METHODOLOGY ANALYSYS FOR AIRPORT MANAGEMENT OF RUNWAY CAPACITY INCREASE

Marcela Coelho Lopes
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias, 12228-900
São José dos Campos/SP – Brasil, lopes.marcelac@gmail.com

Carlos Müller
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias, 12228-900
São José dos Campos/SP – Brasil, muller@ita.br

Claudio Jorge de Pinto Alves
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias, 12228-900
São José dos Campos/SP – Brasil, claudioj@ita.br

Mauro Caetano
Universidade Federal de Goiás
Engenharia de Transportes, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)
MTOW – Grupo de Pesquisa Inovações em Transporte Aéreo
Av. Esperança, s/n, 74690-900, Goiânia/GO – Brasil, maurocaetano1912@gmail.com

ABSTRACT

Airport infrastructure capacity becomes a bottleneck when there is a significant increase on the airport demand. Among the different elements that are part of airport infrastructure, runways for arrivals and departures can significantly represent the number of operations performed or even lead to delayed flights. In this sense, this paper aims to propose a methodology which assists airport managers on decision making related airport runway system, focusing on runway system capacity increase. Through a review of existing methods concerning airport runway capacity proposed on literature, the CONOPS methodology has been used as a systematic process of analysis. The results show the existing tools and a gap left in the literature, concluding with a proposed methodology which aims airport runway capacity increase by reducing congestion and delay.

Keywords: Airport, Capacity, CONOPS, Management, Runway.

1. INTRODUÇÃO

A identificação de diferentes variáveis e melhorias operacionais relacionadas à capacidade aeroportuária, focada no subsistema de pistas de pouso e decolagem, torna-se necessária para o melhor gerenciamento aeroportuário.

Devido à saturação de componentes operacionais dentro do contexto aeroportuário, diferentes gargalos podem ser identificados, como atrasos e cancelamentos de voo, por isso há uma busca constante por procedimentos operacionais que resultem no aumento da capacidade e redução de atrasos e cancelamentos em operações de pousos e decolagens.

No Brasil, segundo dados da ANAC (2016), em dezembro de 2015, do total de voos programados, houve, aproximadamente, 11% de cancelamento e 11% de atrasos superiores a 30 minutos, sendo desses 11%, quase 3% dos voos foram registrados com mais de uma hora de atraso em relação ao programado. Conforme ANAC (2015), durante o ano de 2014, com exceção do mês de julho (período em que o Brasil sediava a Copa do Mundo de Futebol), 10,1% do total dos voos programados foram cancelados, 8,2% do total atrasaram mais de trinta minutos e 3,2% do total apresentaram atrasos de mais de uma hora. Com isso, surge a preocupação e necessidade da análise das causas para esses atrasos.

Juntamente com as causas dos atrasos deve-se analisar a capacidade dos subsistemas aeroportuários para verificar se melhorias operacionais nos subsistemas auxiliam na redução dos gargalos. Observa-se na literatura diferentes estudos sobre o conteúdo. Muitos autores propõem métodos de aumento da capacidade de pistas de aeroportos, como Janic (2008), Bubalo e Daduna (2012) e Moris et al. (2013), porém, há uma lacuna no que diz respeito à proposição de uma metodologia ou conjunto de ferramentas que auxiliem o operador aeroportuário na tomada de decisão referente ao uso de pistas. Sendo assim, o foco do presente estudo consiste na identificação de modelos que auxiliem na melhor utilização do subsistema de pistas de pousos e decolagens de aeronaves em aeroportos.

Com isso, o artigo é dividido da seguinte forma: discute-se a revisão da literatura na Seção 2, onde são abordados conceitos de sistemas aeroportuários, complementando a motivação apresentada na introdução, além dos conceitos de capacidade do conjunto de pistas de pousos e decolagens de aeronaves e atrasos. Na Seção 3 é apresentado o método utilizado, que é aplicado na Seção 4 apresentando os modelos de aumento de capacidade e redução de atrasos. Ao final, a Seção 5 conta com as considerações finais do artigo.

2. SISTEMAS AEROPORTUÁRIOS

A eficiência é buscada em todos os aspectos e componentes aeroportuários, mas, como mencionado por Curi, Gitto e Mancuso (2011), medir eficiência consiste em uma tarefa complexa que envolve diversos níveis de estudos e análises. Yu (2010) acrescenta que a eficiência das operações aeroportuárias pode ser dividida em eficiência de produção e de serviço, que, por sua vez, pode ser decomposta nos aspectos do lado ar e do lado terra.

O aeroporto apresenta-se como um sistema composto por diversos subsistemas, cada qual possuindo capacidade própria e qualquer interrupção em um dos subsistemas pode ser motivo de atraso. Zhang et al. (2014) dividem as operações aeroportuárias em lado terra e lado ar. O lado terra é aquele que faz a interface entre os modais terrestres e o modal aéreo, sendo esse composto pelas vias de acesso, estacionamento e terminal de passageiros, que, por sua vez, possui diversos componentes como check-in, inspeção de segurança, sala de embarque, entre outros. Já o lado ar é aquele que comporta as operações a serem realizadas pelas aeronaves como pátio, pistas de táxi, pistas de pouso e decolagem, entre outros. O subsistema aeroportuário foco do presente estudo é o composto pelas pistas de pousos e decolagens de aeronaves.

Durante a hora-pico, a utilização ótima dos recursos limitados do aeroporto, como pistas e pátio de aeronaves, pode ajudar a evitar congestionamento e atraso, assim como aumentar a capacidade

desses recursos. Para endereçar esse problema é necessário o uso de abordagens táticas e eficientes para lidar com pousos e decolagens.

Öttl et al. (2013) demonstram que a análise da capacidade do lado ar do aeroporto depende de fatores que podem ser divididos em ocupação do sistema e frequência, conforme apresentado na Figura 1.

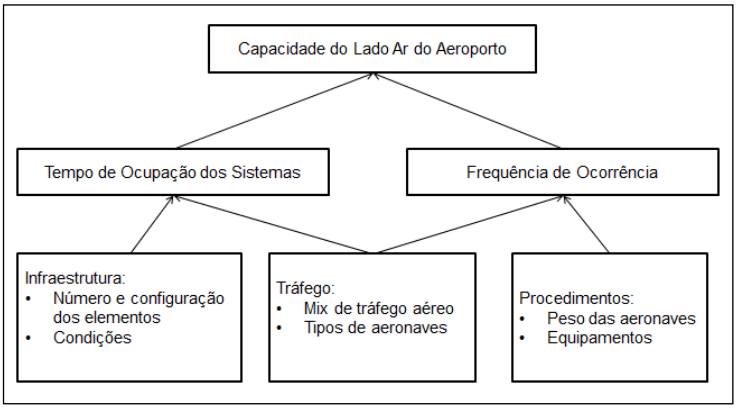


Figura 1 Fatores que influenciam a capacidade do lado ar do aeroporto (Öttl *et al.,*2013).

De acordo com a Figura 1, o tempo de ocupação e a frequência de ocorrência são os principais fatores que interferem na capacidade do lado ar do aeroporto. Esses fatores são divididos em infraestrutura (quantidade e configuração dos elementos e condições de uso), tráfego (mix de operações e de aeronaves) e procedimentos (peso da aeronave e equipamento utilizado). Portanto, para que seja feita uma análise da capacidade do lado ar de aeroportos é necessário levar em conta todos os itens apontados por Öttl et al. (2013).

Incrementos na capacidade do lado ar do aeroporto, mais especificamente nas pistas de pousos e decolagens, de forma segura, pode ser de extrema relevância para determinados aeroportos. Havendo ainda aqueles aeroportos já congestionados e com previsão de aumento contínuo da demanda, mas com restrições ambientais severas (relacionadas a ruído, uso de terra, etc.), para se conseguir disponibilizar capacidade adequada e suficiente para esses aeroportos é preciso construir novas pistas e novos sistemas (JANIC, 2014).

Uma das causas do surgimento dos atrasos consiste na capacidade restrita de subsistemas aeroportuários, como a capacidade de pista do lado ar, não sendo possível, assim, suportar a demanda prevista, sendo necessário o estudo de capacidade e atraso de cada um dos subsistemas.

2.1. CAPACIDADE DE PISTA

A capacidade de pista pode ser definida como o número máximo de operações de pouso e decolagem suportadas pelo subsistema durante um período de tempo específico (normalmente uma hora), desde que haja demanda para isso (HORONJEFF et al., 2010).

Diversos fatores interferem na capacidade do subsistema de pista de pouso e decolagem de aeronaves. Feron et al. (1997) listam alguns desses fatores: i) meteorologia (visibilidade, precipitação, força e direção do vento); ii) separações longitudinal e lateral entre aeronaves (requisitos mínimos de separação); iii) tipo de operação (razão pouso e decolagem); e iv) mix de aeronaves ou distribuição percentual da frota de aeronaves em operação, conforme as categorias de aeronaves (ICAO, 2007). O mix de aeronaves e de operações também é responsável pelos requisitos de separações mínimas e pelo tempo de ocupação de pista de cada, a capacidade varia conforme a quantidade de pousos e decolagens operados por cada categoria de aeronave.

Com isso, a capacidade de determinado subsistema é comumente dada por um envelope de capacidade variando, ainda segundo Feron et al. (1997), conforme : i) as operações executadas; ii) a configuração da pista em uso (número e layout das pistas); iii) a posição relativa e distância entre pistas de pouso e decolagem devido a interferência dos movimentos de uma pista em relação à outra;

e iv) os operadores, caracterizados pelo fator humano em que, acredita-se que quanto mais experientes são os pilotos e controladores de voo, maior agilidade eles terão nas operações e provavelmente mais operações poderão ser executadas num dado intervalo de tempo.

Além desses fatores, Horonjeff et al. (2010) complementam com a presença, o número, a localização e a geometria de saídas de pista e das pistas de táxi, o tempo de ocupação da pista tanto para pouso quanto para decolagem, as restrições devido ao ruído (limitam o tipo e a duração das operações nas pistas), a quantidade e a frequência de operações de toque e arremetida. Os autores também demonstram que há fatores relacionados ao espaço aéreo, como estrutura e disponibilidade para estabelecer rotas de chegada e partida, bem como os equipamentos disponíveis para os pilotos e para os controladores de voo.

Equipamentos com maiores precisões permitem menores separações entre aeronaves, entretanto, os softwares disponíveis tanto para os pilotos quanto para os controladores de voos devem ser compatíveis. De modo complementar, Zhang et al. (2014) acrescentam aos fatores colocados por Feron et al. (1997) e Horonjeff et al. (2010): os obstáculos na vizinhança dos aeroportos e configuração do terminal.

Algumas estratégias podem ser utilizadas para otimizar a capacidade da pista de pouso e decolagem dos aeroportos, como construção de novos sistemas de pista, maximização dos sistemas de pistas existentes, aplicação de padrões operacionais eficientes e maximização do uso de ferramentas de apoio ao sistema.

Aeroportos que possuem restrição de capacidade em seus subsistemas, como na pista de pousos e decolagens de aeronaves, acabam sofrendo com atrasos de voos. No Brasil, como mencionado anteriormente, no ano de 2014 os atrasos e cancelamentos somados chegaram a 21,5% (ANAC, 2015). Com isso, surge a preocupação e necessidade do estudo dos atrasos.

2.2. ATRASOS DE VOOS

O atraso de um voo pode ser definido como a diferença entre o horário marcado para saída da aeronave e o horário de fato da saída da aeronave. Baumgarten et al. (2014) demonstram que os atrasos ocorridos nos Estados Unidos em 2010 foram devido a diversos fatores, como aeronaves que chegam atrasadas, atraso do sistema nacional de aviação, condições climáticas extremas e atrasos devido à segurança. Os atrasos causam diversos desconfortos tanto para o passageiro, que terá sua viagem prolongada, quanto para as companhias aéreas, impactando diretamente na receita e nos custos com funcionários, combustível, manutenção e potencial remarcação, além de possível perda de conexão de alguns passageiros.

Nesse contexto, torna-se necessário que os atrasos sejam evitados ao máximo e, se vierem a ocorrer, que sejam minimizados. Segundo Horonjeff et al. (2010), a infraestrutura necessária para que os aeroportos tenham capacidade suficiente para servir a demanda variada ao longo do dia e do ano sem atrasos não se justifica financeiramente, ou seja, para que não haja atraso é preciso que os componentes possuam grandes dimensões que não são totalmente aproveitadas na maior parte do tempo, apenas naquele período pico. Por isso, o projeto de um aeroporto é concebido com um atraso aceitável, que atende tanto ao usuário quanto ao operador. O dimensionamento de um aeroporto é feito considerando esse atraso, o que permite um balanço entre atrasos e custos com infraestrutura.

De acordo com a FAA (1983), quando a demanda de um aeroporto se aproxima de sua capacidade, os atrasos individuais das aeronaves aumentam. O excesso sucessivo de demanda horária em relação à capacidade horária resulta em atrasos inaceitáveis. No caso em que a demanda horária é menor que a capacidade horária, os atrasos das aeronaves ainda irão ocorrer se, em algum momento, a demanda exceder a capacidade. Para evitar que haja atraso, ou seja, que a demanda exceda a capacidade em algum momento, há duas soluções: reprimir a demanda ou aumentar a capacidade do sistema.

O caso de demanda maior que capacidade é muito comum quando há condições climáticas adversas, pois, nessas situações a capacidade do conjunto de pistas de pousos e decolagens é reduzida enquanto a demanda se mantem constante. A capacidade do conjunto é reduzida nessas situações,

pois, conforme Benedetto (2002), a segurança da aeronave durante pouso e decolagem está diretamente relacionada com as condições da pista, tanto a propriedades do pavimento quanto ao clima, especialmente durante condições climáticas adversas, como ventos fortes, chuvas intensas e neblinas, por isso durante essas condições há maior propensão de ocorrer acidentes.

3. MÉTODO

O presente estudo busca caracterizar o subsistema de pista de pousos e decolagens de aeronaves, apontando as variáveis e os tipos de melhorias operacionais relacionadas à capacidade desse subsistema. Com isso, pretende-se estruturar a análise da capacidade de pista para auxiliar a tomada de decisão e desenvolvimento de modelagens e cenários de melhorias operacionais. A metodologia é baseada na revisão do Conceito de Operações (CONOPS - *Concept of Operations*) dos modelos existentes do complexo sistema aeroportuário, focando, especificamente em modelos de capacidade de pista.

O CONOPS apresenta-se como um documento orientado para os usuários que descreve as características operacionais do sistema e que provê uma abordagem sistemática para definição do uso do sistema e seus requisitos (IEEE, 1998). Na presença de um sistema altamente complexo, como é o caso do sistema aeroportuário, tal metodologia sistemática é fundamental para definição da modelagem do problema, do escopo, das premissas e dos limites. Uma parte importante do CONOPS é a revisão dos sistemas existentes, no caso do presente de estudo se trata do subsistema de pista do aeroporto, para determinar aspectos específicos do seu uso, incluindo objetivos operacionais, políticas e capacidade (Wu e Mergensen, 2013).

Devido à complexidade do sistema aeroportuário, também não é possível utilizar processos de engenharia tradicionais que são predominantemente sequenciais, já que os requisitos não são totalmente conhecidos previamente e pode haver mudanças durante a operação do sistema (INCOSE, 2007), por isso a necessidade da aplicação do CONOPS.

O CONOPS provê orientações para todo o desenvolvimento de processos incluindo a revisão de sistemas existentes, justificativa de necessidades de mudanças, o sistema proposto, cenários de uso para o sistema proposto e seus impactos (IEEE, 1998). O foco do estudo é o subsistema de pistas e os requisitos que proporcionam o aumento da capacidade desse subsistema.

No caso do presente estudo, semelhante àquele elaborado por Wu e Mengersen (2013), o CONOPS é usado como um guia para revisar os modelos existentes, justificar a necessidade de mudanças, apresentar o modelo proposto e os cenários a serem utilizados. O modelo será adaptado para pistas de pousos e decolagens de aeronaves de acordo com os seguintes critérios:

1. Objetivo da modelagem;
2. Políticas e restrições operacionais;
3. O que o modelo captura;
4. Usuários.

Com isso, pretende-se desenvolver sistematicamente os requisitos de modelos já existentes para obtenção dos cenários. Espera-se que o resultado final ajude a garantir que as necessidades dos usuários sejam cumpridas e que os modelos sejam interpretados corretamente, pois a adoção de cenários e uso bem definido dos modelos permite o desenvolvimento de ferramentas de modelagem.

4. MODELOS DE CAPACIDADE E USO DOS CENÁRIOS

Há uma literatura extensiva na modelagem de diferentes aspectos do lado ar do aeroporto com o uso de diferentes modelagens como modelos analíticos, simulação computacional ou abordagens híbridas. Foi proposto por Zografos e Madas (2006) que cenários podem ser usados para gerenciar ou coordenar a aplicação de múltiplos modelos aeroportuários.

Essa seção revisa modelos de capacidade de pista de aeroportos existentes na literatura, trazendo como resultado principal ferramentas que auxiliam o tomador de decisões. A abordagem sistêmica auxilia o operador aeroportuário a definir os cenários aplicáveis ao aeroporto de estudo,

possuindo grande potencial de aumentar a capacidade de pista, sendo a escolha feita com base nos recursos disponíveis. Tal abordagem reflete uma revisão do sistema usado atualmente ou situação como parte do método CONOPS (IEEE, 1998).

4.1. PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE DE PISTA

Uma parte significante da literatura de modelagem do lado ar de aeroportos pertence à capacidade de pista. O modelo é uma ferramenta para auxiliar o tomador de decisões (tipicamente o operador aeroportuário) a definir estratégias referentes à infraestrutura e principalmente, às operações. O modelo irá auxiliar a responder questões que dizem respeito ao aumento de capacidade relacionado com alterações nas operações e/ou na infraestrutura aeroportuária.

Um grande número de modelos de capacidade é baseado em simulação computacional, utilizando softwares altamente qualificados. Esses softwares são usados também pelo operador aeroportuário no auxílio do controle de operações tanto em solo quanto ao espaço aéreo. Majumdar et al. (2005) apresentam uma tabela contendo as principais características de alguns softwares do tipo *fast time* bastante utilizados por autoridades de controle de tráfego aéreo. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre dois dos softwares utilizados por Majumdar et al. (2005). Ambos os softwares apresentados na Tabela 1 permitem a simulação do solo (pista e pátio do aeroporto) e espaço aéreo.

Tabela 1 Comparação entre os softwares TAAM e RAMS

	TAAM	**RAMS**
Desenvolvedor	Preston Group-Boeing	EUROCONTROL
Tipo	Simulação	Simulação
Fonte de dados das tarefas	Base de dados do controle de tráfego aéreo europeu que é baseado nas observações dos controladores de voo.	Base de dados do controle de tráfego aéreo europeu que é baseado nas observações dos controladores de voo.
Controlador	Radar	Planejamento e radar
Diferenciação da carga de tarefas	Simulação para detecção/solução de conflitos	Simulação para detecção/solução de conflitos
	Contribui com a digitalização e planejamento das atividades	Contribui com a digitalização e planejamento das atividades
		Bom gerenciamento das atividades
Validação e uso	Validação do método realizada de maneira intensa na Alemanha e na Suíça	Validação realizada juntamente com o analisador de capacidade incorporado ao modelo de espaço aéreo europeu
Vantagens	A boa adaptação ao DFS (autoridade aeroportuária alemã) na Alemanha garante que o método pode ser amplamente utilizado para a análise de capacidade	Boa ferramenta de solução de conflitos baseado nas regras do espaço aéreo europeu
	Boa identificação de conflito e solução do mesmo	Modelo flexível e relativamente fácil de utilizar
		Amplamente utilizado e validado por toda a Europa
Desvantagens	O tempo de simulação pode ser consideravelmente grande	Não levam em conta, de maneira apropriada, os aspectos cognitivos do controle de trafego aéreo.
	Assume que duas tarefas não podem ser executadas simultaneamente	Assume que duas tarefas não podem ser executadas simultaneamente
	A calibração dos parâmetros requerem esforço e estes parâmetros obtidos para a Alemanha e a Suíça não é válida em outros lugares	

Fonte: Majumdar et al. (2005).

Os softwares apresentados na Tabela 1 possibilitam a análise de cenários relacionados à capacidade de pista, fornecendo capacidades horárias para os procedimentos operacionais inseridos no programa. Portanto, podem ser inseridos vários cenários com características diferentes (*inputs*) e o software irá fornecer as respectivas capacidades (*outputs*).

Pela Tabela 1 pode-se observar que ambos os softwares apresentados são baseados em observações de controladores de voos, ou seja, no caso real, evitando assim erros provenientes de suposições. Foi feita validação para os dois, sendo validados principalmente para o espaço aéreo europeu. Porém, todos os softwares possuem limitações, como o tempo de simulação, não assumir duas tarefas sejam executadas simultaneamente, entre outros. Portanto, apesar de serem utilizados por controladores de tráfego na Europa e em outras regiões do mundo, deve-se atentar para a inserção de informações, principalmente quando operado fora do espaço aéreo europeu.

Além da simulação computacional, alguns pesquisadores utilizaram da modelagem analítica (Janic, 2008), abordagem heurística (Ferhadi et al., 2014) e até mesmo abordagem estocástica (Kapolke et al., 2016) visando o aumento de capacidade de pista de aeroportos.

4.1.1. Discussão: modelos existentes de planejamento de capacidade

Janic (2008) modela analiticamente a capacidade de pistas paralelas próximas, para os casos em que há apenas pousos, apenas decolagens ou operações mistas (pousos e decolagens). O modelo incluiu os requisitos de separações mínimas entre aeronaves, o mix de aeronaves, o tempo correspondente de ocupação de pista e o tipo de aproximação. O objetivo do trabalho era a análise de dois tipos de aproximação inovadores: SGAP (Staggered Approach Procedure) e SEAP (Steeper Approach Procedure). Sendo o primeiro capaz de reduzir a separação longitudinal entre aeronaves, através do deslocamento da cabeceira de uma das pistas e o segundo é um perfil de aproximação com inclinação maior que a convencional, conforme pode ser observado na Figura 2 e na Figura 3, respectivamente.

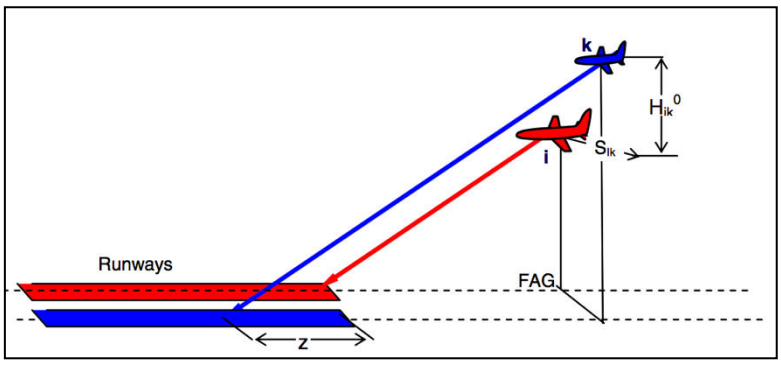


Figura 2 Aproximação do tipo SGAP (Janic, 2008).

A Figura 2 mostra o procedimento de aproximação do tipo SGAP. Essa aproximação permite que, mesmo com pistas paralelas próximas, através do deslocamento de uma das cabeceiras a separação longitudinal entre as aeronaves seja reduzida, desde que se respeite a separação vertical mínima, pois dessa maneira as trajetórias de pouso são diferentes (ICAO, 2007).

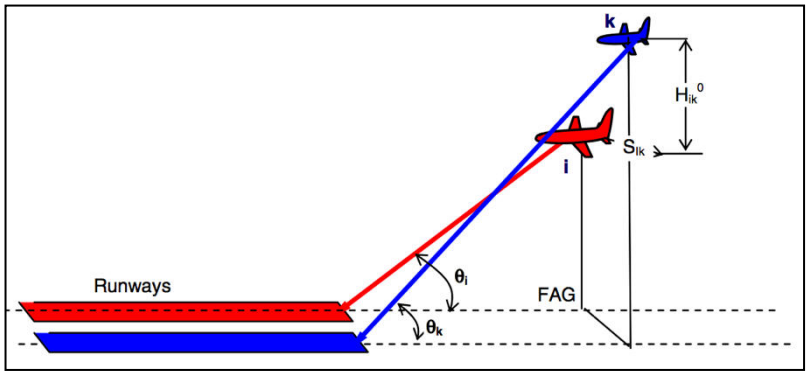


Figura 3 Aproximação do tipo SGAP (Janic, 2008).

Já a Figura 3 apresenta a aproximação do tipo SEAP. Nesse caso, a separação longitudinal pode ser reduzida por conta das trajetórias diferentes devido rampas de aproximação diferentes, como mostrado pelos ângulos da Figura 3 (ICAO, 2007). A redução das separações longitudinais entre aeronaves que pousam em pistas diferentes em um sistema de pistas paralelas próximas, resulta em aumento de capacidade devido o aumento de operações realizadas num dado intervalo de tempo.

Janic (2008) demonstra a aplicação dos conceitos de SGAP e SEAP nos aeroportos de São Francisco e Frankfurt, com resultados de aumento da capacidade de pousos e estabilização da capacidade em quase todas as condições climáticas, tornando as operações mais confiáveis e os atrasos mais previsíveis. O procedimento SGAP foi testado e adotado no aeroporto de Frankfurt.

Além de Janic (2008), Almeida (2014) apresenta uma proposta, a partir de uma pesquisa aplicada ao Aeroporto Internacional de Guarulhos, que analisa o aumento da capacidade de pistas paralelas utilizando os conceitos de SGAP e SEAP, o mix de operações, o mix de aeronaves e os requisitos de separação mínima entre aeronaves, mas através da simulação computacional no software TAAM (Total Airspace and Airport Modeler). Nesse estudo o autor apresenta uma simulação de cenários que englobavam diversas situações como alteração de procedimento para condições visuais, introdução de conceitos aplicados a pistas paralelas próximas, entre outros, concluindo que com melhorias é possível aumentar a capacidade do aeroporto em até 33% sem que haja interferência na infraestrutura existente no aeroporto.

Assim como em Almeida (2014), Offerman (2001) faz uso da simulação computacional no software TAAM, visando maximização de capacidade aplicada ao aeroporto de Amsterdã, Schiphol. Offerman (2001), por sua vez, utiliza-se de procedimentos de abatimento de ruído, cronograma com preferência de pista e diminuição de ruído de aeronaves modernas, visto que a maior limitação para operação no sistema de pistas do aeroporto era o ruído, além de analisar a carga de trabalho dos controladores de voo. A simulação de Offerman (2001) serviu como suporte para tomadas de decisão relativas ao cronograma de voos futuros, mudanças na configuração das pistas devido ao ruído, entre outros, mostrando, também gargalos que viriam ocorrer no aeroporto com o aumento de demanda previsto.

De maneira semelhante, mas usando o simulador *fast time* SIMMOD, Bubalo e Daduna (2012), analisam a demanda e capacidade do Aeroporto Internacional Berlim Brandemburgo em um horizonte de tempo de 20 anos. No caso analisado, há duas pistas paralelas e independentes e foram feitas simulações com alteração do mix de aeronaves que opera no aeroporto, baseado na separação por esteira de turbulência, além de relacionar com congestionamento, atrasos e nível de serviço, assim como custo de atrasos. Nesse estudo os autores demonstram como os atrasos interferem no nível de serviço do aeroporto e nos custos, destacando que a alteração no sequenciamento de aeronaves pode trazer ganhos de capacidade. Ainda relacionado com capacidade de pista, Fortes et al. (2014) apresentam, a partir do uso do software RAMS Plus (Reorganized ATC Mathematical Simulator), como se dá o aumento de capacidade do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro quando é imposta uma redução da separação lateral mínima entre as aeronaves, de 5NM para 3NM. Os autores demonstram que, apesar da necessidade de treinamento e conscientização de todos os agentes

envolvidos na operação, a alteração da separação mínima gera ganhos operacionais no subsistema de pista de decolagens e pousos de aeronaves.

Usando o mesmo software, o RAMS Plus, Pejovic et al. (2009) demonstram em seu estudo o impacto quando há fechamento temporário de um aeroporto, relacionando, além de capacidade e atraso, as emissões de gases ofensivos a atmosfera. Com a simulação pode-se estimar os impactos nos atrasos, consumo de combustível e custos, concluindo que mesmo o fechamento por um período curto de tempo traz prejuízos financeiros substanciais.

Já Moris et al. (2013) validam o conceito de separação entre aeronaves baseada em tempo (TBS ou Time Based Separation), demonstrando que em situações de vento de proa há redução na velocidade de solo da aeronave, resultando em aumento da separação para cada par de aeronaves, o que implica em redução de pousos e, consequentemente, redução na capacidade daquele sistema de pistas. A introdução do conceito de separação de aeronaves baseado em tempo evita que, em condições de vento de proa forte, haja essa redução na capacidade. Tal conclusão foi tirada com base no estudo de caso do Aeroporto Internacional de Londres e, para isso, utilizou-se de simulações em tempo reais, e o auxílio do software LIDAR (Lockheed Martin WindTracer), que mediu as esteiras de turbulência das aeronaves para o aeroporto em questão. Segundo Eurocontrol (2016), há uso do conceito TBS no aeroporto de Londres desde 2015.

O conceito TBS funciona da seguinte maneira: para que a capacidade da pista de pouso e decolagem de aeronaves seja mantida em condição de fortes ventos de proa, a separação entre as aeronaves deve ser adaptada (reduzida) em função do perfil dos ventos de proa (EUROCONTROL, 2016). Normalmente em caso de ventos de proa intensos, há redução na capacidade da pista, mas esse vento acaba dissipando a esteira de turbulência de forma mais rápida, tornando possível a redução da separação entre as aeronaves, mantendo, então, a capacidade prevista da pista. A Figura 4 mostra como funciona o TBS em função da presença ou ausência do vento de proa.

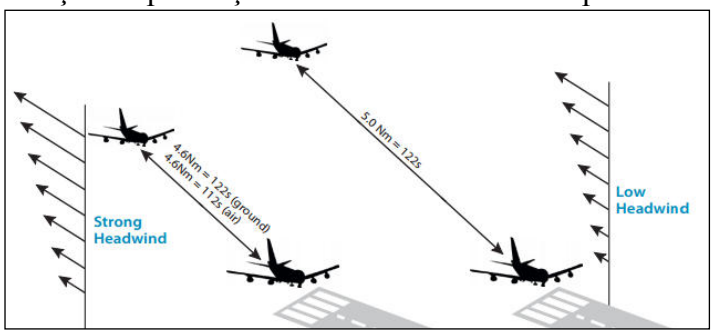


Figura 4 TBS com vento de proa e sem vento de proa (Eurocontrol, 2016)

A Figura 4 mostra que em períodos de ventos de proa fracos (pista da direita) a separação entre aeronaves é de 5 milhas náuticas ou 122 segundos. Já na pista da esquerda é mostrada a condição de fortes ventos de proa, nessa condição a separação em relação ao solo de 122 segundos é mantida, sendo possível reduzir a distância entre as aeronaves para 4,6 milhas náuticas. Essa redução representa uma separação em termos de tempo de 112 segundos em relação ao ar. A redução na separação em condição de vento de proa forte é justificada pela dissipação mais rápida da esteira de turbulência, mantendo a segurança durante a operação.

Ferhadi et al. (2014), também analisando o lado ar do aeroporto, propõem uma abordagem de otimização heurística que analisa o gerenciamento de capacidade de pista, baseado em três fatores: configuração física e modo operacional da pista, o cronograma adotado para aeronaves (envolvendo heurística, metaheurística e abordagens de otimização) e os requisitos mínimos de separação de aeronaves (análise dos métodos da ICAO e da FAA – Federal Aviation Administration). Foi feito um estudo comparativo entre um aeroporto com apenas uma pista de pousos e decolagens, o Aeroporto Internacional de Doha, e um aeroporto com duas pistas, o Aeroporto Internacional de Hamad. Ao fim, Ferhadi et al. (2014) concluem que a heurística desenvolvida produz soluções ótimas ou quase ótimas, resultando em economia de combustível e redução de atrasos.

Rodrigues (2014) apresentam a caracterização do lado ar envolvendo pista e espaço aéreo do aeroporto de Lisboa, através do uso do simulador *fast time* RAMS Plus, considerando os seguintes

fatores: o número e layout das pistas, mix de aeronaves e características das pistas de táxi. Os cenários simulados atendem aos requisitos mínimos separação entre aeronaves (ICAO, 2007) e concluiu-se que o gargalo maior refere-se ao espaço aéreo, sendo propostas modificações que impactam no aumento da capacidade do espaço aéreo.

Kapolke et al. (2016), em estudo sobre o planejamento eficiente da utilização de pistas, utilizam a abordagem estocástica no Solver Gurobi e através do método de Monte Carlo. Diferentemente de outros pesquisadores, os autores não determinam o horário de chegada e saída exatos para as aeronaves, mas sim designam várias aeronaves para um mesmo intervalo de tempo de um dado tamanho, respeitando os requisitos de separação mínima entre elas, em que pode-se observar as distribuições de atrasos. Todos esses modelos apresentados podem ser identificados na Tabela 2.

Tabela 2 Modelos de capacidade de pista

AUTOR	ABORDAGEM	MODELO
Kapolke *et al.* (2016)	Planejamento eficiente da utilização da pista. Uso de janelas de tempo, respeitando requisitos de separação mínima entre aeronaves.	Abordagem estocástica - Solver Gorubi; Monte Carlo
Fortes *et al.* (2015)	Análise do aumento da capacidade do sistema de pistas de pouso e decolagem, através da redução da distância final de aproximação de 5NM para 3NM.	Simulação computacional RAMS Plus
Almeida (2014)	Aumento da capacidade de pista paralelas próximas, utilizando conceitos SGAP e SEAP, mix de aeronaves e requisitos de separação mínimos entre aeronaves.	Simulação computacional TAAM
Ferhadi *et al.* (2014)	Gerenciamento da capacidade de pista, dependendo da configuração física e modo operacional da pista, cronograma adotado para aeronaves e regra de separação entre aeronaves (métodos da FAA e ICAO).	Heurística de aproximação
Rodrigues (2014)	Conceitos do lado ar (envolve pista e espaço aéreo). Medição de capacidade com número e layout das pistas, requisitos de separação por classe de aeronave, mix de aeronaves e características da pista de táxi.	Simulação computacional RAMS Plus
Morris *et al.* (2013)	Conceito de separação baseada em tempo (validação do TBS) aplicado ao aeroporto de Londres, em condições de vento de proa. Resultado da aplicação do TBS: melhora a taxa de pousos, evitando a perda de capacidade, em condições de vento de proa.	Real time simulations, LIDAR
Bubalo de Daduna (2013)	Simulação computacional de pistas paralelas e independentes, com alteração do mix, baseado na separação por esteira de turbulência, relacionando a congestionamento do aeroporto, atraso, nível de serviço e custo de atrasos.	Simulação computacional SIMMOD
Pejovic *et al.* (2009)	Análise dos impactos quando há fechamento do aeroporto. Foco no consumo de combustível e emissão de CO2. Para onde reencaminhar as operações ou o quanto atrasá-las.	Simulação computacional RAMS Plus

AUTOR	ABORDAGEM	MODELO
Janic (2008)	Cálculo de capacidade última de chegada, partida e operação mista de pistas paralelas próximas. Diferencia os tipos de aproximação: SGAP e SEAP. O modelo usa as separações mínimas entre as aeronaves, o mix de aeronaves, o tempo correspondente de ocupação de pista.	Modelagem analítica
Offerman (2001)	Maximização da capacidade no aeroporto de Amsterdã Schiphol. Introdução de procedimentos de abatimento de ruído, cronograma com preferência de pista e diminuição de ruído de aeronaves modernas (o ruído era o principal limitador do aeroporto).	Simulação computacional TAAM

A Tabela 2 apresenta, de forma resumida, os modelos de aumento de capacidade de pista expostos. Com essa tabela é possível verificar as medidas a serem tomadas visando aumento da capacidade de pista em diferentes circunstâncias. Também é possível perceber que há diferentes maneiras de analisar capacidade de pistas de aeroportos como simulação computacional através de vários softwares, modelagem analítica e abordagens heurísticas.

Pode-se perceber que os modelos revisados de capacidade de pista de aeroportos representam uma abordagem para modelagem, da perspectiva CONOPS, isso reflete um resumo de cenários de utilização previstos para esses modelos. Através da revisão feita há fatores-chave usados para o planejamento de tomada de decisão que interferem na capacidade de pista e usados pela maioria dos pesquisadores citados acima, como as separações mínimas entre aeronaves (em termos de distância e tempo), o mix de aeronaves, o mix de operações, número e layout de pistas, localização de saídas rápidas, tipo de aproximação, tempo de ocupação de pista, procedimentos de abatimento de ruído, fechamento temporário da pista do aeroporto, condições climáticas adversas e o cronograma adotado pelas aeronaves.

Com base na Tabela 2, a metodologia proposta para modelo de gerenciamento visando o aumento de capacidade de pista pode ser identificada como:

a) Modelar como se dá a operação atual do aeroporto, incluindo configuração e comprimento de pistas, localização e tipo das saídas, mix de aeronaves que operam no aeroporto, mix de operações, cronograma dos voos, condições climáticas (vento, neblina, fechamento temporário de aeroporto).

b) Com o mix de aeronaves, verificar se é possível a redução, com segurança, da distância entre aeronaves em fases de pouso e decolagem, aumentando assim a taxa de pouso e decolagem, o que implica no aumento de capacidade, semelhante ao que foi feito por Fortes et al. (2015);

c) Alteração do cronograma de voos, permitindo que aeronaves de porte semelhante operem uma seguida da outra, o que reduz a distância mínima requerida entre aeronaves, aumentando a taxa de pouso e decolagem, impactando na capacidade da pista, conforme feito por Bubalo e Daduna (2012), Rodrigues (2014) e Kapolke et al. (2016);

d) Verificar se no cronograma de voos há horários onde se predomina pousos ou decolagens, para assim, operar mais de uma pista com o mesmo tipo de operação (pouso ou decolagem), como Almeida (2014) e Ferhadi et al. (2014). No caso de pouso em pistas paralelas próximas pode-se adotar os conceitos de Janic (2008) do SEAP e SGAP, aumentando a taxa de pousos e consequentemente a capacidade das pistas.

e) No caso de aeroportos com restrições devido a ruído, alterar o uso de pistas em horários pré-definidos utilizando um cronograma de preferência de pista, semelhante ao que foi feito por Offerman (2001);

f) Em aeroportos com condições climáticas adversas, analisar o impacto do fechamento temporário do aeroporto na capacidade e reprogramação para quando o aeroporto reabrir conforme Pejovic et al. (2009) e em aeroportos com ventos de proa fortes inserir a separação

baseada em tempo validada por Morris et al. (2013), permitindo que o aeroporto não reduza sua capacidade quando há a presença desses ventos;

g) Alteração da infraestrutura existente, como o acréscimo de saídas de pista e construção de novas pistas (Ferhadi et al., 2014; Rodrigues, 2014).

Contudo, ainda há deficiência nas abordagens existentes, pois ainda há outros critérios que devem ser considerados, como experiência dos controladores de voo e pilotos, além dos custos para implantação dos modelos apresentados. Além disso, há incertezas associadas ao cronograma de voos, pois as aeronaves podem não estar prontas para realizar determinada operação, bem como possíveis falhas mecânicas e condições climáticas adversas identificadas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O congestionamento e o atraso podem ser identificados em diferentes aeroportos, sendo necessária a análise e o estudo de melhorias operacionais que possibilitem ganhos de capacidade e redução de gargalos. Com isso, foi feita uma revisão de modelos de melhoria de capacidade do subsistema de pistas de pouso e decolagem de aeronaves, percebendo que ainda há espaço na literatura para construção de modelos que auxiliem para melhoria desse subsistema aeroportuário.

Tendo em vista a complexidade dos sistemas e subsistemas dos aeroportos, faz-se necessário a adoção de técnicas e metodologias diferenciadas, como é o caso do processo sistemático do CONOPS. Os modelos existentes para melhoria de capacidade de pistas nem sempre consideram em profundidade todos os requisitos, para isso, foram propostas ferramentas que auxiliam o tomador de decisão em momentos de gargalos.

Esse artigo apresenta uma abordagem com base no CONOPS. Revisando modelos existentes foi possível destacar os principais fatores que afetam a capacidade de pista e como melhorias operacionais podem incrementar essa capacidade, baseando-se em modelos presentes na literatura.

As ferramentas apontadas ajudam o usuário a endereçar os problemas e, em adição a isso, as ferramentas podem auxiliar durante as fases de verificação e validação dos processos. As escolhas de cenários devem feitas levando em conta as ferramentas e recursos disponíveis, cabendo ao operador aeroportuário a tomada da decisão final.

A aplicação dos cenários escolhidos envolve questionamentos do tipo “e se” para a operação futura, podendo ser através da simulação computacional, da modelagem analítica, heurística, etc. Devem ser simulados os cenários apontados e em seguida deve ser feita a análise para validação daqueles cenários, levando em consideração os principais gargalos identificados.

O estudo propôs uma metodologia contendo as ferramentas a serem utilizadas pelo tomador de decisões direcionadas ao aumento da capacidade de pista e que podem ser aplicadas juntamente com os cenários de uso. Essas descobertas servem como ponto de referência para o desenvolvimento de modelos futuros como parte da metodologia CONOPS. Através da aplicação dessa metodologia para revisar modelos existentes é possível desenvolver sistematicamente requisitos de modelagem que ajudem a endereçar alguns desafios do sistema aeroportuário.

6. REFERENCES

ALMEIDA, R. A. Aumento da capacidade de pistas paralelas e próximas: um estudo de caso do Aeroporto Internacional de Guarulhos. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 2014.

BAUMGARTEN, P.; MALINA, R.; LANGE, A. The Impact of Hubbing Concentration on Flight Delays Within Airline Networks: An Empirical Analysis of the US Domestic Market. Transportation Research Part E, v. 66, pp. 103-114, 2014.

BENEDETTO, A. A Decision Support System for the Safety of Airport Runways: the case of heavy rainstorms. Transportation Research Part A, v.36, pp. 665-682, 2002.

BUBALO, B.; DADUNA, J. R. Airport capacity and demand calculations by simulation – the case of Berlin-Brandenburg International Airport. Netnomics, v.12, p. 161-181, 2011.

CURI, C.; GITTO, S.; MANCUSO, P. New evidence on the efficiency of Italian airports: A bootstrapped DEA analysis. Socio-Economic Planning Sciences, v. 45, pp. 84-93, 2011.

EUROCONTROL. Wake vortex. Disponível em: < http://www.eurocontrol.int/articles/wake-vortex >. Acesso em 01.Maio.2016.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION – FAA. Air Capacity and Delay, AC 150/5060-5, Advisory Circular, 1983.

FERHADI, F.; GHONIEM, A.; AL-SALEM, M. Runway capacity management – An empirical study with application to Doha International Airport. Transportation Research Part E, v. 68, p, 53-63, 2014.
FERON, E.; HANSMAN, R. J. ; ODONI, A. R. ; COTS, R. B. ; DELCAIRE, B. ; FENG, X. ; HALL, W. D.; IDRIS, H. R.; MUHARREMOGLU, A.; PUJET, N.; The Departure Planner: A Conceptual Discussion, Technical Report, International Center of Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1997.
FORTES, J. L. C.; PAMPLONA, D. A.; MULLER, C. Análise da capacidade do sistema de pistas – O Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro como estudo de caso. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, 2015.
HORONJEFF, R.; MCKELVEY, F. X.; SPROULE, W. J.; YOUNG, S. B. Planning & Design of Airports. McGraw Hill, 5th Edition, 2010.
INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. DOC 4444:2007: procedures for air navigation services fifteenth edition: air traffic management. Montreal, 2007
IEEE, 1998. IEEE guide for information technology – system definition – concept of operations (ConOps) document. IEEE Std 1362-1998. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.89424> Acesso em 18.Abr.2016.
INCOSE. Systems Engineering Vision 2020. INCOSE-TP-2004-004-02, 2007.
JANIC, M. Modeling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures. Transportation Research Part C, v. 16, p. 704-730, 2008.
JANIC, M. Modeling effects of different air traffic control operational procedures, separation rules, and service disciplines on runway landing capacity. Journal of Advanced Transportation, v. 48 pp. 556-574, 2014.
KAPOLKE, M.; FÜRSTENAU, N.; HEIDT, A.; LIERS, F.; MITTENDORF, M.; WIESS, C. Pre-tactical optimization of runway utilization under uncertainty. Journal of Air Transport Management, v. xxx, p. 1-9, 2016.
MAJUMDAR, A.; OCHIENG, W. Y. The factors affecting air traffic controller workload: a multivariate analysis based upon simulation modelling of controller workload. Transportation Research Record, v.1788, p. 58-69, 2002.
MORIS, C.; PETERS, J.; CHOROBA, P. Validation of the time based separation concept at London Heathrow Airport. Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, ATM, 2013.
OFFERMAN, H. Simulation to support the airport stakeholder decision-making process. Air & Space Europe, v.3, n. 1/2, p.60-67, 2001.
ÖTTL, G; BÖCK. P.; WERPUP, N.; SCHWARZE, M. Derivation of representative air traffic peaks as standard input for airport related simulation. Journal of Air Transport Management, v.28, pp. 31-39, 2013.
PEJOVIC, T.; NOLAND, R. B.; WILLIAMS, V.; TOUMI, R. A tentative analysis of the impacts of an airport closure. Journal of Air Transport Management, v.15, p. 241-248, 2009.
RODRIGUES, J. A. Lisbon Airport capacity enhancement. 102 p. Thesis (Master of Science Degree in Aerospace Engineering), Técnico Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.
WU, P. P.; MENGERSEN, K. A review of models and model usage scenarios for an airport complex system. Transportation Research Part A, v. 47, pp. 124-140, 2013.
YU, M. Assessment of airport performance using the SBM-NDEA model. Omega, v. 38, pp. 440-452, 2010.
ZHANG, B.; WU, H.; YANG, X.; ZHAI, W.; XIA, Q.; LI, Y. An estimation of returns to scale of airport airsides under multiple optimal solutions in DEA. Journal of Air Transport Management, v. 40, pp. 149-156, 2014.
ZOGRAFOS, Konstantinos G.; MADAS, Michael A. Development and demonstration of an integrated decision support system for airport performance analysis. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 14, n. 1, p. 1-17, 2006.