

Uma abordagem metaheurística para o sequenciamento de aeronaves para pouso e o aumento de capacidade de pista

A metaheuristic approach for aircraft landing sequencing and to increase runway capacity

Daniel Alberto Pamplona¹, Mayara Condé Rocha Murça², Alexandre Gomes de Barros³, Claudio Jorge Pinto Alves⁴

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo – Brasil, pamplona@ita.br

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo – Brasil, mayara@ita.br

³Universidade de Calgary, Alberta – Canadá, debarros@ucalgary.ca

⁴Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo – Brasil, claudioj@ita.br

Recebido:

18 de novembro de 2020

Aceito para publicação:

8 de abril de 2021

Publicado:

28 de outubro de 2021

Editor de área:

Li Weigang

Palavras-chave:

Sequenciamento de aeronaves para pouso.

Gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo.

Capacidade de pista.

Otimização.

Metaheurística.

Keywords:

Aircraft landing sequencing.

Air traffic flow management.

Runway capacity.

Optimization.

Metaheuristics.

DOI:10.14295/transportes.v29i4.2500

RESUMO

Problemas de capacidade de pista estão presentes em vários aeroportos ao redor do mundo. A execução eficiente e eficaz do sequenciamento de aeronaves para pouso tornou-se uma alternativa para o aumento de capacidade de pista no nível tático. O problema do sequenciamento busca determinar a melhor ordem de processamento de aeronaves para pouso, a fim de otimizar o uso da pista e mitigar atrasos, entre outros objetivos, sujeito a uma série de restrições operacionais. O presente estudo tem por objetivo desenvolver um método de solução para o problema de sequenciamento que seja capaz de produzir um ganho de capacidade de pista, gerar soluções viáveis em um curto espaço de tempo e manter a equidade entre as empresas aéreas, respeitando o número máximo de mudanças de posição das aeronaves em uma nova sequência. O método é baseado na metaheurística de arrefecimento simulado adaptado ao contexto do problema estudado. O conjunto de dados *Airland*, disponível na *OR-library*, e dados reais do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos foram utilizados para avaliar os potenciais benefícios do método proposto. Os resultados mostraram ganhos de capacidade de até 21% para os dados teóricos e de 10% para os dados reais.

ABSTRACT

Runway capacity problems are present at several airports around the world. The efficient and effective execution of the aircraft sequencing for landing has become an alternative for increasing runway capacity at the tactical level. The aircraft sequencing problem aims to determine the best aircraft processing order for landing towards optimizing the runway usage and mitigate delays, among other objectives, subject to a series of operational restrictions. This study aims to develop a solution method for the aircraft sequencing problem that is capable of producing runway capacity gains, generating feasible solutions in low computational time and maintaining equity among the airlines by respecting the maximum number of aircraft position changes in a new sequence. The method is based on the simulated annealing metaheuristic adapted to the context of the problem studied. The *Airland* dataset, available in the *OR-library*, and actual data from the São Paulo/Guarulhos International Airport were used to evaluate the potential benefits of the method proposed. The results showed capacity gains of up to 21% for the theoretical data and of 10% for the actual data.



1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda por transporte aéreo nas últimas décadas não foi acompanhado pelo crescimento da capacidade dos sistemas aeroportuários no mesmo ritmo. Como consequência, desequilíbrios entre demanda e capacidade tornaram-se cada vez mais frequentes, levando a congestionamentos, atrasos de voos, aumento de custos para as empresas aéreas e desconforto para os passageiros (Ghoniem *et al.*, 2014). Essa conjuntura é encontrada principalmente nos grandes aeroportos ao redor do mundo. Ao concentrarem voos internacionais de longa duração e voos domésticos, esses locais tornam-se pontos centrais de convergência do tráfego aéreo, com a tendência a se tornarem pontos de gargalos.

A gestão do fluxo de tráfego aéreo busca mitigar os impactos de desequilíbrios entre demanda e capacidade, tendo se tornado uma função fundamental dos sistemas de gestão de tráfego aéreo em todo o mundo. No nível tático, a execução do sequenciamento de aeronaves para pouso e decolagem de forma eficiente e eficaz é essencial para aumentar a segurança, capacidade e eficiência de um aeroporto (Hu e Chen, 2005). Para isso, o desenvolvimento de ferramentas de suporte à decisão do controlador de tráfego aéreo nesta etapa do gerenciamento do fluxo tornou-se uma prioridade.

O problema do pouso de aeronaves (ALP - *aircraft landing problem*) busca determinar a melhor ordem de processamento de aeronaves em aproximação para pouso em uma determinada pista de um aeroporto. É considerado um problema de otimização discreta. O ALP busca determinar uma sequência de pouso, a fim de otimizar o uso da pista e mitigar atrasos, entre outros objetivos, sujeito a uma série de restrições operacionais (Bennell *et al.*, 2011). Para cada voo que se aproxima para pouso, é atribuída uma janela de tempo que deverá ser cumprida. Dois voos sucessivos em aproximação para pouso devem ser separados por um intervalo mínimo de tempo que está relacionado diretamente aos tipos de aeronaves envolvidas (Avella *et al.*, 2017).

O presente artigo tem por objetivo propor um método de solução para o problema de sequenciamento que seja capaz de produzir um ganho de capacidade de pista, gerar soluções viáveis em um curto espaço de tempo e manter a equidade entre as empresas aéreas, gerando uma sequência de aeronaves para pouso mais eficiente que a regra atual baseada no “primeiro a chegar, primeiro a ser servido” (FCFS – *first come, first served*).

Esse artigo contribui para a literatura acadêmica no assunto ao propor uma nova implementação metaheurística de arrefecimento simulado (SA - *simulated annealing*) capaz de prover soluções que geram consideráveis ganhos de capacidade em baixo tempo computacional. Conforme apontado por Trivizas (1998), a resolução do ALP é extremamente importante, pois pequenos ganhos na capacidade de operação de uma pista, mesmo que sejam menores que 5%, podem aumentar a segurança de voo e reduzir o consumo de combustível durante os períodos de congestionamento aeroportuário. O conceito de restrição de mudança de posição (CPS – *constrained position shifting*) na sequência para pouso é utilizado para manter a equidade entre os operadores aéreos. Apesar de o CPS ser utilizado na literatura, este artigo investiga a influência de diferentes valores nos potenciais ganhos de capacidade de pista.

O artigo apresenta a seguinte estrutura: a Seção 2 aborda o problema de atenuação do congestionamento aeroportuário, apresentando as principais alternativas operacionais para endereçar o problema. A Seção 3 apresenta a revisão de literatura sobre o ALP, apontando as contribuições deste trabalho. A Seção 4 descreve o método proposto para a resolução do ALP e a

Seção 5 apresenta os resultados da aplicação do método a partir de dados hipotéticos e reais, os quais são comparados com os resultados fornecidos pelo método FCFS e por um *software* comercial de programação inteira mista (CPLEX) para avaliação dos potenciais benefícios. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. ATENUAÇÃO DO CONGESTIONAMENTO AEROPORTUÁRIO

A mitigação do congestionamento aeroportuário pode ser realizada através de três medidas principais: expansão da capacidade de pista e adjacências, gestão da demanda e melhorias operacionais (Gillen *et al.*, 2016). A capacidade aeroportuária está relacionada com: as instalações físicas e a geometria de um aeroporto; o controle do tráfego aéreo realizado; a combinação de aeronaves que operam e as condições meteorológicas. O lado aéreo em um aeroporto é formado pela pista de pouso, pista de táxi, pontos de espera, pátios e boxes de estacionamento. Geralmente, o lado aéreo é o fator limitador da capacidade em um aeroporto (TRB, 2012).

A expansão da capacidade aeroportuária tem por objetivo ampliar o tamanho de aeroportos que vivenciam congestionamentos ao investir na construção de novas pistas ou ampliação das pistas existentes (Brueckner, 2002) e massivas melhorias na infraestrutura (Barnhart e Smith, 2012). Trata-se de uma solução com elevados custos e de lenta implementação. Adiciona-se, ainda, a necessidade de lidar com possíveis restrições físicas e de caráter político e ambiental (Madas e Zografos, 2008).

Exemplos recentes como a construção dos novos aeroportos e a adição de novas pistas destacam como o aumento de capacidade exige grandes investimentos, com um amplo lapso temporal, muitas vezes se estendendo por décadas desde a concepção até a conclusão (Gillen *et al.*, 2016). No contexto brasileiro, com exceção da ampliação dos terminais de passageiros nos principais aeroportos, motivada principalmente pela Copa do Mundo em 2014 e pelos Jogos Olímpicos de 2016, a ampliação de capacidade com construção de novas pistas de pouso aconteceu em 2005 para o aeroporto de Brasília (SBBR), 1989 para o aeroporto de Guarulhos (SBGR) e 1979 para o aeroporto do Galeão (SBGL).

O gerenciamento da demanda aeroportuária refere-se a medidas administrativas como, por exemplo, o controle de *slot* em determinado aeroporto, ou a medidas econômicas como, por exemplo, a precificação de congestionamento, destinada a contrair a demanda geral do aeroporto, ou modificar as características temporais de tal demanda. Para a sua implementação, duas questões principais devem ser confrontadas: (a) o correto mapeamento dos horários de excesso de tráfego aéreo, onde são analisados o equilíbrio entre a utilização da capacidade e os níveis de pontualidade apresentados; e (b) a correta especificação dos mecanismos de alocação de *slots* para as empresas aéreas. Nesse aspecto, busca-se designar a capacidade operacional aos usuários que fornecem o maior valor a ela. Essa problemática é abordada pelas ferramentas da Pesquisa Operacional e pela perspectiva do contexto econômico (Gillen *et al.*, 2016).

As medidas operacionais são englobadas fundamentalmente pelo gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo (ATFM – *air traffic flow management*) e têm por objetivo otimizar os fluxos de tráfego aéreo para minimizar as consequências ou custos dos atrasos dos voos. De acordo com a Organização da Aviação Civil Internacional (2014), o ATFM é uma função do gerenciamento do tráfego aéreo instituída com o objetivo de contribuir para o fluxo seguro, ordenado e célere de aeronaves. O ATFM busca equilibrar a demanda de voos com a capacidade de aeroportos e do espaço aéreo para garantir o uso mais eficiente do sistema. O ATFM faz parte da gestão colaborativa de tráfego aéreo (CATM – *Collaborative Air Traffic Management*).

O CATM é uma tentativa de acomodar ao máximo as preferências dos *stakeholders*, com a imposição de restrições apenas quando existe uma necessidade operacional real. O principal objetivo é dar aos operadores de aeronaves a oportunidade de participar nas decisões de ajuste do plano de voo devido a restrições operacionais (Nolan, 2011).

Nas últimas décadas, várias medidas de gerenciamento de fluxo têm sido estudadas e implementadas para ajustar o fluxo no espaço aéreo em rota, terminal, ou em solo nos aeroportos, como, por exemplo: espera em solo (*ground-holding*); espera no ar; roteamento; regulação da taxa de chegada (*metering*) através da imposição de restrições de separação em distância (*Miles-in-Trail*) ou em tempo (*Minutes-in-Trail*) ou da imposição de restrições de horário de chegada em um determinado ponto do espaço aéreo (*time-based metering*); sequenciamento para pouso e decolagem.

O presente artigo tem como foco o sequenciamento de aeronaves para pouso, de forma a otimizar o fluxo de aeronaves em aproximação na área terminal e maximizar o uso da capacidade de pista, mitigando atrasos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

O ALP tem sido amplamente estudado na literatura. Uma revisão abrangente sobre o histórico de desenvolvimentos nas últimas décadas é apresentada em Beasley *et al.* (2000) e Bennell *et al.* (2011). O ALP busca determinar uma sequência de aeronaves para pouso que seja melhor que a proposta pelo método tradicional FCFS utilizado atualmente na prestação do serviço de tráfego aéreo. Nele, uma fila é formada a partir da ordem de chegada das aeronaves. Conforme as aeronaves se aproximam de um aeroporto para o pouso, entram na fila para ser sequenciadas. Normalmente, vortação por radar e procedimentos padrão de chegada na terminal (*STAR – standard terminal arrival*) são usados para formar essa fila, independente da categoria e de outras características da aeronave. Para manter a separação entre as aeronaves, são empregadas medidas como redução de velocidade ou procedimentos de espera. Como consequência, tais providências promovem um aumento do tempo de voo e dos custos associados.

Tabela 1 – Separação mínima, em segundos, para diferentes pares de aeronaves operando na mesma pista de pouso

		Aeronave seguidora		
		Pesada	Média	Pequena
Aeronave líder	Pesada	94	114	167
	Média	74	74	138
	Pequena	74	74	98

A principal preocupação do gerenciamento de tráfego aéreo é a garantia da segurança operacional. Os parâmetros de separação vertical e horizontal mínimos devem ser sempre respeitados. Na fase de aproximação, separações por esteira de turbulência são empregadas para mitigar o impacto dos vórtices formados durante a passagem de uma aeronave. A esteira de turbulência é um fenômeno potencialmente perigoso que pode causar perda de estabilidade em uma aeronave seguidora. Por isso, as aeronaves são divididas em categorias (pesada, média e pequena), para as quais são definidas separações mínimas em distância ou tempo. A Tabela 1 mostra a separação mínima, em segundos, para diferentes pares de aeronaves operando na mesma pista de pouso.

O controlador de voo monitora, a partir de seu console, os voos da sua área de jurisdição e garante, utilizando medidas de vetoração e espaçamento, que as aeronaves não infrinjam o afastamento regulamentar. A característica assimétrica da separação entre duas aeronaves tornam o FCFS, na maioria das vezes, uma opção sub-ótima de sequenciamento em termos de ganho de capacidade de pista (Zhan *et al.*, 2010). Para permitir a modelagem do ALP, a revisão da literatura utiliza a separação mínima em função do tempo e não da distância. A Tabela 1 é baseada no estudo de Zhang *et al.* (2007), porém, outras distâncias podem ser encontradas como em Balakrishnan e Chandran (2010) ou Ji *et al.* (2017).

Com o objetivo de reduzir a separação mínima entre as aeronaves e aumentar a capacidade, um processo de recategorização de aeronaves (RECAT) encontra-se em estudo. Trata-se de um projeto dividido em três fases e que busca revisar os padrões tidos atualmente como ultraconservadores. Para uma maior discussão acerca do RECAT e seus desafios para a implementação, sugere-se a leitura de Pamplona *et al.* (2015).

O ALP busca aperfeiçoar o sequenciamento de aeronaves através da otimização de uma função objetivo, a qual pode contemplar um ou mais objetivos de desempenho dos diferentes *stakeholders* envolvidos (Bennell *et al.*, 2011). Um dos objetivos de desempenho considerados, sobretudo pelas empresas aéreas, é a minimização dos atrasos resultantes do sequenciamento. A literatura acadêmica aponta três formulações algébricas existentes para este caso. Considerando o número total de aeronaves a serem sequenciadas (P), a primeira concepção, proposta inicialmente por Beasley *et al.* (2000), atribui um fator de penalidade (g_i) ou (h_i) quando uma aeronave i , respectivamente, antecipa ou atrasa o seu pouso em relação ao horário anteriormente idealizado (T_{Pi}). O objetivo é minimizar a soma do total de minutos antecipados (α_i) ou atrasados (β_i) multiplicados pelos respectivos fatores de penalização, conforme Equação 1.

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^P (g_i \alpha_i + h_i \beta_i) \quad (1)$$

Uma variante da Equação 1 é quando a função objetivo visa a minimizar o somatório total de atrasos (Equação 2). Nesse caso, o intuito é minimizar a soma total da diferença entre o horário planejado de pouso (T_{Pi}) e o horário real de pouso (T_{Ei}) para determinada aeronave i , onde os fatores de penalidade (g_i ; h_i) são eliminados e considerados iguais para todo o conjunto a ser ordenado.

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^P (T_{Pi} - T_{Ei}) \quad (2)$$

Alguns estudos, apesar de tratarem de maneira análoga as discrepâncias em relação aos horários previstos, consideram uma diferença no custo do atraso por tipo de aeronave, atribuindo um determinado peso (w_i), conforme Equação 3. Geralmente, w_i está relacionado a categorização baseada no peso máximo de decolagem e considera que aeronaves maiores tendem a ter um custo maior de atraso.

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^P w_i (T_{Pi} - T_{Ei}) \quad (3)$$

Um outro objetivo considerado, sobretudo pelo prestador de serviço de navegação aérea, é a maximização do uso da capacidade de pista. Tipicamente, este objetivo é modelado com a minimização do tempo de operação de determinada pista para processar a sequência de aeronaves, ou seja, com a minimização do horário de pouso da última aeronave a ser sequenciada ($T_{E\text{última}}$), conforme Equação 4. Tal abordagem resulta no aumento da quantidade

de aeronaves que poderão utilizar determinada pista no mesmo espaço de tempo e no decorrente aumento da capacidade de operação (número de operações por espaço de tempo).

$$\text{minimizar } T_{E\acute{u}ltima} \quad (4)$$

A revisão de literatura aponta quatro abordagens para a modelagem do ALP: (1) programação inteira mista (MIP – *mixed integer programming*); (2) problema de programação de máquina (MSP – *machine scheduling problem*); (3) problema do caixeiro viajante (TSP – *travelling salesman problem*); e (4) teoria das filas. As principais abordagens utilizadas são o MSP e o TSP.

A modelagem MSP considera que as pistas de pouso representam máquinas idênticas e as aeronaves representam os trabalhos que serão realizados. O objetivo é minimizar o custo total, onde o custo do delineamento de um trabalho é atribuído em função do desvio em relação ao tempo planejado. Penalizações podem ser atribuídas pelas tarefas realizadas antes ou depois do tempo alvo (Beasley *et al.*, 2000).

Na modelagem TSP, realiza-se uma analogia entre o TSP e o ALP. Tal paridade foi inicialmente apresentada por Luenberger (1988). No TSP, dado um conjunto de N cidades, um vendedor deve visitar cada cidade uma única vez, começando em qualquer cidade e retornando à cidade de origem. O objetivo é determinar qual trajeto minimizará a distância total percorrida pelo vendedor. Modelada-se matematicamente o TSP através de grafos, onde cada cidade é representada por um nó e dois nós são conectados por arcos. Cada arco possui uma distância ou custo associado. A distância total percorrida será o somatório do comprimento dos arcos percorridos. Para formular o problema, variáveis binárias são utilizadas (Hoffman *et al.*, 2013):

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o arco } i \rightarrow j \text{ é percorrido} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

O TSP apresenta a seguinte formulação geral (Hoffman *et al.*, 2013):

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

Restrito:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \text{ para } i = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \text{ para } j = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} x_{ij} \leq |K| - 1 \quad \forall K \subset \{1, \dots, m\} \quad (9)$$

Onde, K é qualquer subconjunto pertencente ao conjunto de cidades $1, \dots, m$. O custo c_{ij} pode ser diferente do custo c_{ji} . O total de variáveis binárias é igual a $m(m-1)$ (Hoffman *et al.*, 2013). A Eq. 6 define a função objetivo, ou seja, a minimização do custo total para visitar as cidades consideradas. As Eq. 7-8 garantem a existência de um caminho de chegada e um de saída em qualquer cidade. A Eq. 9 evita a formação de subcaminhos.

No ALP, cada cidade corresponde a uma aeronave e as distâncias intermunicipais são substituídas pela matriz de separação em tempo entre aeronaves devido à esteira de turbulência. A restrição de terminar a jornada onde ela foi iniciada é removida. As janelas de tempo para visitar cada cidade são as janelas de tempo para a realização do pouso. No TSP, o objetivo é minimizar a distância. Em sua adaptação para o ALP, o objetivo é minimizar o tempo total de operação, aumentando a capacidade de operação de uma pista quando comparado ao FCFS.

Para manter a equidade entre as aeronaves e evitar que uma aeronave seja continuamente atrasada, alguns estudos introduzem a restrição de mudança de posição (CPS) em relação à posição inicial da aeronave na fila, e que pode ser modelada no formato de uma janela de tempo a ser atendida.

O ALP é considerado um problema do tipo NP-difícil (Beasley *et al.*, 2000; Liu, 2010). A maioria das técnicas utilizadas para a solução do problema são baseadas em heurísticas (Beasley *et al.*, 2000; Beasley *et al.*, 2004; Harikiopoulo e Neogi, 2011; Briskorn e Stolletz, 2013; Ghoniem *et al.*, 2014; Faye, 2015; Avella *et al.*, 2017) ou metaheurísticas (Capri e Ignaccolo, 2004; Liu, 2010; Hu e Paolo, 2011; Zhou e Jiang, 2015; Sylejmani *et al.*, 2017).

Na modelagem do ALP, o conhecimento da situação pode ser modelado como: dinâmico ou estático. No caso estático, existe um completo conhecimento da situação que irá ocorrer durante a aproximação das aeronaves para pouso (Beasley *et al.*, 2000). O número total de pistas disponíveis, o total de aeronaves a serem sequenciadas, o tipo de cada aeronave (pesada, média e pequena), os horários estimados para o pouso e os tempos mínimos de separação determinados pelas autoridades de aviação são conhecidos (Ghoniem e Farhadi, 2015). No dinâmico, existe a possibilidade de mudanças como incapacidade da aeronave cumprir os horários determinados, novas aeronaves acrescentadas ao sequenciamento, entre outras situações, obrigando que o mesmo seja realizado constantemente (Beasley *et al.*, 2000). A revisão de literatura aponta que a maioria dos estudos aborda o problema como estático, por considerar que o dinâmico é uma sucessão de situações estáticas, acentuando a necessidade de métodos de solução rápida para o problema (Harikiopoulo e Neogi, 2011).

Para a verificação do método proposto, podem ser utilizados dados teóricos ou reais. Os dados teóricos encontrados na *OR-Library* e utilizados inicialmente no trabalho de Beasley *et al.* (2000) são os mais utilizados. Para os trabalhos que utilizam dados reais, os seguintes aeroportos foram utilizados: Frankfurt (Trivizas, 1998; Lieder e Stolletz, 2016), Denver (Balakrishnan e Chandran, 2010), Detroit (Metropolitan Wayne County) (Sölveling *et al.*, 2011; Andreeva-Mori *et al.*, 2013), Londres (Heathrow) (Caccavale *et al.*, 2014; Bennell *et al.*, 2016; Lieder e Stolletz, 2016), Nova Iorque (John F. Kennedy, Newark e La Guardia) (Jacquillat e Odoni, 2015), Milão (Linate) (Furini *et al.*, 2015; Vasilyev *et al.*, 2016; Sylejmani *et al.*, 2017), Chengdu (Shuangliu) (Zhou e Jiang, 2015), Beijing (Ji *et al.*, 2016), Roma (Fiumicino) (Sama *et al.*, 2016) e Estocolmo (Arlanda) (Avella *et al.*, 2017). Outros artigos usam uma combinação de dados teóricos e reais (Fahle *et al.*, 2004; Ghoniem *et al.*, 2014; Ghoniem *et al.*, 2015; Rodríguez-Díaz *et al.*, 2017).

O presente estudo tem por objetivo desenvolver um método de solução para o problema de sequenciamento de aeronaves para pouso que seja capaz de produzir um ganho de capacidade de pista, gerar soluções viáveis em um curto espaço de tempo e manter a equidade ao respeitar um número máximo de mudanças de posição na fila para o sequenciamento. Para tanto, optou-se por uma metaheurística de busca local baseada no arrefecimento simulado ao invés de uma metaheurística de busca populacional. Com o objetivo de melhorar o desempenho da metaheurística, optou-se por utilizar uma solução inicial baseada em uma heurística do tipo gulosa. Para avaliar os potenciais benefícios do método proposto, foi utilizada a base teórica *OR-Library*, bem como dados reais do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos.

4. O MÉTODO PROPOSTO

O presente estudo modelou o problema do sequenciamento de aeronaves para pouso como o problema do caixeiro viajante em sua forma aberta, com janelas de tempo, e com o objetivo de

minimizar o horário de pouso da última aeronave (Equação 4), de forma a maximizar o uso da capacidade de pista.

Considerando que $N: \{1, 2, \dots, n\}$ é o conjunto de aeronaves na fila para pousar em determinada pista de um determinado aeroporto e que 0 representa a primeira aeronave a pousar, a modelagem do ALP é apresentada a seguir:

$$\sum_{i \in N \cup \{0\}, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \cup \{0\} \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{0\}, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \cup \{0\} \quad (11)$$

$$\beta_j \geq \beta_i + s_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in N \cup \{0\}, j \neq 0 \quad (12)$$

$$e_i \leq \beta_i \leq l_i \quad (13)$$

$$x_{i0} = 0 \quad \forall i \in N \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \cup \{0\} \quad (15)$$

$$\beta_i \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \forall i \in N \cup \{0\} \quad (16)$$

$$e_i, l_i \in \mathbb{R}_{\geq 0} \quad \forall i \in N \cup \{0\} \quad (17)$$

em que: e_i : o horário de pouso mais cedo para a aeronave i (i, \dots, N);

l_i : o último horário de pouso da aeronave i (i, \dots, N);

$[e_i, l_i]$: janela de tempo para o pouso da aeronave i ;

s_{ij} : tempo mínimo de separação entre as aeronaves i e j ao pousar, conforme Tabela 1;

e

M : é volume de contato do agregado;

Variáveis de decisão:

$$x_{ij}: \begin{cases} 1, \text{ se a aeronave líder } i \text{ for imediatamente seguida pela aeronave } j \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

β_i : o horário de pouso da aeronave i

As restrições (10) e (11) estabelecem o sequenciamento das aeronaves. Restrição (12) garante que o horário de chegada de uma aeronave não pode ser menor do que o horário de uma aeronave que pousou anteriormente mais a separação entre as aeronaves i e j . Como todas as separações são positivas, a Restrição (12) evita a formação de subciclos. A Restrição (13) é a ressalva inviolável da janela de tempo, que garante a isonomia durante o sequenciamento. A Restrição (14) remove a obrigação de que a última aeronave esteja vinculada à primeira. A Restrição (15) define a variável de decisão como um valor binário. A Restrição (16) define que o tempo de operação deva ser positivo. A Restrição (17) garante que as janelas de tempo sejam positivas.

O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo proposto para a resolução do problema.

Algoritmo 1 Pseudocódigo do método proposto para a resolução do ALP

Inicialização

Input: N_{INIT}

Output: N_{HSA}

1. Determinar n_{MECPS} , n_{MLCPS}
 2. Determinar λ , T_0 , α , M , N
 3. Determinar $t_{exec} = 0$
 4. Executar o Módulo FCFS
 5. Executar o Módulo JANELA DE TEMPO
 6. Executar o Módulo SOLUÇÃO INICIAL
 7. **enquanto** ($t_{exec} < 5 \text{ seconds}$ or $M > 0$)
 8. Executar o Módulo ARREFECIMENTO SIMULADO COM PENALIZAÇÃO
 9. **fim enquanto**
 10. Fim
-

em que: N_{INIT} : o horário de pouso mais cedo para a aeronave i (i, \dots, N);

N_{HSA} : sequência final de aeronaves utilizando o método proposto

n_{MECPS} : antecipação máxima (CPS)

n_{MLCPS} : atraso máximo (CPS)

t_{exec} : tempo total de execução do algoritmo

λ : variável de penalização

T_0 : temperatura inicial

T' : temperatura atual

α : fator de resfriamento

M : número de execuções na temperatura atual

N : número total de mudanças no parâmetro temperatura

O método proposto busca, de forma sistemática, criar uma sequência de pouso melhor em comparação com a sequência FCFS. O algoritmo está dividido em quatro módulos. O módulo FCFS utiliza como *input* a sequência inicial de aeronaves e aplica a separação entre pares de aeronaves, conforme a Tabela 1. Em seguida, o módulo JANELA DE TEMPO irá calcular a janela de tempo para cada aeronave no conjunto. Trata-se de uma restrição inviolável. A sua não conformidade acarretará em uma solução inviável e que deverá ser descartada. O módulo é baseado no conceito de equidade em termos de tempo, conforme proposto por Bennell *et al.* (2011). O módulo emprega três parâmetros para o cálculo da janela de tempo: a separação máxima entre todos os pares de aeronaves no conjunto a ser sequenciado, o número máximo de mudanças de posição para antecipação (n_{MECPS}) e o número máximo de mudanças de posição para atraso (n_{MLCPS}). Com o objetivo de melhorar o desempenho do algoritmo de busca local, o módulo SOLUÇÃO INICIAL calculará uma sequência de pouso inicial com desempenho superior à sequência proporcionada pelo FCFS. O módulo é baseado em um algoritmo guloso que combina heurísticas construtivas e de inserção adaptado às restrições invioláveis de janela de tempo e à separação mínima entre as aeronaves.

Uma vez que os passos de preparação do algoritmo estão concluídos, o módulo ARREFECIMENTO SIMULADO COM PENALIZAÇÃO usará a estrutura da metaheurística SA combinada com um fator de penalização λ para fornecer uma sequência final de pouso.

O método proposto no presente estudo é inspirado no processo de busca clássico do SA, onde soluções piores podem ser aceitas baseadas em determinado fator de probabilidade. Tal medida busca escapar dos mínimos locais para encontrar o mínimo global da sequência a ser otimizada. Um fator determinante é que cada aeronave na sequência deve respeitar a sua respectiva janela de tempo. No presente módulo, todas as aeronaves são verificadas quanto a esse requisito. O fator de penalização λ será atribuído toda a vez que ocorrer a violação da respectiva janela de tempo. Durante o cálculo do valor da função objetivo, a soma de todas as penalizações será adicionada ao tempo de pouso da última aeronave. Dessa maneira, o algoritmo proposto poderá comparar a qualidade da solução, onde no problema estudado, a melhor solução será aquela com o menor tempo de pouso da última aeronave.

Durante a execução do módulo, dois conjuntos são analisados: a sequência atual (S_a) e a sequência candidata (S_{can}). S_{can} será considerada a resposta atual em dois casos. No primeiro, se o valor da função objetivo de S_{can} for menor que o valor da função objetivo de S_a . No segundo, utiliza-se a Equação 18 para gerar um valor que será comparado com um número aleatório (n_{ai}) gerado. Caso n_{ai} seja menor ou igual à função de probabilidade exponencial

que é enviesada pelo coeficiente da diferença entre as funções objetivos e pelo valor da temperatura atual.

$$n_{al} \leq e^{-\frac{(\text{Função Objetivo}_{S_{can}} - \text{Função Objetivo}_{S_a})}{T}} \quad (17)$$

O fator de penalização será adicionado à função objetivo toda a vez que uma aeronave é inserida em uma posição da sequência que não permita que ela cumpra a sua respectiva janela de tempo. Optou-se por manter as soluções inviáveis no espaço de busca devido às características do problema estudado, onde a ampliação do espaço de busca pode propiciar melhores resultados. As outras partes do algoritmo incluem o decréscimo geométrico da temperatura e a produção de soluções candidatas através de uma estrutura de vizinhança aleatória com um movimento de troca. O movimento de troca será implementado selecionando aleatoriamente a posição i e a posição j na sequência das aeronaves e trocando as suas posições.

5. RESULTADOS

O método proposto foi implementado na linguagem Python e executado em um computador Intel(R) Core™ i7-5500UCPU com 2.4 GHz, 8 Gb RAM e sistema operacional *Windows*. O modelo de programação inteira mista foi resolvido com o *software* CPLEX 12.9.0 usando a configuração padrão e tempo máximo de execução de 600 segundos. No estudo, considerou-se uma pista dedicada apenas para a operação de pouso de maneira independente. O conjunto de dados *Airland*, disponível na *OR-library*, e dados reais do Aeroporto de São Paulo/Guarulhos (SBGR) foram utilizados. O sequenciamento foi realizado com um máximo de 50 aeronaves na base teórica e de até 32 aeronaves na base real.

As instâncias da base real foram criadas a partir de uma análise das operações em SBGR no ano de 2017. Foram escolhidos os dois períodos com maior movimento médio de aeronaves no dia. As instâncias com 30 aeronaves (GRU 7-X) apresentaram um *mix* de aeronaves na ordem de 25% para o tipo Pesada e 75% para o tipo Média. Já as instâncias com 32 aeronaves (GRU 19-X) foram constituídas por um *mix* de 15% para o tipo Pesada e 85% para o tipo Média. Assim como em Balakrishnan e Chandran (2010) e Sølving e Clarke (2014), o *mix* de aeronaves serviu de *input* para um gerador de sequência de aeronaves baseado em simulação do tipo Monte Carlo. 10 instâncias foram geradas, mantendo o *mix* de aeronaves, mas com diferentes sequências de aeronaves.

O CPS influencia diretamente nos ganhos de capacidade. O presente estudo explorou três cenários: *cenário conservador*, com n_{MECPS} e n_{MLCPS} igual a 1; *cenário normal*, com n_{MECPS} igual a 3 e n_{MLCPS} igual a 5; e *cenário permissivo* com n_{MECPS} igual a 5 e n_{MLCPS} igual a 10. Devido à componente de aleatoriedade do método proposto, cada cenário em cada conjunto de dados foi rodado 100 vezes, e foi realizada a análise do valor mínimo (MIN) e da média (MED).

A Tabela 2 apresenta os resultados para o conjunto de dados teóricos, onde n é o total de aeronaves que foram sequenciadas; os cenários são representados por conservador, normal e permissivo; e os valores em negrito representam os casos em que o método proposto foi capaz de apresentar resultados melhores que o CPLEX.

Para o cenário conservador, com exceção da sequência *Airland 6*, não houve diferença entre os algoritmos otimizadores. Porém, a sequência *Airland 6* mostrou que, dependendo do tipo e número total de aeronaves, podem ocorrer ganhos de capacidade. Para os cenários normal e permissivo, não foi observado ganho de capacidade para sequências com até 20 aeronaves. Acima de 30 aeronaves, houve ganhos de capacidade em todos os conjuntos de dados.

A Figura 1 compara os ganhos de capacidade máximo e médio obtidos com a utilização do método proposto, em comparação com o método FCFS, para o conjunto de dados *Airland*, por tipo de cenário.

Tabela 2 – Tempo total de operação da pista, em segundos, para diferentes sequências teóricas de aeronaves operando na mesma pista de pouso

Airland	n	Cenário conservador				Cenário normal			Cenário permissivo		
		FCFS	Método Proposto			CPLEX	Método Proposto		CPLEX	Método Proposto	
			CPLEX	MIN	MED		MIN	MED		MIN	MED
1	10	93	93	93	93	74	74	74	74	74	74
2	15	118	118	118	118	99	99	99	99	99	99
3	20	133	133	133	133	114	114	114	114	114	114
4	20	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134
5	20	153	153	153	153	134	134	134	134	134	134
6	30	3266	3146	3050	3145,76	2840	2840	2952,14	2840	2744	2768,45
7	44	4952	4832	4832	4832	4544	4448	4547,12	4544	4448	4529,6
8	50	402	387	387	387	364	362	363,3	330	330	330

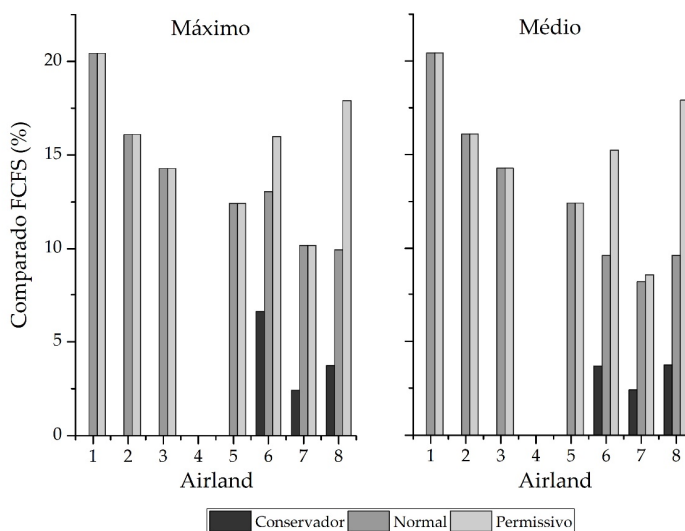


Figura 1. Ganhos máximo e médio de capacidade do método proposto em comparação ao FCFS para o conjunto de dados *Airland*, por cenário

A implementação do método proposto para os dados teóricos resultou em ganhos de capacidade que variaram de 0% a 20,43%, quando comparado com o método FCFS. A explicação para a variação entre os ganhos é que *Airland* abrange três categorias de aeronaves e diferentes números de aeronaves a serem sequenciadas, impactando no desempenho do método proposto. O método proposto foi capaz de apresentar resultados melhores que os apresentados em Ma *et al.* (2014). Em termos de desempenho computacional, o método proposto foi capaz de prover soluções em até um décimo do tempo, quando comparado à abordagem baseada em algoritmos genéticos proposto por Ji *et al.* (2017), e um terço do tempo, quando comparado à abordagem baseada em colônia de formigas apresentada por Xu (2017).

A Tabela 3 apresenta os resultados para o conjunto de dados reais de SBGR, onde n é o total de aeronaves que foram sequenciadas; os cenários são representados por conservador, normal e permissivo; e os valores em negrito representam os casos em que o método proposto foi capaz de apresentar resultados melhores que o CPLEX.

Tabela 3 – Tempo total de operação da pista, em segundos, para diferentes sequências práticas de aeronaves operando na mesma pista de pouso

GRU	n	FCFS	Cenário conservador			Cenário normal			Cenário permissivo		
			CPLEX	Método Proposto		CPLEX	Método Proposto		CPLEX	Método Proposto	
				MIN	MED		MIN	MED		MIN	MED
7-1	30	2466	2426	2426	2426	2346	2346	2346	2346	2306	2342,6
7-2	30	2426	2386	2386	2386	2326	2326	2338.4	2306	2306	2317
7-3	30	2406	2366	2366	2369,6	2326	2326	2332.8	2306	2306	2320
7-4	30	2446	2426	2426	2426	2326	2326	2334	2306	2306	2325
7-5	30	2446	2406	2406	2406	2346	2346	2346	2306	2306	2326
19-1	32	2534	2494	2494	2494	2454	2306	2317,4	2434	2286	2288,8
19-2	32	2514	2494	2494	2507	2474	2306	2327,4	2434	2266	2287
19-3	32	2514	2474	2474	2474	2434	2286	2302	2414	2286	2287,8
19-4	32	2514	2494	2494	2503,2	2454	2306	2321,2	2434	2286	2301
19-5	32	2494	2454	2454	2454	2414	2246	2260,4	2414	2246	2248,6

O modelo proposto foi capaz de apresentar ganhos de capacidade de pista em todos os cenários. SBGR mostra que uma sequência maior de aeronaves pode permitir, dependendo do número de aeronaves e da sequência inicial (FCFS), a possibilidade de inserção de novas operações. A Figura 2 apresenta os ganhos de capacidade por cenário para o conjunto de dados de SBGR.

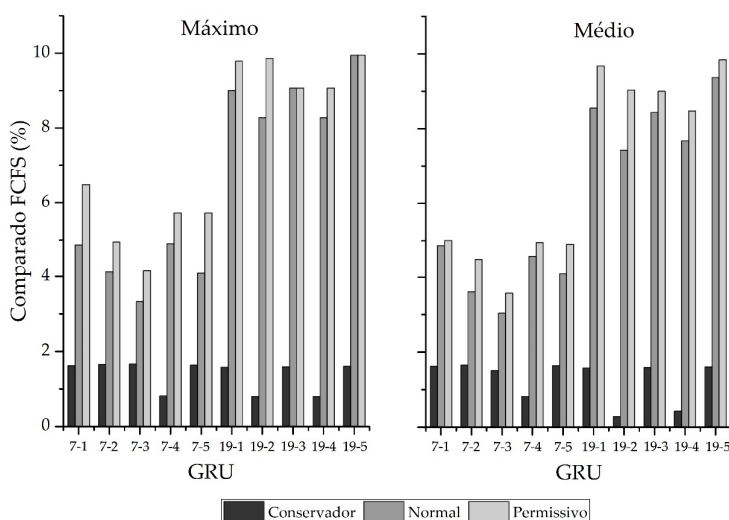


Figura 2. Ganhos máximo e médio de capacidade do método proposto em comparação ao FCFS para o conjunto de dados de SBGR, por cenário

A implementação do método proposto para os dados reais resultou em ganhos de capacidade que variaram de 0,8% a 9,95%, quando comparado com o método FCFS. Os resultados mostram que a implementação de sistemas de suporte à decisão para o sequenciamento de aeronaves representa uma alternativa para os aeroportos que possuem problemas de capacidade, com potenciais aumentos de capacidade de pista.

As metaheurísticas são métodos que se distinguem por possuírem uma componente de aleatoriedade com o objetivo de escapar dos mínimos locais durante o processo de busca pela melhor solução. Para o ALP, uma boa implementação deve ser capaz de apresentar resultados iguais ou menores que os implementados pela programação inteira mista (CPLEX) e que possuam um pequeno nível de variância quando a metaheurística é rodada inúmeras vezes.

O método proposto foi capaz de encontrar, em cinco segundos computacionais de execução, resultados iguais ou melhores que o CPLEX, sendo que cinco soluções na base teórica e 11 soluções na base real foram melhores. Sobre a variância de resultados, a Figura 3 mostra a diferença entre os ganhos máximo e médio.

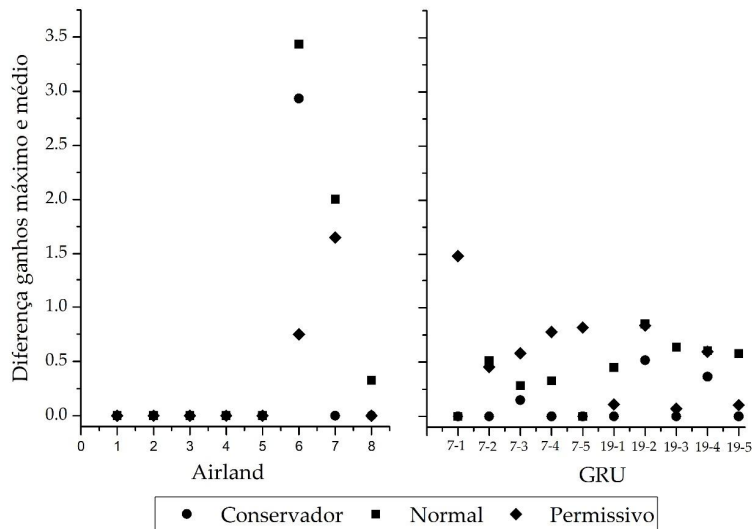


Figura 3. Diferença entre os ganhos máximo e médio para o conjunto de dados *Airland* e GRU

Os resultados mostram que o método proposto apresentou pequena variância entre os ganhos máximo e médio de capacidade. Por conseguinte, a execução do método proposto trará uma maior previsibilidade para os serviços de tráfego aéreo e isonomia para as empresas aéreas.

Ao testar a utilização de três possíveis configurações de janela de tempo, baseadas no nível de flexibilidade definido pelo CPS para o novo sequenciamento de aeronaves, o presente estudo foi capaz de analisar o seu impacto no ganho de capacidade. A Figura 4 mostra o tempo total de operação da pista, para o conjunto de dados reais, em cada configuração CPS.

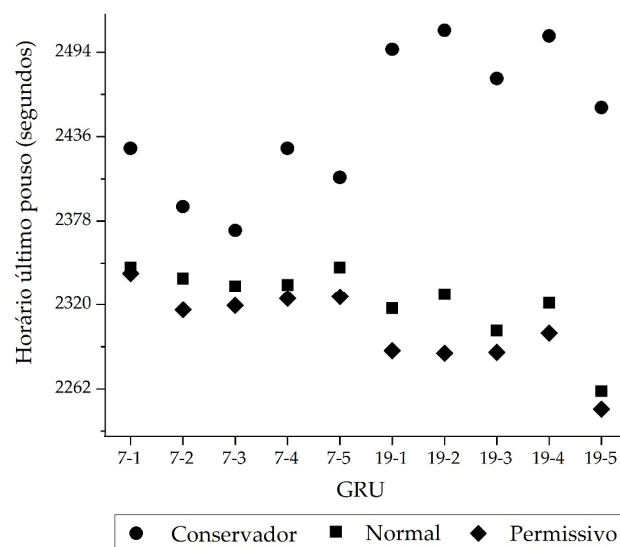


Figura 4. Tempo total de operação da pista para o conjunto de dados reais em cada configuração CPS

O estudo mostra que, para o conjunto de dados analisado, os ganhos de capacidade de pista para o cenário normal e o cenário permissivo são semelhantes. A garantia da equidade na alocação de atrasos, neste trabalho modelada com janelas de tempo construídas a partir do CPS, é uma característica importante para que ocorra a aceitação de novos métodos de sequenciamento pelos *stakeholders*. O estudo aponta que a utilização de uma antecipação máxima de 3 posições e de um atraso máximo de 5 posições em relação à posição da aeronave na sequência inicial apresenta-se como a melhor configuração a ser utilizada para a implementação do método proposto no aeroporto estudado. Porém, deve-se ressaltar que essa configuração não deve ser vista como universal e está ligada à combinação de aeronaves que operam em determinado horário no aeroporto.

6. CONCLUSÃO

Problemas de capacidade de pista estão presentes em vários aeroportos ao redor do mundo. Uma das soluções para o problema seria a construção de novas pistas ou até mesmo de novos aeroportos nas áreas afetadas. Porém, numerosas restrições podem impossibilitar a expansão da capacidade. Para sobrepor tais óbices, uma alternativa viável é o aperfeiçoamento do gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, de forma a maximizar a utilização da capacidade existente. No nível tático, o aperfeiçoamento do sequenciamento de aeronaves pode ser realizado para maximizar o uso da pista e mitigar atrasos.

O problema do sequenciamento de aeronaves pode ser modelado como um problema de otimização e está sujeito a uma série de restrições operacionais. Por ser um problema de difícil resolução, a literatura acadêmica aponta para a utilização de heurísticas e metaheurísticas. O presente artigo tem por objetivo propor um método de solução para o problema do sequenciamento que produza uma sequência de aeronaves para pouso mais eficiente que a regra atual baseada no FCFS, que seja de rápida execução e que mantenha a equidade na alocação de atrasos entre os operadores aéreos. O método proposto, baseado na metaheurística de arrefecimento simulado, foi capaz de, em cinco segundos de tempo computacional, produzir soluções iguais ou melhores que as encontradas pelo CPLEX e com ganhos de capacidade de até 11% em instâncias reais, quando comparado ao método FCFS.

O método proposto no presente artigo não deve ser considerado a solução final para os problemas de capacidade de pista, mas uma tentativa de acomodar os níveis de tráfego aéreo em determinado aeroporto por determinado espaço de tempo até que soluções definitivas possam ser implementadas.

REFERÊNCIAS

- Andreeva-Mori, A.; S. Suzuki e E. Itoh (2013) Rule derivation for arrival aircraft sequencing. *Aerospace Science and Technology*, n. 30, p. 200-209. DOI: 10.1016/j.ast.2013.08.004
- Avella, P.; M. Boccia; C. Mannino e I. Vasilyev (2017) Time-indexed formulations for the runway scheduling problem. *Transportation Science*, n. 51, p. 1196-1209. DOI: 10.1287/trsc.2017.0750
- Balakrishnan, H. e B. G. Chandran (2010) Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting. *Operations Research*, n. 58, p. 1650-1665. DOI: 10.1287/opre.1100.0869
- Barnhart, C. e B. Smith (2012) *Quantitative problem-solving methods in the airline industry*. Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4614-1608-1
- Beasley, J. E.; M. Krishnamoorthy; Y. M. Sharaiha e D. Abramson (2000) Scheduling aircraft landings—the static case. *Transportation science*, n. 34, p. 180-197. DOI: 10.1287/trsc.34.2.180.12302
- Beasley, J. E.; M. Krishnamoorthy; Y. M. Sharaiha e D. Abramson (2004) Displacement problem and dynamically scheduling aircraft landings. *Journal of the operational research society*, n. 55, p. 54-64. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601650
- Bennell, J. A.; M. Mesgarpour e C. N. Potts (2011) Airport runway scheduling. *4OR*, n. 9, p. 115. DOI: 10.1007/s10288-011-0172-x

- Bennell, J. A.; M. Mesgarpour e C. N. Potts (2013) Airport runway scheduling. *Annals of Operations Research*, n. 204, p. 249-270. DOI: 10.1007/s10479-012-1268-1
- Bennell, J. A.; M. Mesgarpour e C. N. Potts (2016) Dynamic scheduling of aircraft landings. *European Journal of Operational Research*, n. 258, p. 315-327. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.08.015
- Briskorn, D. e R. Stolletz (2013) Aircraft landing problems with aircraft classes. *Journal of Scheduling*, n. 17, p. 31-45. DOI: 10.1007/s10951-013-0337-x
- Brueckner, J. K. (2002) Internalization of airport congestion. *Journal of Air Transport Management*, n. 8, p. 141-147. DOI: 10.1016/s0969-6997(01)00049-7
- Caccavale, M. V.; A. Iovanela; C. Lancia; G. Lulli e B. Scoppola (2014) A model of inbound air traffic: The application to Heathrow airport. *Journal of Air Transport Management*, n. 34, p. 116-122. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2013.09.004
- Capri, S. e M. Ignaccolo (2004) Genetic algorithms for solving the aircraft-sequencing problem: the introduction of departures into the dynamic model. *Journal of Air Transport Management*, n. 10, p. 345-351. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2004.05.004
- Fahle, T.; R. Feldmann; S. Götz; S. Grothklags e B. Monien (2004) The aircraft sequencing problem. *Computer science in perspective*. Springer. DOI: 10.1007/3-540-36477-3_11
- Faye, A. (2015) Solving the aircraft landing problem with time discretization approach. *European Journal of Operational Research*, n. 242, p. 1028-1038. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.10.064
- Furini, F.; M. P. Kidd; C. A. Persiani e P. Toth (2015) Improved rolling horizon approaches to the aircraft sequencing problem. *Journal of Scheduling*, n. 18, p. 435-447. DOI: 10.1007/s10951-014-0415-8
- Ghoniem, A. e F. Farhadi (2015) A column generation approach for aircraft sequencing problems: a computational study. *Journal of the Operational Research Society*, n. 66, p. 1717-1729. DOI: 10.1057/jors.2014.131
- Ghoniem, A.; F. Farhadi e M. Reihaneh (2015) An accelerated branch-and-price algorithm for multiple-runway aircraft sequencing problems. *European Journal of Operational Research*, n. 246, p. 34-43. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.019
- Ghoniem, A.; H. D. Sherali e H. Baik (2014) Enhanced models for a mixed arrival-departure aircraft sequencing problem. *INFORMS Journal on Computing*, n. 26, p. 514-530. DOI: 10.1287/ijoc.2013.0581
- Gillen, D.; A. Jacquillat e A. R. Odoni (2016) Airport demand management: The operations research and economics perspectives and potential synergies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, n. 94, p. 495-513. DOI: 10.1016/j.tra.2016.10.011
- Harikiopoulo, D. e N. Neogi (2011) Polynomial-time feasibility condition for multiclass aircraft sequencing on a single-runway airport. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, n. 12, p. 2-14. DOI: 10.2514/6.2004-6547
- Hirst, M. (2008) *The air transport system*. Amsterdam: Elsevier. DOI: 10.1533/9781845695224
- Hoffman, K.L.; M. Padberg e G. Rinaldi (2013) Traveling salesman problem. *Encyclopedia of operations research and management science*, n. 1, p. 1573-1578. DOI: 10.1007/978-1-4419-1153-7_1068
- Hu, X. B. e W. H. Chen (2005) Genetic algorithm based on receding horizon control for arrival sequencing and scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, n. 18, p. 633-642. DOI: 10.1016/j.engappai.2004.11.012
- Hu, X. B. e E. A. D. Paolo (2011) A ripple-spreading genetic algorithm for the aircraft sequencing problem. *Evolutionary Computation*, n. 19, p. 77-106. DOI: 10.1162/evco_a_00011
- ICAO (2014) Doc 9971 Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management. International Civil Aviation Organization
- Jacquillat, A. e A. R. Odoni (2015) Endogenous control of service rates in stochastic and dynamic queuing models of airport congestion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, n. 73, p. 133-151. DOI: 10.1016/j.tre.2014.10.014
- Ji, X. P.; X. B. Cao; W. B. Du e K. Tang (2016) An evolutionary approach for dynamic single-runway arrival sequencing and scheduling problem. *Soft Computing*, n. 21, p. 7021-7037. DOI: 10.1007/s00500-016-2241-8
- Lieder, A. e R. Stolletz (2016) Scheduling aircraft take-offs and landings on interdependent and heterogeneous runways. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, n. 88, p. 167-188. DOI: 10.2139/ssrn.2657577
- Liu, Y. H. (2010) A genetic local search algorithm with a threshold accepting mechanism for solving the runway dependent aircraft landing problem. *Optimization Letters*, n. 5, p. 229-245. DOI: 10.1007/s11590-010-0203-0
- Luenberger, R. A. (1988) *A traveling-salesman-based approach to aircraft scheduling in the terminal area*. Houston: National Aeronautics and Space Administration.
- Ma, W.; B. Xu; M. Liu e H. Huang (2014) An efficient approximation algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling problem. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: 10.1155/2014/236756
- Madas, M. A. e K. G. Zografos (2008) Airport capacity vs. demand: mismatch or mismanagement? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, n. 42, p. 203-226. DOI: 10.1016/j.tra.2007.08.002
- Nolan, M. (2011) *Fundamentals of air traffic control*. Boston: Cengage learning.
- Pamplona, D. A.; T. Hermeto; C. J. P. Alves; C. Muller (2015) Impactos na capacidade aérea através da recategorização da esteira de turbulência das aeronaves. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, n. 7, p. 162-175.
- Rodríguez-Díaz, A.; B. Adenso-Díaz e P. L. González-Torre (2017) Minimizing deviation from scheduled times in a single mixed-operation runway. *Computers & Operations Research*, n. 78, p. 193-202. DOI: 10.1016/j.cor.2016.09.014
- Sama, M.; A. D'ariano; P. D'ariano e D. Pacciarelli (2016) Scheduling models for optimal aircraft traffic control at busy airports: tardiness, priorities, equity and violations considerations. *Omega*, n. 67, p. 81-98. DOI: 10.1016/j.omega.2016.04.003
- Skorupski, J. e A. Florowski (2016) Method for evaluating the landing aircraft sequence under disturbed conditions with the use of Petri nets. *The Aeronautical Journal*, n. 120, p. 819-844. DOI: 10.1017/aer.2016.32

- Sölveling, G.; S. Solak; J. P. B. Clarke e E. L. Johnson (2011) Scheduling of runway operations for reduced environmental impact. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, n. 16, p. 110-120. DOI: 10.1287/opre.1100.0869
- Sylejmani, K.; E. Bytyçi e A. Dika (2017) Solving aircraft sequencing problem by using genetic algorithms. *Intelligent Decision Technologies*, p. 1-13. DOI: 10.3233/idt-170309
- Tian, Y.; L. Wan; K. Han e B. Ye (2018) Optimization of terminal airspace operation with environmental considerations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, n. 63, p. 872-889. DOI: 10.1016/j.trd.2018.06.018
- TRB (2012) Evaluating Airfield Capacity - ACRP Report 79. Washington, D.C.: Transportation Research Board
- Trivizas, D. A. (1998) Optimal scheduling with maximum position shift (MPS) constraints: A runway scheduling application. *The Journal of Navigation*, n. 51, p. 250-266. DOI: 10.1017/s0373463397007625
- Tu, Y.; M. O. Ball e W. S. Jank (2008) Estimating flight departure delay distributions—a statistical approach with long-term trend and short-term pattern. *Journal of the American Statistical Association*, n. 103, p. 112-125. DOI: 10.2139/ssrn.923628
- Vasilyev, I. L.; P. Avella e M. Boccia (2016) A branch and cut heuristic for a runway scheduling problem. *Automation and Remote Control*, n. 77, p. 1985-1993. DOI: 10.1134/s0005117916110084
- Xu, B. (2017) An efficient Ant Colony algorithm based on wake-vortex modeling method for aircraft scheduling problem. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, n. 317, p. 157-170. DOI: 10.1016/j.cam.2016.11.043
- Zhan, Z. H.; J. Zhang; Y. Li; O. Liu; S. Kwok; W. Ip e O. Kaynak (2010) An efficient ant colony system based on receding horizon control for the aircraft arrival sequencing and scheduling problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, n. 11, p. 399-412. DOI: 10.1145/1569901.1570148
- Zhang, X.; X. Zhang; J. Zhang e B. Liu (2007) Optimization of sequencing for aircraft arrival based on approach routes. Bellevue: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, p. 592-596. DOI: 10.1109/itsc.2007.4357670
- Zhou, H. e X. Jiang (2015) Multirunway optimization schedule of airport based on improved genetic algorithm by dynamical time window. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: 10.1155/2015/854372