EQUAÇÕES DO CONCEITO CCO/CDO PARA MODELAGEM OTIMIZADA DO ESPAÇO AÉREO

Márcio Ney da Silva Duarte
Instituto do Controle do Espaço Aéreo-ICEA, São J. Campos-SP
Rua H26A, 120, Campus DCTA, 12-982317124, marcioneymnsd@gmail.com

RESUMO
A concepção de navegação aérea baseada em performance tem como objetivo estratégico aumentar a eficiência nas operações das aeronaves, aprimorar as técnicas das operações aéreas e reduzir o impacto ambiental. O conceito CCO/CDO (*Continuous Climb Operations/Continuous Descent Operations*) aplica técnicas de controle de tráfego aéreo e de voo nos procedimentos por instrumento de subida e descida através de fórmulas matemáticas conceituais a fim de otimizar essas operações. Contudo, as fórmulas usadas abordam um modelo mais amplo. Este artigo propõe a simplificação dessas fórmulas conceituais, através de premissas e técnicas CCO/CDO, em equações do conceito CDO e CCO que atendam as especificidades locais para a modelagem otimizada do espaço aéreo.
Palavras-Chave: CCO/CDO, Controle de Tráfego Aéreo, Procedimento por Instrumento, Modelagem, Espaço Aéreo.

ABSTRACT
The conception of performance-based air navigation's strategic objective of increasing the efficiency in the operations of aircraft, improve the techniques of air operations and reduce environmental impact. The CCO/CDO (Continuous Climb Operations/Continuous Descent Operations) concept apply flight and air traffic control techniques in ascent and descent instrument procedures through of conceptual mathematical formulas in order to optimize these operations. However, the formulas used address a broader model. This article proposes to simplify these conceptual formulas, through assumptions and techniques CCO/CDO in CDO and CCO equations that meet the local conditions for optimum modeling of airspace.
Keywords: CCO/CDO, Air Traffic Control, Instrument Procedure, Modeling, Airspace.

1. INTRODUÇÃO

A Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO), agência a qual o Brasil é membro efetivo, define os padrões de segurança, eficiência e regularidade da aviação, bem como para a proteção do ambiente da aviação. Em 2010, a ICAO trouxe o conceito de Operação de Descida Constante (CDO) e, a partir de 2013, o de Operação de Subida Constante (CCO), ambos parte complementar de um conceito mais abrangente que é a utilização da Navegação Baseada em Performance (PBN) na Modelagem do Espaço Aéreo.

O conceito CCO/CDO utilizado pelas aeronaves saindo ou chegando a um aeródromo engloba a compreensão do espaço aéreo, a representação da forma tridimensional (modelagem) de procedimento de voo por instrumento, as técnicas de Controle de Tráfego Aéreo (ATC) e o uso de técnicas de voo. Estas premissas tem o intuito de reduzir o impacto ambiental, com a diminuição de emissão de CO_2, e aumentar a eficiência nas operações das aeronaves, reduzindo o gasto de combustível sem, contudo, afetar os requisitos de segurança.

Atualmente, as implementações do PBN vêm encontrando dificuldades quanto as particularidades das regiões estudadas, principalmente quanto a continuidade nas áreas do espaço aéreo de aproximação e decolagem, onde se aplica o conceito CCO/CDO.

Para o conceito PBN o espaço aéreo pode ser visto como um espaço geométrico tridimensional onde se precisa elaborar sua estrutura a partir de objetivos específicos. Este detalhamento para o especifico inclui aspectos particulares locais através da organização do espaço aéreo e dos papéis a serem desempenhados pelos vários intervenientes e utilizadores do espaço aéreo (ICAO, 2013).

O conceito CDO é a concepção do espaço aéreo planejado para que a trajetória de descida tridimensional, orientada por um procedimento instrumento e vigiada pelo ATC, possibilite uma descida contínua, na maior extensão possível. Para isso, emprega potência mínima do motor e, de preferência, em uma configuração de baixo arrasto antes do FAF (Final Approach Fix). Prevê também uma redução no ruído, no consumo de combustível e nas emissões de gases poluentes, enquanto aumenta a estabilidade de voo e da previsibilidade de trajetória do voo para

controladores e pilotos (ICAO, 2010).

Para a implementação CDO em uma localidade é importante conhecer as características de voo, limitações e capacidades de aeronaves esperadas para realizar a CDO, bem como as características do espaço aéreo e rotas onde será utilizada (ICAO, 2010).

O conceito CCO é uma técnica de voo em que a taxa de subida ideal permite o menor consumo de combustível e, por isso, menor emissão de gases poluentes, trabalhando com impulso motor necessário que ganha maior eficiência à medida que ganha altitude. Para tal, a trajetória vertical ótima deve ser planejada para possibilitar uma subida sem parada, mesmo que a trajetória horizontal do voo seja maior, com o intuito de vencer restrições de terreno, sobrevoo de reservas ecológicas ou permitir a trajetória das descidas contínuas (ICAO, 2013).

As CCO e CDO assumem diferenças na aplicação do conceito e estruturação do espaço aéreo para alcançarem os mesmos objetivos estratégicos. Enquanto na CDO evita-se mudar a trajetória horizontal para atender restrições ATC, na CCO isso deve ser priorizado pelo mesmo motivo. Contudo, a CDO deve ser descontinuada em detrimento da CCO quando for mais apropriado (FANTONI; MÜLLER, 2014).

Na maioria das vezes, o voo nivelado é muito mais desnecessário na fase de descida do que na fase de subida. A tomada de decisão deverá levar em conta as características locais, a extensão do segmento nivelado e a importância do ruído nas áreas afetadas. Entretanto, tanto na CCO quanto na CDO as restrições de velocidade configuram limitação operacional mais grave para a eficiência do voo do que a própria restrição de manter um segmento em voo nivelado (ICAO, 2013).

O mais indicado é que as restrições de velocidade para fins de sequenciamento ou separação ATC sejam aplicadas na CDO a partir do nível mais alto possível nas fases de rota ou de chegada do voo para se conseguir a redução máxima em consumo de combustível, ruído e emissões (ICAO, 2010).

Na CDO o segmento de voo nivelado para desaceleração deve ser considerado a dez mil pés de altitude com extensão de cinco milhas náuticas, quando requerido pela performance da aeronave (PAMPLONA; FORTES; ALVES, 2014). Porém, em situações em que a localidade possui áreas com altitudes elevadas próximas a dez mil pés, os fatores consumo de combustível, ruído e emissões de gazes devem ser considerados. Portanto, aplica-se a desaceleração na fase em rota próxima ao início de descida, quando exigido pela performance da aeronave (ICAO, 2010).

Aeronaves que chegam e partem são geralmente interdependentes, e a construção do espaço aéreo de apoio CCO/CDO deve garantir que ambos os voos que chegam e partem possam alcançar perfis econômicos, que por sua vez, tornam a demanda de tráfego aéreo mais intensa. Para isso, é necessário o aperfeiçoamento de ferramentas de estudo e medição para a separação e sequenciamento, no Gerenciamento do Tráfego Aéreo (ATM), para melhorar ainda mais a disponibilidade CCO/CDO (ICAO, 2010).

Hoje, as modelagens utilizando o conceito CCO/CDO são aprimoradas pelo uso de simuladores do espaço aéreo em tempo acelerado ou tempo real, ou pela aplicação direta no espaço aéreo de baixa densidade (FORTES; PAMPLONA; MÜLLER, 2014). No caso do espaço aéreo de baixa densidade, muitas vezes não entram as especificidades estratégicas básicas do conceito CCO/CDO do espaço aéreo estudado, o que só vai sendo detectado após consequentes tentativas. Para se evitar isso, pretende-se aprimorar uma ferramenta de estudo e medição para modelagem preliminar do espaço aéreo que ajude a reunir os fatores específicos da localidade estudada referentes aos preceitos estratégicos do conceito CCO/CDO.

Este artigo tem por objetivo apresentar uma ferramenta de estudo através de equações de implementação do conceito CCO/CDO. Equações desenvolvidas a partir de fórmulas e premissas deste conceito para aplicá-lo em qualquer espaço aéreo designado de forma otimizada.

2. METODOLOGIA

Os Manuais CCO/CDO trazem premissas para o delineamento de chegadas e partidas considerando uma ampla gama de *mix* de aeronaves, trajetórias e níveis que são traduzidas em fórmulas para cálculo de janelas com limites superiores e inferiores. Estas janelas incluem a janela CDO e a janela CCO, descritas nas próximas seções.

2.1 Análise da Janela CDO

Com base nas premissas do conceito CDO, a fórmula do limite superior da janela considera a distância horizontal do FAF para o início da descida na rampa de 3,3 graus e a altitude do FAF. Já a fórmula do limite inferior da janela considera a distância do FAF para o início de descida na rampa de 2 graus, a soma dos segmentos de desaceleração nivelado ou angular raso (< 2º) e a altitude do FAF (ICAO, 2010). A partir disso, podemos analisar matematicamente que:

- a altitude, em pés, perdida na descida e a distância, em milhas náuticas (NM), percorrida na horizontal por uma aeronave, chamada de razão de descida ou velocidade vertical (pés/NM), de acordo com o ângulo dessa descida, determina o gradiente de descida ideal (**Figura 1**), a partir do qual se pode variar a distância ou altitude para se obter altitudes dos pontos intermediários ou segmentos de desaceleração; por isso, a razão de descida em pés por milha na fórmula é adequada para o cálculo do limite superior e inferior da janela CDO;
- a somatória dos produtos da distância do FAF ao início de descida da aeronave (subtraída das distâncias dos segmentos de desaceleração) pela razão de descida ótima, e das distâncias dos segmentos pela razão de descida rasa, somados a altitude do FAF, resulta em altitude de início da CDO (Fórmula 3).

A **Figura 1** é a representação gráfica de uma janela CDO (limite superior/inferior), onde:

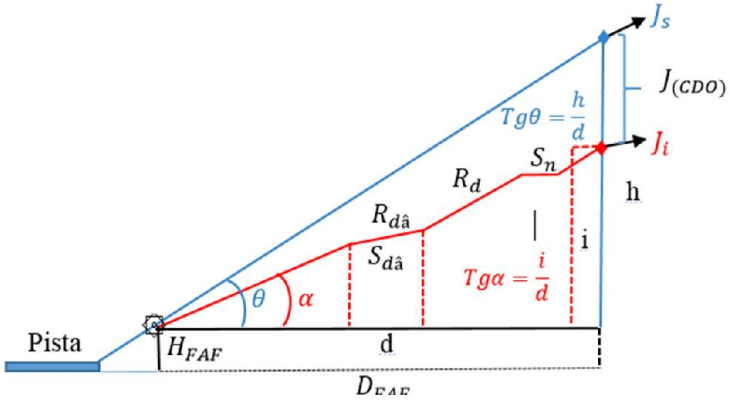


Figura 1: Limites superior e inferior da janela CDO. (Fonte: autor)

H_{FAF} é a altitude do FAF; D_{FAF} (d) é a distância horizontal do FAF para a Janela CDO; h é a altitude do limite superior da janela CDO; J_s é a rampa do limite superior da janela CDO; i é a altitude do limite inferior da janela CDO; J_i é a rampa do limite inferior da janela CDO; $S_{d\hat{a}}$ é o comprimento do segmento de desaceleração em ângulo raso; S_n é o comprimento do segmento de desaceleração nivelado; $R_{d\hat{a}}$ é a razão de descida aplicada no segmento de desaceleração em ângulo raso; e, R_d é a razão de descida ótima.

A componente de variação entre os ângulos α e θ corresponde ao intervalo da janela CDO de descida da aeronave que irá determinar a razão de descida ótima ou para desaceleração.

Usando a nomenclatura algébrica para facilitar o entendimento na interpretação das fórmulas, tomamos por base a **Figura 1**.

Sendo a janela CDO o intervalo de descida adotado para determinada localidade ou setor da localidade, o limite superior dessa janela descreve uma única rampa sem segmentos de desaceleração e pode ser determinado pela fórmula 1 (ICAO, 2010):

$$J_s = (D_{FAF}.R_d) + H_{FAF} \ (1)$$

Em que, J_s: altitude do limite superior da janela CDO em qualquer ponto da rampa distante horizontalmente do FAF [pés]; D_{FAF}: distância horizontal do FAF para a janela CDO [NM]; R_d: razão de descida com angulação ótima, que configura a rampa do limite superior da janela [pés/NM]; H_{FAF}: altitude do FAF [pés].

Para o limite inferior da janela CDO, que é a rampa mais baixa adotada para a janela CDO, considerado só o segmento de desaceleração em ângulo raso na fórmula 2 (ICAO 2010), teremos:

$$Ji = (S_{d\hat{a}}.R_{d\hat{a}}) + [(D_{FAF} - S_{d\hat{a}}).R_d] + H_{FAF} \ (2)$$

Em que, J_i: altitude do limite inferior da janela CDO em qualquer ponto da rampa distante horizontalmente do FAF [pés]; $S_{d\hat{a}}$: medida do segmento de desaceleração em ângulo raso [NM]; $R_{d\hat{a}}$: razão de descida aplicada no segmento de desaceleração com ângulo raso [pés/NM]; D_{FAF}: distância horizontal do FAF para a janela CDO [NM]; R_d: razão de descida com angulação ótima [pés/NM]; H_{FAF}: altitude do FAF [pés].

Caso a rampa do limite inferior tenha, além do $R_{d\hat{a}}$, um segmento de desaceleração nivelado, a medida desse seguimento entra na fórmula 3 (ICAO) subtraindo da D_{FAF}, como segue:

$$Ji = (S_{d\hat{a}}.R_{d\hat{a}}) + [(D_{FAF} - S_{d\hat{a}} - S_n).R_d] + H_{FAF} \ (3)$$

Em que, S_n: medida do segmento de desaceleração nivelado [NM].

2.2 Análise da Janela CCO

Na janela CCO o perfil vertical ótimo é representado por gradientes ideais de subida. Contudo, para se manter a trajetória vertical ótima numa rampa CCO, a trajetória horizontal da subida pode ser variável para atender a determinadas faixas de performances de aeronaves. Dessa forma, para se conseguir o perfil vertical ótimo de uma janela CCO devem ser criadas várias saídas CCO para uma mesma janela.

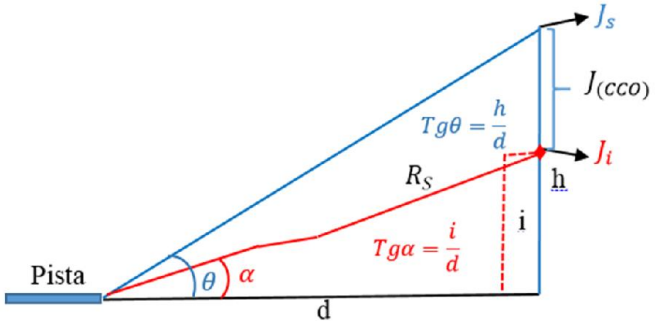


Figura 2: Limite superior e inferior da janela CCO. (Fonte: autor)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é a representação gráfica de uma janela CCO (limite superior/inferior), onde: d é a distância horizontal do final da pista até a janela CCO; R_s é a razão de subida ótima ou velocidade vertical; h é a altitude do limite superior da janela CCO; J_s é a rampa do limite superior da janela CCO; i é a altitude do limite inferior da janela CCO; J_i é a rampa do limite inferior da janela CCO. A componente de variação entre os ângulos α e θ corresponde ao intervalo da janela CCO que irá determinar o gradiente de subida ou ATC ($G\%$) da razão de subida aplicada.

A tangente do ângulo ($Tg\theta$) da rampa

considerada de subida de uma aeronave determina o gradiente de subida (G) através da razão entre a altitude (h) e a distância (d) atingidos no mesmo intervalo de tempo.

A altitude e a distância devem estar na mesma unidade de medida para se chegar ao gradiente, então:

$$Tg\theta = G = \frac{h}{d.6076} \quad (4)$$

Em que, G: gradiente de subida; h: altitude [pés]; d: distância [NM]; e 6076: medida aproximada de uma milha em pés.

Contudo, na aviação, as unidades de medida usadas são padronizadas. A distância percorrida é medida em milhas náuticas (NM); a altitude em pés (ft); a velocidade vertical ou razão de subida em pés por minuto (ft/min); e velocidade horizontal ou velocidade verdadeira em milhas náuticas por hora (NM/h) ou *knot* (kt).

Para se trabalhar com o gradiente em porcentagem e as unidades de medidas adotadas na aviação, temos:

$$h = R_s.t \quad (5)$$

$$d = \frac{V.t}{60} \quad (6)$$

Em que, R_s: razão de subida [pés/min]; V: velocidade verdadeira [kt]; t: tempo em minutos [min]; e 60: valor de conversão de hora em minutos.

Substituindo (5) e (6) em (4), teremos:

$$G\% = \frac{R_s}{V}.0{,}98 \quad (7)$$

Em que, $G\%$: gradiente de subida em porcentagem; R_s: razão de subida [pés/min]; V: velocidade verdadeira [kt]; e 0,98: constante de conversão de unidade.

Por definição, temos:

$$R_s = \frac{G\%.V}{0{,}98} \quad (8)$$

$$t = \frac{60d}{V} \quad (9)$$

Substituindo (8) e (9) em (7), teremos:

$$h = d.G\%.61{,}22 \quad (10)$$

Em que, 61,22: constante de conversão de unidades.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram reunidas as premissas do CCO/CDO em duas equações para equilibrar as diversas características de um espaço aéreo específico para modelagem da circulação de saída e chegada das aeronaves em uma área multiaeroportos.

3.1 Equação Geral do conceito CDO

A Equação Geral para o cálculo de altitudes do conceito CDO considera:

- a distância do FAF para a janela de descida (superior ou inferior) estudada para a localidade;
- os segmentos de desaceleração nivelados ou em descida com angulação rasa;
- a elevação do FAF em relação ao nível médio do mar (Altitude do FAF);
- a razão de descida;
- as premissas das fórmulas (1), (2) e (3) apresentadas.

Dessa forma, temos como resultado do estudo CDO, a partir da análise feita na seção 2.1, a equação geral do conceito CDO, que pode ser assim representada:

$$\boldsymbol{A_{(CDO)} = \left[\left(D_{FAF} - \sum_{i=1}^{n} S_{d_i}\right) R_d\right] + \left(\sum_{i=1}^{n} S_{d\hat{a}_i} . R_{d\hat{a}_i}\right) + H_{FAF}} \quad (11)$$

Em que, $A_{(CDO)}$: altitude do limite superior ou inferior da janela CDO calculada para a localidade [pés];

D_{FAF}: distância do FAF para a janela calculada para a localidade [NM];
S_{d_i}: somatória das medidas dos segmentos de desaceleração nivelado e/ou em descida em ângulo raso [NM];
R_d: Razão de descida com angulação ótima [pés/NM];
$S_{d\hat{a}_i}$: medidas dos seguimentos de desaceleração em ângulo raso [NM];
$R_{d\hat{a}_i}$: razão de descida aplicada nos seguimentos de desaceleração angular raso [pés/NM];
H_{FAF}: altitude do FAF [pés].

3.1.1 Aplicação da Equação Geral do Conceito CDO

A Equação Geral do conceito CDO permite calcular a extensão em altitude da camada vertical do espaço aéreo de uma área multiaeroportos através das altitudes dos limites superior e inferior, separadamente. Esse "túnel" no espaço aéreo permitirá as Operações de Descida Contínuas para o *mix* das aeronaves em chegada para um ou mais aeródromos da localidade estudada. A altitude do limite superior dependerá da maior performance dentro do *mix* de aeronaves que chegam, ou seja, do maior teto operacional de voo; ou ainda, por restrições do fluxo de controle do espaço aéreo. Já a altitude do limite inferior, obedecerá às especificidades da localidade, a partir de parâmetros como obstáculos de edificações e/ou relevo, espaço aéreo condicionado, sobrevoo de santuários ecológicos ou de preservação ambiental, zona de proteção de ruído, performance do *mix* de aeronaves e fluxo de controle de tráfego aéreo. A Equação Geral CDO contempla plenamente uma CDO de trajetória fechada, porém pode ser adaptada a uma CDO de trajetória aberta até o ponto de início da vetoração radar, ponto a partir do qual a CDO é aberta.

3.2 Equação Geral do Conceito CCO

A Equação Geral para o cálculo das altitudes do conceito CCO envolve:

- a altitudes dos limites de subida superior ou inferior;
- o gradiente de subida máximo ou mínimo aplicável às restrições da modelagem do espaço aéreo com subida contínua para o *mix* de aeronaves da localidade;
- a distância do final da pista de rolagem até a janela de subida.

Desse modo, apresentamos como resultado deste artigo a equação geral CCO a partir da análise feita na seção 2.2, que pode ser assim representada:

$$\boldsymbol{A_{(CCO)} = D . G\% . 61,22} \quad (12)$$

Em que, $A_{(CCO)}$: altitude superior ou inferior da janela CCO calculada para a localidade [pés]; D: distância do final da pista de rolagem até a janela de subida [NM]; $G\%$: gradiente de subida aplicável para a janela de subida [%]; 61,22: constante de conversão de unidades.

3.2.1 Aplicação da Equação Geral do Conceito CCO

A Equação Geral CCO possibilita calcular a extensão em altitude da camada vertical do espaço aéreo de uma área multiaeroportos através das janelas superior e inferior, separadamente. A Altitude do limite superior e inferior dependerá da performance do *mix* de aeronaves que voam na localidade, de obstáculos causados por edificações e/ou por relevo, de espaço aéreo condicionado, limitações de sobrevoo de santuários ecológicos ou de preservação ambiental, de zona de proteção de ruído e, por fim, do fluxo de

controle de tráfego aéreo. Estes fatores irão configurar como valores atribuídos à Equação Geral CCO para se conseguir outros parâmetros relacionados ao conceito CCO. A variação da Equação Geral, $G\% = \frac{J(cco)}{G\% .61,22}$, permite o cálculo de gradiente de subida e/ou ATC ideal para altitudes pré-estabelecidas à segurança da circulação aérea ou restrições outras na modelagem do espaço aéreo.

O manual de descida contínua da ICAO (Doc 9931) propõe o conceito CDO através de fórmulas amplas que representam a definição do conceito. Já o manual de subida contínua da ICAO (Doc 9993) traz apenas gráficos com sugestões de aplicação do conceito CCO. Este artigo traz as Equações Gerais dos conceitos CCO/CDO com as relações matemáticas necessárias para se trabalhar com os dados disponíveis e variáveis em função de diversos fatores específicos para uma localidade multiaeroportos. Sendo estas variáveis aplicadas com unidades de medidas padronizadas na aviação conforme seção 2.2.

A Equação Geral CCO/CDO trabalha dados disponíveis a partir de publicações aeronáuticas obtendo outros relacionados às nuances da localidade a partir de gradientes, janelas de altitude de descida e subida, razões de descida e subida, todos pré-estabelecidos de acordo com a necessidade e limitações da circulação aérea.

4. CONCLUSÕES

O cálculo de dados específicos de uma localidade multiaeroportos, através das Equações Gerais CCO/CDO, permite a modelagem preliminar de forma direta e simplificada da circulação aérea por especialistas em controle de tráfego aéreo da área terminal. Assim, os diversos fatores envolvidos no conceito CCO/CDO como a altitude/distância da janela de descida/subida, a razão de descida/subida ou gradiente de subida ou ATC necessários para ultrapassar determinada limitação, além das requeridas pela melhor performance para o *mix* de aeronaves, possibilitam a aplicação dos conceitos básicos CCO/CDO de forma equilibrada. Dessa forma, as especificidades do CCO/CDO pela utilização ponderada das Equações aqui apresentadas servirão de suporte na implantação do Conceito de Navegação Aérea Baseada em Performance-PBN. Portanto, trarão os resultados atualmente perseguidos pelos órgãos envolvidos na aviação local e mundial.

Agradecimentos

A Alexandre L. D. Bastos, por ter me possibilitado vislumbrar escrever sobre o tema aqui apresentado; a Rafael de A. Almeida e Lívia M. S. Cruz por ajudar no aprimoramento deste estudo e eliminar as inconsistências matemáticas. Por fim, ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo por propiciar ambiente de apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ICAO, *Internacional Civil Aviation Organization.* Doc 9931. *Continuous Descent Operations (CDO) Manual. 4th Edition*. Quebec, Canadá, 2010.

ICAO, *Internacional Civil Aviation Organization.* Doc 9993. *Continuous Climb Operations (CCO) Manual. 3th Edition*. Quebec, Canadá, 2013.

FANTONI, F. L.; MÜLLER, C. "Evolução da Área de Controle Terminal (TMA) para a Navegação RNAV". Aerial Transportation Symposium, 2014, São Paulo. *Annals of the XIII SITRAER*. São Paulo: E-Papers, 2014. v. 1. p. 123.

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". Aerial Transportation Symposium, 2014, São Paulo. *Annals of the XIII SITRAER*. São Paulo: E-Papers, 2014. v. 1. p. 36-39.

FORTES, J. L. C.; PAMPLONA, D. A.; MÜLLER, C. "Uso da Programação Linear Inteira como Ferramenta de Planejamento no Gerenciamento de Tráfego Aéreo". Aerial Transportation Symposium, 2014, São Paulo. *Annals of the XIII SITRAER*. São Paulo: E-Papers, 2014. v. 1. p. 8.