO BASEADA EM DESEMPENHO

2.1. Histórico

A primeira tentativa da Organização de Aviação Civil (OACI) de planejar os procedimentos RNAV ocorreu em 1998 com a primeira edição do Documento n° 8168. Nesse manual foram definidos os desempenhos que eram necessários para a operação RNAV (ICAO, 2013).

Inicialmente, esse tipo de procedimento era considerado como meio para a realização de procedimentos em rota e não para aproximação para pouso. Porém, devido à falta de especificações e necessidades operacionais ocorreu pouca implementação pela indústria aeronáutica (ICAO, 2013).

Em 2007 durante a 36° Assembleia da OACI, os Estados membros comprometeram-se com a implementação e desenvolvimento da navegação baseada em performance, refletindo em um esforço mundial e não mais regional, em adotar a navegação satelital na aviação. Esse esforço foi reiterado na 37° Assembleia que ocorreu em 2010. Percebe-se um amadurecimento com a proposição de melhorias e definições dos procedimentos RNAV e RNP. (ICAO, 2013).

O Documento 9613 continuou a ser editado e teve a sua quarta edição em 2013,

onde é sugerido que não deverão ser desenvolvidos novos procedimentos RNAV, devendo os novos procedimentos a serem adotados do tipo RNP baseados em GNSS. A tendência é que os novos procedimentos RNP deverão abranger todas as fases do voo com o objetivo de maximizar os benefícios e minimizar os custos aos operadores (ICAO, 2013).

2.2. Aspectos fundamentais

Um dos objetivos originais do PBN é o de permitir as aeronaves utilizarem qualquer auxílio disponível para a navegação ao invés de ficar dependente em um único. Atualmente, devido ao aumento da necessidade de acuracidade e precisão dos novos procedimentos, os auxílios utilizados estão cada vez mais limitados, ficando em alguns casos, apenas um conjunto específico de auxílios capaz de fornecer o tipo de precisão requerida.

Os auxílios à navegação transmitem informações de posição. Essas informações são recebidas pelos sensores a bordo das aeronaves e que são transformadas em informação pelos sistemas de navegação das aeronaves. Os auxílios baseados em solo que são utilizados na navegação PBN são o DME e VOR. O NDB não é considerado uma fonte de posicionamento para o PBN (ICAO, 2013).

Os auxílios baseados no espaço são os sistemas de navegação satelital global ou *Global Navigation Satelite System* (GNSS). Atualmente, as constelações GNSS em operação são: GPS (EUA) e GLONASS (Rússia). Estão em desenvolvimento as constelações Galileo (Europa), Beidou (China) e QZSS (Japão). Os sistemas de aumento da precisão utilizam os sinais do GNSS e realizam correções para aumentar a precisão e são definidos por aumentos em grandes áreas de navegação ou *Satellite Based Augmentation System* (SBAS) e estão incluídos no PBN e os de aumento da precisão em uma área local ou *Ground Based Augmentation System* (GBAS) e incluem EGNOS (Europa), WAAS (EUA), GAGAN (Índia), SDCM (Rússia) e MSAS (Japão).

Os procedimentos RNAV e RNP para a sua execução variam desde sistemas baseados em um único sensor a aqueles com vários tipos de sensores de navegação. Os sistemas de navegação em alguns procedimentos devem estar conectados a outros sistemas, como *auto-throttle* e o piloto-automático / diretor de voo, permitindo uma operação mais automatizada. A Figura 1 mostra uma configuração básica, onde o sistema de navegação está ligado a um único sensor e uma configuração complexa com vários sensores e aviônicos (ICAO, 2013).

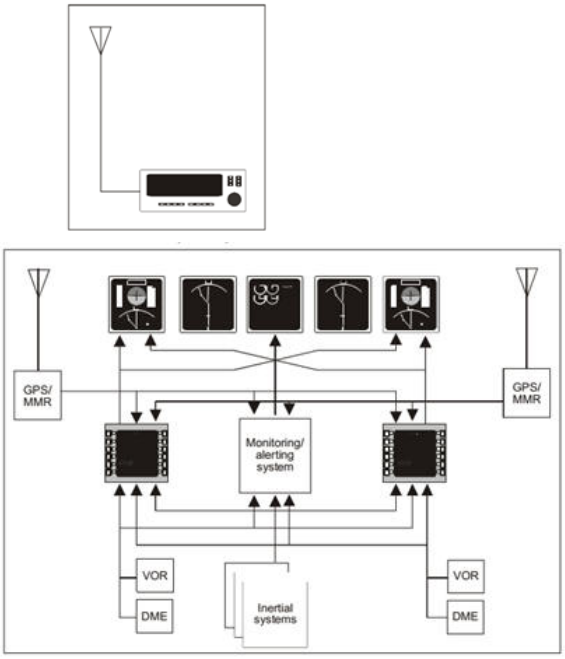


Figura 1: Configuração básica de um sistema PBN (ICAO, 2013)

O conceito PBN especifica que a aeronave voando procedimentos RNAV ou RNP tenha os seus sistemas de navegação definidos em termos de acuracidade, integridade, continuidade e funcionalidade necessárias para a execução do procedimento específico.

- **Acuracidade** é definida como sendo o requisito de manter o posicionamento da aeronave em um raio de uma vez (1X) RNP por 95% do tempo.

Representa o grau de exatidão que a posição indicada é a posição atual.

- **Integridade** é definida como sendo o requisito de manter o posicionamento da aeronave em um raio de duas vezes (2X) RNP por 99,999% do tempo.
- **Disponibilidade** é definida como sendo a probabilidade, usando modelos de risco, que o sistema de navegação (GPS, DME, VOR) utilizado para prover a acuracidade e a integridade da navegação estará presente durante a operação da aeronave.
- **Continuidade** é definida como sendo a probabilidade, usando modelos de risco, que o sistema de gerenciamento da navegação à bordo (FMS ou outro sistema) irá prover a acuracidade e a integridade durante a operação da aeronave.

2.3. Conceito do Espaço Aéreo PBN

Os procedimentos RNAV são definidos como sendo "um método de navegação que permite a operação de uma aeronave em qualquer trajetória de voo na cobertura de auxílios à navegação, nos limites de cobertura ou da combinação de ambos" (ICAO, 2013).

Essa nova definição baseada no Doc 9613, retira a limitação anterior de que as aeronaves deveriam sobrevoar os auxílios à navegação, aumentando a eficiência e flexibilidade operacional.

Os tipos de procedimentos PBN são classificados como:

- **Rotas oceânicas e Continentais Remotas** – três tipos de navegações são utilizados para essas localidades: RNAV 10, RNP 4, RNP 2. Empregam basicamente o GNSS para a realização.
- **Rotas continentais** – utilizados procedimentos RNAV e RNP. RNAV 5 é utilizado no Oriente Médio, América do Sul e Europa, sendo nessas regiões designados como B-RNAV (Basic RNAV). Nos Estados Unidos, RNAV 2 é utilizado.
- **Chegadas e partidas** – na Europa P-RNAV (*Precision* RNAV), devendo ter a sua nomenclatura mudada para A-RNAV (*Arrival* RNAV). Existe ainda o RNAV 1. O RNP 1 foi desenvolvido principalmente para a aplicação em ambientes desprovidos de radar de navegação e Terminais de baixa densidade.
- **Aproximação para pouso** – os procedimentos cobrem todas as fases de uma aproximação por instrumento (inicial, intermediária, final e aproximação perdida). São requisitos necessários uma acuracidade entre 0.3 e 0.1 milhas náuticas ou até menor.

O manual PBN define os requisitos de performance dos procedimentos (acuracidade, integridade e continuidade) necessários para cada sistema de navegação. As mínimas distâncias de separação e o espaçamento de rotas quando do emprego de procedimentos baseados em solo, os dados de performance do equipamento são utilizados para determinar esses espaços, tendo como parâmetro principal a acuracidade do equipamento em solo.

O desempenho de navegação necessário pelo procedimentos RNAV e RNP é parte integrante das especificações de navegação. Por exemplo, caso se esteja planejando um espaço aéreo RNAV 1 (especificação de navegação), ou seja, o máximo de desvio lateral permitido será de 1 milha náutica lateral 95% do tempo, o desempenho de navegação dos equipamentos de navegação aérea embarcados na aeronave deverá seguir os limitadores. Tendo isso em mente, o planejador aéreo determinará as separações mínimas e os espaçamentos entre rota.

No conceito PBN, existem dois tipos de especificações de navegação: especificações RNAV e especificações RNP. A principal diferença entre os dois, é que as especificações RNP necessitam do monitoramento do desempenho da navegação mostrado ao piloto e que alertas sejam

emitidos caso as especificações para o cumprimento do procedimento não sejam atingidas. Por exemplo, caso se esteja voando um procedimento RNP 5 e os equipamentos a bordo da aeronave indiquem que o equipamento está mantendo um desvio lateral maior que 5 milhas náuticas, não será possível para aquela aeronave executar o procedimento. (ICAO, 2013).

A navegação por área com PBN utiliza os conceitos de operação baseada em desempenho onde os equipamentos de navegação da aeronave tem as suas características definidas em termos de precisão, acuracidade e confiabilidade, buscando rotas que sejam confiáveis, previsíveis, repetitivas e que possibilitem a diminuição da distância de obstáculos.

A principal diferença para os planejadores de espaço aéreo é que não ocorrerá o desenho de um procedimento para um sensor específico (Ex: VOR), mas para uma especificação de performance de navegação (Ex: RNAV 5).

A escolha da especificação de procedimento para uma determinada região é baseada nos requisitos do espaço aéreo, a infraestrutura de auxílios à navegação disponível e a capacidade dos equipamentos a bordo da aeronave (Nolan, 2010).

Para a execução dos procedimentos a tripulação deve estar qualificada a operar no espaço aéreo determinado e o avião voado deve ter todos os requisitos necessários para garantir que seja executado o desempenho esperado na realização do procedimento. Os controladores de voo assumem que os equipamentos embarcados são capazes de executarem os procedimentos, assim como a tripulação está devidamente qualificada.

Para os pilotos, a principal vantagem da utilização de procedimentos PBN é que a navegação executada é realizada através de equipamentos com elevada acuracidade e tecnologia, permitindo a diminuição da carga de trabalho do piloto e aumentando a segurança de voo. Para os controladores de voo, a principal vantagem é que as rotas de tráfego aéreo tem as suas distâncias entre rotas diminuídas, as aeronaves não precisam sobrevoar auxílios à navegação baseados no solo e durante as chegadas e saídas os procedimentos PBN podem substituir a vetoração radar.

3. METODOLOGIA

Através da simulação em tempo acelerado (*fast-time)*, utilizando o programa *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM), foram simulados de forma individual sem a interação das aeronaves em conjunto no espaço aéreo, as diferenças operacionais quando uma aeronave voa utilizando procedimentos PBN e procedimentos convencionais. O parâmetro operacional utilizado para comparação foi o consumo de combustível.

Levando em consideração os fabricantes das aeronaves da frota das empresas aéreas brasileiras, segundo ANAC (2013), as aeronaves da empresa Boeing representavam 36,10%, da Airbus 31,85% e da Embraer 14,48%. A distribuição de aeronaves por operador e fabricante no ano de 2012 é representada na Figura 2.

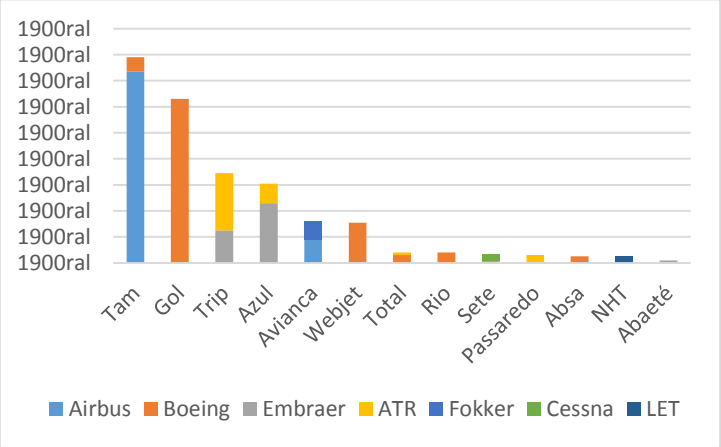


Figura 2: Frota e tipo de aeronaves das empresas brasileiras

As aeronaves utilizadas nesse cenário foram as aeronaves utilizadas pelas empresas brasileiras em voos domésticos sendo divididas em aeronaves a reação e aeronaves a hélice, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Aeronaves utilizadas

Aeronave a reação	*Aeronave a hélice*
A-319; A-320; A-321; B-733; B-737; B-738; F-100; EMB-145; EMB-190	ATR-72

Cada voo simulado é composto de um somatório de procedimentos a saber: decolagem, procedimento de saída (SID), voo em rota por aerovia, procedimento de chegada (STAR), procedimento de aproximação por instrumento (IAC) e pouso. A construção da simulação levou em conta que a aeronave só poderia voar em toda a rota um só tipo de procedimento (PBN ou Convencional), significando que a SID, STAR e IAC deveriam ser exclusivamente de um desses tipos.

Os procedimentos utilizados foram os vigentes em dezembro de 2013 e foram fornecidos pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão do Comando da Aeronáutica responsável em administrar e controlar o Espaço Aéreo Brasileiro, conforme Tabela 2.

Tabela 2:Procedimentos utilizados

Procedimento	*Decolagem*	*SID*	*Aerovia*	*Star*	*IAC*	*Pouso*
PBN	10/15	RNAV UGROK 1A	UZ 10	RNAV ANSUG 1A	RNP X	09R
PBN	10/15	RNAV UGROK 1A	UZ 10	RNAV ANSUG 1A	RNAV Y	09R
Convencional	10/15	UGROK 1B	Z10/W2	ANSUG 1B	ILS T	09R

As aeronaves decolaram utilizando a cabeceira 15 do aeroporto do Galeão e pousaram na cabeceira 09R do aeroporto de Guarulhos. A altitude de cruzeiro compreendeu 28.000 pés para as aeronaves a reação e 18.000 pés para as aeronaves a hélice.

Buscando uma maior utilização e eficiência dos procedimentos, foram simulados voos com o emprego do conceito de Aproximações de Descida Contínuas (CDA).

O TAAM permite que alguns parâmetros de voo, como peso máximo de decolagem, velocidades de decolagem, ponto de início de descida, entre outros possam ser aleatorizados, buscando simular a utilização de aeronaves por vários tipos de pilotos que possuem diferenças em suas técnicas de pilotagem. A função de aleatoriedade foi desabilitada no estudo, buscando simular que a mesma técnica de pilotagem seja utilizada para comparar as rotas voadas.

4. RESULTADOS

O consumo total em quilos por tipo de procedimento sem a utilização de CDA e a comparação entre a utilização de um procedimento RNP e um convencional encontram-se nas Figuras 3 e 4.

Os resultados mostram que cada aeronave possui um consumo de combustível associado a execução dos perfis dos procedimentos. Apenas para as aeronaves A321 e F100, a utilização do procedimento RNP X quando comparado com o RNAV Y apresentou maior consumo. Quando a comparação foi entre rotas RNP e convencional, os resultados ficaram muito próximos, sendo o consumo do convencional ligeiramente menor.

A utilização da técnica de descida contínua gera um menor consumo de combustível, ao permitir que o ponto de início da descida seja postergado, a aeronave voe mais tempo em cruzeiro e realize os perfis de descida com pouca utilização de motor. A Figura 5 mostra o consumo total no procedimento RNP com a utilização do CDA e nos demais procedimentos sem CDA.

O consumo total de combustível com a utilização do RNP e aplicação da técnica de CDA mostrou-se menor quando comparado com a utilização do RNP, RNAV e convencional.

A aplicação do RNP aliado ao CDA, quando comparado aos demais, trouxe uma economia de até 13% (A321). A aeronave ATR-72, por ser um turboélice e voar uma altitude de cruzeiro mais baixa (18.000 pés) não apresentou ganhos com a utilização da técnica de CDA, conforme mostra a Figura 6.

A Figura 7 mostra o consumo quando analisado apenas o consumo total de combustível por procedimento de chegada (STAR) e pouso (IAC) para a pista 09R do aeroporto de Guarulhos (SBGR).

Os ganhos operacionais (economia de combustível) não foram os mesmos para as aeronaves simuladas, conforme a Figura 8. Cada modelo de aeronave apresentou um desempenho específico. A maior economia foi das aeronaves A319, A320 e E190 com aproximadamente 7%. As aeronaves B733, B737, B738 e ATR72 apresentaram um ganho menor que 1% e a aeronave F100 teve um aumento de consumo de combustível quando da realização de um procedimento RNP.

A Figura 9 mostra a comparação entre o consumo do procedimento RNP com a utilização da técnica de descida contínua e os demais procedimentos.

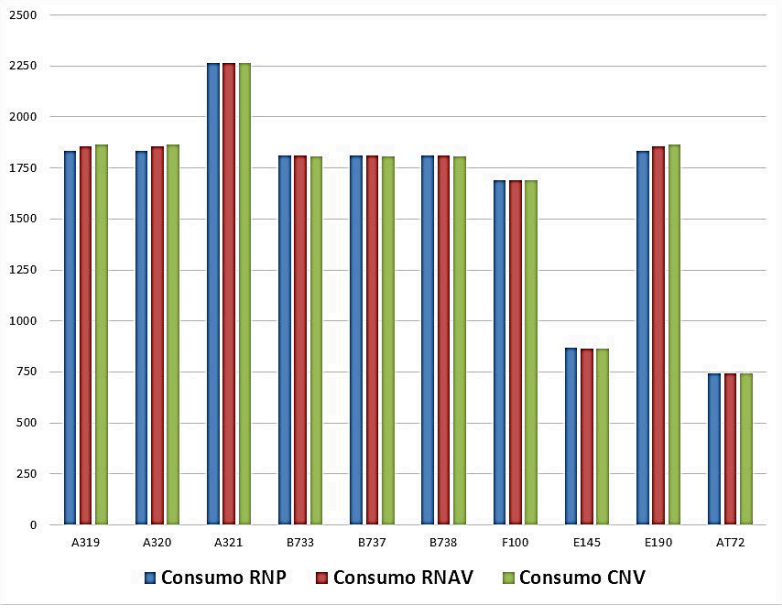


Figura 3: Consumo Total da rota por procedimento sem CDA

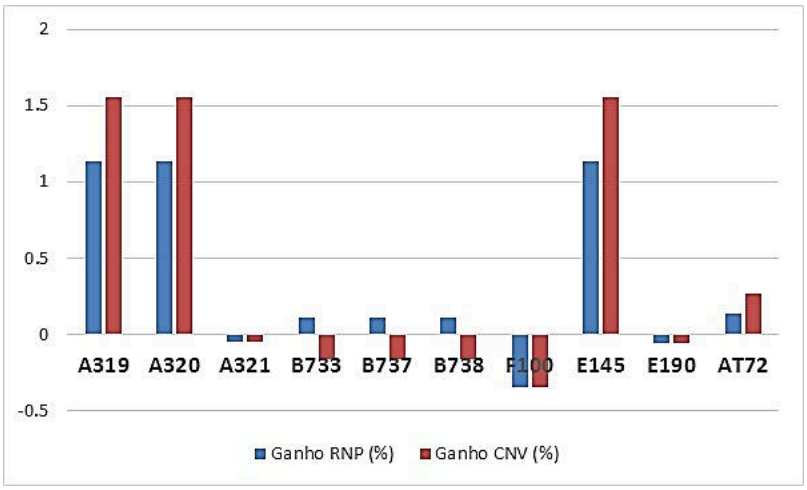


Figura 4: Comparação de consumo total da rota entre procedimentos

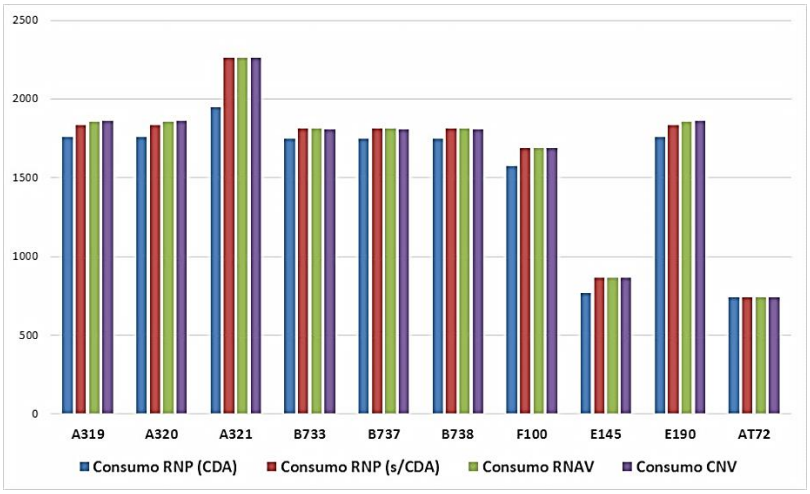


Figura 5: Consumo total da rota por procedimento RNP (CDA) e sem CDA

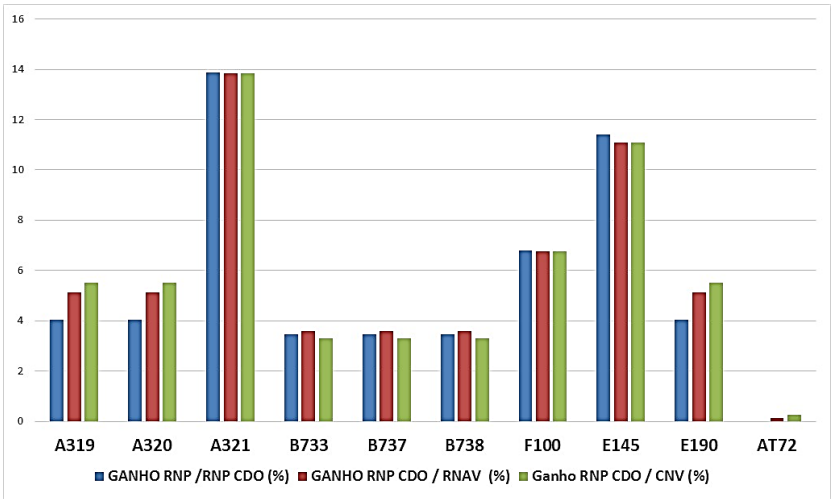


Figura 6: Comparação entre a utilização de procedimento RNP / CDA e demais procedimentos (total da rota)

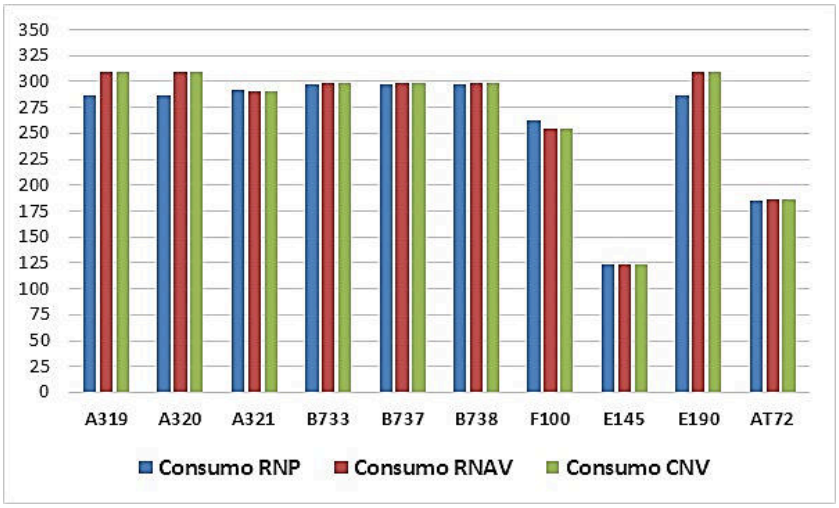


Figura 7: Consumo total por procedimento SBGR (09R) sem CDA

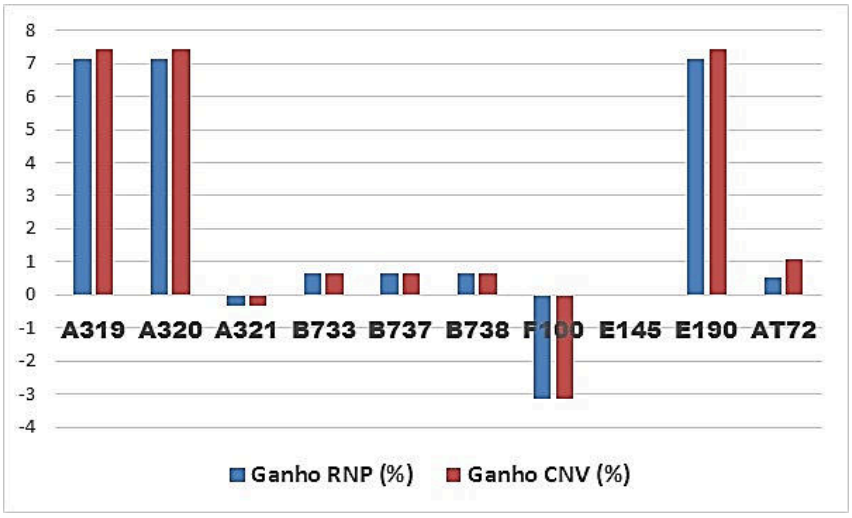


Figura 8: Comparação de consumo total entre procedimentos em SBGR (09R)

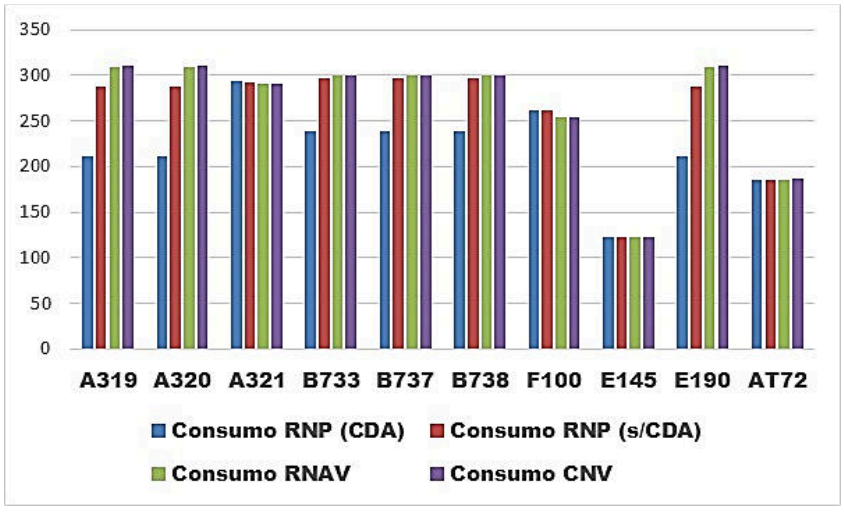


Figura 9: Consumo total da rota por procedimento RNP (CDA) e sem CDA em SBGR (09R)

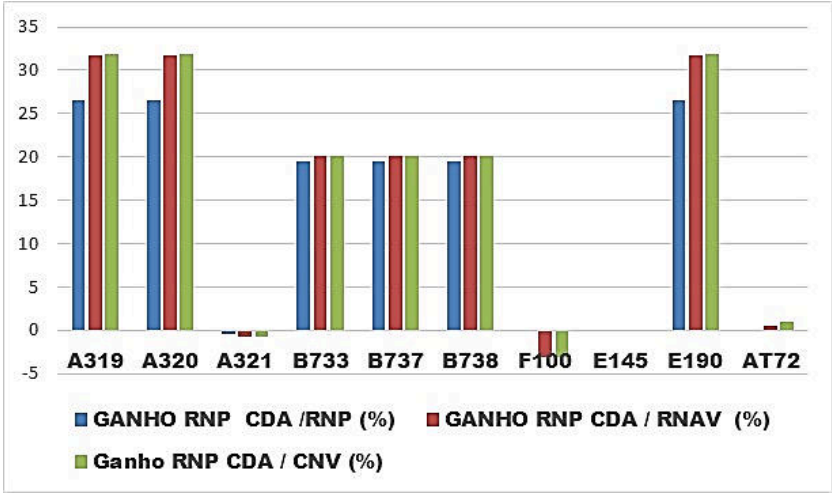


Figura 10: Comparação entre a utilização de procedimento RNP / CDA e demais procedimentos em SBGR (09R)

Os ganhos operacionais estão diretamente ligados ao modelo de aeronave. No procedimento analisado (STAR + IAC) da pista 09R do aeroporto de Guarulhos e com a utilização da técnica de descida constante, as aeronaves A319, A320 e E190 apresentaram uma economia de 26%. As aeronaves Boeing 733, 737 e 738 apresentaram economia de 19,52%. As aeronaves F100, E145 e ATR72 não apresentaram economia de combustível com a utilização da técnica CDA e a aeronave A321 consumiu o mesmo montante combustível para fazer o perfil do CDA quando comparado com o RNP sem CDA.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A introdução dos procedimentos PBN trouxe mudanças fundamentais na operação das aeronaves, nos procedimentos dos pilotos e controladores de voo e na introdução de novos equipamentos embarcados nas aeronaves.

Várias pesquisas tem sido realizadas para verificar a eficiência da utilização de procedimentos PBN nos aeroportos. Novos cenários deverão ser analisados comparando o consumo de combustível na realização de procedimentos PBN em outros aeroportos, assim como a verificação dos níveis de consumo quando da interação de tráfego aéreo, com várias aeronaves chegando e partindo de um aeroporto.

Estudos preliminares utilizando como base a rota Galeão – Guarulhos e análise dos procedimentos de chegada e pouso nessa rota mostraram que o desempenho e a economia de combustíveis estão diretamente ligados ao perfil do procedimento e características da aeronave. Dependendo do tipo de procedimento e da aeronave, economias na ordem de 30% são verificadas.

A introdução de novas técnicas de utilização do espaço aérea traz ao pesquisador da área de transporte aéreo novos desafios para a verificação de sua eficácia.

6. REFERENCIAS

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Anuário Estatístico do Transporte Aéreo. Dados Estatísticos e Econômicos de 2012. Brasília, 2013.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Histórico de Voos. Disponível em http://www2.anac.gov.br/vra/. Último acesso em 23 março de 2013.

ICAO. *International Civil Aviation Organization.* Doc 9613. *Performance-Based Navigation (PBN) Manual". 4th Edition*. Quebec, Canada, 2013.

ICAO. *International Civil Aviation Organization*. Doc 8168. *Procedures for Air Navigation Services, Aircraft Operations, PANS-OPS, Volume II, Construction of Visual and Instrument Flight Procedures". 5th Edition.* Quebec, Canada, 2006.

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