ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TRÁFEGO AÉREO NA UTILIZAÇÃO DE PROCEDIMENTOS BASEADOS EM DESEMPENHO (PBN) NA ROTA GALEÃO - GUARULHOS

Daniel Alberto Pamplona
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Grupo de Engenharia de Tráfego Aéreo - GETA
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50. 12280250 - São José dos Campos, SP – Brasil,
pamplonadefesa@gmail.com

João Luiz de Castro Fortes
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Grupo de Engenharia de Tráfego Aéreo - GETA
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50. 12280250 - São José dos Campos, SP – Brasil,
jlfortes@gmail.com

Claudio Jorge Pinto Alves
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50. 12280250 - São José dos Campos, SP – Brasil,
claudioj@ita.br

RESUMO

A utilização dos Procedimentos Baseados em Performance (PBN) foi motivada pela otimização do consumo de combustível e melhor utilização do espaço aéreo. Estudos devem verificar se os benefícios encontrados quando a aeronave voa de forma isolada são mantidos em um ambiente normal de tráfego aéreo, com a interação de todas as aeronaves. O objetivo do artigo foi verificar se os benefícios da navegação PBN foram mantidos em um dia normal de voo. Os resultados mostraram que apenas 8,7% dos voos conseguiram manter os benefícios e o restante dos voos apresentou aumento de consumo que variou entre 3,3% a 31,3% na rota estudada.

Palavras-chaves: Eficiência, PBN, Tráfego Aéreo, Benefícios.

1. INTRODUÇÃO

A introdução dos Procedimentos Baseados em Performance (PBN) foi motivada pela otimização e melhor utilização do espaço aéreo.

Segundo Airbus (2015), nos próximos 20 anos, ocorrerá uma demanda por 32.600 novas aeronaves (passageiros e carga). A frota estimada de aeronave de passageiros aumentará dos atuais 17.354 para 35.749, representando um aumento de 106%. Nas previsões da empresa, 70% do aumento do tráfego aéreo será de rotas aéreas já existentes.

Segundo Boeing (2015), a frota comercial atual na América Latina passará de 1.470 aeronaves para 3.620 aeronaves em 2034, sendo que 84% das novas aeronaves serão de corredor único. Estima-se que o crescimento dos passageiros será em média 6% ao ano nas próximas duas décadas.

Novas maneiras de se pensar o espaço aéreo serão necessárias com o aumento significativo do movimento aéreo. A navegação PBN com a introdução dos procedimentos RNAV e RNP são considerados como fatores fundamentais para a melhora na eficiência e capacidade do sistema de espaço aéreo.

Seu funcionamento é considerado 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.

Pamplona, Fortes e Alves (2014), utilizando a simulação em tempo acelerado, mensuraram os benefícios da implantação do PBN no espaço aéreo, utilizando como estudo de caso a rota ligando os Aeroportos do Galeão e de Guarulhos.

Optou-se no estudo por utilizar como parâmetro de eficiência o consumo de combustível. A escolha foi motivada devido ao fato de as aeronaves terem o seu consumo aumentado quando em situações de saturação de tráfego aéreo, devido os procedimentos de separação de tráfego aéreo empregados pelos controladores como, por exemplo, procedimentos de espera em órbita, separação por nível de voo, entre outros.

O estudo mostrou que os ganhos operacionais advindos dos procedimentos PBN estão diretamente ligados ao modelo de aeronave e da utilização ou não das aproximações utilizando a técnica CDA (Aproximação de Descida Contínua). Dependendo do tipo de procedimento e da aeronave, economias na ordem de 30% foram verificadas.

Porém, o estudo verificou os ganhos advindos apenas com as aeronaves voando de maneira isolada, sem a interação de outras aeronaves, situação esta, presente no tráfego aéreo e uma das principais razões do aumento de combustível e tempo de voo.

O objetivo do presente artigo foi verificar se os benefícios da navegação PBN, encontrados quando voando de forma isolada foram mantidos e verificar o impacto operacional do sistema de tráfego aéreo quando as aeronaves voam PBN.

Para fins de comparação, utilizou-se como cenário base, os resultados do estudo de Pamplona, Fortes e Alves (2014).

O ganho acadêmico é verificado através da comparação dos ganhos em situação isolada de voo e as de interação com outras aeronaves, realidade presente no tráfego aéreo. Com isso, o planejador de tráfego aéreo poderá analisar as regiões de aumento do consumo e perda da eficiência e com isso remodelar o sistema buscando a sua otimização.

Esse artigo está estruturado em cinco seções, além desta introdutória. A segunda seção trata da interação entre aeronaves e as regras de tráfego aéreo. A terceira seção apresenta a metodologia empregada no estudo. A quarta seção apresenta os resultados e a quinta seção apresenta a conclusão do estudo.

2. A ESTRUTURA E INTERAÇÃO NO TRÁFEGO AÉREO

O tráfego aéreo envolve a interação do voo de várias aeronaves inseridas em um ambiente controlado por órgãos de controle que utilizam regras de voo estabelecidas buscando a condução do voo seguro.

A capacidade de um sistema de tráfego aéreo depende de muitos fatores, a citar: a estrutura e *layout* da rota aérea; a precisão e acuracidade das aeronaves que utilizam o

espaço aéreo; fatores relacionados a meteorologia; e carga de trabalho do controlador de voo (ICAO, 2007)

Os sistemas de gerenciamento do tráfego aéreo dividem e classificam os espaços aéreos da seguinte forma (DECEA, 2013; ICAO, 2007):

a) **Classe A:** somente voos IFR (regra de voo por instrumento) são permitidos. Todos os voos estão sujeitos ao serviço de controle de tráfego aéreo e são separados entre si.
b) **Classe B:** são permitidos voos IFR e VFR (regra de voo visual). Todos os voos estão sujeitos ao serviço de controle de tráfego aéreo e são separados entre si.
c) **Classe C:** são permitidos voos IFR e VFR. Todos os voos estão sujeitos ao serviço de controle de tráfego aéreo. Os voos IFR são separados entre si e dos voos VFR. Os voos VFR são separados apenas dos voos IFR e recebem informação de tráfego em relação aos outros voos VFR e aviso para evitar tráfego quando solicitado pelo piloto.
d) **Classe D:** são permitidos voos IFR e VFR. Todos os voos estão sujeitos ao serviço de controle de tráfego aéreo. Os voos IFR são separados entre si e recebem informação de tráfego em relação aos voos VFR (e aviso para evitar tráfego quando solicitado pelo piloto). Os voos VFR recebem apenas informação de tráfego em relação a todos os outros voos (e aviso para evitar tráfego, quando solicitado pelo piloto).
e) **Classe E:** são permitidos voos IFR e VFR. Apenas voos IFR estão sujeitos ao serviço de controle de tráfego aéreo e são separados dos outros voos IFR. Todos os voos recebem informação de tráfego sempre que for possível. Aeronaves VFR podem voar neste espaço aéreo sem autorização prévia e sem notificação.
f) **Classe F:** são permitidos voos IFR e VFR. Apenas os voos IFR recebem o serviço de assessoramento de tráfego aéreo. Todos os voos recebem serviço de informação de voo, quando solicitado pelo piloto.
g) **Classe G:** espaço aéreo no qual são permitidos voos IFR e VFR, recebendo somente serviço de informação de voo, quando solicitado pelo piloto.

A escolha do nível do serviço de tráfego aéreo a ser prestado e a consequente classificação do espaço aéreo é determinada por cada país. A Figura 1 mostra a divisão do espaço em classes nos Estados Unidos.

De forma genérica, os espaços aéreos e respectivos limites, todas as aerovias superiores, acima do nível de voo 145 são classificadas como espaço aéreo Classe A ou C dependendo do país (DECEA, 2013; EUROCONTROL, 2003, FAA, 2008)

A separação entre as aeronaves para pouso e decolagem é baseada na separação mínima da esteira de turbulência e baseia-se no peso máximo de decolagem. Para efeitos, as aeronaves são divididas em (DECEA, 2013):

a) Pesada (H): todos os tipos de aeronaves de peso máximo de decolagem 136.000 kg ou mais;
b) Media (H): tipos de aeronaves de peso máximo de decolagem inferior a 136.000 kg e superior a 7.000 kg; e
c) Leve (L): tipos de aeronaves de peso máximo de decolagem de 7.000 kg ou menos.

A Tabela 1 apresenta as distâncias mínimas entre aeronaves.

Tabela1: Separação pela esteira de turbulência

Aeronave líder	*Aeronave seguidora*	*Distância mínima (Milhas náuticas*
Pesada	Pesada	4
	Media	5
	Leve	6
Media	Pesada	3
	Media	3
	Leve	5
Leve	Pesada	3
	Media	3
	Leve	3

Fonte: DECEA, 2013

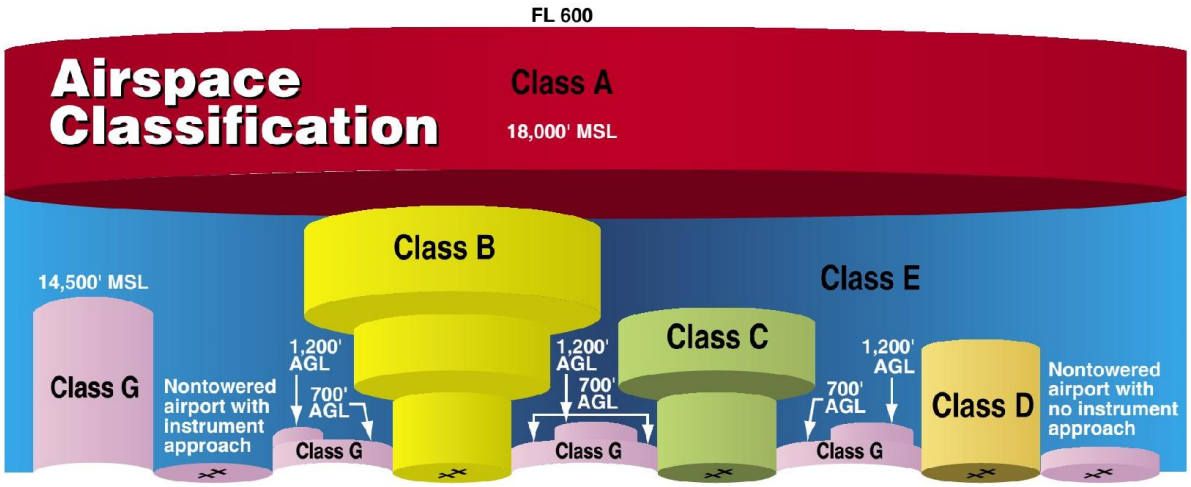
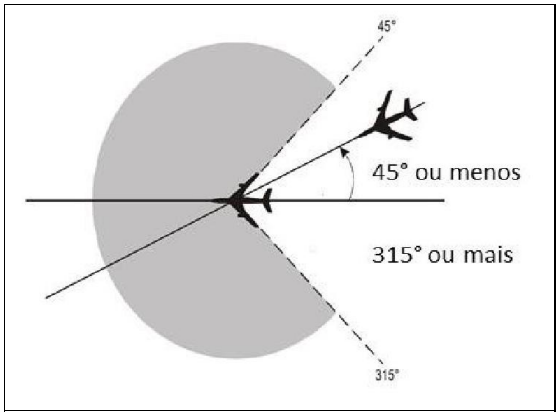


Figura 1: Classes do espaço aéreo nos Estados Unidos.
Fonte: FAA, 2008

Segundo ICAO (2005) e DECEA (2013) as aeronaves são consideradas na mesma rota longitudinal, quando as aeronaves em rotas da mesma direção ou rotas que se cruzam ou porções delas, cuja diferença angular entre elas é menor que 45º ou maior que 315º, conforme ilustra a Figura 2.



a) 10 minutos; ou
b) Entre 9 e 5 minutos inclusive, contanto que a aeronave precedente esteja mantendo um número Mach maior do que a aeronave seguinte, conforme a diferença de velocidade entre as aeronaves número Mach

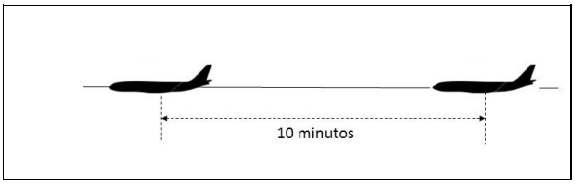


Figura 3: Separação entre aeronaves.
Fonte: Adaptado de DECEA, 2013.

Figura 2: Separação longitudinal em rota.
Fonte: Adaptado de ICAO, 2005.

Para o voo de subida, rota e descida segundo DECEA (2013), existem vários tipos de técnicas para a separação longitudinal. Devido o artigo ter focado em aeronaves de alto desempenho, foi utilizada a técnica de mínima separação longitudinal com a técnica de número Mach e baseado em tempo, aplicada entre aeronaves turborreatoras na mesma rota, se em voo nivelado, subindo ou descendo devendo ser:

Com base na separação mínima a ser mantida pelas aeronaves, buscou-se através da simulação em tempo acelerado, verificar se os ganhos apresentados pelas aeronaves quando voando de forma isolada, seriam mantidos quando em interação de tráfego aéreo, com toda a metodologia prevista para a manutenção da segurança.

3. METODOLOGIA

A ferramenta utilizada no estudo foi a simulação em tempo acelerado (*fast-time*). Através da simulação em tempo acelerado, utilizando o programa *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM), foram simulados de forma conjunta, com a interação das aeronaves no espaço aéreo e não apenas de forma isolada como realizado no estudo de Pamplona, Fortes e Alves (2014), o voo das aeronaves utilizando os procedimentos baseados em performance (PBN) e verificar se o desempenho operacional atingido de forma isolada foi atingido quando em um dia normal de voo.

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.

As rotas simuladas com suas origens e destinos e os horários de partida tiveram como base o Horário de Transporte Aéreo (HOTRAN) de 14 de junho de 2014 (ANAC, 2014), sendo que os horários foram convertidos para o horário padrão GMT e as rotas foram construídas, com os fixos que deveriam ser seguidos, através do Plano de Voos Repetitivos (RPL) de 16 de junho de 2014 (CGNA, 2014). A escolha do modelo de aeronave e do nível de voo utilizado foi o previsto pelas companhias aéreas no RPL e HOTRAN.

Com isso, alguns modelos de aeronaves utilizados no estudo de Pamplona, Fortes e Alves (2014) não foram utilizados no presente artigo por não serem utilizados atualmente pelas companhias aéreas nas rotas estudadas. O desempenho das aeronaves e o consumo de combustível são baseados no BADA (*Base of Aircraft Data*). O BADA é um modelo de desempenho de aeronaves desenvolvido pelo *Eurocontrol* para ser utilizado em simulações de tráfego aéreo e está inserido no TAAM.

Durante o estudo, todos os voos estarão sobre as regras de voo por instrumento (IFR). O simulador TAAM aplicou quando necessário a separação entre aeronaves, provendo a separação mínima vertical, lateral ou longitudinal adequada, com relação as aeronaves, para evitar colisões e conflitos, o que acarretaria em aumento do consumo e do tempo de voo, conforme Figura 4.

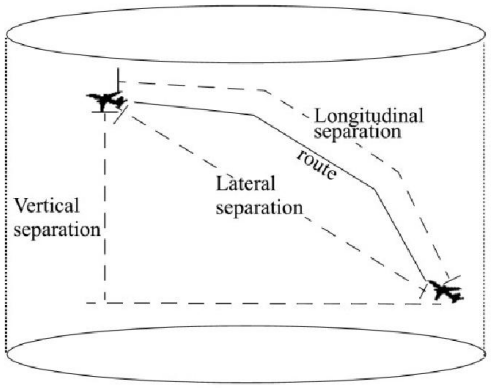


Figura 4: Modos de separação longitudinal, vertical e lateral.

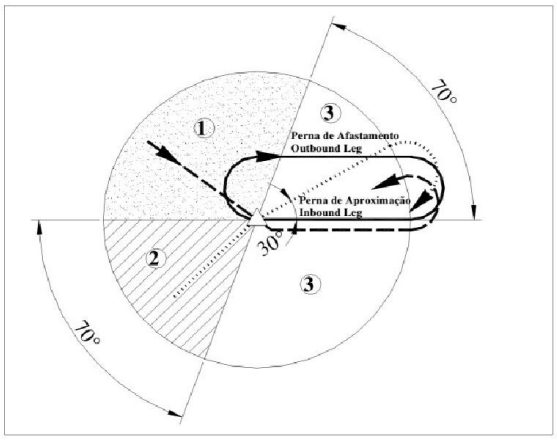
Fonte: JEEPSEN, 2014.

A separação das aeronaves seguiu o modo trilha (*intrail separation*), com a especificação por tempo e distância na rota estudada.

Padronizou-se que na simulação, o controle de tráfego aéreo seria feito por radar. Para a

separação vertical, adotou-se a premissa que as aeronaves eram RVSM (*Reduced Vertical Separation Minimum*), com isso a separação ficou restrita a 1000 pés a partir do nível de voo 290.

A separação horizontal utilizada pela aeronave depende do tipo de espaço aéreo, dos modelos de separação e o estágio de voo (decolagem, rota ou aproximação). (JEEPSEN, 2014). Para a separação horizontal, foi utilizado



a distância de 10 milhas náuticas.

Para a separação longitudinal, foi utilizada a separação de 10 minutos.

Na simulação foi habilitada a função de Resolução Automática de Conflitos. Como consequência, o TAAM realiza a detecção e previsão de conflitos, buscando a sua resolução automática.

O gerenciamento do espaçamento no TAAM busca manter o espaçamento entre as aeronaves e aplicar medidas, quando necessário, para aumentar a distância entre elas.

O TAAM controla a aeronave através dos parâmetros de altitude e velocidade e o muda para manter os espaçamentos. Os mecanismos de espaçamento são realizados na seguinte ordem de prioridade:

1) **Espera no solo (*ground holding*):** no caso da simulação, a aeronave foi mantida em espera na cabeceira de decolagem, visto que as funções taxi e estacionamento foram desabilitadas na simulação. O tempo máximo de espera no solo é de 30 minutos.
2) **Controle de velocidade:** serão comparadas as velocidades entre um par de aeronaves. O TAAM mantém a velocidade da aeronave sucessora igual ou menor que a aeronave líder.
3) **Procedimento de espera (*holding*):** realização de procedimentos de espera. O tempo de espera é definido por dois fatores: tempo mínimo de espera e tempo necessário de atraso. O TAAM escolhe qual for o maior e soma dois minutos a ele.

Quando a separação e atraso da aeronave são necessários em voo, o TAAM primeiramente utiliza o controle de velocidade. Caso o espaçamento não seja atingido e seja menor que 60 segundos, o TAAM busca atingi- lo no próximo ponto, mantendo o controle de velocidade. Caso não seja possível, o TAAM busca atingir através do procedimento de espera (JEPPSEN, 2014).

O tempo mínimo padronizado pelo simulador para que uma aeronave complete um procedimento de espera completo é de dois minutos, com uma taxa de curva de 3º por segundo. Caso a aeronave necessite realizar um procedimento do tipo hipódromo, o tempo de duração da espera aumentará, conforme Figura 5 (JEPPESEN, 2014).

Figura 5: Procedimento de espera.

Fonte: DECEA, 2013

O processo de verificação dos dados utilizou a seguinte metodologia: os dados inseridos foram checados duas vezes. Além disso, foi revisado por um profissional com experiência no TAAM que verificou os dados inseridos.

O processo de validação foi realizado através da comparação entre os voos simulados e os voos reais retirados da base de dados *Flightware,* que utiliza o sistema ADS-B para a coleta de posições. A base de dados fornece o tempo total em rota do momento em que a aeronave decola até o momento de seu pouso.

Para a validação verificou-se se o tempo total do voo simulado correspondeu às médias dos tempos dos voos reais fornecidos pela base de dados. Dados como consumo de combustível não são fornecidos pela base. Assumiu-se, portanto, que os dados de desempenho e, consequentemente, de consumo reais seriam os mesmos do BADA utilizado pelo TAAM.

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.

As aeronaves decolaram utilizando a cabeceira 15 do aeroporto do Galeão e pousaram na cabeceira 09R do aeroporto de Guarulhos.

Na próxima seção serão apresentados os resultados do estudo.

4. RESULTADOS

Dos 3.344 voos simulados, o que corresponde a um dia inteiro de voos no Brasil, foram analisados no estudo 23 voos. Os demais voos foram mantidos devido a possível interação quando voando pelas aerovias. Só foram analisadas as rotas domésticas e que fazem a ligação direta entre os aeroportos.

Na rota SBGL-SBGR operam as aeronaves A320, B737, B738 e E190. O primeiro voo tem início às 00:11Z e o último voo às 22:46Z. A perda média quando comparado com o consumo base para a rota foi de 10,81% e a mediana é 6,54% com um desvio padrão de 10,65%. Dos voos analisados, 8,7% mantiveram o consumo base não apresentando

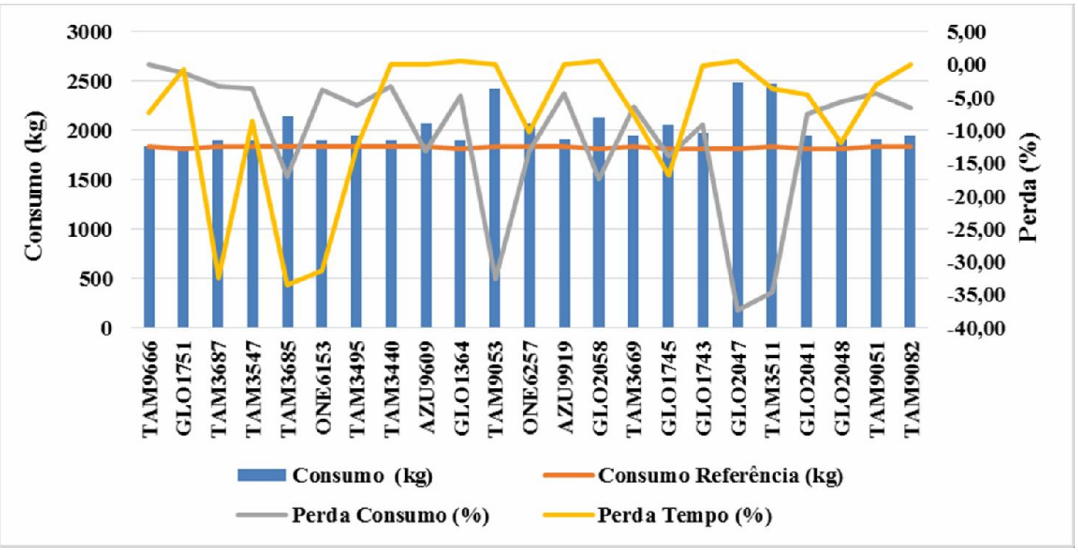


Figura 6: Consumo em rota, referência e perda de desempenho na rota SBGL-SBGR

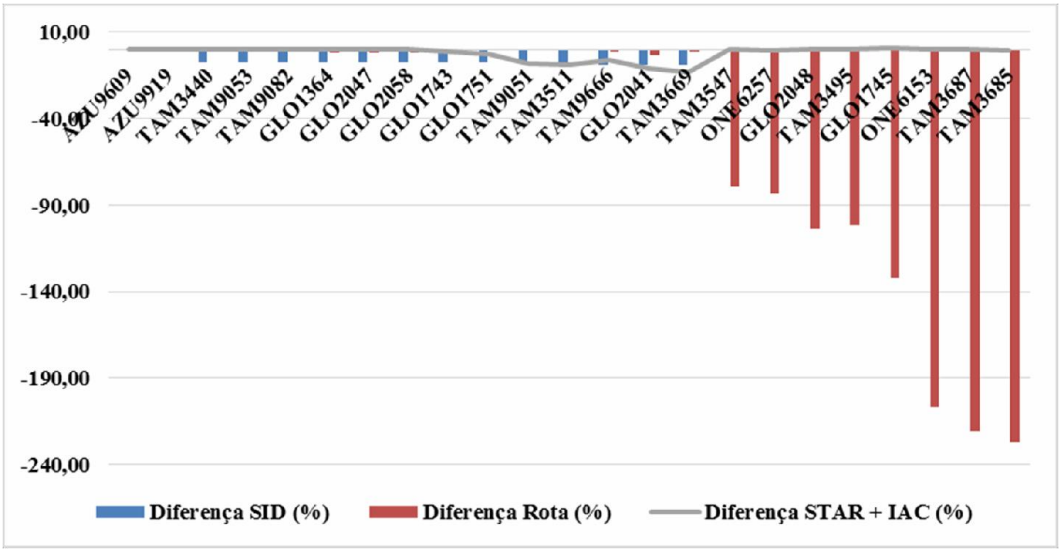


Figura 7: Diferenças por fase de voo na rota SBGL-SBGR (%)

Tabela 2: Influência no consumo por fase de voo na rota SBGL-SBGR

Aeronave	*Decolagem*	*SID*	*Rota*	*Star + IAC*	*Pouso*
E190	7,63%	61,01%	15,70%	15,27%	0,38%
B737	10,16%	59,41%	14,03%	15,79%	0,61%
B738	10,16%	59,41%	14,03%	15,79%	0,61%
A320	7,63%	61,01%	15,70%	15,27%	0,38%

Tabela 3: Economia diária e anual na rota SBGL - SBGR

	RNP - RNAV	RNP - CNV	RNAV - CNV
Economia diária (kg)	345	428	83
Economia diária (US$)	345	428	83
Economia diária média por voo (US$)	15,00	18,61	3,61
Economia anual (kg)	124.200	154.080	29.880
Economia anual (US$)	124.200	154.080	29.880
Economia anual média por voo (US$)	340,27	422,14	81,86

perdas, os demais variaram de 3,3% a 31,3% conforme Figura 6.

O aumento do consumo materializou-se no aumento do tempo de voo, quando comparado ao voo realizado de forma isolada (consumo base). A média do aumento foi de três minutos. As aeronaves que tiveram o maior consumo tiveram um aumento de até 13 minutos em rota, o que representa um aumento de 34% no tempo total de duração. Os três voos com maior consumo tiveram atrasos maiores que 12 minutos.

Analisando os voos, constatou-se que a parte do voo em rota apresentou o aumento do consumo de combustível em relação ao cenário base, conforme Figura 7.

A Tabela 2 mostra a influência de cada fase de voo no consumo geral utilizando-se como base os consumos apresentados em Pamplona, Fortes e Alves (2014).

Os resultados da simulação em rota RNP indicam que um aumento de 1% no consumo dos procedimentos de saída, rota e procedimento de chegada resultaram em aumentos de 0,57%; 0,20% e 0,14% no consumo total, respectivamente.

As maiores diferenças foram em rota. Devido os procedimentos de espera e desvios devido ao tráfego aéreo, ocorreu o aumento no consumo de até 227%. Os cinco maiores aumentos de combustível tiveram um consumo maior que 100% em rota. Como a parte em rota representa em média 15% do consumo, esse aumento não foi tão impactante, caso os desvios tivessem ocorrido durante os procedimentos de saída (SID).

A Tabela 3 traz o consumo total em um dia em quilos, do somatório do consumo de todas as aeronaves por tipo de procedimento voado, comparando entre RNP, RNAV e Convencional (CNV).

Tabela 3: Consumo total em um dia em quilos por tipo de procedimentos na rota SBGL-SBGR

RNP	*RNAV*	*CNV*
46.539	46.884	46.967

A economia diária e anual em quilos de QAV e em dólares por tipo de rota está na Tabela 3.

Os dados mostram que a utilização de rotas PBN (RNAV e RNP) traz em média economia em tempo e consumo de combustível para as empresas aéreas.

A análise da rota mostrou que, em média, as aeronaves não conseguem manter os consumos-base atingidos quando as aeronaves voam de forma isolada, apresentando uma perda média de consumo de 10,81% e uma perda média de tempo 7,95%.

Analisando por fase de voo, existe uma diferença de 4,42% na SID, 50,67% em rota e 2,22% na chegada.

A elevada diferença do consumo em rota sinaliza que estudos deverão focar em maneiras de diminuir as discrepâncias, principalmente quando comparado com os baixos níveis de diferença nos procedimentos de saída e chegada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca pela otimização e melhor aproveitamento do espaço aéreo motivou a introdução dos Procedimentos Baseados em Performance (PBN).

Estudos anteriores buscaram quantificar os ganhos advindos da utilização desse tipo de procedimento, o fazendo de forma isolada. O presente artigo buscou verificar se os ganhos mostrados seriam mantidos quando a aeronave voasse em situação normal de tráfego aéreo, com a interação das aeronaves e aplicação das regras de sequenciamento. Como estudo de caso, foi escolhida a rota Galeão-Guarulhos.

Devido a falta de disponibilidade dos dados de consumo das empresas, foi utilizada a simulação em tempo acelerado, tendo sido simulados 3.344 voos, o equivalente a um dia de voo da aviação regular no Brasil. Desse universo, foram analisados 23 voos, o correspondente a demanda comercial ligando os dois aeroportos.

Os resultados apresentaram uma perda média de 10,81% e a mediana de 6,54%. Apenas 8,7% dos voos mantiveram o consumo quando voando de forma isolada. Os demais voos apresentaram perdas que variaram de 3,3% a 31,3%. A fase do voo que mais apresentou aumento de consumo foi a fase em rota.

Apesar de ter tido aumento no consumo, quando comparado com o voo utilizando o

RNAV ou a navegação Convencional, a utilização do procedimento PBN (RNAV ou RNP) trouxe economia para as empresas.

Novos estudos deverão focar outras rotas para quantificar as perdas e as economias anuais.

Da mesma forma, novos *layouts* de espaço aéreo deverão ser estudados, com o objetivo de diminuir as perdas em rota e melhorar a utilização do espaço aéreo.

Em um ambiente competitivo, como o aeronáutico, faz-se necessário o constante aprimoramento e melhor utilização do espaço aéreo, evitando atrasos, aumentando o conforto dos passageiros e melhorando os lucros das empresas.

6. REFERENCES

AIRBUS. **Global Market Forecast 2015-2034.** 2015.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Horário de Transportes (HOTRAN).** 2014.

BOEING. **Current Market Outlook 2015-2034.** 2015.

CGNA – Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. **Plano de Voo Repetitivo.** 2014.

DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **ICA100-12 Regras do Ar.** 2013

EUROCONTROL – European Air Traffic Management. **Eurocontrol Manual for Airspace Planning.** 2003.

FAA – Federal Aviation Agency. **Pilot´s Handbook of Aeronautical Knowledge.** 2008.

ICAO – International Civil Aviation Organization. **Doc 4444 – Air Traffic Management.** 2007

ICAO – International Civil Aviation Organization. **Annex 2 – Rules of the Air.** 2005

JEPPESEN. **TAAM – Reference Manual.** 2014.

PAMPLONA, D. A.; FORTES, J. L. C; ALVES, C. J. P. 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. **Sitraer**.v.13. p.30-39, 2014.