EVOLUÇÃO DA ÁREA DE CONTROLE TERMINAL (TMA) PARA A NAVEGAÇÃO RNAV

Fernando Luiz Fantoni
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
Pça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP 12.228-900, São José dos Campos, SP, Brasil
(12)3947-5851
E-mail: ferfant@hotmail.com

Carlos Müller
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
Pça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP 12.228-900, São José dos Campos, SP, Brasil
(12)3947-5851
E-mail: muller@ita.br

RESUMO

A introdução do programa PBN no espaço aéreo brasileiro trouxe uma evolução da navegação aérea antes baseada em auxílio de radio-navegação no solo para a navegação baseada na performance dos equipamentos a bordo das aeronaves. Isso permitiu o desenvolvimento de novas rotas aéreas para cada fase do voo, principalmente para aquelas dentro das áreas de controle terminal (TMA). Tanto a navegação convencional como a navegação de área (RNAV) possuem limitações, porém a segunda é capaz de entregar o nível de precisão tão necessário para permitir o aumento de capacidade de uma TMA em absorver a crescente demanda do setor. Ao mesmo tempo que trouxe vários benefícios ao fluxo do tráfego aéreo, a navegação RNAV trouxe também novas exigências operacionais aos controladores e operadores aéreos.

Palavras-chave: navegação aérea, navegação convencional, *Performance Based Navigation*, área de controle terminal, RNAV..

1. INTRODUÇÃO

A Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), através de seu comitê cujo objetivo é estudar o comportamento e as tendências da navegação aérea mundial, cria na década de 90 o programa denominado CNS/ATM (Communication, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management). Dois conceitos desse programa, quando implementados no espaço aéreo brasileiro, trouxeram novidades e exigências tanto para os controladores quanto para os operadores aéreos. A eles dá-se o nome de RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum) e PBN (Performance Based Navigation). Um dos objetivos do CNS/ATM é justamente aumentar a capacidade do espaço aéreo como um todo a fim de atender a crescente demanda pelo sistema, sem detrimento da segurança operacional. Ao RVSM foi dado o aumento de utilização do espaço aéreo no plano vertical e ao PBN no plano horizontal. Este artigo tem como objetivo discorrer sobre as limitações impostas pelo sistema de navegação convencional ainda utilizado pela navegação aérea atual e sobre os benefícios do sistema de navegação de área (RNAV), conceito base para o PBN. Adicionalmente, este artigo trata da navegação baseada em performance em área de controle terminal (TMA), onde a mesma possibilita a criação de rotas padrões de chegada (Standard Terminal Arrivals Routes ou STARs) e rotas de saída (Standard Instrument Depatures ou SIDs) mais diretas, econômicas e próximas umas das outras. Por definição, TMA é uma área ao redor de um ou mais aeródromos, na maioria das vezes situada na confluência de rotas de tráfego aéreo, que tem o principal objetivo de fornecer diferentes níveis de serviços às aeronaves que partam ou cheguem nela.

A passagem de uma TMA de navegação convencional para o RNAV pode trazer benefícios tanto do lado do controle de tráfego aéreo quanto do lado do operador. Porém eles somente serão atingidos se a separação e sequenciamento for estabelecido e garantido antes mesmo do início da descida das aeronaves.

A seção 2 deste artigo apresenta as características e diferenças fundamentais entre a navegação convencional e a navegação de área. A seção 3 apresenta o conceito Performance Based Navigation (PBN) e a evolução da Área de Controle Terminal (TMA) para ele. E por último, a seção 4 discorre sobre os benefícios do PBN para o gerenciamento do tráfego aéreo em uma TMA.

2. NAVEGAÇÃO AÉREA

2.1. Da Navegação Visual à Navegação por Instrumentos

A necessidade de navegar uma aeronave de um ponto a outro iniciou-se antes mesmo da Primeira Guerra Mundial quando houve o primeiro registro de um voo comercial transportando passageiro (Chade, 2014). Naquela época, os pilotos somente voavam as aeronaves durante a luz do dia pois era preciso enxergar referências visuais no solo tanto para se orientarem quanto para navegarem (Nolan, 2011). Com o desenvolvimento da demanda, tanto do correio aéreo quanto do passageiro, sendo o segundo sensível a atrasos e cancelamentos por mau tempo, métodos que permitiriam o voo durante condições meteorológicas adversas ou a noite teriam que ser desenvolvidos para que as empresas de linha aérea pudessem prosperar. Portanto, a partir da navegação visual (VFR), a qual é baseada em proa magnética indicada por uma bússola, tempo de deslocamento, referências no solo e mapas, equipamentos a bordo e no solo permitiram o desenvolvimento da navegação por instrumentos (IFR). Dentre os vários auxílios que permitiram o desenvolvimento da navegação, ainda hoje em uso, estão os marcadores (*marker beacons*), os NDBs (*nondirectional radio beacons*), os VORs (VHF omnidirectional range) e os DMEs (*distance measuring equipment*). Todos, sem exceção, são basicamente antenas no solo transmitindo ondas rádio em

determinadas frequências, alocadas conforme Tabela 1.

Tabela 1: Alocação de frequências para os auxílios rádios de navegação comentados. Fonte: Nolan, 2011.

Nome	Abrev.	Freq.	Uso
Low frequency	LF	30 kHz a 300 kHz	LORAN, NDB
Medium frequency	MF	300 a 3.000 kHz	NDB
Very high frequency	VHF	30 a 300 MHz	VOR, localizer, *marker beacons*
Ultra high frequency	UHF	300 a 3.000 MHz	DME, glide slope, GPS

Em paralelo ao avanço dos recursos de navegação no solo disponíveis para o voo por instrumentos, os equipamentos a bordo das aeronaves também tiveram seu avanço tecnológico. Além dos instrumentos que permitiram as aeronaves serem controladas dentro de nuvens ou em períodos noturnos, ou seja sem referências visuais, elas também ganharam equipamentos que permitiam sintonizar os diversos recursos no solo (marcadores, NDBs, VORs e DMEs). Estes, além de possibilitarem o desenvolvimento de rotas aéreas ligando aeroportos, permitiram também o pouso sobre condições meteorológicas desfavoráveis.

À navegação utilizando os auxílios rádio comentados dá-se o nome de navegação convencional, e ainda hoje é um recurso obrigatório para uma aeronave certificada para voos IFR. Porém, a evolução tecnológica não parou e a introdução de equipamentos a bordo das aeronaves que pudessem utilizar informações de auxílios rádio no solo e/ou de equipamentos avançados de navegação de longa distância, denominados inercial e GNSS (*Global Navigation Satellite System*), possibilitou voos mais diretos e precisos. A este segundo tipo de navegação dá-se o nome de navegação de área (*area navigation* ou RNAV).

2.2. Princípios e Performance da Navegação Convencional

Pelo fato da navegação convencional necessitar a sintonização dos equipamentos a bordo das aeronaves aos auxílios rádios espalhados pelo solo, ela impossibilita o voo em linha reta entre dois pontos caso eles tenham entre si uma distância maior que a capacidade dos auxílios sintonizados. Isso porque todo auxílio tem um limite de alcance determinado pelo tipo de frequência e potência, ou ainda por algum limite geográfico. Neste caso é necessário que o voo seja realizado sobrevoando estações intermediária distribuídas por essa rota, tal como mostra a Figura 1.

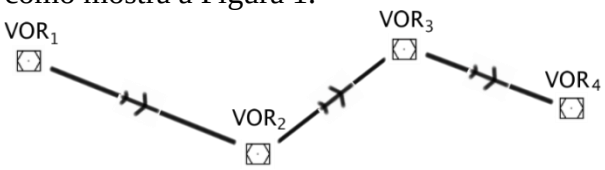


Figura 1: Navegação convencional baseada em auxílio rádio VOR. Fonte: Autor.

A sua precisão também depende de alguns fatores. Primeiramente, o auxílio no solo precisa estar operacional. Mantê-lo em funcionamento com precisão dentro dos limites requeridos exige um certo custo. No Brasil, esta função é atribuída ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), sob o Comando da Aeronáutica. A distância da aeronave em relação ao auxílio sintonizado também influencia a precisão. Quanto maior a distância e menor a potência do auxílio VOR ou VOR/DME, menor será a precisão das radiais recebidas. Os equipamentos VOR são classificados em 3 tipos, conforme mostra a Figura 2: *terminal*, *low altitude service volume* e *high altitude service volume*.

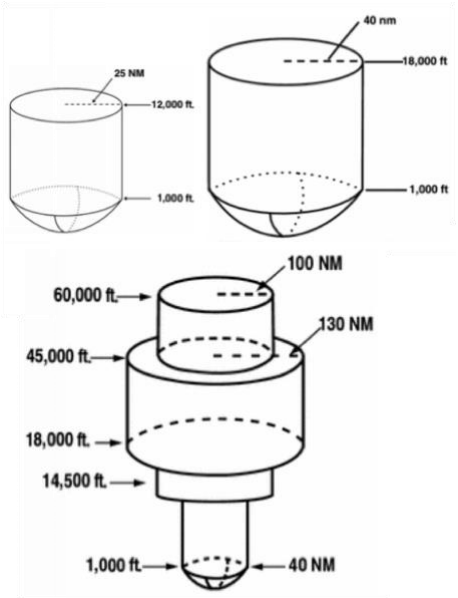


Figura 2: Alcance dos VORs Terminal, Low e High Altitude Service Volume (da esquerda para a direita, de cima para baixo). Fonte: Jeppesen (2013).

O equipamento receptor a bordo da aeronave também pode influenciar na qualidade da navegação. O regulamento brasileiro de aviação civil (ANAC, 2011) que regulamenta a operação das aeronaves da aviação geral e aviação comercial (entenda-se transporte aéreo público privado e comercial, respectivamente) prevê inspeções mensais de manutenção dos receptores VOR a fim de verificar sua qualidade. A própria regra permite variações máximas de precisão devido às limitações do próprio tipo de navegação, sendo um dos fatores contribuintes às dispersões horizontais quando as aeronaves estiverem voando com base nesse auxílio. A Figura 3 apresenta a imagem radar de uma área de controle terminal onde eram executadas chegadas e saídas por instrumentos convencionais. Isolando-se as vetorações radar, é possível observar dispersões significativas nas trajetórias horizontais das aeronaves.

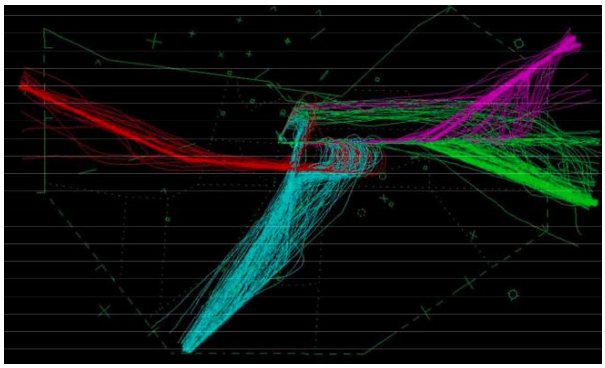


Figura 3: Trajetórias executadas em navegação convencional dentro de uma TMA. Fonte: Sprong K. et al (2005).

A fim de debater a possível dispersão lateral de uma aeronave voando sobre uma determinada radial, considere o seguinte modelo proposto por esse artigo:

$$LD(x) = f\{d(x), EE(x), XE(x), NE\} \quad (1)$$

Onde a dispersão lateral (*LD*) da aeronave *x* depende da sua distância (*d)* em relação ao auxílio de navegação VOR, do erro do equipamento (*EE)* a bordo da aeronave, do erro de execução do voo sobre a radial (*XE*) e do erro do auxílio de navegação no solo (*NE*).

Supondo que o erro de execução do voo (*XE*) sobre a radial é nulo, ou seja, a aeronave está exatamente sobre a radial pretendida e que o erro do auxílio de navegação é desconhecido, sendo considerado desprezível, simplificamos o modelo (1) da seguinte maneira:

$$LD(x) = f\{d(x), EE(x)\} \quad (2)$$

Representando o erro do equipamento a bordo da aeronave pelo símbolo θ, transformamos o modelo (2) na seguinte fórmula:

$$LD(x) = d(x) \times \tan\theta \quad (3)$$

Onde a distancia lateral em milhas náuticas da aeronave *x* é resultado da sua distância do auxílio de navegação multiplicado pela tangente do ângulo do erro

conhecido do equipamento, registrado no momento da verificação mensal.

Para exemplificar o que uma imprecisão do equipamento de navegação representa à dispersão lateral no momento da execução da navegação, vamos supor duas aeronaves *x* e *y* executando a mesma rota, em momentos diferentes, definida pela radial *RDL X*. Quando a 15 milhas náuticas (*Fix 1*) do auxílio de navegação *VOR X* e cada qual com erro (θ) de -1° e 4° em seu equipamento de navegação, respectivamente, através da fórmula (3) os desvios laterais serão 0,26 e 1,05 milhas náuticas (Figura 4).

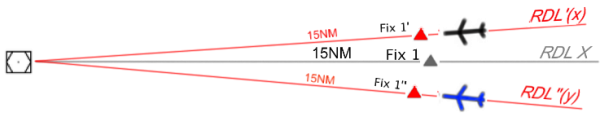


Figura 4: Dispersão das trajetórias executadas das aeronaves x e y. Fonte: Autor.

2.3. Princípios e Performance da Navegação de Área

A navegação de área (*area navigation*), também conhecida pela sigla RNAV, é o tipo de navegação que dá à aeronave a capacidade de voar ponto-a-ponto, através de coordenadas geográficas, sem a necessidade de sobrevoar, aproximar ou afastar de uma determinada estação no solo, conforme Figura 5. Ela somente é possível quando a aeronave possuir a bordo um equipamento que tenha capacidade de calcular sua posição atual, através da informação de sensores específicos, e de traçar o rumo a ser voado para uma determinada posição.

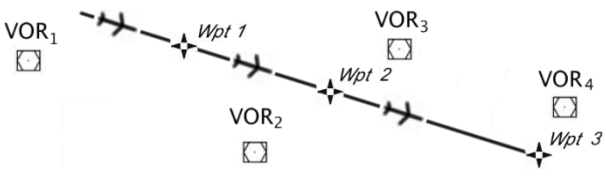


Figura 5: Navegação RNAV caracterizada por rotas diretas através de *waypoints*. Fonte: Autor.

Inicialmente, para os equipamentos calcularem suas posições geográficas e possibilitarem a navegação RNAV eles utilizavam obrigatoriamente estações no solo (VORs), no caso do *course-line computer* (CLC), ou estações específicas, no caso do LORAN. A sua evolução foi marcada pela introdução da navegação inercial e por satélite (GPS), não dependendo mais de estações no solo para navegar. Enquanto a primeira calcula precisamente qualquer deslocamento por meio de aceleração tridimensional a partir de um ponto inicial informado pelo piloto (durante o processo de alinhamento antes de iniciar o voo), a segunda utiliza sinais de satélite para determinar sua posição. O GPS, *Global Position System*, foi o programa de navegação por satélite desenvolvido na década de 70 pelos Estados Unidos da América (EUA) o qual se baseia única e exclusivamente na constelação de satélite norte americana. Com o desenvolvimento de programas similares por outros países ou continentes, tal como Rússia, China, Índia e Europa, criou-se a possibilidade de integração das constelações tornando o sistema mais confiável, contínuo e preciso. A OACI define essa integração pela sigla GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Atualmente, os equipamentos RNAV utilizados tanto na aviação geral quanto na aviação comercial são classificados em autônomos (*stand-alone*) ou multi-sensores (*multi-sensors*) (OACI, 2008). Isso significa que equipamentos autônomos são os que têm capacidade de calcular a sua posição com base em um único sensor, normalmente o GNSS. Já os multi-sensores, como o próprio nome diz, utilizam um ou mais sensores para definir sua posição, normalmente o GNSS, inercial e rádio (DME/DME e VOR/DME). Quando um equipamento RNAV autônomo perde sua fonte de informação para cálculo de posição, o piloto deve reverter seu voo para a navegação convencional. Já o multi-sensor atua de maneira diferente. Ao perder a fonte de informação atual utilizada para cálculo de sua posição, o equipamento passa imediatamente a outra fonte mais precisa disponível e assim por diante. Neste caso, o piloto somente reverte à navegação convencional se perder todos os sensores ou se a solução de precisão do cálculo está com degradação de performance além da permitida para a fase de voo.

Para que um equipamento RNAV trabalhe com diversos sensores e tenha a capacidade de calcular sua posição utilizando o mais preciso, é necessário que o mesma tenha como base um computador de gerenciamento de voo, denominado *Flight Management Computer* (FMC). Quando o FMC tem a atribuição de gerenciar a navegação da aeronave e adicionalmente informações de outros sistemas, tais como combustível, grupo motopropulsor, piloto automático, entre outros, a esta integração dá-se o nome de sistema de gerenciamento de voo ou *Flight Management System* (FMS). O objetivo primário do FMS é gerenciar as informações de voo de maneira a tornar a operação mais econômica, eficiente e, ao mesmo tempo, diminuir a carga de trabalho dos pilotos.

Como a navegação RNAV é definida a partir de um cálculo de posição proveniente de um ou mais sensores, a posição atual da aeronave é circunstancial pois possui um acúmulo de erros definido como TSE (*total system error*) (Figura 6). Desagregado, o erro total é a soma do NSE (*navigation system error*), FTE (*flight technical error*) e PDE (*path definition error*). Primeiramente, a rota a ser voada é definida pelo sistema de rotas publicadas e presentes nas carta aeronáuticas aplicáveis. Ao equipamento de navegação acessar sua base de dados, ele apresenta ao piloto a rota definida, a qual já pode possuir o primeiro erro (PDE). A qualidade do cálculo de navegação determina a dimensão do PDE. Ao se realizar o voo sobre a rota definida, cria-se a possibilidade do erro técnico de execução (FTE), pois ele é o resultado de qualquer desvio da posição da aeronave em relação à linha a ser voada. Porém, a posição estimada pode ainda não ser a posição real da aeronave por existir a possibilidade do último erro, denominado erro do sistema de navegação (NSE). Com exceção do NSE, o FTE e PDE pode ser controlado e monitorado pelo piloto, respectivamente.

O controle do FTE é feito pela execução do voo em relação a rota voada, observada visualmente no *display* de mapa e/ou informada pelo equipamento de navegação. Ele representa a distância lateral da rota gerada, conhecida como *cross-track*. Já o PDE é monitorado diretamente no equipamento de navegação, sendo resultado da qualidade do cálculo de posição. Por exemplo, se o equipamento for multi-sensor utilizando o sensor GNSS, uma avaliação da qualidade dos sinais dos satélites vai determinar o valor apresentado ao piloto. Caso o cálculo utilize o sensor inercial, a avaliação agora irá considerar o tempo transcorrido desde o último alinhamento da aeronave em solo, pois o sistema é susceptível a erros cumulativos. Essa informação pode vir em diferentes formatos dependendo do equipamento.

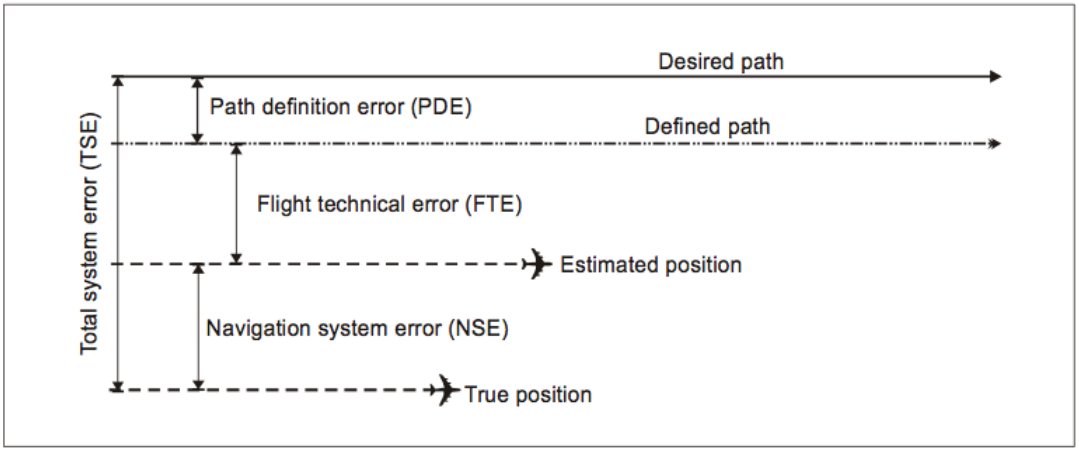


Figura 6: Erros do cálculo de posição do sistema RNAV. Fonte: OACI (2008).

Portanto, a navegação RNAV, pelo fato de não depender do voo sobre uma radial ou marcação de uma auxílio de navegação no solo, define o posicionamento espacial da

aeronave e não mais somente lateral. Isso significa que o erro agora pode ser tanto lateral como longitudinal. Assim, o monitoramento da qualidade da navegação é importante pois além de existir restrições máximas para determinada rota, o erro longitudinal irá afetar a navegação vertical calculada pelo FMS.

Com base na Figura 6, podemos definir a seguinte fórmula:

$$TSE = PDE + FTE + NSE \quad (4)$$

Na prática, pelo fato do *NSE* estar presente no sistema de navegação e não poder ser monitorado ou controlado, ou seja, é desconhecido, podemos simplificar a fórmula (4) em:

$$EP = PDE + FTE \quad (5)$$

Onde a posição estimada (EP) apresentada na Figura 6 é resultado da soma dos erros de definição da rota e técnico do voo.

Pelo fato do cálculo de posição ser circunstancial, a precisão da navegação pode ser mais ou menos precisa que a navegação convencional, porém, possui um potencial de qualidade infinitamente maior. O resultado é a menor dispersão das rotas executadas pelas aeronaves voando com base em equipamentos RNAV observada na Figura 7. Isso permite que a estrutura de rotas RNAV seja planejada para o uso mais eficiente do espaço aéreo por simplesmente utilizar rotas mais estreitas e próximas umas das outras.

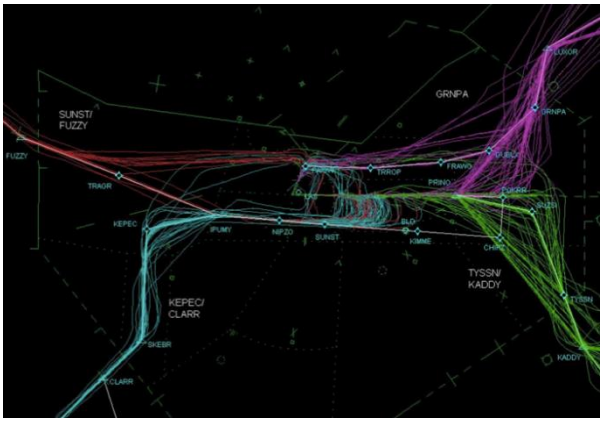


Figura 7: Trajetórias executadas em navegação RNAV dentro de uma TMA. Fonte: Sprong K. et al (2005).

3. A NAVEGAÇÃO BASEADA EM PERFORMANCE EM TMA

3.1. O PBN e os Requisitos de Equipamento em uma TMA

A navegação baseada em performance ou *performance based navigation* (PBN) é um programa da OACI que recomenda e orienta os Estados consignatários a explorarem a navegação de área a fim de permitir um maior volume de tráfego aéreo sem detrimento da segurança operacional do sistema. Ele estabelece os requisitos e as especificações de navegação, em termos de disponibilidade, continuidade, integridade e precisão, para todas as etapas do voo (em rota, área terminal e aproximação). A fase em rota se divide em duas, oceânica/remota e continental, não sendo tratada por esse artigo. Igualmente, não é tratada a fase aproximação, a qual se divide em procedimentos de não precisão com e sem rampa vertical baseados em sensor GNSS.

O termo disponibilidade se refere, como o próprio nome diz, à opção que o equipamento a bordo tem em utilizar um determinado sensor para cálculo de posição. O termo continuidade se refere à disponibilidade do sensor durante o período de tempo necessário a sua utilização. O terceiro, integridade, se refere à validade ou qualidade da informação recebida por aquele sensor, a qual é de fundamental importância e atinge diretamente o quarto e último termo, precisão.

A área de controle terminal (TMA), objetivo do artigo, pode possuir dois tipos de especificação de navegação: RNAV 1 ou RNP 1. Ambas são tratadas na seção 3.2, porém antes é necessário entender as diferenças de RNAV e RNP. As duas nomenclaturas dizem respeito não só aos requisitos de equipamento exigido para o espaço aéreo. Enquanto a sigla RNAV em uma especificação de navegação informa que o equipamento a bordo da aeronave para navegar na rota deve ser, no mínimo, do tipo RNAV, a sigla RNP informa que este equipamento deve ser do tipo RNP. Um equipamento RNP é um equipamento RNAV com uma capacidade a mais, a de monitoramento e alerta. Portanto, uma TMA que possui rotas de chegada e saída de navegação de área (RNAV) pode suportar aeronaves tanto com equipamentos de navegação RNAV quanto RNP.

3.2. A TMA RNAV

Como já mencionado, em uma TMA é possível encontrar rotas de navegação de área RNAV 1 e/ou RNP 1. Ambas possuem a mesma exigência de performance, 1 milha náutica máxima de precisão lateral de navegação da aeronave em 95% do tempo voado. Qualquer valor além disso torna a aeronave impossibilitada em manter a rota determinada. Uma chegada ou saída RNAV 1 ou RNP 1 tem espessura de 1 milha náutica para cada lado do eixo da rota. Isso permite desenvolver rotas em uma TMA separadas lateralmente em 7 milhas náuticas entre eixos (OACI, 2007).

A escolha da especificação RNAV 1 ou RNP 1 está ligada diretamente a característica e limitação da TMA em termos do serviço de tráfego aéreo prestado. Caso haja nessa área restrições quanto à prestação de vigilância radar por limitações de terreno ou por simplesmente não haver cobertura radar, a OACI recomenda o uso da especificação RNP. Isso é devido ao monitoramento e alerta da performance de navegação, pois no caso de haver uma degradação no cálculo de posição acima do previsto o equipamento irá alertar o piloto.

4. CONCLUSÃO: OS BENEFÍCIOS DA TMA RNAV

Os benefícios de uma terminal RNAV (Robinson, 2002) podem ser explorados tanto do lado do serviço de tráfego aéreo quanto do lado do operador aéreo. Como a navegação de área permite a configuração de rotas mais diretas e mais próximas umas das outras, é possível configurar a TMA com chegadas e saídas RNAV ou RNP mais curtas e com menos restrições verticais. Sendo as separações laterais menores, é possível também aumentar a própria capacidade do sistema em absorver maior volume de tráfego aéreo. A existência do número de auxílios à navegação no solo pode ser reduzida, respeitando certos critérios, permitindo uma menor necessidade de infraestrutura e seus custos associados. A queda no nível de utilização da frequência de comunicação entre controlador e piloto e a capacidade de desenvolver procedimentos de abatimento de ruído mais eficazes são outros benefícios.

Para os operadores, os benefícios estão relacionados ao custos, pois rotas mais diretas permitem tempos de deslocamentos mais curtos e, consequentemente, menores consumos de combustível e tempo de uso da aeronave. A economia de combustível não está somente atrelada ao tempo de voo, mas também à execução de descidas e subidas contínuas sem a necessidade de nivelamentos intermediários. Às descidas contínuas dá-se o nome de CDAs (*continuous descent approaches*) e caracterizam-se pela definição do ponto de início de descida, no nível de cruzeiro, a partir do qual a aeronave utilizará regimes de motores reduzidos até a sua configuração e estabilização para a aproximação e pouso. Já as subidas contínuas permitem atingir os níveis de cruzeiro com maior rapidez onde os consumos de combustível são menores.

Porém, os benefícios para ambas as partes são somente atingidos quando os procedimentos RNAV são executados sem interrupções, tais como as ferramentas utilizadas pelos controladores de voo para garantir a separação entre as aeronaves (Ren, 2007). As ferramentas comumente utilizadas

são vetorações radar, restrições de velocidade (incrementos ou reduções), procedimentos de espera, mudança de chegadas, entre outros. Toda vez que uma mudança é solicitada ao piloto da aeronave pelo controlador de voo, o planejamento de voo do FMS é perdido. Portanto, ferramentas que possam suportar e auxiliar a tomada de decisão dos controladores de voo dentro de uma TMA são fundamentais para se atingir o ganho econômico esperado pela operação RNAV.

5. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Aviação Civil. "RBHA 91 - Regras Gerais de Operação para Aeronaves Civis." Emd. 91-12, 2011.

JEPPESEN. General Airway Manual. 2013.

CHADE, J. "Aviação comercial completa cem anos". Agência Estado, 05 Janeiro 2014.

NOLAN, S. M. "Fundamentals of Air Traffic Contol". 5ª ed., 2011.

OACI. "Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services, Air Traffic Management". 15th ed. 2007.

OACI. "Doc 9613, Performance-Based Navigation (PBN) Manual". 3rd ed., 2008.

REN, L., CLARKE, J. B. "Separation Analysis Methodology for Designing Area Navigation Arrival Procedures". Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 30, No. 5 (2007), pp.1319-1330.

ROBINSON, S. M., DEARMON, J. S. "Benefits of RNAV Terminal Procedures: air/groung Communication Reduction and Airport Capacity Improvements [ATC]". Digital Avionics Systems Conference, 2002.

SPRONG, K. R., et al. "Improving Efficiency Through Terminal Area RNAV". 2005.