

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



José Renato Paiva Carvalho

Otimização operacional de sistema pista-pátio aeroportuário

Trabalho de Graduação

2014

Civil-Aeronáutica

José Renato Paiva Carvalho

Otimização operacional de sistema pista-pátio aeroportuário

Orientador

Prof. Dr. Rodrigo Arnaldo Scarpel (ITA)

Co-orientador

Prof. Dr. Cláudio Jorge Pinto Alves (ITA)

Engenharia Civil-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

COMANDO-GERAL DE TECNOLOGIA AEROESPACIAL

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Carvalho, José Renato Paiva
Otimização operacional de sistema pista-pátio aeroportuário
São José dos Campos, 2014.
54f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil – Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
2014. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Arnaldo Scarpel

1. Sistema de pistas. 2. Pesquisa operacional 3. Algoritmos genéticos. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil-Aeronáutica. III. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARVALHO, José Renato Paiva. **Otimização operacional de sistema pista-pátio**. 2014. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: José Renato Paiva Carvalho

TÍTULO DO TRABALHO: Otimização operacional de sistema pista-pátio aeroportuário

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2014

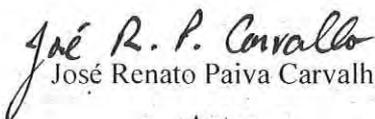
É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

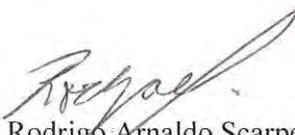
José Renato Paiva Carvalho

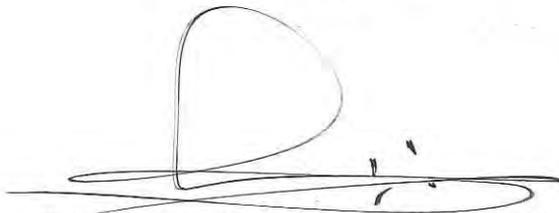
Rua H8A, número 142, Campus do CTA, CEP 12.228-460, São José dos Campos - SP

OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMA PISTA-PÁTIO AEROPORTUÁRIO

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação


José Renato Paiva Carvalho
Autor


Prof. Dr. Rodrigo Arnaldo Scarpel (ITA)
Orientador


Prof. Dr. Cláudio Jorge Pinto Alves (ITA)
Co-orientador


Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto
Coordenador do Curso de Engenharia de Computação

São José dos Campos, 24 de novembro de 2014

Dedico este trabalho à minha família,
suporte fundamental de todas as conquistas.

Agradecimentos

Ao corpo docente da divisão, de modo geral, pela dedicação e pela constante preocupação em melhorar o curso.

A todos os meus professores, pelos ensinamentos e pela contribuição para minha formação pessoal e profissional.

Ao meu orientador Prof. Rodrigo Scarpel, pelo apoio constante e pela contribuição essencial para a execução deste trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Cláudio Jorge, tanto pelo apoio neste trabalho, quanto pela orientação em minha PIBIC, sendo importante fomentador do meu interesse por transporte aéreo.

Ao meu relator Prof. Carlos Müller, pela importante contribuição no curso do trabalho, a qual levou a abordagens mais reais e, portanto, relevantes do problema aqui tratado.

À Turma 14, fruto de grandes amizades e momentos inesquecíveis, os quais tornaram a trajetória no ITA mais leve e rica.

À Civil 14 – tanto em sua formação inicial, quanto final -, por tornarem – relativamente – agradáveis noites em claro e serem meu maior exemplo de coletividade,

A meus amigos, por terem ensinado que o significado de família pode transpor o significado estrito, sanguíneo.

À minha família, por mostrar que os laços sanguíneos, em certa medida arbitrários, são os principais alicerces de qualquer conquista.

Por fim, em especial, a meus pais, por terem sido meus maiores professores.

“O alvoroço causa grandes imprudências.”

Alberto Santos-Dumont

Resumo

Este trabalho de graduação tem por objetivo avaliar o atual contexto de organização e execução dos procedimentos de pousos e decolagens. Para tanto, fez-se o estudo para o caso do Aeroporto Internacional de Guarulhos.

Após diagnóstico do contexto de infraestrutura aeroportuária vigente hoje no país e revisão das melhores práticas adotadas internacionalmente, bem como dos principais estudos na área, optou-se por desenvolver um algoritmo genético que funcionasse para o estudo de caso: nesse sentido, um dos pontos cruciais é a abordagem conjunta, dentro do mesmo modelo, de pousos e decolagens, o que está em consonância com a situação de operações dependentes do sistema de pistas de Guarulhos.

A análise de dois períodos distintos do ponto de vista de movimentação levou a dois resultados diferentes: no primeiro, mais movimentado, no qual se verificaram, inclusive, três transgressões às regras de espaçamento mínimo entre operações no cenário-base, obteve-se a redução a zero das infrações, porém não se conseguiu ampliar a possibilidade de inserções de novas operações – sob esse ponto de vista, o cenário-base foi 9% superior. No segundo período, com menor movimentação, mas ainda com ocorrência de uma infração, verificou-se, nos outputs do modelo, tanto a anulação das transgressões ao espaçamento mínimo, quanto o aumento da capacidade de receber novas operações – nesse período, o modelo foi 5% superior em relação ao cenário-base.

Em relação à implementação, a mesma seria sobremaneira facilitada caso houvesse a implementação das rotas alternativas sugeridas por Condé (2013) no mesmo aeroporto de Guarulhos, o que permitiria maior flexibilidade para se realizar as modificações necessárias em termos de horários previstos das operações.

Palavras-chave: sistema de pista; algoritmos genéticos; heurística populacional; Aeroporto de Guarulhos.

Abstract

This graduate work aims to assess the current context of the organization and implementation of procedures for landing and takeoff procedures. To do so, a study for the case of Guarulhos International Airport was done.

After diagnosis the context of existing airport infrastructure in the country today and review of international best practices adopted, as well as the main studies in the area, it was decided to develop a genetic algorithm that works for the case study: in this sense, one of the crucial points is the joint approach within the same model of takeoffs and landings, which is in line with the situation of dependent operations from Guarulhos runway system.

The analysis of two different periods of movement viewpoint led to two different results: the first busiest, which were found including three minimum spacing violations of rules between operations in the base scenario, obtained by reduction to zero the infractions, but it failed to extend the possibility of new operations inserts - from this point of view, the base scenario was 9% higher. In the second period, with less movement, but even with the occurrence of a breach, it was found in model outputs, both the annulment of transgressions to the minimum spacing, as the increased ability to receive new business - in this period, the model was 5% higher than the base scenario.

Regarding implementation, it would be greatly facilitated if there was the implementation of alternative routes suggested by Condé (2013) at the same airport of Guarulhos, which would allow greater flexibility to make the necessary changes in terms of expected timing of operations.

Keywords: runway system; genetic algorithms; population heuristic; Guarulhos Airport.

Lista de Figuras

Figura 1: Caraterização da população na heurística populacional.....	21
Figura 2: Processo de reprodução na heurística populacional	22
Figura 3: Processo de reposição da população em heurística populacional.....	27
Figura 4: Vista aérea do Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR)	33
Figura 5: Vista detalhada do sistema de pistas de SBGR	34
Figura 6: Vista detalhada do pátio do SBGR	35

Lista de Tabelas

Tabela 1: Separação radar mínima entre pousos (NM)	18
Tabela 2: Separação radar mínima entre decolagens (s).....	29
Tabela 3: Porte de aeronaves usadas para operações no Brasil	32
Tabela 4: Dados de entrada do modelo	36
Tabela 5: Resultados do modelo para período iniciados às 6:00 horas	37
Tabela 6: Análise da possibilidade de inserções de operações com aeronaves grandes	38
Tabela 7: Análise da possibilidade de inserções de operações com aeronaves médias	40
Tabela 8: Resultados do modelo para período iniciados às 13:00 horas	42
Tabela 9: Análise da possibilidade de inserções de operações com aeronaves grandes	43
Tabela 10: Análise da possibilidade de inserções de operações com aeronaves médias	45
Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos	47
Tabela 12: Resultados obtidos na terceira execução do modelo para o segundo período observado (13:00 h)	50

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

ALP – Aircraft Landing Problem

APP – Controle de Aproximação

ATFM - Air Traffic Flow Management

CTOT - Calculated Take-Off Time

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

HOTRAN – Horário de Transporte

ICAO – International Civil Aviation Organization

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

SBGR – Aeroporto Internacional de Guarulhos

TG – Trabalho de Graduação

VRA – Voo Regular Ativo

Sumário

1	Introdução	14
2	Objetivos	15
3	Revisão bibliográfica	15
	3 Metodologia empregada	17
	4.1 Aircraft Landing Problem (ALP).....	17
	3.1.1.1 Heurística populacional.....	20
	3.1.1.2 Heurística populacional aplicada ao problema do pouso da aeronave.....	23
	3.1.1.2.1 Representação da solução do problema.....	24
	3.1.1.2.2 Adaptação.....	24
	3.1.1.2.3 Seleção dos pais.....	25
	3.1.1.2.4 Crossover.....	25
	3.1.1.2.5 Restrições de separação.....	25
	3.1.1.2.6 Reposição da população.....	27
	3.1.2 Sequenciamento e otimização do controle de decolagens.....	28
	3.1.2.1 Sequenciamento de decolagens.....	28
	3.2 Modelo desenvolvido para as operações dependentes	31
4	Estudo de caso	32
	4.1 Aeroporto Internacional de Guarulhos	32
	4.2 Resultados.....	35
	4.3 Oportunidades de sinergia com outra abordagem do ALP.....	47
	4.3.1 Contrastes entre os estudos de ALP.....	48
	4.3.2 Perspectivas de visão integrada dos trabalhos	48
	4.4 Discussão dos resultados	49
5	Conclusões	51
	Referências bibliográficas.....	52

1. Introdução

Nos últimos anos, o transporte aéreo no Brasil passou por uma expansão de demanda sem precedentes: de 2007 a 2013, por exemplo, o número de passageiros anuais nos 20 principais aeroportos no Brasil passou de cerca de 100 milhões para cerca de 176 milhões, aumento superior a 10% ao ano. Em contrapartida, à exceção da privatização de seis aeroportos – São Gonçalo do Amarante, em 2011, Guarulhos, Viracopos e Brasília, em 2012, e Galeão e Confins, em 2013 -, com posteriores obras nos mesmos, pouco foi feito no sentido de ampliar a infraestrutura desse modal.

O descompasso entre demanda crescente e infraestrutura insuficiente levou à saturação de grande parte dos aeroportos do país. Os reflexos no sistema pista-pátio são notáveis: são raros os aeroportos que possuem mais de uma pista operando de maneira concomitante e problemas com pistas curtas e com falta de saídas de pista adequadas são bastante comuns; finalmente, segundo relatório feito pela consultoria McKinsey em parceria com o ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica), dos vinte aeroportos analisados, 10 já estavam saturados em 2009, 9 precisariam de investimentos até 2030 e apenas um, Galeão, tinha infraestrutura para chegar a 2030 sem precisar de investimentos. Mas quando se fala de déficit de capacidade, não é a execução de grandes obras estruturantes o único caminho; há muito o que se melhorar na operação e nos processos, o que é capaz de incrementar expressivamente a capacidade e o nível de serviço dos aeroportos brasileiros sem que se façam grandes investimentos. Naturalmente que, para muitos casos, apenas essa revisão de operações e processos não é suficiente, entretanto representa parte da solução.

Vejamos, então, o planejamento e a organização dos pousos e decolagens nos aeroportos do país. Esses são ainda assaz incipientes no que tange, respectivamente, a se obter sequencias de chegadas de aeronaves mais inteligentes, que prezem por menores tempos entre operações consecutivas, tanto em termos da operação planejada, quanto da operação realizada, operada por APP (Controle de Aproximação). Esse caráter atrasado da operação leva a prejuízos diversos e que afetam de maneira bastante extensiva todos os atores do transporte aéreo, desde as companhias aéreas e os administradores aeroportuários até o próprio passageiro.

Sob a ótica do aeroporto, sequencias de pousos ou de decolagens que não prezem pela maximização do uso da pista ou, simplesmente, baseadas em sistema first-come, first-served levam a intervalos maiores entre aeronaves consecutivas, diminuindo a sua capacidade e, por conseguinte, em muitos casos, a do aeroporto como um todo. Evidentemente, para que a função social do aeroporto seja exercida e o mesmo se firme dentro de um raio de influência, é de suma importância que este tenha uma movimentação de voos e passageiros tanto maior quanto possível.

Sob a ótica econômica, a má utilização da capacidade instalada de um aeroporto leva a perdas de todos, tanto das empresas, quanto dos passageiros. Para a administradora do aeroporto, abrir novos slots significa ganhos imediatos de receita a partir das companhias

aéreas; estas, por outro lado, vão ter maiores possibilidades de captação de receita, vendendo mais assentos naquele aeroporto; por fim, mesmo os passageiros ganham com a maior utilização da pista, pois, com o aumento da oferta de assentos, o preço das tarifas tende a diminuir. Ainda sob a ótica do passageiro, além do benefício econômico supracitado, o modelo leva a menores atrasos, o que conduz a prestação de melhores serviços para o consumidor.

Ditos os diversos benefícios de uma abordagem mais racional dos processos de pouso e decolagem, ressalta-se que exemplos internacionais demonstram que significativas melhoras são possíveis: o Aeroporto de Heathrow, em Londres é um exemplo singular de excelência na condução da operação de pista.

Terceiro aeroporto mais movimentado do mundo e principal portão de entrada da Europa, com movimentação anual de cerca de 70 milhões de passageiros, em 2011, Heathrow tem apenas duas pistas principais sem grandes possibilidades de expansão. Esse aparente paradoxo é explicado pelo grande estudo e inteligência que suportam as operações do aeroporto aliado ao uso de equipamentos sofisticados para permitir menores espaçamentos entre as operações e, portanto, um maior fluxo de aeronaves.

Desse modo, a situação de saturação de grande parte dos aeroportos brasileiros, já explicada anteriormente, pode levar em consideração esse caso para ter alguma perspectiva de melhoria das operações, saindo da situação de utilização próxima da saturação para, talvez, ter a possibilidade de abrir novos slots, oferecendo melhores serviços aos passageiros e assegurando mais receitas às empresas envolvidas.

2. Objetivos

Este trabalho de graduação (TG) visa a discutir a organização e os processos ligados à operação de pouso e de decolagem e contribuir com a melhoria das práticas hoje vigentes, as quais ainda têm grande potencial de otimização, com importantes implicações econômicas.

Especificamente, foram abordados o Aircraft Landing Problem (ALP) e o problema de ordenamento das aeronaves para a decolagem.

O tratamento desses problemas foi feito para o Aeroporto Internacional de Guarulhos, por se tratar de um aeroporto crítico para o país, tendo uma demanda bastante extensa e suas operações estarem adequadas para se realizar uma análise ampla sobre os métodos e procedimentos doravante propostos.

3. Revisão bibliográfica

O estudo de Air Traffic Flow Management (ATFM) é bastante amplo e, desde a década de 80, tem dado largos passos no sentido de se aumentar a otimização e a segurança da atividade aérea.

Em se tratando de pouso, o consagrado Aircraft Landing Problem (ALP) tem por objetivo determinar o sequenciamento e a programação dos pousos em um aeroporto sob determinadas condições operacionais. Entre outros, cabe aqui destacar como aspectos que impactam o problema a separação necessária entre as aeronaves, a definição da estratégia de sequenciamento e a configuração de pistas.

A separação é um ponto crucial para se garantir a segurança das operações, dependendo das esteiras de turbulência, cujos efeitos variam em função do porte das aeronaves envolvidas; a estratégia de sequenciamento determina o nível de flexibilidade existente para se alterar o fluxo de aeronaves corrente, condição que é determinante para a magnitude dos resultados obtidos; finalmente, a configuração de pistas tem grande relevância por determinar como potencialmente ocorrem as interações entre pousos e decolagens: caso a configuração de pistas seja tal que pousos e decolagens ocorram de maneira independente, também assim pode ser visto problema de alocação de ambas as operações; caso contrário, não se pode enxergar os problemas como dissociados e as alocações de pousos têm de levar em conta as decolagens.

Nas últimas décadas, o ALP foi tratado sob o prisma de diferentes metodologias; aqui, no entanto, nos ateremos a discorrer a respeito de alguns trabalhos realizados sob o ponto de vista da pesquisa operacional: Beasley et al. (2000) usaram programação linear para abordar o problema, desenvolvendo uma otimização detalhada para o ALP. O modelo tem por objetivo determinar os horários de pouso para um conjunto de aeronaves, tendo como restrições uma janela de tempo possível para o pouso de cada aeronave e o espaçamento mínimo exigido entre aeronaves consecutivas. No caso estático, trabalha-se com um conjunto de aeronaves previamente estabelecido para o pouso; pode-se entender, mais do que a alocação real dos pousos, como o planejamento dos horários a serem executados. Por outro lado, no caso dinâmico, os horários de pouso são determinado continuamente ao longo do dia, na medida em que as aeronaves se aproximam dos aeroportos para efetuarem-nos.

Beasley et al. (2001) em seguida fizeram uso de algoritmos genéticos e heurística populacional para determinar o melhor horário dos voos, aproveitando de mix diverso de aeronaves para obter ganhos de uso da capacidade instalada da pista do aeroporto de Heathrow.

Condé (2013) também abordou o ALP sob a ótica de pesquisa operacional, desenvolvendo um modelo de programação linear inteira mista que visa a minimizar o custo do desvio do horário real do pouso em relação ao horário alvo do pouso na determinação de como a aeronave irá realizar a trajetória de aproximação do aeroporto de forma que a separação na final seja garantida. Para tanto, o modelo determina atrasos ou adiantamentos discretos, associados a rotas alternativas de chegada e/ou procedimentos de espera, que são atribuídos a cada aeronave, de modo a se evitar conflitos. O estudo de caso se aplica ao Aeroporto Internacional de Guarulhos e, ao trazer a questão do uso de rotas alternativas,

aumenta a flexibilização das aeronaves em termos da discretização com que se pode tratar o problema.

Por outro lado, a questão das decolagens também é centro de grandes esforços no sentido de se obter melhores resultados operacionais. Como a questão das esteiras de turbulência também afeta as operações, a busca por um sequenciamento ótimo, respeitando uma série de restrições também é objeto de estudo.

Atkin et al.(2011) usaram programação linear para obter sequencias melhores de decolagens, mais uma vez, em Heathrow, inclusive estudando a questão da operacionalização das trocas de ordem das aeronaves em sistemas de filas situadas próximas às bordas das pistas.

Em um segundo momento, Atkin et al. (2011) levaram em consideração os obstáculos que seriam encontrados pela aeronave no caminho entre o pátio e a pista caso a liberação pela torre de controle ocorresse em determinado momento, tais como aviões que passem pelo mesmo caminho e provoquem retardo no deslocamento, bem como eventuais filas na baía de espera. Desse modo, passa a ser possível também determinar o momento ideal de se fazer o pushback, procedimento inicial da aeronave nesse caminho, de modo a não se encontrar filas nas imediações da pista, reduzindo o tempo da aeronave com os motores ligados, gerando significativa economia para a companhia aérea, além de importante redução do impacto ambiental.

3.1 Metodologia empregada

Nesse trabalho serão abordados dois problemas: relativamente ao pouso, o de organização da sequência de pousos das aeronaves (amplamente conhecido como Aircraft Landing Problem) e, relativamente à decolagem, o da organização da sequência das decolagens.

Essas intervenções terão, neste trabalho, sempre como fim precípua o incremento do uso da pista em termos de operações por hora, de modo a se ter um maior uso da capacidade já instalada, e serão usadas tanto para que a APP reorganize real time as operações que acontecerão nos próximos minutos, quanto para que administradora do aeroporto e órgãos responsáveis revejam os horários previstos dos vôos, de modo a se aumentar de maneira permanente a quantidade de operações da pista e/ou tornar as separações entre operações consecutivas mais racional do ponto de vista de segurança de vôo.

3.1.1 Aircraft Landing Problem

O Aircraft Landing Problem (ALP) diz respeito ao sequenciamento dos pousos em um aeroporto. Os diversos voos, provenientes de diversas rotas, devem ter sua chegada organizada de maneira eficiente e segura, o que envolve, respectivamente, minimizar a diferença entre o horário real e o horário ideal de chegada, procurando-se estabelecer sequencias que prezem pelo maior aproveitamento da pista, e respeitar as separações regulamentares entre aeronaves consecutivas em procedimento de pouso, relativa à esteira de turbulência entre o par de aeronaves.

A esteira de turbulência é um efeito causado por todas as aeronaves, entretanto é proporcional às massas dessas; por outro lado, as aeronaves são tão mais susceptíveis às turbulências quanto menor for sua massa. Com isso, tem-se que as distâncias que, por motivo de segurança, devem ser respeitadas entre dois pousos consecutivos são diferentes para cada tipo de par de aeronaves que façam o pouso. A Tabela 1 traz as distâncias estabelecidas pelo DECEA como mínimas para cada possível par de aeronaves, sendo que estas são categorizadas em pesadas, médias e leves.

Tabela 1: Separação radar mínima entre pousos (NM)

		Categoria da aeronave que segue atrás (seguidora)		
		Pesada	Média	Leve
Categoria da aeronave que segue à frente (líder)	Pesada	4	5	6
	Média	3	3	5
	Leve	3	3	3

Fonte: DECEA (2009)

Mais adiante, se entrará em maior profundidade na questão das classificações das aeronaves segundo o porte. Por ora, basta se saber que as aeronaves pesadas são as que possuem peso máximo de decolagem superior a 136 toneladas; as aeronaves médias têm o peso máximo de decolagem entre 7 e 136 toneladas; e, por fim, as aeronaves pequenas têm esse parâmetro inferior a 7 toneladas.

O controle de tráfego aéreo opera, então, respeitando as distâncias regulamentares entre os pares de aeronaves conforme detalhado anteriormente, restrição essa que independe de qual seja a abordagem usada para ordenar as chegadas.

Percebe-se, então, que esse distanciamento mínimo é o principal limitante da capacidade das pistas. Fazendo uma análise mais profunda a respeito das diferentes distâncias mínimas impostas, pode-se afirmar que quanto mais diverso o mix de aeronaves que se verifica no aeroporto, maiores são, também, as possibilidades de otimização de sua operação, pois as mudanças em relação a um primeiro sequenciamento – que ocorreria caso se operasse em first come, first served ou, mesmo, em relação aos horários previstos, caso esses sejam determinados sem ter em vista a questão do mix de aeronaves – são as que possuem o maior

potencial de encurtamento do tempo global (a título de exemplificação, uma troca na sequência de duas aeronaves médias na ordem de pousos não leva a uma diminuição do tempo demandado, enquanto a troca da sequência grande-pequena por pequena-grande leva a grande economia de tempo, pois as esteiras de turbulência das duas primeiras são indistintas, enquanto a esteira de turbulência de uma aeronave grande é mais relevante, sobretudo encontrando em seguida uma aeronave de pequeno porte, caso comparado com o tamanho da esteira deixada por uma aeronave pequena a ser enfrentada por uma aeronave de porte grande). Deve-se destacar, entretanto, que aeronaves maiores tendem a se deslocar com maiores velocidades na aproximação do que as aeronaves menores, devendo esse ponto ser ainda levado em conta nas operações de pouso, para se ter uma modelagem mais fidedigna.

Deseja-se, então, se aproveitar desse fato – o de diferentes combinações de ordens de pousos levarem a diferentes tempos totais para se completar todas as operações – para gerar sequências de pousos que durem menos tempos, aumentando, assim, a quantidade de lacunas ao longo das operações – em outras palavras, aumentando a capacidade da pista.

Atualmente, ao se estudar os agendamentos dos voos de um aeroporto, checando as aeronaves que executam esses voos e a sequência estabelecida, percebe-se que a questão de se executar um ordenamento que leve em conta a esteira de turbulência não é uma prioridade no planejamento, visto que se encontra com facilidade casos de subutilização da pista em momentos de grande demanda. Além disso, via de regra, os operadores do APP usam uma abordagem “first come, first served”, a qual gera a sequência de pousos baseada apenas na ordem em que os aviões chegam nas imediações do aeroporto e solicitam autorização para o pouso, o que, de forma alguma, se aproxima das ideias de otimização supracitadas. Projeta-se, com isso, um panorama de grande potencial de incremento de capacidade para os aeroportos que adotarem alguma lógica no sequenciamento dos pousos, perspectiva que será explorada a seguir.

Uma vez que, para os fins do presente trabalho, se tem um objetivo claro a ser atingido nas operações de pouso, que é aumentar a capacidade da pista do ponto de vista de operações horárias, há de se repensar à luz desse novo modelo os horários previstos dos pousos e se estudar um sistema de suporte para que os operadores do APP consigam de maneira rápida fazer sequenciamentos, tendo em vista as eventuais mudanças de horários que ocorrem por motivos diversos, revendo, assim, o ordenamento que deve ser seguido nos minutos seguintes. Nesse sentido, há três restrições de segurança que devem ser respeitadas quando determinados os horários de pouso:

- 1) Quando o horário é atribuído a uma aeronave, esta deve ter tempo hábil para sair da posição naquele momento e pousar, algum tempo depois, em segurança. Essa restrição é sobremaneira relevante se levarmos em conta que, quando em voo, há severas restrições quanto ao plano de voo - mais especificamente, em primeiro lugar, as trajetórias executadas pelos aviões devem ser seguidas com grande fidelidade, restando, como solução alternativa, a custosa opção de dar voltas no espaço aéreo contíguo ao aeroporto, o que aumenta significativamente o percurso e o consumo de combustível, visto que as vias estabelecidas são de grandes comprimentos; depois, a velocidade de cruzeiro não deve sofrer grandes

alterações, mesmo em se tratando de se manter na via estabelecida no plano de voo daquela aeronave;

2) Aeronaves com baixos níveis de combustível não devem ficar à espera de autorização para o pouso. Essa regra de segurança acaba por, juntamente com o ponto (1), arrochar os limites em que uma aeronave já em voo tem para efetuar seu pouso.

3) Aeronaves não podem pousar com distanciamento menor que o estabelecido pelo DECEA.

Percebe-se então, por (1) e (2), que existe uma janela de tempo dentro da qual o pouso deve ocorrer e, por (3), que cada voo está relacionado aos outros, devendo haver um tempo mínimo entre esses, o que já foi discutido anteriormente. Essas três restrições tornam o problema de estabelecer horários e, eventualmente, promover alterações nos mesmos bastante relevante para o tráfego aéreo.

Estabelecidas então as restrições temporais para a alocação do pouso, tem-se como próximo passo a discussão da função objetivo: esta levará em consideração apenas o desvio em relação ao horário-alvo de pouso.

Como temos por objetivo a máxima utilização da pista, o número de passageiros nos aviões, que poderia ser um critério importante, de modo que se evitassem maiores atrasos para voos com mais passageiros, diminuindo a percepção global de um nível de serviço pior, não é levado em conta.

Para a modelagem do problema, será utilizada uma heurística populacional, cuja descrição é feita a seguir.

3.1.1.1 Heurística populacional

A heurística populacional parte de uma população inicial e usa operadores genéticos em cada reprodução, de modo a se terem otimizações. Nesse sentido, cada indivíduo da população tem atrelado a ele um código ou um “cromossomo”, que representa uma possível resposta do problema. Em outras palavras, cada indivíduo da população é detentor de uma sequência de aeronaves que pode ou não preencher as restrições do problema – ainda em tempo, cabe frisar que uma aeronave não é um indivíduo, mas, sim, um gene, uma parte, do indivíduo; o indivíduo por sua vez é a totalidade das aeronaves organizadas segundo uma sequência, com os próprios horários dos pousos. A Figura 1 mostra esquematicamente como se relacionam os conceitos de população, indivíduos e genes, sendo que o indivíduo, como supracitado, tem a ele associada a sequência de aeronaves e os genes são as próprias aeronaves.

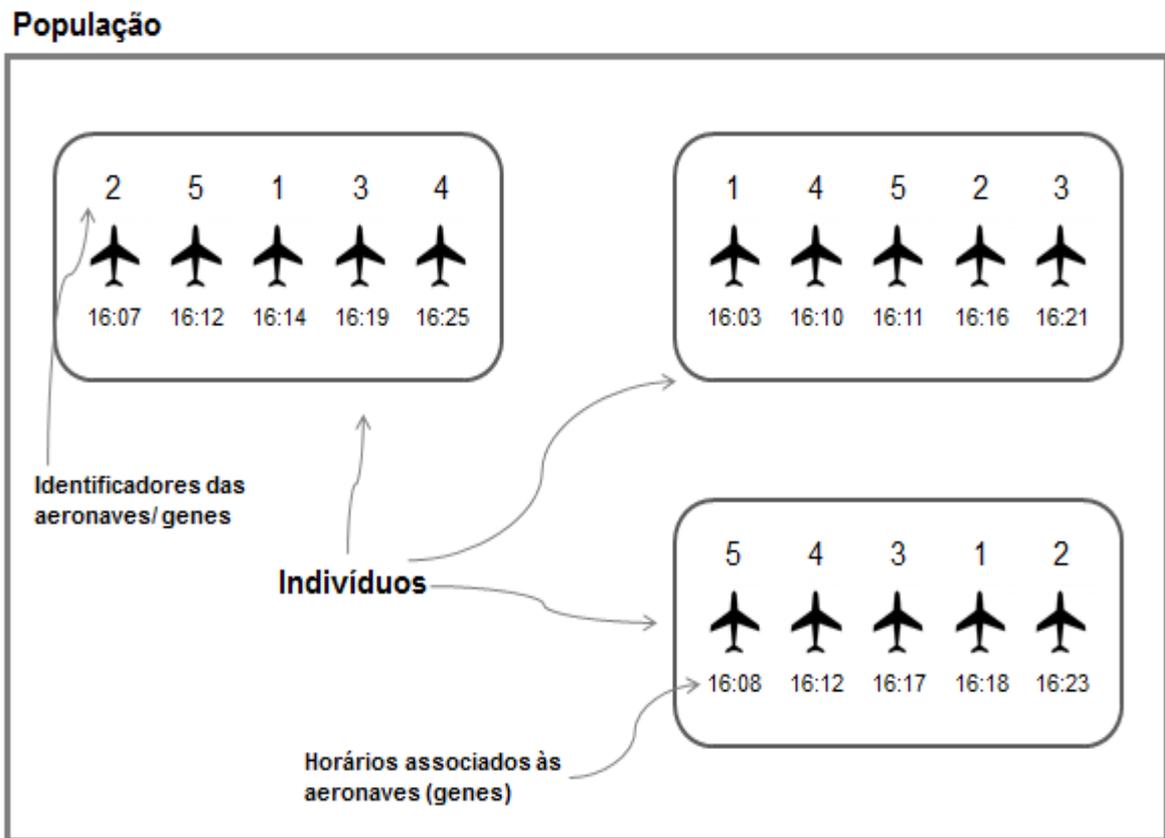


Figura 1: Caracterização da população na heurística populacional

A adequação do indivíduo é avaliada em termos da função objetivo e das restrições. Procura-se fazer as reproduções entre os indivíduos mais adaptados, por meio de crossover, dando origem a “filhos” que conjugam parte das características de um pai e parte das características do outro. Como se escolhe os indivíduos mais adaptados para serem pais, os filhos tendem a ser mais adaptados do que a média da população e sua inserção na mesma torna a população mais evoluída. A Figura 2 apresenta o processo de geração de um novo filho.

Geração de um novo filho

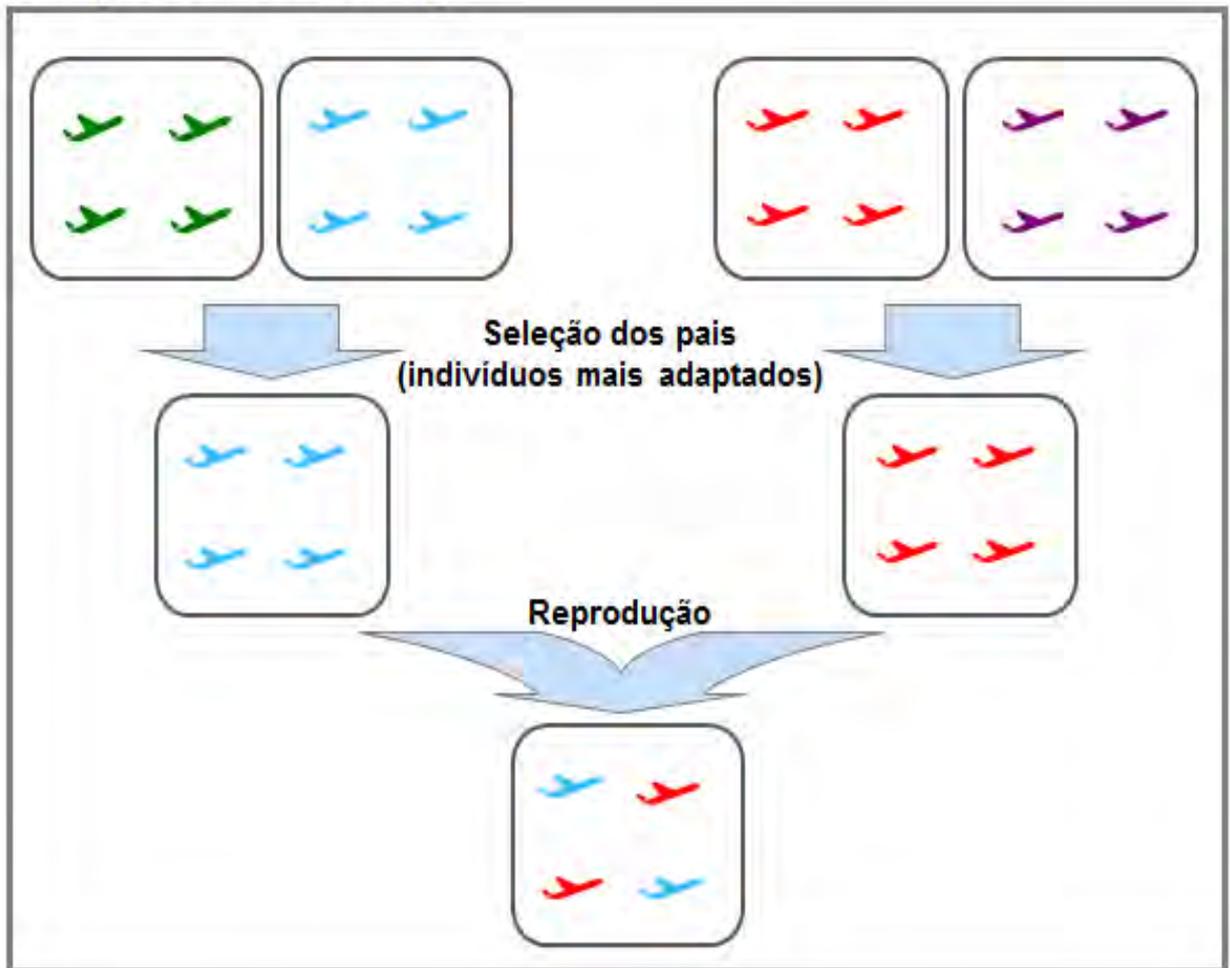


Figura 2: Processo de reprodução na heurística populacional

Esse fluxo avaliação-seleção-reprodução é repetido até que se chegue a uma população satisfatória, isto é, que se atenda minimamente o que se espera em termos de objetivo, preenchendo amplamente as restrições estabelecidas.

Assim, em resumo, pode-se dizer que as etapas da heurística populacional são:

- Geração da população inicial;
- Avaliação da adaptação dos indivíduos na população;

Repetir

- Selecionar indivíduos da população para serem pais;
- Combinar (cruzar) pais para gerar filhos;
- Fazer mutação nos filhos;

- Avaliar a adaptação dos filhos;
- Trocar parte ou toda a população pelos filhos;

Até

- Decidir parar, porque já se achou a solução que preenche os requisitos estabelecidos.

Uma vez detalhada a heurística populacional, há de se adequar essa heurística para o caso do Aircraft Landing Problem.

3.1.1.2 Heurística populacional aplicada ao problema do pouso da aeronave

Conforme J.E. Beasley et al. (2001), inicialmente, estabelece-se algumas notações, as quais são referentes a conceitos já introduzidos:

P: o número total de aeronaves

C_i : o horário mais cedo de pouso possível para a aeronave i ($i = 1, \dots, P$)

T_i : o horário mais tarde de pouso possível para a aeronave i ($i = 1, \dots, P$)

H_{Ai} : o horário-alvo de pouso para a aeronave i ($i = 1, \dots, P$)

E_{ij} : o tempo requerido relativo ao espaçamento mínimo entre as aeronaves i e j , ambas pousando, sendo i pousa antes de j , $i = 1, \dots, P$ e $j = 1, \dots, P$, $j \neq i$.

Sendo todas as variáveis acima conhecidas para uma determinada situação e expressas em minutos – por motivos de tornar viável a execução pelos operadores da torre de controle e do APP, opta-se pela utilização dessa granularidade temporal. Há ainda de se apresentar a variável de decisão:

X_i : o horário determinado para o pouso

O problema então é determinar valores de X_i dentro do intervalo $[C_i, T_i]$ que satisfaçam os espaçamentos mínimos estabelecido, objetivando ainda que o pouso se dê no horário-alvo H_{Ai} ou antes dele.

Para se entender a necessidade de se forçar os pousos a ocorrerem anteriormente ao horário-alvo estabelecido, é necessário rememorar que o objetivo traçado é de se ganhar mais tempo para a inclusão de novos voos nos íterins existentes. Desse modo, além de se rever as ordens, chegando a sequencias que promovam menos espaços mínimos entre operações, é frutífero para a solução desse problema termos a alocação dos pousos de fato mais aproximada uns dos outros, criando não só mais tempo disponível para novos pousos, mas, também, maiores lacunas ao longo do período analisado. Serão criados na função objetivo,

outrossim, mecanismos para evitar que ocorram grandes deslocamentos entre o horário do pouso gerado por ela e o horário alvo, para que se evite grandes atrasos, de modo a prejudicar pontualmente uma única aeronave.

Agora, uma vez estabelecidas as variáveis do problema, há ainda que se discutir seis pontos relativos à heurística populacional, a saber: representação da solução do problema; adaptação, que se trata da avaliação de uma resposta para o problema; seleção de pais; crossover; separação das restrições; e, por fim, reposição da população, para que se introduza um novo filho. Cada um desses temas será brevemente abordado a seguir.

3.1.1.2.1 Representação da solução do problema

Para esse problema, utilizar-se-á como representação da solução a variável y_i , sendo $0 \leq y_i \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, P$. O valor de y_i representa a proporção do tempo dentro do intervalo $[C_i, T_i]$ que passa antes de a aeronave i pousar, de modo que se pode dizer que o pouso da aeronave i ocorre em:

$$X_i = C_i + y_i \cdot (T_i - C_i)$$

Desse modo, cada indivíduo da população tem associado a ele uma representação do tipo:

$$[y_1, y_2, y_3, \dots, y_P]$$

Essa representação tem a vantagem de assegurar que, invariavelmente, o horário determinado para o pouso pertence ao intervalo $[C_i, T_i]$.

3.1.1.2.2 Adaptação

A questão da adaptação é crítica por avaliar se uma solução, isto é, se um indivíduo, já é suficientemente adequado ao problema que se quer solucionar, gerando, ou não, um resultado melhor do que o resultado inicial – de horários dos pousos - proposto. Nesse sentido, cabe lembrar que se tem por objetivo que a chegada da aeronave, X_i , ocorra no horário-alvo, H_{Ai} , ou antes dele. Introduzindo então a função D_i , Desvio, tal que:

$$D_i = (X_i - H_{Ai})$$

Percebe-se então que, se $D_i < 0$, a aeronave pousa antes do seu horário-alvo e, se $D_i > 0$, a aeronave pousa depois.

Em termos algébricos, tem-se, então, que:

$$\text{Adaptação} = \sum_{i=1}^P D_i^2, \text{ onde } D_i = -D_i^2, \text{ caso } D_i \geq 0; \text{ e } D_i = D_i^2, \text{ caso contrário}$$

Tem-se, da equação acima, que a função é não-linear. Faz-se isso para que desvios maiores recebam um peso desproporcionalmente maior, sendo mais fortemente evitados – conforme explicitado anteriormente, esse peso se deve à necessidade de se evitar prejudicar sobremaneira algumas aeronaves, com grandes atrasos. Além disso, conforme também exposto anteriormente, espera-se adiantar o quanto possível os pousos, ou seja, fazer X_i ser menor do que H_{Ai} . Isso é procurado quando tentamos maximizar a adaptação, que será o objetivo do problema.

Percebe-se então que a questão da adaptação está ligada principalmente à função objetivo, não tendo forte ligação com as restrições do problema – não se pode dizer que se tem aqui totalmente destituída a questão das condições de contorno, pois, como supracitado, com o estabelecimento do intervalo em que X_i pode estar situado, se está, automaticamente, respeitando a restrição da janela em que o pouso pode ocorrer.

3.1.1.2.3 Seleção dos pais

Nessa heurística populacional, faz-se que a junção de dois pais gerem um filho único. Para fazer a seleção desses dois pais, executa-se os dois seguintes passos:

1) Da população, seleciona-se aleatoriamente dois indivíduos. Desses dois indivíduos, seleciona-se apenas um, que é o mais adaptado dentre eles, isto é, aquele que tem o maior valor da equação de “Adaptação”, exposta no item 3.1.1.2.2.

2) Repete-se o processo (1) para selecionar o segundo pai.

Esse processo pode levar a seleção do mesmo indivíduo duas vezes, entretanto, para populações grandes essa possibilidade é desprezível e, mesmo que ocorra, não afeta a continuidade do problema ou a consistência dos resultados.

3.1.1.2.4 Crossover

Será utilizado um crossover uniforme, isto é, dois pais têm um filho único. Ainda, faremos como mecanismo do crossover que, nessa heurística, cada um dos P valores da representação do filho serão gerados aleatoriamente de um dos dois pais selecionados.

Assim, a evolução da população se dá pela escolha de pais mais adaptados, unicamente, não havendo qualquer inteligência no cruzamento dos pais que leve a um filho ainda melhor. A experiência com esse tipo de algoritmo mostra que a abordagem aqui escolhida não leva a significativos prejuízos na convergência.

3.1.1.2.5 Restrições de separação

Uma grande dificuldade dessa heurística é garantir que as soluções geradas são confiáveis, do ponto de vista de estar de acordo com as restrições de separação exigidas entre

operações consecutivas. Esse critério é um imperativo do ponto de vista de segurança das operações de pouso e, também, de decolagem.

Conforme observado anteriormente, a ocorrência do pouso dentro da janela de tempo em que a aeronave deve pousar já está garantida pela própria maneira como o problema foi formulado. Resta então estabelecer de que maneira se garante que as separações entre aeronaves consecutivas estejam acima do estabelecido como mínimo. Para tanto, do mesmo modo que foi estabelecido o conceito de adaptação para a função objetivo, será criado o conceito de não-adaptação, que está relacionado à violação das restrições. Desse modo, pode-se expressar matematicamente da seguinte forma:

$$X_j - X_i \geq E_{ij}, \text{ se } X_i < X_j, i = 1, \dots, P, j = 1, \dots, P, j \neq i$$

Assim, para todo avião j que pousa após o avião i , tem-se que o espaçamento mínimo regulamentar é respeitado.

Então, dada uma solução representada por $[y_1, y_2, \dots, y_p]$, a qual tem a ela associada uma série de horários previstos de pouso (x_1, x_2, \dots, x_p) , pode ou não respeitar as restrições de espaçamento. Tendo este ponto em vista, é necessário construir uma equação que garanta a satisfação dessa condição de contorno do problema sem, por outro lado, beneficiar acréscimos de tempo entre pousos além desse mínimo. Isto porque, apesar de se desejar respeitar o espaçamento mínimo regulamentar, não se pretende ter maiores distanciamentos, o que iria de encontro à melhoria operacional que se pretende obter.

Com isso, a seguinte equação aglutina esses dois pontos: respeita o espaçamento mínimo, porém não preconiza o aumento dos espaçamentos.

$$\sum_{i=1}^P \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, x_i \leq x_j}}^P \max[0, S_{ij} - (x_j - x_i)]$$

Essa equação será igual a zero sempre que as restrições de separação forem satisfeitas e será positiva sempre que isso não ocorrer. O valor gerado por essa equação será entendida doravante como a medida da não-adaptação, de modo que, quanto maior o seu valor, maior a não-adaptação da solução encontrada – ao mesmo tempo, sempre que esse valor for nulo, a solução é viável do ponto de vista dessa restrição. Ser não-adaptado, é bom ressaltar, não está ligado de modo algum à não maximização da função objetivo, mas, sim, a não respeitar as restrições de espaçamento.

Será, portanto, o par (adaptação, não-adaptação) que pautará a evolução da população nos procedimentos de reposição que serão feitos na mesma: procurar-se-á soluções com alta adaptação e baixa não-adaptação.

3.1.1.2.6 Reposição da população

A reposição da população é crítica para que se evolua de maneira consistente para a obtenção de soluções melhores do ponto de vista da função objetivo respeitando-se ainda as restrições do problema. Conforme supracitado, a inserção de um novo indivíduo, filho de dois indivíduos da população, é acompanhada da eliminação de um outro, o que mantém a população numericamente constante, porém com tendência de evolução.

Para tanto, quando se produz um novo filho, deve-se escolher um indivíduo já pertencente à população que tenha idealmente parâmetros de adaptação e não-adaptação inferiores ao seu.

Para exemplificar o método de reposição da população, vejamos a Figura 3.

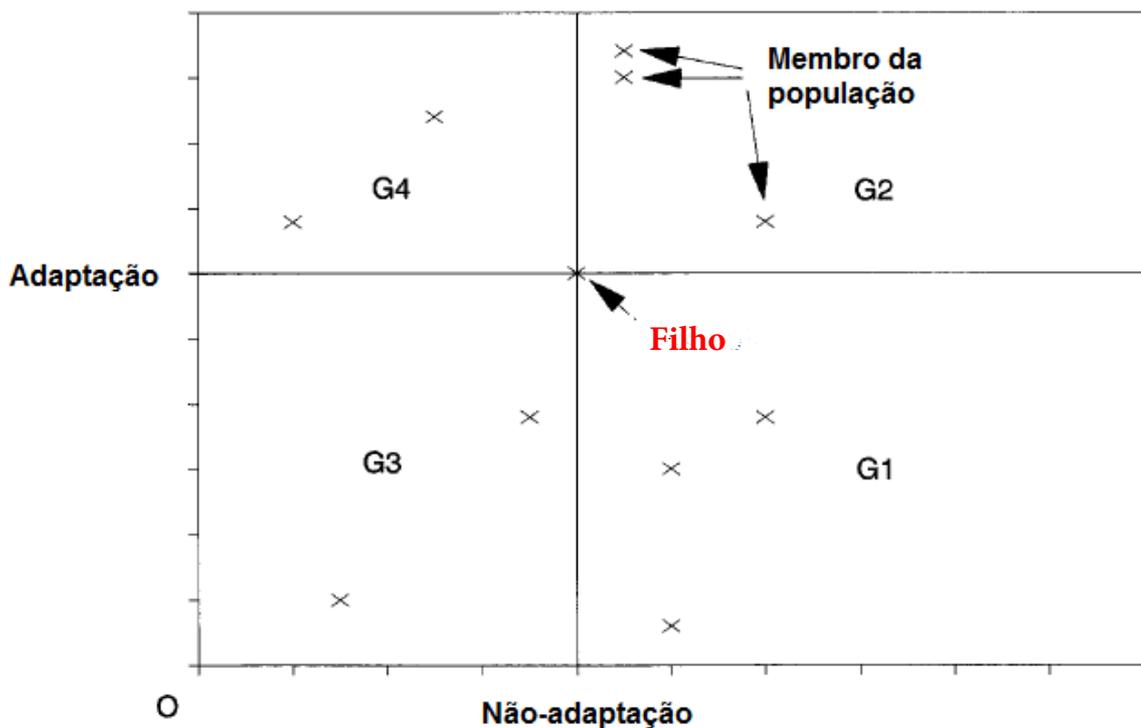


Figura 3: Processo de reposição da população em heurística populacional (Fonte: Beasley et al, 2001)

Conforme se pode ver, os indivíduos são posicionados no gráfico conforme seus valores do par (adaptação, não-adaptação), sendo a origem dos eixos o par do filho que vai ser inserido na população, formando-se, então, quatro grupos – G1, G2, G3 e G4 - onde o resto da população irá se inserir.

Pode-se perceber, também, que o filho a ser inserido será superior em ambos os critérios analisados em relação a todos os elementos do grupo G1; será, por outro lado,

inferior em ambos os critérios em relação ao grupo G4; e, por fim, será superior em um dos aspectos e inferior no outro em relação aos indivíduos dos grupos G2 e G3.

Esses grupos serão usados para se determinar o indivíduo a ser excluído da população para inserção do filho: em ordem, serão procurados indivíduos nos grupos G1, G2, G3 e G4 para sair da amostra, sendo que somente se passa para o grupo seguinte em caso de não existência de nenhum elemento no grupo. Cabe destacar que, em caso de só haver indivíduos no grupo G4, isto é, só haver indivíduos superiores em ambos os aspectos ao filho a ser inserido, ainda assim deve-se efetuar a substituição, pois essa “perturbação” do sistema é necessária por motivos computacionais, sendo que, caso isso não seja feito, pode-se falhar em futuros progressos do algoritmo, comprometendo-se novos avanços evolutivos.

3.1.2 Sequenciamento e otimização do controle de decolagens

A eficiência da operação de decolagem está diretamente ligada a um sequenciamento adequado das aeronaves, assim como se deseja ter nos pousos. Assim, também as decolagens sofrerão uma abordagem de revisão do sequenciamento das operações, de modo a se obter maior aproveitamento da capacidade instalada da pista.

Ainda, quando se tratam de operações dependentes, o que ocorre em grande parte dos aeroportos do país, caso que inclusive abordaremos adiante, quando dos estudos de caso, as operações de pouso e decolagem sofrem mútuas interferências, o que deve ser levado em conta na construção dos algoritmos. Pretende-se pautar o presente estudo em casos de operações dependentes e, neste tópico, introduziremos como será feita a concordância entre a otimização das operações de pousos e decolagens.

3.1.2.1 Sequenciamento de decolagens

Do mesmo modo que ocorre com os pousos, há de se ter uma separação mínima entre aeronaves devido à esteira de turbulência gerada durante a decolagem. Essa separação depende do porte das aeronaves, sendo, portanto, diferente para pares diferentes de aeronaves em sequencia. Desse modo, o ordenamento das aeronaves para o pouso é um fator crítico do rendimento da pista e dos atrasos dos voos. Do mesmo modo que ocorre com os pousos, a Tabela 2 traz as distâncias estabelecidas pelo DECEA como mínimas, agora em termos de tempo, para cada par de aeronaves, sendo categorizadas em pesadas, médias e leves.

Tabela 2: Separação radar mínima entre decolagens (s)

		Categoria da aeronave que segue atrás		
		Pesada	Média	Leve
Categoria da aeronave que segue à frente	Pesada	60	120	120
	Média	60	60	120
	Leve	60	60	60

Fonte: DECEA (2009)

É interessante, portanto, que os administradores dos aeroportos e planejadores dos voos, bem como controladores de voo disponham de um sistema que provenha ordenamento ótimo, dada uma determinada configuração das aeronaves que farão os próximos voos dentro de certo período de tempo – no caso dos controladores, há também a demanda de que essa ferramenta provenha as soluções de maneira rápida, viabilizando o uso real time.

Em termos práticos, dada a dificuldade operacional de se prever o tempo que a aeronave consumirá nos procedimentos desde a liberação pela torre de controle para sair de sua posição no pátio até chegar à cabeceira da pista, o reordenamento, quando executado, é feito com as aeronaves já próximas à cabeceira, na baía de espera, o que exige que esse espaço seja propício a manobras mais extensivas. Esse procedimento já é de grande utilidade para uma melhor utilização da pista, entretanto três aspectos ainda o deixam longe de uma otimização significativa:

1) No momento em que as aeronaves se acumulam nas baías de espera, os controladores devem estar em constante comunicação com os pilotos, de modo a dar prosseguimento a vários procedimentos necessários naquele momento. Com isso, resta pouco tempo útil dos controladores para executarem essa heurística, que acaba por se colocar como um supérfluo para a torre de controle;

2) Incrementos significativos de rendimento da pista só se podem ser obtidos quando considerado um número maior de aeronaves, levando em conta não só as aeronaves que já estão na baía de espera. Aqui, a título de exemplo, pode-se pensar em uma aeronave que está taxiando rumo à baía de espera e que, como ainda não chegou neste ponto, não é levada em consideração na heurística.

3) É muito comum os aeroportos, principalmente no Brasil, não terem baía de espera ou espaço adequado próximo à cabeceira da pista para as fazerem as manobras necessárias para se reordenarem.

Essas restrições da heurística hoje usada mostram ser necessária alguma lógica mais ampla e que permita tomar decisões de sequenciamento em um momento anterior à chegada da aeronave nas imediações da pista.

Segundo Atkin et al. (2011), os controladores devem levar em consideração quatro objetivos ao decidirem a sequencia de decolagem:

- 1) O rendimento da pista ou a taxa de atrasos;
- 2) A sequencia estabelecida não pode ser proibitivamente difícil de se operar, envolvendo, por exemplo, uma série extremamente grande de instruções a serem dadas ao piloto, podendo comprometer a segurança das operações do aeroporto;
- 3) Deve-se procurar respeitar o máximo possível os slots de decolagem delegados às aeronaves. Os slots são períodos em que se espera que a decolagem ocorra e são estabelecidos em relação ao “horário calculado de decolagem” (CTOT, Calculated Take-Off Time);
- 4) E, finalmente, os controladores devem assegurar que nenhuma aeronave é desproporcionalmente prejudicada pela sequencia estabelecida, isto é, a melhora global do rendimento da pista para decolagens não deve ocorrer às custas de um atraso muito grande de uma só aeronave. O estabelecimento desse objetivo é muito importante para evitar que aeronaves menores ou mais lentas – e, portanto, costumeiramente demandantes de maiores espaçamentos – fiquem sempre relegadas ao final das filas, independentemente dos seus horários inicialmente previstos de decolagem.

Conforme citado anteriormente, há estudos que procuram desenvolver metodologias para antecipar o atraso das aeronaves nas imediações da pista para a posição das mesmas no pátio, ainda com motores desligados, o que vem exatamente ao encontro do proposto anteriormente. Muito embora esse procedimento seja de extrema importância para uma utilização mais racional do combustível e conseqüente economia de custos das companhias aéreas, este não será levado a frente no presente trabalho, no qual apenas desenvolveremos a determinação eficiente das decolagens, tendo como objetivo, assim como feito para os pousos, o aumento da capacidade da pista em termos de possibilidade de operações por hora.

Em termos de execução, de fato, das sequencias estabelecidas, ficará como um imperativo para a torre de controle conceder as liberações procurando-se estar de acordo com a ordem determinada. Ainda, em caso de extensas alterações do estado normal das aeronaves, como em dias atípicos, como em eventos de fortes chuvas ou nevoeiros, poderá se executar novamente o modelo, condicionando-se os inputs às condições reais de momento e gerando um novo sequenciamento ideal.

Para efetuar o ordenamento, será usada a mesma metodologia de algoritmos genéticos com heurística populacional usada para o pouso. Do mesmo modo, haverá uma janela de tempo dentro da qual poderá ocorrer a decolagem. Isso porque os voos precisam respeitar os seus Calculated Time of Take-off.

Abordando agora a adequação de pousos e decolagens em operações dependentes, há de se levar em consideração, mutuamente, que um tipo de operação inviabiliza o outro. Nesse sentido, o modelo deve estar de acordo com três pontos:

- 1) Respeitar todas as condições de contorno relativas às operações de pouso;
- 2) Respeitar todas as condições de contorno relativas às operações de decolagem;
- 3) Estar de acordo com a condição de operações dependentes, restringindo uma operação apenas aos momentos em que a outra operação não estiver ocorrendo.

3.2 Modelo desenvolvido para as operações dependentes

Como se têm as operações dependentes e opta-se por usar a mesma metodologia para abordar os problemas de pouso e decolagem, fez-se um modelo único abrangendo ambas as operações.

Para tanto, além dos espaçamentos mínimos estabelecidos para cada tipo de operação, haverá um espaçamento entre operações diferentes consecutivas, cujo motivo é garantir que a pista esteja livre de uma operação quando se deseja executar a outra; em outras palavras, impede-se que o modelo determine duas operações, mesmo que sejam de naturezas distintas, no mesmo minuto. Para tanto, usa-se um espaçamento mínimo de 1 minuto entre um pouso e uma decolagem e vice-versa, o qual se considera adequado aos procedimentos hoje executados pela torre de controle do estudo de caso.

Com isso, em certa medida, tratam-se pousos ou decolagens indistintamente como ocupações provisórias da pista. Tem-se como distinções apenas o fato de que duas ocupações não podem ocorrer de maneira concomitante e, ainda, como já exposto, essas ocupações demandam diferentes tempos, a depender da operação e da aeronave que a executa.

Quanto à abordagem dos problemas de sequenciamento, tanto de pousos, quanto de decolagens, procurou-se construir um modelo tanto para a abordagem dinâmica, quanto para a estática.

Finalmente, para classificar as aeronaves segundo seu porte, o que, se sabe, é crítico para determinação dos espaçamentos, usa-se o Documento 4444 da ICAO (2001), que é adotado pelo DECEA (ICAO 100-12), que versa:

“As três categorias para uso (ITEM 9) do formulário de Plano de Voo são:

- a) PESADA (H) - todos os tipos de aeronaves de peso máximo de decolagem de 136.000 kg (300.000 libras) ou mais;
- b) MÉDIA (M) - tipos de aeronaves de peso máximo de decolagem inferior a 136.000 kg (300.000 libras) e superior a 7000Kg (15.500 libras); e
- c) LEVE (L) - tipos de aeronaves de peso máximo de decolagem de 7000 kg (15.500 libras) ou menos."

Com isso, ocorre, na prática, que grande parte das aeronaves que realizam trechos comerciais nacionais são classificadas como de médio porte, ao passo que a maior parte das aeronaves que realizam trechos comerciais internacionais, saindo ou chegando no Brasil, são classificadas como de grande porte. Para os casos que estudaremos, o uso de aeronaves de pequeno porte é raro, portanto não abordaremos com maior profundidade as mesmas. A Tabela 3 traz alguns modelos de aeronaves e suas classificações.

Tabela 3: Porte de aeronaves usadas para operações no Brasil

Modelo	Porte
Boeing 777	Grande
Boeing 767	Grande
Airbus A340	Grande
Airbus A330	Grande
Boeing 737	Médio
Airbus A321	Médio
Airbus A320	Médio
Embraer 190	Médio
Embraer 175	Médio
ATR 72	Médio

Fonte: Especificações técnicas das aeronaves

4. Estudo de caso

Para se estudar mais a fundo e de maneira prática os dois problemas abordados no presente trabalho, escolhe-se o Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR), localizado em Guarulhos, São Paulo.

Inicialmente, procurou-se estudar o caso de Congonhas, o que se devia ao elevado valor de se obter ganhos de capacidade naquele aeroporto, localizado em área privilegiada no município de São Paulo, com conseqüente grande demanda e impossibilidade de expansões. Entretanto, já os primeiros testes mostraram que, por ter um mix de diversidade reduzida, esse aeroporto não está susceptível a sofrer melhorias operacionais caso utilize o modelo desenvolvido.

4.1 Aeroporto Internacional de Guarulhos

O Aeroporto Internacional de Guarulhos é o aeroporto mais movimentado do país, com cerca de 37 milhões de passageiros ao ano (dados de 2013). Trata-se de um aeroporto extremamente demandado, operando durante grande parte do dia acima de sua capacidade

teórica de terminal e pátio e no limite da saturação da pista. Ao mesmo tempo, não possui grandes possibilidades em termos de expansões, sobretudo da pista.

Em termos de pista, o aeroporto possui duas, sendo que a operação destas é dependente, devido à proximidade verificada entre ambas. Via de regra, uma é usada para pousos enquanto a segunda é usada para decolagens, de modo que quando uma aeronave em pouso toca a pista a outra é autorizada a decolar, do mesmo modo que, quando uma em decolagem começa a levantar voo a outra pode pousar. A Figura 4 mostra a área do aeroporto, bem como a sua vizinhança, completamente povoada e, portanto, sem grandes perspectivas de expansões; já a Figura 5 mostra de maneira mais aproximada o sistema de pistas.

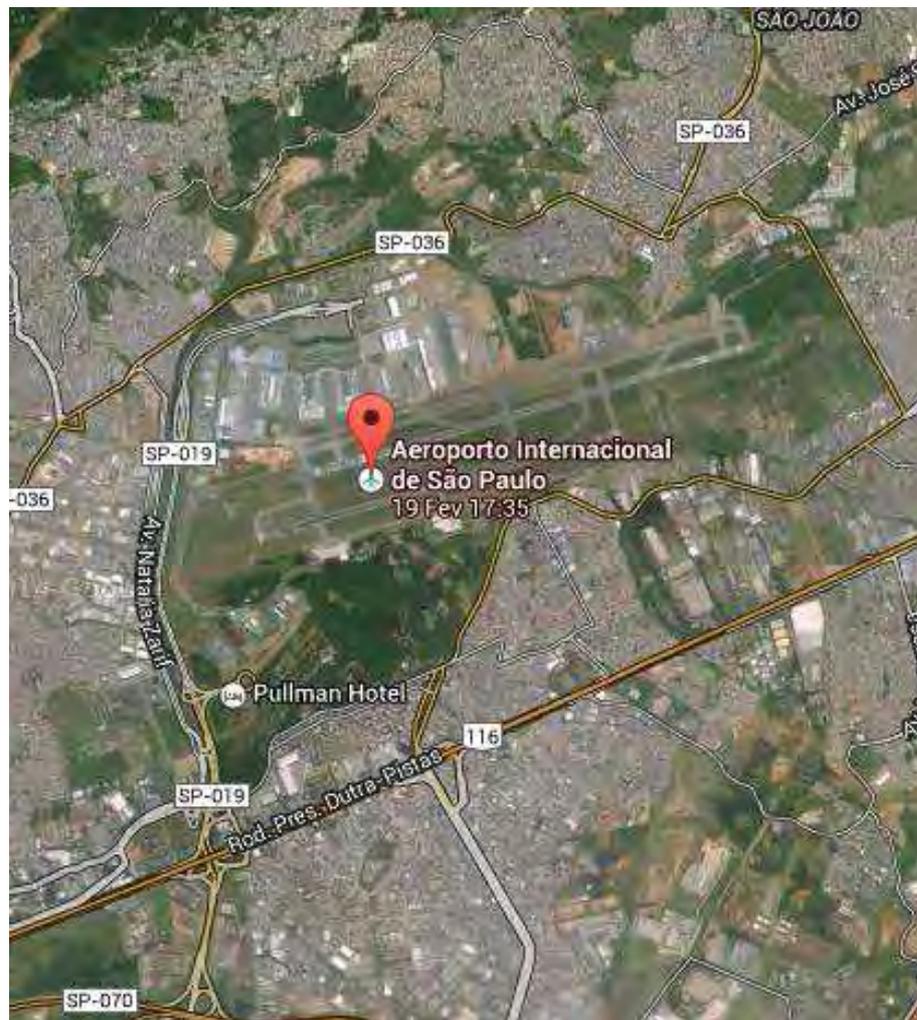


Figura 4: Vista aérea do Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR) (Fonte: Google Maps)



Figura 5: Vista detalhada do sistema de pistas de SBGR (Fonte: Google Maps)

Diante desse contexto de grande solicitação e constante saturação do aeroporto, é evidente a relevância de se aumentar a eficiência da operação do sistema-pátio desse aeroporto, que talvez seja a principal alternativa para aumento da capacidade.

Um único adendo, no entanto, quanto a esse aeroporto refere-se à atual situação de grande saturação do pátio de aeronaves, que, na realidade, é tido como o principal gargalo do mesmo, frente inclusive às pistas. Essa situação, então, pode ser um novo obstáculo à implementação de melhorias operacionais na pista: sem haver estrutura de pátio, não há como acomodar o acréscimo de aeronaves. A Figura 6 mostra o pátio de aeronaves de Guarulhos.



Figura 6: Vista detalhada do pátio do SBGR (Fonte: Google Maps)

Nesse sentido, uma solução seria otimizar os processos em solo, tais como desembarque, embarque e reabastecimento, de modo a encurtar o período que as aeronaves ficam no pátio, tendo um efeito de desafogo do mesmo. Uma outra saída seria ampliar o pátio, usando os poucos espaços ainda passíveis de utilização no aeroporto.

4.2 Resultados

O modelo construído segundo a metodologia descrita no item 4 leva em conta um panorama com 20 aeronaves, o que, para o caso do Aeroporto Internacional de Guarulhos corresponde a um período entre 25 e 40 minutos, a depender do período do dia observado.

Em termos da heurística populacional, desenvolveu-se uma população com 50 indivíduos, o que se mostrou adequado em termos de convergência e qualidade dos resultados. Com essa configuração, o modelo foi executado sempre por 3 minutos no Microsoft Excel 2010.

Com relação aos testes executados, escolheu-se dois diferentes momentos do dia, um com grande movimentação e outro com menor movimentação, a saber, os períodos iniciados, respectivamente, às 6 horas e às 13 horas no dia 6 de maio de 2014. Os dados a respeito das operações são obtidos e cruzados a partir da HOTRAN e do VRA, documentos relativos, respectivamente, à lista das operações comerciais dos aeroportos brasileiros e à consolidação das operações de fato realizadas.

Ainda em tempo, uma definição importante é a da janela de tempo em que se pode considerar possível o pouso e a decolagem das aeronaves. Como não estamos abordando especificamente o problema dinâmico, no qual a aeronave já está em aproximação do

aeroporto e requer autorização para pouso, mas, sim, com a perspectiva de aumentar a capacidade da pista, não precisamos nos ater a janelas excessivamente reduzidas; por outro lado, dado o caráter de rede da malha aérea, não se pode também ter grande flexibilidade quanto aos horários das operações, pois mudanças maiores podem ter repercussão negativa nos horários em vários outros aeroportos. Considerando esses pontos antagônicos, usa-se uma janela de 10 minutos com o horário centrado nesse intervalo, tanto para pousos, quanto para decolagens. A Tabela 4 mostra o cenário base, isto é, o que ocorreu na realidade no dia estudado no período entre 13:00 e 13:45.

Tabela 4: Dados de entrada do modelo

Aeronave	Earliest time	Latest time	Target time	Porte	Operação
1	0.00	10.00	5.00	Grande	Decolagem
2	2.00	12.00	7.00	Médio	Pouso
3	4.00	14.00	9.00	Médio	Pouso
4	7.00	17.00	12.00	Médio	Pouso
5	9.00	19.00	14.00	Médio	Pouso
6	10.00	20.00	15.00	Médio	Decolagem
7	12.00	22.00	17.00	Grande	Decolagem
8	13.00	23.00	18.00	Médio	Pouso
9	15.00	25.00	20.00	Grande	Pouso
10	17.00	27.00	22.00	Médio	Decolagem
11	20.00	30.00	25.00	Grande	Decolagem
12	22.00	32.00	27.00	Médio	Decolagem
13	23.00	33.00	28.00	Médio	Pouso
14	25.00	35.00	30.00	Médio	Decolagem
15	26.00	36.00	31.00	Grande	Pouso
16	28.00	38.00	33.00	Médio	Pouso
17	30.00	40.00	35.00	Médio	Pouso
18	31.00	41.00	36.00	Médio	Pouso
19	33.00	43.00	38.00	Médio	Decolagem
20	35.00	45.00	40.00	Médio	Pouso

A partir dos dois cenários bases supracitados, executou-se o modelo três vezes, de modo a se analisar os resultados sob a ótica de dois parâmetros:

1) Possibilidade de inserção de operações de aeronaves grandes e médias: para cada um dos cenários, base ou output do modelo, analisa-se separadamente ao longo do mesmo intervalo de tempo o número de operações de pousos ou decolagens que se pode inserir. Como os critérios para a alocação de aeronaves grandes e médias são distintos (do ponto de vista de espaçamento entre operações consecutivas), faz-se essa análise de maneira separada para cada um dos portes das aeronaves.

2) Infração ao espaçamento mínimo entre operações consecutivas: as possíveis infrações à regulação de separação entre operações consecutivas devem ser apontadas, de modo a balizar eventuais resultados melhores do ponto de vista de capacidade da pista obtidos a partir de inadequações às restrições do problema.

Desse modo, em um primeiro momento, será feita a análise do período que se inicia às 6:00, o mais movimentado dentre os dois estudados. A Tabela 5 apresenta os resultados em termos de horários das operações e sequenciamento para cenário-base e para os três testes executados – nessa Tabela, “P” representa pousos, enquanto “D”, decolagens.

Tabela 5: Resultados do modelo para período iniciados às 6:00 horas

Operação	Porte da aeronave	Posição Inicial	Horário inicial	Posição final (1)	Horário final (1)	Posição final (2)	Horário final (2)	Posição final (3)	Horário final (3)
D	Médio	1	6:05	1	6:01	1	6:02	2	6:05
P	Médio	2	6:07	2	6:03	3	6:06	1	6:04
P	Grande	3	6:09	3	6:05	2	6:04	6	6:12
P	Médio	4	6:10	4	6:07	4	6:07	3	6:06
P	Grande	5	6:12	6	6:09	6	6:09	11	6:17
D	Médio	6	6:13	5	6:08	5	6:08	4	6:08
D	Médio	7	6:14	7	6:11	7	6:12	5	6:10
P	Grande	8	6:17	8	6:13	11	6:18	7	6:13
P	Médio	9	6:18	11	6:17	8	6:14	9	6:15
D	Médio	10	6:19	9	6:15	10	6:17	8	6:14
D	Médio	11	6:20	10	6:16	9	6:15	10	6:16

Horário	Inicial			Final 1			Final 2			Final 3		
	D	P	Infração									
6:07											X	
6:08	X	X										
6:09											X	
6:10			X		X		X	X				
6:11	X	X						X		X	X	
6:12				X	X							
6:13							X					
6:14					X							
6:15	X	X										
6:16	X	X						X				
6:17			X									
6:18				X	X							
6:19							X	X				
6:20							X	X		X	X	
6:21	X	X		X	X						X	
6:22				X	X							
6:23								X		X		
6:24		X										
6:25												
6:26	X	X										
6:27			X	X				X		X	X	
6:28										X		
6:29							X					
6:30	X	X										
6:31				X	X		X	X				
6:32				X	X					X	X	

Horário	Inicial			Final 1			Final 2			Final 3		
	D	P	Infração									
6:16	x	x					x	x				
6:17			x									
6:18				x	x							
6:19							x					
6:20							x	x		x		
6:21	x	x		x	x					x	x	
6:22				x	x							
6:23							x			x	x	
6:24	x											
6:25												
6:26	x	x										
6:27			x	x				x		x		
6:28										x	x	
6:29												
6:30	x											
6:31				x	x		x	x				
6:32				x	x					x		
6:33				x	x		x			x	x	
6:34	x	x		x	x		x	x		x	x	
6:35	x	x		x	x		x	x		x	x	
Total	16	14	3	16	12	0	15	11	0	16	13	0

Fonte: VRA (maio/2014) e HOTRAN (2014)

À semelhança do que foi feito para o contexto de 6:00 horas, faz-se, a seguir, a análise para o cenário de 13:00 horas, momento menos movimento do que o primeiro. A Tabela 8 apresenta os resultados em termos de horários das operações e sequenciamento para cenário-base e para os três testes executados – novamente, “P” representa pousos, enquanto “D”, decolagens.

Tabela 8: Resultados do modelo para período iniciados às 13:00 horas

Operação	Porte da aeronave	Posição inicial	Horário inicial	Posição final (1)	Horário final (1)	Posição final (2)	Horário final (2)	Posição final (3)	Horário final (3)
Decolagem	Grande	1	13:05	1	13:03	1	13:00	1	13:02
Pouso	Médio	2	13:07	2	13:04	2	13:03	2	13:03
Pouso	Médio	3	13:09	3	13:06	3	13:04	4	13:09
Pouso	Médio	4	13:12	4	13:08	4	13:07	3	13:07
Pouso	Médio	5	13:14	7	13:14	5	13:09	5	13:11
Decolagem	Médio	6	13:15	5	13:11	6	13:10	9	13:18
Decolagem	Grande	7	13:17	6	13:13	7	13:12	6	13:13
Pouso	Médio	8	13:18	8	13:15	8	13:13	7	13:14
Pouso	Grande	9	13:20	9	13:16	9	13:16	8	13:17
Decolagem	Médio	10	13:22	10	13:17	10	13:20	12	13:24
Decolagem	Grande	11	13:25	11	13:20	14	13:28	10	13:21
Decolagem	Médio	12	13:27	12	13:22	12	13:25	13	13:25
Pouso	Médio	13	13:28	13	13:25	11	13:23	11	13:23
Decolagem	Médio	14	13:30	14	13:26	13	13:26	15	13:27
Pouso	Grande	15	13:31	18	13:34	18	13:36	14	13:26
Pouso	Médio	16	13:33	15	13:28	15	13:29	16	13:28
Pouso	Grande	17	13:35	16	13:30	16	13:31	20	13:38
Pouso	Médio	18	13:36	17	13:32	19	13:37	17	13:32
Decolagem	Médio	19	13:38	19	13:36	17	13:32	19	13:36
Pouso	Médio	20	13:40	20	13:40	20	13:39	18	13:35

Fonte: VRA (maio/2014) e HOTRAN (2014)

Como foi feito para o primeiro caso, analisam-se as possibilidades de inserção de novas operações, além das infrações ao espaçamento mínimo entre operações consecutivas. A Tabela 9 apresenta os resultados para inserção de operações com aeronaves grandes, enquanto a Tabela 10, com aeronaves médias – mais uma vez, o “x” representa, nas colunas de

decolagem e pouso, a possibilidade da inserção de novas operações, enquanto, nas colunas de infrações, indica a ocorrência de uma infração ao espaçamento mínimo exigido.

Tabela 9: Análise da possibilidade de inserções de operações com aeronaves grandes

Horário	Inicial			Final 1			Final 2			Final 3		
	D	P	Infração									
13:00	x	x		x	x					x	x	
13:01	x	x		x	x		x	x		x	x	
13:02	x	x		x	x		x					
13:03	x	x										
13:04	x	x								x	x	
13:05				x			x	x		x	x	
13:06	x						x			x		
13:07				x								
13:08	x						x			x		
13:09				x	x							
13:10	x	x			x					x		
13:11	x						x	x				
13:12				x	x					x		
13:13	x	x										
13:14							x	x				
13:15							x	x		x	x	
13:16	x									x	x	
13:17							x	x				
13:18				x	x		x	x				
13:19	x			x	x			x		x	x	
13:20										x	x	
13:21		x			x		x	x				
13:22							x					

Horário	Inicial			Final 1			Final 2			Final 3		
	D	P	Infração									
13:23	x	x		x	x							
13:24	x	x		x				x				
13:25												
13:26		x								x		
13:27				x			x	x				
13:28												
13:29	x	x		x	x					x	x	
13:30							x	x		x	x	
13:31				x						x		
13:32	x											
13:33				x	x		x	x		x	x	
13:34	x	x					x	x		x		
13:35					x		x	x				
13:36			x									
13:37		x		x	x					x	x	
13:38				x	x		x					
13:39	x			x						x	x	
13:40							x	x		x	x	
13:41	x	x		x	x		x	x		x	x	
13:42	x	x		x	x		x	x		x	x	
Total	20	16	1	20	17	0	21	18	0	23	16	0

Fonte: VRA (maio/2014) e HOTRAN (2014)

Tabela 10: Análise da possibilidade de inserções de operações com aeronaves médias

Horário	Inicial			Final 1			Final 2			Final 3		
	D	P	Infração									
13:00	x	x		x	x					x	x	
13:01	x	x		x	x			x		x	x	
13:02	x	x		x	x		x	x				
13:03	x	x										
13:04	x	x									x	
13:05				x	x		x	x		x	x	
13:06		x					x	x		x	x	
13:07				x	x							
13:08	x	x					x	x		x	x	
13:09				x	x							
13:10	x	x		x	x					x	x	
13:11	x	x					x	x				
13:12				x	x					x	x	
13:13	x	x										
13:14							x	x				
13:15							x	x		x	x	
13:16	x	x								x	x	
13:17							x					
13:18				x	x		x	x				
13:19	x	x		x	x		x	x		x	x	
13:20										x	x	
13:21	x				x		x	x				
13:22							x	x			x	
13:23	x	x		x	x							
13:24	x	x		x	x		x	x				

Horário	Inicial			Final 1			Final 2			Final 3		
	D	P	Infração									
13:25												
13:26		x										
13:27				x	x		x	x				
13:28												
13:29	x	x		x	x					x	x	
13:30							x	x		x	x	
13:31				x						x	x	
13:32	x											
13:33				x	x		x	x		x	x	
13:34	x	x					x	x		x	x	
13:35				X			x	x				
13:36			x									
13:37	x	x		X	x					x	x	
13:38				X	x		x	x				
13:39	x	x		X	x					x		
13:40							x	x		x	x	
13:41	x	x		X	x		x	x		x	x	
13:42	x	x		X	x		x	x		x	x	
Total	21	21	1	22	21	0	22	22	0	21	22	0

Fonte: VRA (maio/2014) e HOTRAN (2014)

A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados para os períodos analisados.

Tabela 11: Resumo dos resultados obtidos

Período	Cenário	Aeronaves grandes		Aeronaves médias		Média de infrações
		Média de decolagens inseridas	Média de pousos inseridos	Média de decolagens inseridas	Média de pousos inseridos	
6:00 - 6:35	Base	14	15	16	14	3
	Output modelo	12,66	13,33	15,66	12	0
13:00 - 13:42	Base	20	16	21	21	1
	Output modelo	21,33	17	21,66	21,66	0

Fonte: VRA (maio/2014) e HOTRAN (2014)

A análise dos resultados será feita no item 4.4 – Discussão dos resultados.

4.3 Oportunidades de sinergia com outra abordagem do ALP

Ao analisar o ALP, Condé (2013) desenvolveu um modelo de programação matemática para o sequenciamento e a programação de aeronaves para pouso, usando o caso do Aeroporto de Internacional de São Paulo/Guarulhos. Este modelo visa à minimização dos desvios entre o horário previsto de pouso e o horário de fato praticado, o que é taticamente viabilizado pelas diferentes determinações das trajetórias de aproximação do aeroporto, de modo a se proporcionar ao piloto a possibilidade de manter uma velocidade ótima de cruzeiro e, portanto, de minimizar o consumo da aeronave.

O trabalho traz a abordagem dinâmica do problema, isto é, os horários de pouso são continuamente determinados à medida que o tempo passa e que o conjunto de aeronaves que já pousaram e que ainda vão pousar é atualizado. Essa abordagem sofre da dificuldade de operacionalização junto aos controladores de tráfego aéreo, já que soma às várias atividades já realizadas pelos mesmos um novo conjunto de atividades relacionadas às constantes revisões de ordenamentos e horários de pousos das aeronaves. No entanto, uma vez superados os desafios de operacionalização e desenvolvido o tema dos trechos de encurtamento e alongamento, conjuntos discretos e de pequenos valores de atrasos ou adiantamento, o modelo conduz a significativas reduções dos atrasos.

Ainda em tempo, analogamente ao que foi observado no presente trabalho, o fato de se ter um mix pouco diverso de aeronaves no Aeroporto Internacional de Guarulhos compromete sobremaneira as possibilidades de melhora dos resultados, dificuldade também aqui enfrentada.

4.3.1 Contrastes entre os estudos de ALP

Apesar de o presente trabalho e o trabalho desenvolvido por Condé (2013) serem relativos ao mesmo tema, há uma série de distinções que devem ser pontuadas, de modo a dirimir qualquer eventual confusão entre ambos e, por outro lado, para se apontar as intersecções que ocorrerem.

Quanto ao escopo, a tese desenvolvida por Condé (2013) abordou a caso dinâmico do ALP, enquanto o presente trabalho, em um primeiro momento, analisou ambos os casos tendo se estendido, adiante, no caso estático. Há também uma flagrante dissonância em termos de objetivos: enquanto a tese tem por objetivo a redução dos atrasos, o trabalho se pauta no maior uso da pista em termos de número de operações horárias. Evidentemente, essa distinção de objetivos leva a indicadores de performance diferentes. Por fim, a tese se aprofunda mais na questão do tráfego aéreo, sobretudo quando trata do uso de rotas alternativas para viabilizar as alterações de horário de pouso sem que se altere a velocidade da aeronave, o que a tiraria da velocidade de cruzeiro ótima.

Por outro lado, uma importante semelhança que deve ser mencionada é o fato de que as otimizações propostas, mesmo que divergentes, seriam obtidas pelo mesmo caminho, reordenamento das operações, se aproveitando dos diferentes espaçamento que se devem ter devido às diferentes esteiras de turbulência

De modo geral, então, há confluências entre os estudos feitos, o que não significa que os mesmos sejam comparáveis, sobretudo no sentido de propósitos e resultados; ao mesmo tempo, o contexto de intersecções é muito propenso a se ter oportunidades de sinergias entre o conhecimento construído em cada um dos trabalhos, isto é, há, aqui, de se analisar de que modo um pode complementar o outro, levando a resultados ainda melhores.

4.3.2 Perspectivas de visão integrada dos trabalhos

Em Condé (2013), o foco do estudo se deu na abordagem dinâmica do ALP, ao passo que no trabalho aqui exposto foi em relação à abordagem estática. A esse respeito, pode-se dizer que a abordagem estática está sobremaneira ligada ao planejamento dos horários de pouso, enquanto a abordagem dinâmica tem maior ligação com a operação propriamente dita e o real horário de execução desses pousos. Com isso, já se pode enxergar desde já que essas abordagens não são antagônicas; pelo contrário, são largamente sujeitas a junções.

Além disso, Condé (2013) se aprofunda no tema da utilização de novos procedimentos de aproximação, com a inclusão de trechos de encurtamento e alongamento, o que é muito importante para uma maior flexibilidade em relação aos horários reais de pouso frente ao horário previsto. Mesmo quando tratando da abordagem estática do problema, a execução das mudanças propostas depende fortemente da possibilidade de alterações no tempo em rota das aeronaves, isto porque, sendo a malha aérea uma rede, não é possível se alterar os horários de pouso e/ou decolagem em um determinado aeroporto, havendo reduzidas possibilidades de alterações do tempo de viagem, sem se impactar vários outros aeroportos. Com isso, restam

apenas duas possibilidades: alterar de maneira generalizada o horário dos voos, mesmo que seja com reduzidas variações; ou apoiar as pequenas variações em um só aeroporto com o uso dessas rotas alternativas ou outro meio de tornar mais elásticas as rotas.

Portanto, apesar de não haver grandes congruências em termos de abordagem do mesmo problema, o presente trabalho pode usar a visão dinâmica para realizar maiores incrementos de uso da pista, bem como as rotas alternativas para ajudarem na execução das mudanças pontuais em um só aeroporto.

4.4 Discussão dos resultados

Analisando-se os resultados apresentados no item 4.2, um primeiro ponto que se observa é a eliminação de infrações nos cenários construídos pelo modelo frente ao cenário-base. Na prática, como o aeroporto de Guarulhos é altamente demandado, funcionando com um alto número de operações ao longo de todo o dia, é costumeiro que o fluxo de aeronaves seja tal que crie situações propensas ao desrespeito dessa condicionante; por outro lado, como as restrições de espaçamento mínimo entre operações consecutivas são impostas no modelo, esse ponto acaba sendo equacionado.

Ao mesmo tempo, o fato de não se comprometer as operações com infringências ao espaçamento mínimo entre aeronaves em operações de pouso e decolagens, há certa perda de capacidade de se otimizar a questão da capacidade da pista, função objetivo do problema; em outras palavras, por se respeitar à plenitude as restrições do problema – o que não é verificado no cenário-base – deixa-se de se ter resultados expressivos em termos da otimização do problema. É justamente isso que ocorre no primeiro período analisado, o mais movimentado: por se cometer 3 infrações no cenário-base, não se consegue ter resultados melhores quando da utilização do modelo. Verifica-se, então, depois de executado o modelo, menos lacunas para se incluir novas operações, tanto para aeronaves grandes, quanto para aeronaves médias. Na média, a redução do número de possíveis inclusões foi de 9%.

A verificação de um caso menos movimentado, como é o segundo estudado, é importante para confrontar o modelo com uma situação mais próxima do que se espera ter normalmente em aeroportos: grande movimentação de aeronaves, entretanto respeitando as regulamentações de espaçamento entre operações – ainda assim observa-se um caso de infração nesse cenário-base. Nesse caso, além de se ter todos os outputs respeitando as restrições de espaçamento, verifica-se mais lacunas para a inclusão de novas operações, tanto para aviões grandes, quanto médios. Na média, o aumento do número de possíveis inclusões foi de 5%.

Desse modo, pode-se traçar que o uso do modelo construído leva a dois tipos de ganhos distintos: pode levar à adequação das operações em termos de respeitar as regras de espaçamento e, por outro lado, quando em situações iniciais de maior conformidade com essas restrições, leva a melhorias operacionais em termos de capacidade da pista de assimilar a inclusão de novas operações.

Evoluindo agora a análise dos resultados para que se consiga encontrar o motivo da melhoria operacional da pista, deve-se lembrar que o uso do mix de aeronaves diversificado em termos de porte das mesmas leva à possibilidade de se readequar o sequenciamento das chegadas ou partidas. Na prática, nos melhores resultados obtidos em termos de aumento da capacidade da pista observa-se a formação de espécies de clusters de aeronaves semelhantes em porte ou aeronaves realizando operações opostas. Esses clusters têm a característica de as aeronaves que a ele pertencem se separam por pequenos espaçamentos racionais e, devido a essa espécie de coesão, formam-se nos seus extremos lacunas maiores para inclusões mais arbitrárias e relevantes de novas operações. Para exemplificar esse ponto, voltemos ao segundo período analisado e, mais especificamente, ao terceiro caso executado do modelo: a Tabela 12 apresenta esses resultados.

Tabela 12: Resultados obtidos na terceira execução do modelo para o segundo período observado (13:00 h)

Operação	Porte da aeronave	Posição final (3)	Horário final (3)
Decolagem	Grande	1	13:02
Pouso	Médio	2	13:03
Pouso	Médio	3	13:07
Pouso	Médio	4	13:09
Pouso	Médio	5	13:11
Decolagem	Grande	6	13:13
Pouso	Médio	7	13:14
Pouso	Grande	8	13:17
Decolagem	Médio	9	13:18
Decolagem	Grande	10	13:21
Pouso	Médio	11	13:23
Decolagem	Médio	12	13:24
Decolagem	Médio	13	13:25
Pouso	Grande	14	13:26
Decolagem	Médio	15	13:27
Pouso	Médio	16	13:28

Operação	Porte da aeronave	Posição final (3)	Horário final (3)
Pouso	Médio	17	13:32
Pouso	Médio	18	13:35
Decolagem	Médio	19	13:36
Pouso	Grande	20	13:38

Na região em azul, pode-se observar um desses clusters: 6 operações ocorrendo em 6 minutos, com grande aproveitamento das diferenças entre aeronaves, em termos de porte e de operações, para se conseguir efetuar todas as operações nesse reduzido espaço de tempo. É interessante, então, observar o efeito desse cluster nas adjacências, sinalizadas em laranja: anteriormente ao cluster, há um período de 5 minutos com apenas 2 operações e, posteriormente, há um período de 7 minutos também com apenas duas operações. Justamente nesses períodos de certa rarefação em termos de fluxo de aeronaves é que se têm as melhores oportunidades de incremento de capacidade da pista.

Por fim, retomando o tema de rotas alternativas, introduzido nesse mesmo aeroporto por Condé (2013), é importante lembrar que qualquer alteração em uma única operação pode abalar a malha aérea de maneira generalizada. Nesse sentido, a perspectiva de usar as rotas alternativas para auxiliar as eventuais mudanças de horários geradas pela introdução desse modelo no sentido de suavizar os efeitos dessas mudanças é bastante positiva e deve, portanto, ser levada em conta, se possível, quando da revisão dos horários dos voos.

5. Conclusões

Desse modo, enxerga-se no trabalho uma relevância no sentido de reorganização dos voos de modo a se obter, em primeira e principal instância, agendamentos de operações que respeitem os espaçamentos regulamentares, bem como, em segundo lugar, se ter maiores lacunas para a inserção de novas operações. Percebe-se, entretanto, que os resultados vão ser significativamente melhores se o modelo for aplicado a casos em que se tenha um mix heterogêneo de aeronaves no sentido do porte das mesmas, bem como em aeroportos que estejam operando sem um número alto de infrações às regras de espaçamento.

Há ainda um grande desafio de implementação do modelo proposto, no sentido de tornar viáveis as alterações, tendo-se em conta o caráter de malha do transporte aéreo – qualquer alteração pontual em um aeroporto afeta as operações em vários outros. Para tanto, a implementação de rotas alternativas propostas por Condé (2013) deve ser viabilizado.

Por fim, a utilização do modelo em outros aeroportos é totalmente possível, sendo apenas importante se ter em mente a questão de maior melhora das operações em aeroportos onde ocorra o contexto supracitado.

Referências bibliográficas

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) n° 153, Emenda n° 00**. Brasília: ANAC, 2012

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **VRA, Voos Regulares Ativos**. Brasília: ANAC, 2014

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **HOTRAN, Horários de Transporte** . Brasília: ANAC, 2014

ATKIN, J. D. A.; BURKE, E. K.; GREENWOOD, J. S. **A comparison of two methods for reducing take-off delay at London Heathrow Airport**, 2011.

ATKIN, J. D.; RAVIZZA, S.; MAATHUIS, M. H.; BURKE, E. K. **A combined statistical approach and ground movement model for improving taxi time estimations at airports**, 2013

BEASLEY, J. E.; SONANDER, J.; HAVELOCK, P. **Scheduling Aircraft Landings at London Heathrow using a population heuristic**, 2001

DECEA - MINISTÉRIO DA DEFESA COMANDO DA AERONÁUTICA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Capacidade do sistema de pistas**. Brasília: DECEA, 2009

McKinsey & Company, **Estudo do setor de transporte aéreo no Brasil: relatório consolidado**. Rio de Janeiro, 2010.

MURÇA, M. C. R. **O problema de sequenciamento de aeronaves para pouso: análise para o caso do Aeroporto Internacional de Guarulhos**, 2013

WEN, M. **Algorithms of Scheduling Aircraft Landing Problem**, 2005

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO	2. DATA	3. REGISTRO N°	4. N° DE PÁGINAS
TC	20 de novembro de 2014	CTA/ITA/TC-076/2014	54
5. TÍTULO E SUBTÍTULO:			
Otimização operacional de sistema pista-pátio aeroportuário.			
6. AUTOR(ES):			
José Renato Paiva Carvalho			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):			
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:			
Sistema de pista; Algoritmos genéticos; Heurística populacional; Aeroporto de Guarulhos.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:			
Planejamento de aeroportos; Pista (de pouso e decolagem); Infraestrutura (transporte); Transporte de passageiros; Tráfego aéreo; Aeroportos; Transporte.			
10. APRESENTAÇÃO:			
		X Nacional	Internacional
ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil Aeronáutica. Orientador: Rodrigo Arnaldo Scarpel; coorientador: Cláudio Jorge Pinto Alves. Publicado em 2014.			
11. RESUMO:			
<p>Este trabalho de graduação tem por objetivo avaliar o atual contexto de organização e execução dos processos de procedimentos de pousos e decolagens. Para tanto, fez o estudo para o caso real do Aeroporto Internacional de Guarulhos. Após diagnóstico do contexto de infraestrutura aeroportuária vigente hoje no país e revisão das melhores práticas adotadas internacionalmente, bem como dos principais estudos na área, optou-se por desenvolver um algoritmo genético com heurística populacional que funcionasse para o estudo de caso: nesse sentido, um dos pontos cruciais é a abordagem conjunta, dentro do mesmo modelo, de pousos e decolagens, o que está em consonância com a situação de operações dependentes do sistema de pistas de Guarulhos. A análise de dois períodos distintos do ponto de vista de movimentação levou a dois resultados diferentes: no primeiro, mais movimentado, no qual se</p>			

verificaram, inclusive, três transgressões às regras de espaçamento mínimo entre operações no cenário-base, obteve-se a redução a zero das infrações, porém não se conseguiu ampliar a possibilidade de inserções de novas operações – sob esse ponto de vista, o cenário-base foi 9% superior. No segundo período, com menor movimentação, mas ainda com ocorrência de uma infração, verificou-se, nos *outputs* do modelo, tanto a anulação das transgressões ao espaçamento mínimo, quanto o aumento da capacidade de receber novas operações – nesse período, o modelo foi 5% superior em relação ao cenário-base. Em relação à implementação, a mesma seria sobremaneira facilitada caso houvesse a implementação das rotas alternativas sugeridas por Condé (2013) no mesmo aeroporto de Guarulhos, o que permitiria maior flexibilidade para se realizar as modificações necessárias em termos de horários previstos das operações.

^{12.} GRAU DE SIGILO:

OSTENSIVO RESERVADO CONFIDENCIAL SECRETO