AUMENTO DA CAPACIDADE DE PISTAS PARALELAS E PRÓXIMAS: UM ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS

Rafael de Araújo Almeida
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50
Vila das Acácias – 12.228-900
São José dos Campos, SP – Brasil
Telefone: + 55 12 3945-9352 / e-mail: raaralmeida@gmail.com

Carlos Müller
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50
Vila das Acácias – 12.228-900
São José dos Campos, SP – Brasil
Telefone: + 55 12 3947-6834 / e-mail: muller@ita.br

RESUMO

A necessidade de aumentar a capacidade dos aeródromos congestionados pode ser suprida usando pistas paralelas de forma mais eficiente. O aumento da capacidade de pista é cercado por diversas limitações, principalmente, quando se trata de pistas paralelas e próximas devido a interferência da esteira de turbulência nas operações da pista adjacente. Por isso, o desafio de superar a restrição dos procedimentos de aproximação devido aos vórtices gerados pelas aeronaves motiva o estudo de alternativas para operações de pouso e decolagem na configuração de pista paralela e próxima de forma mais eficiente. Dessa forma, são analisadas capacidades de pista sob diversos cenários baseados em simulação computacional, em que o *software* a ser utilizado é o TAAM (*Total Airspace and Airport Modeller*). Os cenários propostos abrangem operações regulamentadas e outras inovadoras, tais como SGAP (*Staggered Approach Procedure*) e SEAP (*Steeper Approach Procedure*), de forma a permitir aproximações simultâneas ou reduções das separações longitudinais entre aeronaves nas aproximações para pouso. Tais procedimento podem fornecer um aumento de capacidade entre 1,5% a 45%.

Keywords: Pistas paralelas e próximas, capacidade de pista, SGAP, SEAP, simulação.

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de pista dos aeroportos está diretamente relacionada com a sua configuração, que, por sua vez, influencia o modo de operação no aeródromo. Basicamente, as configurações de pistas são simples, paralelas, quase paralelas ou cruzadas. No entanto, as pistas paralelas reduzem a quantidade de conflito nas trajetórias dos procedimentos de pouso e decolagem, possibilitando assim um fluxo mais eficiente das aeronaves. Por esse motivo pistas paralelas são largamente utilizadas nos principais aeroportos do mundo.

Dentre as pistas paralelas existe a seguinte classificação: as próximas, com espaçamento entre eixos menor do que 760 m (2500 ft); intermediárias, com espaçamento entre eixos de 760 m a 1310 m (2500 – 4300 ft); e distantes, com espaçamento entre eixos maior do que 1310 m (4300 ft) (Wald, Fay, & Gleich, 2010).

O aumento da capacidade de pista possui diversas limitações, principalmente, quando se trata de pistas paralelas e próximas devido a interferência da esteira de turbulência nas operações da pista adjacente. Essa limitação faz com que as pistas paralelas e próximas sejam utilizadas como se fossem uma única pista, e por isso sua capacidade é reduzida.

O desafio de superar a restrição dos procedimentos de aproximação devido aos vórtices gerados pelas aeronaves, motiva o estudo de alternativas para operações de pouso e decolagem na configuração de pista paralela e próxima de forma mais eficiente.

Por isso o estudo propõe a análise da capacidade de pista sob diversos cenários baseados em simulação computacional, em que o *software* a ser utilizado é o TAAM (*Total Airspace and Airport Modeller*). Os cenários propostos abrangem operações regulamentadas e outras inovadoras, tais como SGAP (*Staggered Approach Procedure*) e SEAP (*Steeper Approach Procedure*) de forma a permitir aproximações simultâneas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os procedimentos inovadores SGAP e o SEAP foram abordados por Janic (2008), o autor desenvolve um modelo da capacidade para esses dois novos procedimentos. Burnham, Hallock e Greene (2001) tratam do aumento de capacidade aeroportuária com procedimentos modificados de aproximação por instrumentos baseado em aproximação visual, em pistas paralelas e próximas.

Além desses, de forma complementar, o Subramanian (2002) apresenta uma metodologia para avaliação de capacidade utilizando simulação indicando ainda parâmetros de interesse para análise da eficiência da utilização de pistas.

2.1 Método de Simulação

Segundo Subramanian é determinada a capacidade por meio de uma curva de atraso, como mostra a Figura 1, onde para um atraso *x* a capacidade foi de λ_{Px}, que não é necessariamente o máximo rendimento da capacidade da configuração de pista.

Para um nível de atraso maior, a capacidade também será maior, no entanto, o aeroporto poderá aumentar essa capacidade somente até um nível máximo. Para cada movimento acima deste nível máximo, dentro do mesmo intervalo, o atraso será maior sem que ocorra acréscimo da capacidade do aeroporto. Esta situação é chamada de capacidade de saturação.

A capacidade de saturação é usada em três diferentes tipos de medidas de capacidade segundo cada tipo de restrições e limitações no aeródromo. Cada uma das restrições é apresentada a seguir:

a) Capacidade totalmente restrita (λ_{S1}) – leva em conta todas as restrições existentes no ambiente aeroportuário. É composta pela configuração completa do aeródromo (pátio, *taxiway*, pista, etc) mantendo suas restrições assim como fatores de procedimentos e tecnológicos do espaço aéreo (equipamentos e/ou auxílios existentes, tipo de operação, restrições de segurança, etc).

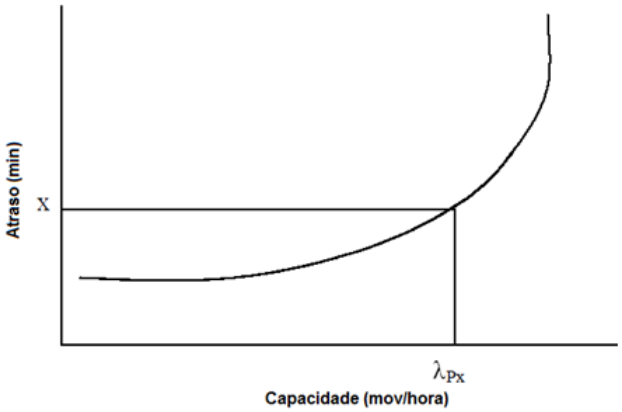


Figura 1 - Capacidade x Atraso

Fonte: (Subramanian, 2002)

b) Capacidade semi restrita (λ_{S2}) – é assumido que há melhorias tecnológicas e de procedimentos. Essas alterações ajudam na precisão dos equipamentos que auxiliam a separação padrão, aumentando assim a capacidade da pista. No entanto, ainda é considerada a configuração aeroportuária e suas restrições.

c) Capacidade irrestrita (λ_{SU}) – é assumido que não há restrições, com exceção das exigências de segurança padrão, incluindo normas de separação. Os principais pressupostos para determinar a medida de capacidade são: existência de saídas rápidas de pista suficiente para permitir a redução do tempo de ocupação da pista, ausência de restrições de *taxiway* e pátio.

3 OPERAÇÕES EM PISTAS PARALELAS E PRÓXIMAS

3.1 Operações visuais

Aproximações visuais simultâneas em pistas paralelas e próximas operam com uma abordagem diferente para evitar a esteira de turbulência, ao invés de requerer que a esteira de turbulência não alcance a pista paralela, o procedimento se vale do tempo que a esteira de turbulência leva para ser transportada até a pista paralela.

A Figura 2 apresenta aproximações simultâneas em pistas paralelas e próximas, que são realizadas em condições VMC[1], conforme demonstrado por Janic. Para permitir o procedimento de aproximação com segurança,

A esteira de turbulência gerada pela aeronave i não deve alcançar a trajetória da aproximação da aeronave k em um ponto à frente de k. A zona de proteção entre i e k (S_{ik}) representa a distância máxima entre as aeronaves i e k para que a esteira de turbulência de i não afete k.

O cálculo da zona de proteção (S_{ik}) é dado pela equação (1), onde d é a distância entre eixos das pistas, v_w é a velocidade de transporte da esteira de turbulência, que é influenciada pelo vento perpendicular à trajetória, e v_k é a velocidade da aeronave k.

As operações de decolagens simultâneas obedecem a mesma abordagem das aproximações visuais.

$$S_{ik} = (d/v_w) \cdot v_k \qquad (1)$$

3.2 Staggered Approach Procedure (SGAP)

Segundo Janic, o procedimento de aproximação decalada conhecido como SGAP (*Staggered Approach* Procedure) é capaz de reduzir a separação longitudinal entre algumas aeronaves e por conseguinte aumentar a capacidade de pista sob IMC (Janic, 2008). Esse tipo de procedimento foi testado e agora é implementado no aeroporto de Frankfurt (Reason Foundation, 2008).

O SGAP consiste em um perfil de aproximação para uma cabeceira deslocada mantendo a separação vertical, logo o perfil do procedimento SGAP será mais elevado do que o perfil convencional realizado na outra pista, como pode ser observado na Figura 2.

[1] Condições VMC de aeródromo significa que as condições mínimas meteorológicas são 1000 ft de teto e 5000 m de visibilidade, caso contrário as condições são instrumento (IMC).

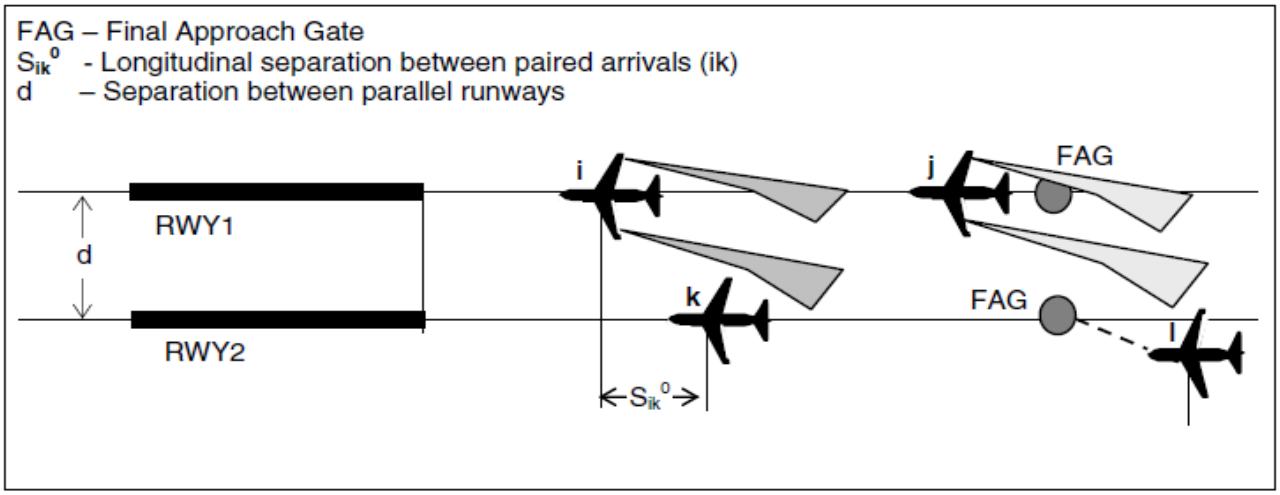


Figura 2 – Aproximações simultâneas em pistas paralelas e próximas em condições VMC

Fonte: (Janic, 2008)

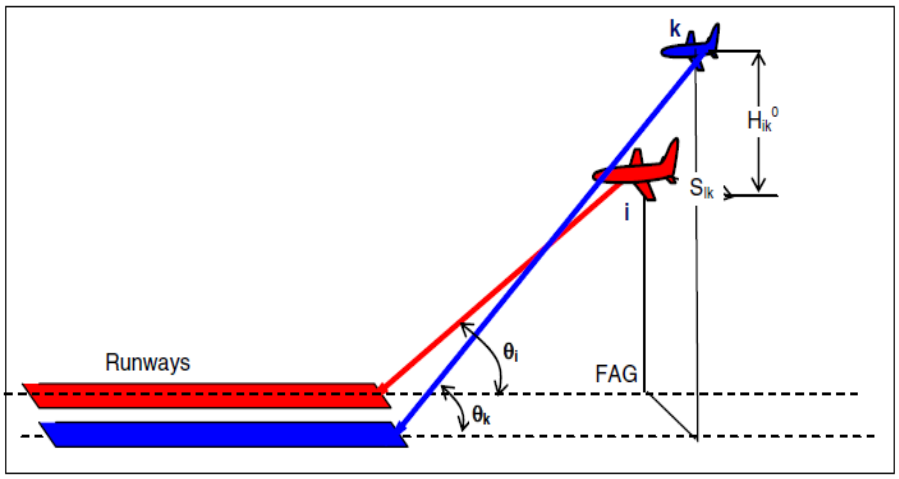


Figura 3 - Aproximação SEAP

Fonte: (Janic, 2008)

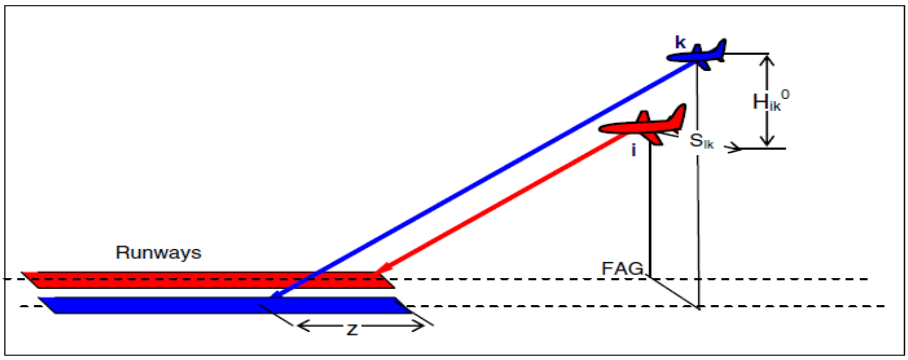


Figura 4 - Aproximação SGAP

Fonte: (Janic, 2008)

Para realizar o SGAP uma aeronave mais pesada e veloz utiliza a pista de pouso com cabeceira normal e a aeronave mais leve e lenta utiliza a outra pista de pouso que tem a cabeceira decalada. A Figura 3 ilustra o par de aeronaves i e k na aproximação, onde são estabilizadas quando a aeronave i passa pelo FAG (*Final Approach Gate*), esse par de aeronaves é separada verticalmente para aproximação em cabeceiras decaladas.

3.3 Steeper Approach Procedure (SEAP)

O procedimento de aproximação acentuado ou SEAP (*Steeper Approach Procedure*) consiste em um perfil de aproximação com um GS (*glide* slope) mais acentuado do que o convencional (3°) enquanto outra aeronave executa um perfil convencional na pista paralela adjacente. Segundo Janic, é um procedimento inovador com possível aplicação futura.

Esse procedimento pode ser executado sob IMC e é utilizado quando há a necessidade de evitar obstáculos em aproximação e quando não for possível deslocar a cabeceira.

A Figura 4 ilustra o procedimento para o par de aeronaves i e k, onde i é uma aeronave pesada e k uma aeronave menor. A aeronave i se aproxima com um ângulo θ_i e a aeronave k se aproxima com um ângulo θ_k, em que $\theta_i < \theta_k$. No FAG o par de aeronaves devem estar separadas verticalmente, no mínimo, pela separação padrão S_v^0. No entanto, essa separação vertical não exclui a necessidade de alguma separação longitudinal.

Esse procedimento não é padronizado pela ICAO, como uma aproximação convencional. Exige ainda certificação do procedimento para aeronaves, além de análises devido a complexidade do tráfego e consequente aumento da carga de trabalho do controlador.

4 ESTEIRA DE TURBULÊNCIA

Burnham, Hallock e Greene abordaram o problema da esteira de turbulência para pistas paralelas e próximas através da análise de dados coletados em aeroportos, esse estudo apresentou como resultados tempos de transporte da esteira de turbulência ((Burnham, Hallock, & Greene, 2001) (Burnham, Hallock, & Greene, 2002)).

Tabela 1 - Máxima separação longitudinal (em segundos) em função do espaçamento entre pistas e o vento perpendicular (crosswind)

Espaçamento entre pistas (ft)	Crosswind (nós)		
	6	10	20
750 – 1000	28 s	20 s	12 s
1000 – 1500	43 s	31 s	18 s
1500 – 2000	73 s	52 s	30 s
2000 – 2500	102 s	73 s	43 s

Fonte: (Burnham, Hallock, & Greene, 2001)

Do resultado de Burnham, Hallock e Greene tem-se a Tabela 1, que apresenta a máxima separação longitudinal em tempo entre aeronaves para uma aproximação lado-a-lado em função do espaçamento entre pistas e o *crosswind*.

Em função da esteira de turbulência determina-se ainda uma mínima separação horizontal entre aeronaves. A Tabela 2 apresenta essa separação devido a esteira de turbulência, em que as aeronaves são classificadas de acordo com o peso máximo de decolagem. As aeronaves se dividem em três categorias: as pesadas (peso máximo de decolagem $\geq$ 136 t); as médias (7 t $\leq$ PMD < 136 t); e por fim os leves (PMD < 7 t).

Tabela 2 - Mínimo de separação por esteira de turbulência em NM

		Aer seguidora		
		P	**M**	**L**
Aer líder	**P**	4 NM	5 NM	6 NM
	M	3 NM	3 NM	5 NM
	L	3 NM	3 NM	3 NM

Fonte: (ICAO, Internacional Civil Aviation Organization, 2007)

5 METODOLOGIA

Utilizando o simulador TAAM (*Total Airspace and Airport Modeller*) a metodologia empregada para análise da capacidade é aquela apresentada por Subramaniam (item 2.1), onde serão obtidas as capacidade de saturação pelo acréscimo de operações até o nível em que ocorre o aumento de atrasos sem o aumento da quantidade de movimentos no intervalo de uma hora.

Os acréscimos de aeronaves são realizados de forma a manter, o máximo possível, o mix da frota por categoria conforme os planos de voo base.

As capacidades obtidas são: a capacidade totalmente restrita (λ_{S1}), a capacidade semi restrita (λ_{S2}) e a capacidade irrestrita (λ_{SU}).

O TAAM é uma ferramenta de simulação computacional em tempo acelerado ou ainda um modelador de simulação de atraso. Essa ferramenta pode ser usada para compreender muitos tipos de problemas do aeroporto e do espaço aéreo, assim como simular impactos do presente e do futuro.

A versão do TAAM utilizada na simulação foi a V2013.3.0 Release 23, atualizada em 01 de outubro de 2013.

6 AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS

O Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos representa 9,11% dos movimentos da rede Infraero, ocupando o primeiro lugar dos aeroportos de maior movimento do Brasil (INFRAERO, 2013). Vale destacar que esse dado é referente a um período anterior às concessões aeroportuárias.

O aeródromo possui duas pistas paralelas e próximas, que são a 09R/27L e a outra 09L/27R. A distância entre eixos de pista é de 375 m, caracterizando-a como pistas paralelas e próximas. As cabeceiras 09R e 09L estão decaladas em 580 m, conforme ilustra a Figura 5.

A pista 09R/27L é utilizada apenas para pouso, enquanto a 09L/27R é utilizada apenas para decolagem. Sendo a frequência de uso das cabeceiras em torno de 80% nas cabeceiras 09 e 20% nas cabeceiras 27.



Figura 5 - Imagem de satélite de SBGR
Fonte: (Google Earth, 2012) (Almeida, 2012)

7 CENÁRIOS

Em cada cenário são avaliados três situações a fim de obter os parâmetros λ_{S1}, λ_{S2} e λ_{SU}. A Tabela 3 apresenta as restrições aplicadas em cada parâmetro.

Para o caso de separação horizontal para 3 NM é considerado ainda a separação por esteira de turbulência, ou seja, o que for mais restritivo.

Para cada saturação existe ainda o fator distância de captura, que define um ponto de referência no alinhamento da cabeceira na distância determinada.

Tabela 3 - Diferenças em cada parâmetro de saturação

Restrições	**λ_{S1}**	**λ_{S2}**	**λ_{SU}**
Físicas (taxiway, saídas rápidas, gate, etc)	Sim	Sim	Não
Separação radar	5 NM	3 NM	3 NM

Tal parâmetro indica que a partir daquela distância da cabeceira alguma ação está impedida de ocorrer, por exemplo, se uma aeronave em aproximação encontra-se a menos de 4 NM da cabeceira 09L nenhuma aeronave será autorizada a decolar até o controle do pouso da aeronave quando a distância de captura é maior que 4 NM.

No caso da capacidade de saturação 1 (λ_{S1}) a distância de captura é de 4 NM, para a capacidade de saturação 2 e 3 (λ_{S2} e λ_{SU}) a distância de captura é de 2,5 NM, que é o valor necessário para que as decolagem sejam efetuadas já que a separação mínima na aproximação é de 3 NM, e também é uma distância suficiente para que a decolagem tenha sido realizada até o toque da aeronave que pousa.

7.1 Cenário 1

O primeiro cenário é o base para os demais. Ele representa a dinâmica atual do aeródromo de Guarulhos na hora pico de um dia típico. Aqui não há nenhuma modificação operacional em relação ao procedimento real.

As operações estão em conformidade com os procedimentos em vigor no dia 15 de Dezembro de 2013.

7.2 Cenário 2

Este cenário representa a operação VMC. De maneira geral a operação visual proporciona a maior capacidade de pista possível.

O Aeroporto de Guarulhos não opera de forma diferenciada para condições visuais, o que ocasiona uma perda de eficiência da capacidade de pista nessas condições.

De acordo com a Equação (1) a separação máxima é de $S_{ik} = 31.v_k$, sabendo que o tempo de deslocamento da esteira de turbulência é de 31 s (crosswind de 10 nós) (ICEA, Instituto de Controle do Espaço Aéreo). Ou seja, quando a aeronave seguidora é uma leve (v ≈ 110 nós), média (v ≈ 140 nós) ou pesada (v ≈ 160 nós) (ICAO, Internacional Civil Aviation Organization, 2006) as respectivas separações máximas são 1,0 NM, 1,2 NM e 1,4 NM.

7.3 Cenário 3

Este cenário apresenta o primeiro procedimento inovador, o SGAP. O objetivo deste procedimento é reduzir a separação horizontal para certas sequência de aeronaves cuja esteira de turbulência exige separação maior do que 3 NM.

As sequências beneficiadas nesse procedimento seriam a P-L (Pesada-Leve), P-M (Pesada-Média) e M-L (media-Leve), que apresentam separações mínimas por esteira de turbulência de 6, 5 e 5 NM (Tabela 2). A sequência P-P não seria beneficiada, embora tenha a exigência de separação de 4 NM, a fim de garantir a segurança do procedimento baseado no desempenho da aeronave (Janic, 2008). Ou seja, não é recomendado que a aeronave pesada execute o perfil decalado de aproximação.

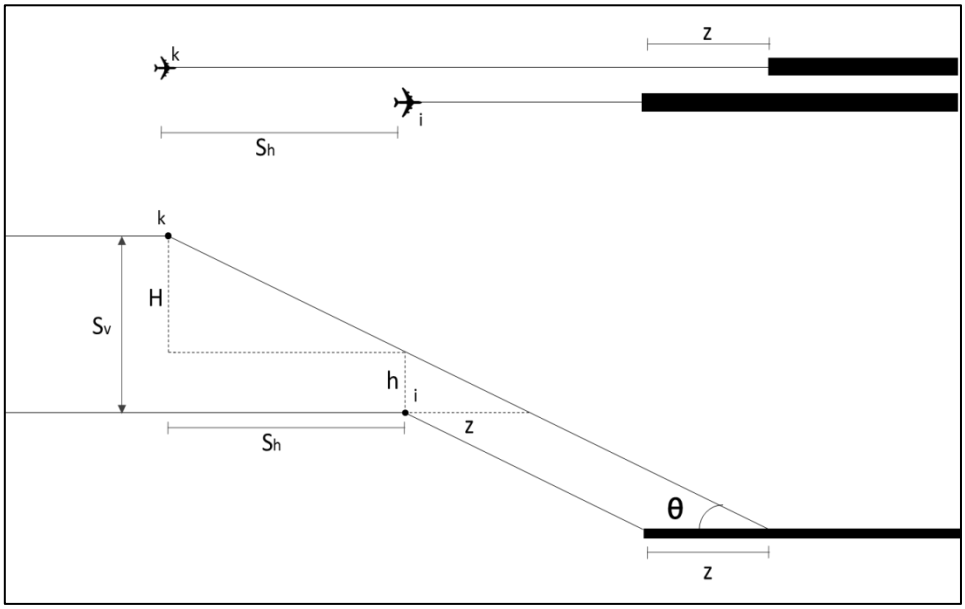


Figura 6 - Vista superior e de perfil do procedimento SGAP (sem escala)

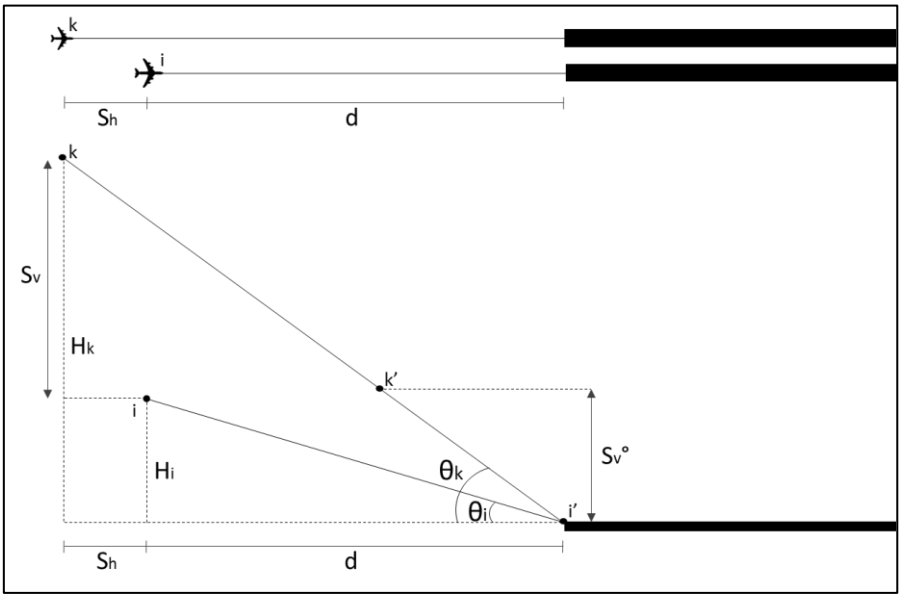


Figura 7 - Vista superior e de perfil do procedimento SEAP (sem escala)

A Figura 6 é apresentada a fim de auxiliar o cálculo da separação mínima possível entre aeronaves realizando o procedimento SGAP. A imagem apresenta a vista superior e de perfil dos procedimentos SGAP com aeronaves aproximando. O perfil do procedimento das aeronaves i e k possuem o ângulo de descida θ (*glide slope*) e decalagem de z. As aeronaves i e k devem ter separação vertical S_v e separação horizontal S_h.

A velocidade vertical de i (V_{vi}) deve ser maior ou igual a velocidade vertical de k (V_{vk}) para garantir que durante a descida das aeronaves a separação vertical (S_v) aumente ou permaneça constante a separação vertical mínima de 1000 ft. Como o *glide slope* é igual (θ) para os dois perfis, então a restrição será atendida se a velocidade de i (V_i) for maior ou igual a velocidade de k (V_k), ou seja, $V_i \geq V_k$.

Sabendo que a separação vertical irá aumentar, caso $V_i > V_k$, ou permanecer constante, caso $V_i = V_k$, a situação crítica em que a separação vertical será menor é no início do seguimento de descida para a aproximação final, conforme apresentado na Figura 6.

A fim de obter uma relação entre a separação vertical, a separação horizontal e a decalagem, as equações (2), (3) e (4) são apresentadas, resultando na equação (5). Essa relação é usada para determinar a separação horizontal necessária dada a decalagem ou determinar a decalagem dada a separação horizontal que se pretende empregar.

$$S_h = \frac{H}{\tan\theta} \qquad (2)$$

$$H = S_v - h \qquad (3)$$

$$h = z.\tan\theta \qquad (4)$$

$$\therefore\ S_h = \frac{S_v - z.\tan\theta}{\tan\theta} = \frac{S_v}{\tan\theta} - z \qquad (5)$$

Para o caso de Guarulhos o objetivo será determinar a separação horizontal para a decalagem existente de 580 m, que pela relação de S_h e z tem-se S_h = 5239,7 m (≈ 2,8 NM), adotando-se θ = 3° e S_v = 1000 ft. Da equação (4) obtêm-se ainda a diferença de altura (h) entre as trajetórias de descida de 30 m (≈ 100 ft). Com vistas esses resultados o valor adotado para a separação horizontal mínima no procedimento SGAP será de 3 NM.

7.4 Cenário 4

Este cenário apresenta o segundo procedimento inovador, o SEAP. O objetivo deste procedimento também é reduzir a separação horizontal para certas sequência de

aeronaves inclusive sequências cuja esteira de turbulência exige separação igual a 3 NM.

Nesse cenário considera-se que as cabeceiras 09L e 09R não estão decaladas a fim de simular o procedimento SEAP sem modificações.

A Figura 7 apresenta a vista superior e de perfil dos procedimentos SEAP com aeronaves aproximando, com o objetivo de auxiliar o cálculo da separação mínima horizontal. O perfil do procedimento das aeronaves i e k possuem o ângulo de descida θ_i e θ_k, onde $\theta_i < \theta_k$. As aeronaves i e k devem ter, inicialmente, separação vertical S_v e separação horizontal S_h. A distância entre o FAG e a cabeceira de pista é dado por d.

A velocidade da aeronave no perfil mais baixo deve ser maior ou igual do que a velocidade da aeronave no perfil mais alto ($V_i \geq V_k$) para que a separação horizontal aumente após o FAG.

Em virtude dos ângulos e velocidades diferentes para os dois perfis de aproximação, a velocidade vertical da aeronave seguidora poderá ser maior do que a líder, logo a separação vertical poderá reduzir durante a execução do procedimento SEAP. Com base nesse fato é inferido que a situação crítica ocorre quando a aeronave i realiza o toque na pista (posição indicada por i') estando a aeronave k com a menor separação vertical (posição indicada por k').

As equações de (6) a (14) são apresentadas a fim de obter uma relação entre os parâmetros do procedimento SEAP, que são a separação vertical, a separação horizontal, os ângulos de aproximação, a distância do FAG à cabeceira e as velocidades das aeronaves.

$$V_{vi} = V_i . \tan\theta_i \qquad (6)$$

$$V_{vk} = V_k . \tan\theta_k \qquad (7)$$

$$V_{rel} = V_{vk} - V_{vi} = \\ = V_k . \tan\theta_k - V_i . \tan\theta_i \qquad (8)$$

$$t = \frac{d}{V_i} \qquad (9)$$

$$D_v = V_{rel} . t = \\ = (V_k . \tan\theta_k - V_i . \tan\theta_i) . t \qquad (10)$$

As equações (6) e (7) representam as velocidades verticais das aeronaves, e a equação (8) por sua vez a velocidade vertical relativa entre as aeronaves. Essa velocidade relativa e o tempo que a aeronave i leva para alcançar a cabeceira determinará o deslocamento vertical relativo (D_v) da aeronave k em relação a i, conforme mostra a equação (10).

$$S_v = D_v + S_v^0 \qquad (11)$$

$$S_v = H_k - H_i \qquad (12)$$

$$H_i = d . \tan\theta_i \qquad (13)$$

$$H_k = (d + S_h) . \tan\theta_k \qquad (14)$$

A separação vertical no início do procedimento (S_v) deve ser igual a separação mínima vertical padrão (S_v^0) mais o deslocamento vertical relativo da aeronave k, conforme a equação (11). E pode ser representada ainda pela diferença entre as alturas iniciais das aeronaves, conforme mostra a equação (12). Por sua vez as alturas das aeronaves são representadas pelas equações (13) e (14).

$$S_h = \frac{S_v^0}{\tan\theta_k} + d . \left(\frac{V_k}{V_i} - 1\right) \qquad (15)$$

Realizando a álgebra necessária obtêm-se a relação apresentada na equação (15). Essa relação é usada para determinar a separação horizontal necessária dado o ângulo do perfil mais elevado, a distância entre o FAG e a cabeceira da pista e as velocidades das aeronaves.

A relação dada pela equação (15) é válida se a velocidade vertical relativa é maior do que zero ($V_{rel} > 0$), ou seja, se separação vertical reduz durante o procedimento, caso contrário a separação horizontal não será necessária ($S_h = 0$). Ou ainda, se $V_{rel} > 0$, mas o resultado da separação horizontal for negativo, significa que não existe a necessidade dessa separação.

Para o caso de Guarulhos considera-se d = 12 NM, $\theta_i = 3°$, $\theta_k = 5°$ e velocidades de 110, 140 e 160 nós das aeronaves leves (L), médias (M) e pesadas (P), respectivamente

(ICAO, Internacional Civil Aviation Organization, 2006). Por fim, aplicando a equação (15) as sequências P-L, M-L, L-L, P-M e M-M tem-se as respectivas separações: zero, zero, 1,9 NM, 0,4 NM e 1,9 NM.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 apresenta os resultados dos três parâmetros de saturação.

Tabela 4 - Resultado das saturações

	λ_{S1}	λ_{S2}	λ_{SU}
Cenário 1	58	68	69
Cenário 2	77	91	100
Cenário 3	54	68	70
Cenário 4	57	74	84

Analisando os resultados, nota-se que:

- O cenário atual permite aumentar a capacidade de 58 para 68 movimentos por meio de melhorias tecnológicas e de treinamento que permitam reduzir as separações na aproximação para o mínimo da separação por esteira de turbulência, além da redução da distância de captura;
- O cenário com operações visuais apresenta o maior ganho de capacidade, permitindo um aumento de quase 33%, mesmo que não ocorram mudanças físicas e/ou tecnológicas, ou ainda 45% de aumento se houver melhorias tecnológicas e físicas;
- O cenário 3 (SGAP) não apresenta ganhos consideráveis, com incremento de capacidade apenas para a situação irrestrita, representado que para esse tipo de operação as restrições físicas podem ser determinantes;
- Ainda no cenário 3, nota-se que tal procedimento favorece o ganho de capacidade quanto maior for o mix de aeronaves pesadas, situação em que a separação longitudinal será reduzida com maior frequência;
- Por fim o cenário 4, de procedimentos SEAP, não favorece o ganho de capacidade para a situação básica, ou seja, com as atuais restrições, no entanto, a partir do momento que são implementados tecnologias que permitam a redução da separação na aproximação para pouso ou reformas físicas o ganho chega a 28% e 45%, respectivamente;
- Os cenários 3 e 4 tornam-se viáveis se houver investimentos tecnológicos e/ou físicos, caso contrário a capacidade pode reduzir e ainda tornar o sistema de pistas mais ineficiente quando comparado as capacidades semi-restrita e irrestrita.

9 CONCLUSÃO

Esse artigo objetivou a análise da capacidade do sistema de pistas paralelas e próximas por serem um sistema que apresenta desafios à operação simultânea devido a dependência das pistas.

Foram abordadas três propostas para possibilitar operações simultâneas ou ainda a redução da separação longitudinal entre aeronaves para aproximação durante o pouso. A primeira foi a operação visual, a segunda foi a utilização do procedimento SGAP e a terceira foi a utilização do procedimentos SEAP.

Essas duas últimas propostas, SGAP e SEAP, visam manter a separação vertical mínima de tal forma que seja possível reduzir a separação longitudinal, podendo extinguir a necessidade de separação longitudinal para algumas sequências de aeronaves.

O método utilizado para analisar a capacidade foi através da simulação computacional, que possibilitou extrair parâmetros de saturação, tais como, saturação restrita, semi-restrita e irrestrita.

Analisando os parâmetros obtidos em cada cenário para os procedimentos propostos, incluindo ainda o cenário atual, verifica-se que o cenário atual é o que apresenta menor potencial de aumento de capacidade,

equivalente a 19% de incremento para o caso irrestrito.

Analisando a operação visual, nota-se que é a operação que possibilita maior ganho, 33% comparado ao cenário base, sem que ocorra nenhuma melhoria na estrutura física e tecnológica. Podendo aumentar ainda 72% no caso de melhorias tecnológicas e físicas, quando comparado a capacidade restrita atual e a irrestrita visual.

Quanto aos cenários de procedimentos inovadores, nota-se que em um primeiro momento não é vantajoso sua aplicação, isso porque a separação longitudinal é reduzida, mas as restrições que impedem os movimentos de decolagem ainda permanecem.

No entanto, quando ocorrem investimentos para sanar as restrições do aeródromo o procedimento se torna vantajoso em termos de capacidade. Salientando que esses procedimentos visam beneficiar aeródromos que apresentem um mix de aeronaves pesadas elevado, onde a separação longitudinal entre aeronaves torna-se maior do que 3 NM.

A carência desse artigo está na ausência de um estudo de segurança do procedimento, necessitando assim de pesquisas na área para testar e homologar o procedimento. Além da validação em simulação de tempo real com recursos humanos especializados em controle do espaço aéreo.

Por isso trabalhos futuros podem ser alvo de continuação da pesquisa, aqueles que abordam a segurança do procedimento, a viabilidade econômica para cada solução, além de estudos específicos de esteira de turbulência para Guarulhos quando focado em procedimentos visuais.

10 REFERÊNCIAS

Almeida, R. d. (2012). *Análise de alternativas para aumento da capacidade operacional do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos.* Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. (2009). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil - RBAC nº 154.*

Burnham, D. C., Hallock, J. N., & Greene, G. C. (2001). Increasing Airport Capacity with Modified IFR Approach Procedure for Close-Spaced Parallel Runways. *Air Traffic Quarterly, 9(1)*, 45-58.

Burnham, D. C., Hallock, J. N., & Greene, G. C. (2002). Wake Turbulence Limits on Paires Approaches to Parallel Runways. *Journal of Aircraft, 39, No. 4*, 630-637.

Google Earth. (2012). Acesso em 23 de outubro de 2012, disponível em Google Earth

ICAO, Internacional Civil Aviation Organization. (2004). *Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR) - doc 9643* (First ed.).

ICAO, Internacional Civil Aviation Organization. (2006). *Doc 8168 - Aircraft Operations* (5th ed., Vols. I - Flight Procedures).

ICAO, Internacional Civil Aviation Organization. (2007). *Doc 4444 - Air Traffic Management* (15th ed.).

ICAO, Internacional Civil Aviation Organization. (2009). *Annex 14 - Aerodromes* (5th ed., Vols. I - Aerodrome Design and Operations).

ICEA, Instituto de Controle do Espaço Aéreo. (s.d.). *Sistema de geração e disponibilização de informações climatológicas*. Acesso em 25 de Abril de 2014, disponível em Banco de dados climatológicos: http://clima.icea.gov.br/clima/RelVelDirVento_MesesSeguidos.php

INFRAERO. (2013). *Anuário Estatístico 2012.*

Janic, M. (2008). Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures. *Transportation Research Part C, 16*, pp. 704-730.

Reason Foundation. (2008). *Increasing Airport Capacity Without Increasing Airport Size.*

Subramanian, P. (2002). *A Simulation Study to Investigate Runway Capacity Using TAAM.* Daytona Beach, Florida: Embry-Riddle Aeronautical University.

Wald, A., Fay, C., & Gleich, R. (2010). *Introduction to Aviation Management.* LIT Verlag Münster.