



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Atribuição de Portas de Embarque em Aeroportos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

Autor

Tânia Sofia Dias Ventura

Orientadores

António José Pais Antunes

João Pedro Almeida da Rocha Pita

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2014

RESUMO

A importância crescente do uso dos transportes aéreos para movimentar passageiros e carga tem vindo a colocar pressão extra sobre os aeroportos e obrigar a novas abordagens na atribuição dos voos a portas de embarque.

Neste trabalho mostram-se duas abordagens possíveis à atribuição dos voos: uma considerando a minimização do total das distâncias a percorrer pelos passageiros nos terminais e a outra maximizando os passageiros servidos por portas de embarque.

Das duas abordagens escolhidas, desenvolve-se a da maximização dos passageiros servidos por portas, criando um modelo capaz de atribuir os voos tendo em conta as restrições geométricas do terminal, a possibilidade da retirada das aeronaves das portas de embarque, quando estas vão permanecer por longos períodos de tempo no aeroporto, assim como lidar com situações de congestionamento.

A aplicabilidade do modelo foi testada usando como estudo de caso um dos terminais do Aeroporto Internacional de São Paulo.

A rapidez de cálculo de modelo torna-o bastante versátil, podendo ser usado tanto para o planeamento a longo prazo das atribuições dos voos, como lidar com imprevistos diariamente e em tempo real.

ABSTRACT

The increasing importance of the use of air transportation to transit passengers and cargo has been placing extra pressure on the airports and forces new approaches in the gate assignment problem.

In this paper, we present two possible approaches to gate assignment: one considers the minimization of total passenger walking distance inside the terminal and the other the maximization of the passengers served by gates.

From the two chosen approaches, we developed the one that maximizes passengers served by gates, creating a model able to assign flights taking into account the terminal geometrical restrictions, the possibility of towing the aircraft from the gate, when it stays in the airport for long periods of time, as well as able to deal with congestion situations.

The model applicability was tested using a terminal from São Paulo International Airport as our case study.

The model calculation speed makes it extremely versatile, allowing it to be used to not just for long term assignment planning, as well as dealing in real-time with daily unexpected changes.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Revisão da literatura.....	2
1.2 Estrutura da dissertação.....	4
2 PROBLEMÁTICA.....	6
2.1 Conceitos básicos.....	6
3 METODOLOGIA.....	13
4 MODELOS.....	16
4.1 Minimização de distâncias.....	16
4.2 Maximização da atribuição a portas.....	22
5 ESTUDO DE CASO.....	35
6 CONCLUSÃO.....	40
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Terminal linear (Aeroporto de Munique)	7
Figura 2.2 - Terminal tipo finger pier (Aeroporto Leonardo Da Vince, Roma).....	8
Figura 2.3 - Terminal tipo satélite (Aeroporto Charles de Gaulle, Paris).	8
Figura 2.4 - Terminais midfield linear (aeroporto Stansted, Londres) e em X (Aeroporto Internacional Pittsburgh).	9
Figura 2.5 - Terminal Transporter	9
Figura 2.6 - Esquematização das restrições de adjacência.	10
Figura 2.7 - Esquema da situação “primeiro a chegar, último a sair”.	10
Figura 4.1 - Esquematização dos períodos de tempo que o avião passa nas portas.	20
Figura 4.2 - Esquematização da atribuição dos aviões às portas.	21
Figura 4.3 - Esquematização da atribuição dos aviões às portas.	25
Figura 4.4 - Tempos de resposta do modelo para maximização de atribuição de voos.	27
Figura 4.5 - Percentagem de voos atribuídos.	28
Figura 4.6 - Percentagem de passageiros servidos por porta de embarque.	28
Figura 4.7 - Tempo de resposta do modelo para maximização de atribuição de passageiros. .	29
Figura 4.8 - Percentagem de passageiros servidos por porta para a função objetivo de maximização de passageiros.....	29
Figura 4.9 - Tempos de resposta do modelo para a maximização dos passageiros servidos por portas de embarque.	34
Figura 5.1 - Esquema do terminal 3 do aeroporto de Guarulhos.....	37

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 - Distância em metros entre portas do terminal.....	19
Quadro 4.2 - Número de passageiros em transferência.....	19
Quadro 4.3 - Períodos de chegada e partida das aeronaves.....	20
Quadro 4.4 - Distribuição dos aviões pelas portas, durante os vários períodos de tempo.	20
Quadro 4.5 - Número de lugares de cada avião.....	24
Quadro 4.6 - Distribuição dos aviões pelas portas e pelos vários períodos de tempo.....	25
Quadro 5.1 - Tempos mínimos de embarque e desembarque.....	36
Quadro A - 1: Horário e características dos voos de sábado.	A-1
Quadro A - 2: Resultados da atribuição dos voos.	A-3
Quadro A - 3: Percentagem de ocupação das portas e lugares de estadia ao longo do dia. ...	A-6

1. INTRODUÇÃO

Os transportes aéreos têm vindo a assumir cada vez mais uma maior importância, no transporte de passageiros e mercadorias e tem estado sujeito a alterações importantes nos últimos anos. O aparecimento das companhias *low cost* nos anos noventa, os incidentes do 11 de Setembro de 2001 no World Trade Center, assim como o aumento do poder económico de alguns países do médio Oriente e Ásia são alguns dos fatores que têm influenciado o número de viagens. Apesar de alguns acontecimentos como o de 11 de Setembro terem tido um efeito negativo no transporte aéreo, a tendência geral tem sido de crescimento.

Em 2011 segundo dados da International Civil Aviation Organization (ICAO) houve um total de 3 mil milhões de passageiros transportados e um total de 31 milhões de viagens, que representa um aumento de 4,7% no número de passageiros e 0,7% no número de viagens em relação a 2010. A mesma fonte prevê que em 2030 o número de passageiros suba para os 6,4 mil milhões e o número de viagens para os 59 milhões, o que significa um crescimento de 4,4% e de 3,6% para o número de passageiros e viagens respetivamente. Esta previsão mostra-nos que em menos de vinte anos o número de utilizadores de transporte aéreo pode mais do que duplicar, e o número de viagens quase duplica.

Diretamente associados ao transporte aéreo estão os aeroportos, como as infraestruturas de apoio mais importantes. Deles partem e chegam todos os voos efetuados e todos os passageiros transportados. Para além das aeronaves e dos passageiros, temos que pensar em todas as atividades e serviços de apoio a eles associados. Estas vão desde o tratamento das bagagens, manutenção das aeronaves, postos de controlo aéreo, passando pelos serviços de *check-in* e segurança e espaços comerciais.

O crescimento do número de viagens e passageiros transportados vai-se refletir, de forma mais ou menos acentuada, nalguns aeroportos, principalmente naqueles que estejam a operar perto do seu limite de capacidade. Nesta perspetiva é cada vez mais importante arranjar soluções para rentabilizar melhor os recursos já existentes.

A capacidade de um aeroporto está diretamente relacionada com o número de portas de embarque que nele existe e por conseguinte também com a maneira como as portas são atribuídas aos aviões. Essa atribuição pode ser feita de forma coordenada e pensada de acordo com objetivos e critérios definidos para cada caso. Alguns desses objetivos poderão prender-se com o melhoramento do serviço para os clientes, nomeadamente, tentando minimizar as distâncias que os mesmos precisam de se deslocar dentro do aeroporto. Ou objetivos que estejam mais ligados à geração de receitas e à operacionalidade, como por exemplo reduzir o número de aviões que não são servidos por mangas de embarque, ou minimizar os impactos provocados pelos atrasos de voos.

O presente trabalho pretende estudar metodologias de atribuição dos voos (aviões) de chegada às portas embarque, ou decidir quais os voos que vão ficar na pista caso não haja mangas de embarque disponíveis. Vão ser estudados diferentes métodos de atribuição de portas, tendo em conta critérios e objetivos diferentes, consoante as diferentes situações que possamos ter presentes no aeroporto.

1.1. Revisão da literatura

A problemática da atribuição de portas a voos tem vindo a ser abordada nas últimas décadas por vários autores, tendo vindo sempre a crescer o interesse no assunto. A abordagem ao problema tem vindo a alterar-se assim como os métodos usados na sua resolução.

Uma boa revisão do trabalho já feito nesta área foi elaborada, recentemente, por Bierlaire e Viswanathan (2013). Sendo um trabalho recente e bem estruturado, a presente revisão da literatura terá como base os mesmos artigos que foram citados por estes autores.

Dois dos primeiros artigos publicados sobre a atribuição de voos a portas foram feitos por Babic et al (1984) e Mangoubi e Mathaisel (1985). Ambos têm como objetivo a minimização das distâncias médias percorridas pelos passageiros dentro do terminal; ambos apresentam um modelo contínuo no tempo para solucionar o problema e consideram que todos os voos são atribuídos a portas. O segundo artigo incorpora ainda no problema a questão de compatibilidade entre o tipo de avião e o espaço disponível na porta. O problema é resolvido usando métodos heurísticos.

Posteriormente Haghani e Chen (1998) formularam um modelo de atribuição de portas, em que o objetivo continua a ser a minimização das distâncias a percorrer pelos passageiros. O problema usa programação inteira e é formulado como um problema de atribuição quadrático, que é resolvido usando uma heurística iterativa.

Yang e Chan (1998) abordaram o problema da atribuição de portas como um problema de fluxos numa rede de serviços múltiplos, em que o objetivo é fazer “fluir” todos os aviões na rede ao menor custo, que acaba por se traduzir na redução das distâncias percorridas pelos passageiros. A solução do problema é encontrada usando primeiro Relaxação Lagrangeana e posteriormente uma heurística Lagrangeana.

Com o objetivo de minimizar as distâncias para passageiros em transferência para facilitar a ligação com o voo seguinte Xu e Baley (2001) desenvolveram um modelo de atribuição com uma função objetivo quadrática. O problema é resolvido usando meta-heurísticas de pesquisa tabu.

Bolat (2000) desenvolveu um modelo de atribuição de portas que pretende chegar a uma atribuição robusta, que consiga minimizar os efeitos negativos provocados por alterações dos horários dos voos, atrasos, condições atmosféricas adversas, etc. O objetivo do modelo é minimizar a variância dos tempos de inatividade das portas. A função objetivo é quadrática e é solucionada usando métodos heurísticos.

Yan et al (2002) propõem uma comparação entre os modelos de atribuição de portas estáticos e os modelos de atribuição em tempo real afetados por atrasos estocásticos. Num quadro de simulação avaliam os efeitos dos atrasos nos modelos estáticos, o uso de tempos de espera das portas flexíveis e atribuição em tempo real.

Ainda com o objetivo de minimizar a distância percorrida pelos passageiros, pelas bagagens ou bens, Lim et al (2005) tornam o problema mais realista considerando que os horários de chegada e partida dos voos podem sofrer pequenas alterações. A aproximação à solução é feita usando inserção e mudança de intervalos em conjunto com um algoritmo de mudança de tempo.

Yan e Huo (2001) definem um modelo multiobjectivo para tornar a atribuição de portas mais eficiente, tendo em conta situações de congestionamento. Os dois objetivos do modelo são a minimização das distâncias percorridas pelos passageiros e a minimização do tempo de espera dos passageiros quando não existem portas livres a atribuir.

Outro modelo multiobjectivo que lida com situações de congestionamento e distâncias percorridas pelos passageiros foi proposto por Ding et al (2005). O modelo usa um programa quadrático 0-1, que minimiza o número de voos não atribuídos e as distâncias percorridas pelos passageiros. A minimização dos voos não atribuídos é feita usando um algoritmo guloso, enquanto uma técnica de pesquisa local permite encontrar boas soluções usando pesquisa tabu.

Procurando encontrar o modelo de atribuição mais robusto, Lim e Wang (2005) desenvolveram critérios de avaliação para a capacidade de uma atribuição de voos a portas lidar com as incertezas nos horários dos voos. Desenvolveram um modelo de programação estocástica e transformaram-no em programação binária introduzindo funções de estimativa não supervisionadas, sem se ter informação dos horários reais dos voos. O problema é resolvido usando uma meta-heurística híbrida, envolvendo pesquisa local e pesquisa tabu.

Yan e Tang (2007) consideram que o estudo da relação entre os modelos de planeamento e os modelos de operação, usados em tempo real, tem sido negligenciada. Eles propõem desenvolver um quadro de atribuição de apoio às autoridades aeroportuárias que seja sensível aos atrasos. Este quadro assenta em três componentes, um modelo de atribuição estocástica, uma regra de atribuição em tempo real e métodos de ajuste de penalidades.

Focando-se no Aeroporto de Schiphol, Amesterdão, Diepen et al (2007) desenvolveram um modelo de atribuição que pretende, dadas as chegadas e partidas das 24 horas seguintes, fosse feita uma atribuição robusta que exija pouco replaneamento devido a alterações de horário. Numa primeira fase o modelo cria planos de porta usando uma função de custo para maximizar os tempos livres nas portas e numa segunda fase decide-se que planos de porta são atribuídos a cada uma das portas existentes.

Dorndorf et al (2007) propõem o uso de duas abordagens para conferir robustez a um modelo não robusto. As duas abordagens são o uso de métodos de sobreposição e uso de conjuntos difusos. No seguimento, Dorndorf et al (2008) consideram um modelo multiobjectivo de maximização do total de atribuições preferenciais, minimização de voos não atribuídos, minimização das operações de reboque e maximização da robustez em relação a atrasos de voos. O problema é abordado passando de um problema de planeamento de atribuição de voos a portas a um problema gráfico – *clique partitioning problem* (CPP).

Drexel e Nikulin (2008) apresentam um modelo multiobjectivo que pretende minimizar os voos não atribuídos e as distâncias percorridas pelos passageiros e também maximizar as atribuições preferenciais. O problema é formulado como um problema de atribuição quadrático e resolvido usando *Pareto simulated annealing*.

Hu e Di Paolo (2009) propõem um algoritmo genético híbrido, inspirado no fenómeno de dispersão de ondas na superfície de um líquido, para solucionar problemas de atribuição de portas multiobjectivo.

1.2. Estrutura da dissertação

No capítulo 2 deste documento vai ser abordada a problemática relativa aos aeroportos; vão ser apresentados alguns conceitos e noções básicas que é necessário ter presentes para se poder estudar a atribuição dos voos às portas de embarque.

O capítulo 3 terá uma descrição da metodologia e o tipo de abordagem que serão usadas na resolução do problema em estudo.

No capítulo 4 serão apresentados e descritos em detalhe os diferentes modelos matemáticos criados em função das várias especificidades do problema da atribuição das portas de embarque. Estes modelos são a ferramenta de base que nos vai permitir chegar a resultados concretos, tendo em conta os dados e os objetivos de cada caso, sobre qual é a melhor atribuição de voos a portas de embarque.

A aplicação dos modelos a um caso concreto será descrita no capítulo 5 da presente dissertação.

No capítulo 6 serão expostas as conclusões a que o presente estudo permitiu chegar e serão, também feitas algumas considerações finais sobre o mesmo.

2. PROBLEMÁTICA

A função desempenhada por um aeroporto faz com que este seja uma infraestrutura complexa, mas com zonas e funções que são comuns a qualquer aeroporto e que obedecem a regras bem estabelecidas.

Numa primeira instância podemos dividir um aeroporto em duas grandes áreas: o lado ar e o lado terra. Segundo o Instituto Nacional de Aviação Civil, INAC, ao lado ar correspondem as zonas de movimentos de aeronaves, terrenos do aeroporto e edifícios adjacentes ou parte destes, em que o acesso é controlado. A restante área do aeroporto pertence ao lado terra; deste fazem parte todas as áreas públicas do aeroporto.

Neste estudo será focado o lado ar, nomeadamente os terminais, as portas de embarque e as plataformas de estacionamento das aeronaves.

2.1. Conceitos básicos

Para podermos entender melhor a questão em estudo é necessário ter presentes alguns conceitos e noções básicas sobre aeroportos.

A atribuição de voos a portas, de uma forma muito simples, consiste em atribuir um avião que acabou de chegar a uma manga de embarque de um terminal, para que os passageiros possam sair ou entrar do avião diretamente para o terminal.

De uma forma geral um avião chega ao aeroporto e, dependendo do tipo de voo, a totalidade ou apenas parte dos passageiros vão desembarcar. Os passageiros que desembarcam podem ter como destino final aquele aeroporto ou podem estar em transferência e continuarem a viagem noutro voo. Como já foi referido, dependendo da disponibilidade de portas, um avião quando chega ao aeroporto pode ser ou não atribuído a uma porta de embarque. Idealmente seria preferível que todos os voos fossem atribuídos a uma porta, já que ao não serem implica um desembarque, e possivelmente embarque remoto o que exige a disponibilização de transporte dos passageiros do avião até ao edifício do aeroporto. Esta situação implica custos acrescidos e algum transtorno para os passageiros.

Para se estudar a atribuição dos voos às portas existem vários fatores que têm que ser levados em consideração, nomeadamente o espaço e a geometria, distâncias percorridas pelos passageiros, limitações na capacidade do aeroporto e os atrasos dos voos.

Fatores como a dimensão, geometria e localização dos terminais são fatores importantes a considerar. Eles vão influenciar distâncias percorridas pelos passageiros, os tipos de aviões que podem ser atribuídos a determinadas portas, se o facto de uma porta estar ocupada influencia ou não o funcionamento das adjacentes e se é ou não necessário algum tipo de transporte para aceder aos terminais.

Segundo Neufville e Odoni (Airport Systems, 2003, cap. 14-3) os terminais podem dividir-se em cinco configurações básicas: terminais lineares, *finger piers*, satélites, *midfield* e *transporters*. Os terminais lineares são edifícios longos e estreitos em que num dos lados temos a zona dedicada aos aviões e do outro as zonas de acesso dos passageiros (Figura 2.1). Os *finger piers* (Figura 2.2) são estruturas que têm extensões alongadas e salientes relativamente à zona central, e é nessas extensões que se encontram as portas de embarque. Depois temos os satélites (Figura 2.3) que, tal como os *finger piers* tem extensões salientes, mas estas normalmente em forma de T, em que só no topo é que temos portas de embarque. Os terminais *midfield* (Figura 2.4), são edifícios independentes dos restantes, normalmente são acedidos por transporte próprio e usualmente tem um formato linear ou em X. E por fim os *transporters* (Figura 2.5), que são os veículos que fazem o transporte entre os edifícios do aeroporto e o avião.



Figura 2.1 - Terminal linear (Aeroporto de Munique)



Figura 2.2 - Terminal tipo *finger pier* (Aeroporto Leonardo Da Vince, Roma).



Figura 2.3 - Terminal tipo satélite (Aeroporto Charles de Gaulle, Paris).



Figura 2.4 - Terminais *midfield* linear (aeroporto Stansted, Londres) e em X (Aeroporto Internacional Pittsburgh).



Figura 2.5 - Terminal *Transporter*
(<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=331080>)

Quando passamos ao estudo da atribuição dos aviões às portas de embarque, relativamente à geometria do terminal, temos que ter em atenção situações de limitação de espaço. Por exemplo, o espaço que existe entre duas portas de embarque adjacentes pode ser tal que só alguns tipos de avião as podem usar, ou se uma for ocupada por um determinado tipo de avião vai influenciar, também a forma como a porta adjacente é usada (Figura 2.6). Há ainda situações em que a ocupação de uma porta bloqueia o acesso da adjacente, isto leva a que as estadias na porta possam estar dependentes, por exemplo o avião que é servido na porta que fica bloqueada tem que ser o primeiro a chegar e o último a sair (Figura 2.7).



Figura 2.6 - Esquemática das restrições de adjacência.

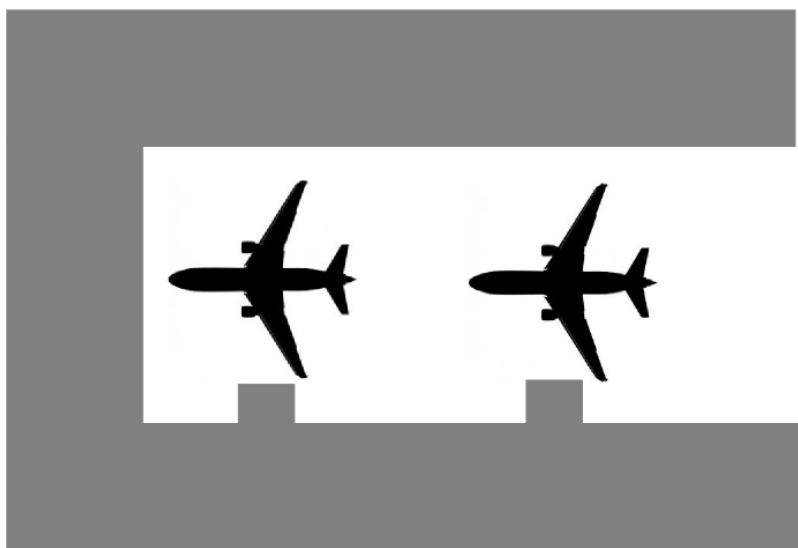


Figura 2.7 - Esquema da situação “primeiro a chegar, último a sair”.

As distâncias percorridas pelos passageiros e bagagem tem a ver com a geometria dos terminais, mas também são influenciadas pela posição em que cada avião é colocado no terminal e pelo tipo de passageiros. Os passageiros terminais vão sair do avião e vão dirigir-se à zona de recolha de bagagens e depois à saída; os passageiros que estão a iniciar a viagem vão fazer o percurso desde a zona de entrada e *check-in* até ao avião. Enquanto os passageiros em transferência vão percorrer o terminal desde a porta de chegada até à porta de partida. Alterando o posicionamento dos voos vamos estar a alterar, também as distâncias a percorrer pelos passageiros.

O constante crescimento do uso do transporte aéreo faz com que certos aeroportos estejam a operar perto do seu limite de capacidade, isto pode implicar, nomeadamente que o número de

portas que o aeroporto disponibiliza não seja suficiente, pelo menos nas horas de ponta, para receber todos os aviões que chegam.

As portas existentes nos aeroportos, por norma, estão a ser usadas pelas companhias aéreas que nele operam; usualmente a cada companhia são atribuídas portas de um mesmo terminal. Quando o número de portas de uma determinada companhia não é suficiente, o embarque e desembarque de passageiros pode ser feito remotamente no terminal em que a companhia opera, trazendo os custos acrescidos do transporte dos passageiros, no caso de isto não ser possível, o voo pode ainda ser atribuído a uma porta noutra terminal, o que implica custos ainda maiores.

Para além do número de portas disponível, o tempo que cada avião permanece em cada porta também tem influência na capacidade do aeroporto. Por vezes, quando o período de chegada de um avião e o período de partida estiverem muito afastados no tempo, pode proceder-se ao reboque do avião da porta para o estacionamento, e posteriormente trazê-lo de volta para a mesma ou outra porta disponível. Esta operação tem custos acrescidos e necessita que haja estacionamento disponível, mas também permite ganhar alguma capacidade extra.

Quando o avião é atribuído a uma porta, ele vai, geralmente, permanecer aí algum tempo para permitir que os passageiros do voo de chegada desembarquem e os passageiros do voo de partida embarquem. Este período de tempo que cada avião passa na porta vai ter um papel importante na atribuição do mesmo. Quando se planeia a atribuição do avião à porta considera-se a hora prevista de chegada e o tempo que o avião vai necessitar de estar na porta e por questões de segurança pode considerar-se ainda um intervalo de tempo entre a partida de um voo e a chegada do seguinte, em que a porta fica desocupada.

As atribuições às portas são feitas de acordo com os horários previsíveis de chegadas e partidas dos voos. No entanto, os horários programados estão sujeitos a uma série de imprevistos, como avarias dos aviões, condições atmosféricas adversas ou problemas com a tripulação que podem levar a que sejam alterados.

Para pequenas alterações de horário o intervalo de tempo de segurança entre a partida de um voo e a chegada de outro, pode ser suficiente para absorver as alterações. No entanto basta haver um voo atribuído a uma porta com um atraso significativo e poderá afetar vários dos voos subsequentes, alterando as atribuições que estavam planeadas e obrigando a um novo planeamento em tempo real, para lidar com a nova situação.

O presente trabalho pretende estudar metodologias de atribuição dos voos de chegada às portas de embarque, ou decidir quais os voos que vão ser servidos remotamente caso não haja mangas de embarque disponíveis. Tendo presente o que foi descrito anteriormente, a atribuição de voos

a portas pode ser efetuada, tendo por base objetivos e critérios diferentes. Podemos ter como objetivo reduzir as distâncias que os passageiros tem que a percorrer no terminal, maximizar o número de aviões servidos por portas de embarque, ou de forma idêntica o número de passageiros servidos pelas portas. Podemos ainda ter como objetivo a maximização da robustez do modelo, ou seja que ele seja capaz de funcionar mesmo quando há alterações significativas nos horários de chegadas e partidas.

3. METODOLOGIA

O estudo da atribuição de portas desenvolvido nesta dissertação tem como base trabalhos já desenvolvidos por outros investigadores, nomeadamente os artigos publicados por Haghani e Chen (1998) e Viswanathan e Bierlaire (2013), que representam duas fases distintas do estudo do problema. O problema de atribuição de portas foi estudado, numa primeira instância com o objetivo de minimizar as distâncias que os passageiros tinham de percorrer dentro do terminal, outros objetivos foram sendo considerados como a minimização de custos das operações e maximização da robustez das atribuições feitas; há estudos em que alguns destes objetivos são combinados.

Neste trabalho, vamos numa primeira fase estudar um modelo de minimização de distâncias e numa segunda fase um modelo de maximização da atribuição de voos a portas.

A minimização das distâncias percorridas tem particular interesse para os passageiros em transferência e respetivas bagagens, principalmente para aqueles que têm voos de chegada e partida pouco distanciados no tempo, para estes casos a proximidade entre as portas de embarque pode fazer a diferença entre apanhar o voo ou não.

Na formulação do problema de minimização de distâncias vamos ter em conta a geometria do terminal, ou seja vamos usar as distâncias entre cada par de portas do terminal, assim como a distância entre cada porta e as zonas de *check-in* e *check-out*. Para sabermos quais os percursos que cada passageiro necessita fazer, precisamos de saber a sua origem e o seu destino ou pelo menos possuímos informação que permita, para cada voo fazer a distribuição dos seus passageiros de modo a criar uma matriz origem-destino. Para este caso estamos a considerar que os horários de chegada e partida de cada avião são fixos e estamos apenas a considerar os aviões que estão a usar as portas de embarque.

O problema vai ser modelado como programação inteira binária, em que as variáveis de decisão podem apenas assumir os valores 0 ou 1 e a atribuição é feita ao longo do tempo, considerando vários períodos de tempo. O objetivo é diminuir o total das distâncias percorridas pelos passageiros, ou seja saber quantos passageiros vão de um avião para outro e quanto distam os aviões, isso implica, que para fazer esse cálculo temos que estar sempre associar as atribuições aos pares e não independentemente. Esta situação torna o problema de atribuição de portas num problema quadrático.

O aumento do tráfego aéreo assim como o aumento das gestões privadas de aeroportos fazem com que estes estejam cada vez mais a serem levados ao seu limite de capacidade e as suas instalações a serem o mais rentabilizadas possível. O que acontece é que alguns voos vão ser

servidos por portas de embarque de contacto e outros por portas remotas, que vão exigir o uso de transporte para trazer e levar os passageiros das aeronaves para o terminal; pode ainda haver situações de congestionamento que faça com que uma aeronave tenha que esperar até ter uma porta disponível. Todas as operações num aeroporto vão ter custos associados, por isso para além do impacto negativo que tem nos passageiros não terem uma porta de embarque no terminal ou terem que esperar para desembarcar do avião, vão representar, também custos acrescidos para as companhias aéreas. Parte das receitas dos aeroportos vêm de alugar as suas instalações às companhias aéreas, logo tanto do ponto de vista da gestão do aeroporto, como do ponto de vista das companhias aéreas, interessa estudar maneiras de rentabilizar o melhor possível as instalações. Esta situação faz com que a questão da minimização das distâncias percorridas pelos passageiros nos terminais passe para segundo plano e se torne mais importante estudar como é que se pode maximizar o número de aeronaves atribuídas a portas de embarque ou maior número de passageiros. Neste trabalho vai ser dada mais ênfase ao estudo maximização da atribuição de portas.

O problema da atribuição de portas, tal como o anterior vai usar programação inteira e vai considerar múltiplos intervalos de tempo. Na formulação deste problema temos que ter associado a cada avião o seu horário de chegada e partida, o tipo de aeronave e número de passageiros que a mesma pode transportar. Sobre o terminal, precisamos de saber o número de portas de embarque, o número de posições remotas e o número de lugares de estadia para as aeronaves e as características geométricas.

A função objetivo deste problema pode ser a maximização do número de aviões servidos por portas de embarque ou a maximização do número de passageiros servidos por portas, já que para qualquer dos casos as restrições serão iguais. Pretende-se que este modelo possa ser usado para fazer o planeamento das atribuições a longo prazo, mas essencialmente o objetivo é usá-lo em tempo real em situações de atrasos de voos ou imprevistos que exijam alterações no planeamento. Para que o modelo possa ser usado em tempo real é necessário que ele consiga dar resultados em tempo útil.

O modelo vai considerar dois tipos de restrições de adjacência, uma ligada à possível situação de o uso de uma porta bloquear o uso da adjacente e a situação de o uso de uma porta por uma aeronave de grande porte obrigar a que a porta ao lado tenha uma utilização restrita, ou não possa mesmo ser usada.

Outra situação que influencia bastante a utilização das portas vai ser o tempo que as aeronaves aí vão permanecer; quando se tem voos com estadias longas no aeroporto vale a pena considerar a retirada da aeronave da porta após o desembarque dos passageiros, colocá-la numa posição de estadia disponível e trazê-la de volta a uma porta para fazer o embarque dos passageiros

antes da partida. Nesta situação, o avião vai permanecer o tempo necessário na porta para proceder ao desembarque, esse tempo pode ser aproximadamente uma hora ou mais, será levado para uma posição de estadia e será trazido novamente para a porta, também pelo menos uma hora antes da sua partida, isto significa que só voos com estadias superiores a cerca de 4 horas é que valerá a pena considerar serem retirados da porta.

4. MODELOS

4.1. Minimização de distâncias

Para uma abordagem inicial da questão em estudo, vamos focar-nos, em primeiro, na questão da minimização das distâncias percorridas pelos passageiros dentro do aeroporto. Esta questão já foi abordada por Haghani & Chen (1998) e é nesta abordagem que se baseará o modelo proposto a seguir.

O modelo considera o número de portas de embarque, as distâncias que os passageiros em transferência, de chegada ou partida têm que percorrer no aeroporto e os períodos de tempo entre chegadas e as partidas. Para facilitar a definição do modelo, as distâncias entre portas de embarque e a entrada do aeroporto pode ser considerada como mais uma distância entre portas. Considera-se também que os voos chegam no início de um período de tempo e saem no final de outro.

A formulação do problema considera a seguinte notação:

Conjuntos: $F=\{1,\dots,F\}$ é o conjunto de voos; $G=\{1,\dots,G\}$ é o conjunto de portas; $T=\{1,\dots,T\}$ é o conjunto de períodos de tempo.

Parâmetros: P_{io} é o número de passageiros em transferência do voo de chegada i para o voo de partida o ; D_{jk} é a distância da porta j para a porta k ; TA_i é o tempo de chegada do voo i ; TD_o é o tempo de partida do voo o .

A função objetivo pode ser definida da seguinte forma:

$$\text{MIN Dist} = \text{MIN} \sum_{j,k \in G} \sum_{i,o \in F} P_{io} \cdot D_{j,k} \cdot X_{ijt} \cdot X_{okt} \quad (1)$$

A função (1) expressa a minimização da distância que os passageiros percorrem de uma porta para outra. O primeiro termo representa o número de passageiros que passa o voo i para o voo o , o segundo termo representa distância da porta j para a porta k . X_{ijt} é a variável de decisão binária, que assume os valores:

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{se o voo } i \text{ é atribuído à porta } j \text{ no período de tempo } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

E a X_{okt} é também uma variável binária que assume o valor:

$$X_{okt} = \begin{cases} 1 & \text{se o voo } o \text{ é atribuído à porta } k \text{ no período de tempo } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

O produto das duas variáveis anteriores pode ser substituído pela variável binária Y_{ijok} , transformando a função objetivo quadrática numa função linear, sendo assim a sua resolução mais fácil.

$$Y_{ijok} = X_{okt} \cdot X_{ijt} \quad \forall i, o \in F, t \in T, j, k \in G \quad (4)$$

A variável assume os seguintes valores:

$$Y_{ijok} = \begin{cases} 1 & \text{se o voo } i \text{ for atribuído à porta } j \text{ e o voo } o \text{ for atribuído à porta } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

A função objetivo agora escreve-se da seguinte forma.

$$\text{MIN Dist} = \text{MIN} \sum_{j,k \in G} \sum_{i,o \in F} P_{io} \cdot D_{jk} \cdot Y_{ijok} \quad (6)$$

Esta função fica sujeita às seguintes condições:

1. Cada voo deve ser atribuído a uma e única porta durante o período que permanece no aeroporto.

$$\sum_{j \in G} X_{ijt} = 1 \quad \forall i \in F, t \in T: TA_i \leq t \leq TD_i \quad (7)$$

2. Pode apenas estar um ou nenhum avião por porta no mesmo período de tempo.

$$\sum_{i \in F} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall j \in G, t \in T \quad (8)$$

3. Cada voo é atribuído a uma porta e mantém-se nessa porta durante o seu tempo no aeroporto.

$$X_{ijt} \leq X_{ij,t+1} \quad \forall i \in F, j \in G, t \in T: TA_i \leq t < TD_i \quad (9)$$

4. Um voo não pode ser atribuído antes do seu tempo de chegada ou depois do seu tempo de partida.

$$\sum_{j \in G} X_{ijt} = 0 \quad \forall i \in F, t \in T: t < TA_i \vee t > TD_i \quad (10)$$

5. A equação $Y_{ijok} = X_{ijt} \cdot X_{okt}$, por questões de programação, pode ser escrita como uma restrição linear.

$$2 \cdot Y_{ijok} \geq X_{ijTA_i} + X_{okTD_o} - 1 \quad \forall i, o \in F, k, j \in G, t \in T: TA_i < TD_o \quad (11)$$

O funcionamento do modelo anterior foi testado aplicando-o a um problema simples, mas com dados realistas, de modo a poder inferir sobre o seu comportamento.

O modelo vai ser resolvido num processador *quad-core* com 4GB de RAM, usando o *software* comercial Xpress-IVE, (Xpress-IVE versão 1.23.00 e Xpress *Optimizer* versão 23.01.05).

Considerou-se um terminal de embarque do tipo *finger pier* com cinco portas de embarque; cinco períodos de tempo e oito voos. Considera-se que cada voo chegará à respetiva porta no início de um dos períodos de tempo e sairá dessa porta no final de um período de tempo; a chegada e a partida de cada voo não ocorre necessariamente no mesmo período de tempo. Um período de tempo terá uma duração fixa e pouco extensa, funcionando como uma unidade mínima de tempo que cada avião poderá estar na porta de embarque. Um intervalo de tempo razoável a considerar será de quinze minutos.

A configuração considerada para o terminal leva à matriz de distâncias entre portas, em metros, apresentada no quadro seguinte.

Quadro 4.1 - Distância em metros entre portas do terminal.

Portas	1	2	3	4	5
1	0	50	75	65	40
2	50	0	25	40	65
3	75	25	0	25	65
4	65	40	25	0	50
5	40	65	65	50	0

O Quadro 4.2 contém o número de passageiros em transferência que vão passar de um avião para outro, por exemplo do avião 1 vão 7 passageiros para o avião 2, do avião 2 vão 3 passageiros para o 1. Os valores indicados, para os pares de voos onde pode haver transferência de passageiros são números gerados aleatoriamente entre zero e vinte. O terminal apresentado seria para servir aeronaves de pequeno porte (*narrow-body*), que tem têm capacidade para sensivelmente 200 passageiros, daí usar-se uma gama pequena de valores, para garantir que um avião não recebe mais passageiros que eles que pode transportar.

Quadro 4.2 - Número de passageiros em transferência.

Avião	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	7	20	8	5	10	18	13
2	3	0	14	13	17	14	8	18
3	0	18	0	15	6	1	13	6
4	0	10	13	0	9	9	3	17
5	0	11	3	11	0	0	9	4
6	0	0	0	2	2	0	16	4
7	0	0	0	0	0	19	0	6
8	0	0	0	0	0	0	15	0

O quadro seguinte indica, para cada voo, qual é o período de tempo de chegada, TA, e o período de partida, TD, dos cinco voos que se consideraram. Por exemplo o voo 1 chega no início do período de tempo 1 e parte no final do período de tempo 2. A mesma informação encontra-se esquematizada na Figura 4.1 - Esquematização dos períodos de tempo que o avião passa nas portas.

Quadro 4.3 - Períodos de chegada e partida das aeronaves.

Avião	1	2	3	4	5	6	7	8
TA	1	1	2	2	2	3	4	4
TD	2	3	3	4	4	5	5	5

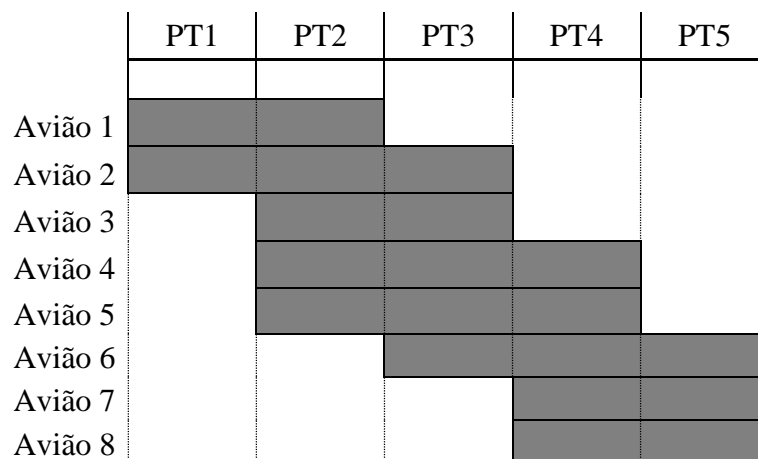


Figura 4.1 - Esquematização dos períodos de tempo que o avião passa nas portas.

Pretende-se chegar à atribuição de voos a portas que minimize a distância total percorrida pelos passageiros em transferência. Para os dados concretos deste problema, a função objetivo assume o valor 14935, ou seja o somatório das distâncias percorridas por todos os passageiros em transferência perfaz um total de 14935 metros; para um total de passageiros 390 dá uma média de 38,3 metros por passageiro. Estes resultados foram obtidos em 1,9 segundos. A atribuição de voos a portas que levou a este resultado aparece descrita Quadro 4.4 e na Figura 4.2, em que temos a atribuição feita para cada período de tempo.

Quadro 4.4 - Distribuição dos aviões pelas portas, durante os vários períodos de tempo.

Portas	Períodos de tempo				
	1	2	3	4	5
1	-	5	5	5	-
2	2	2	2	8	8
3	-	3	3	7	7
4	1	1	6	6	6
5	-	4	4	4	-

Se olharmos para a atribuição de portas podemos verificar que os aviões que trocam um maior número de passageiros, como é o caso do avião 1 para o 3 e do 7 para o 6, vemos que ambos foram colocados em portas adjacentes que distam o mínimo das distâncias entre si.

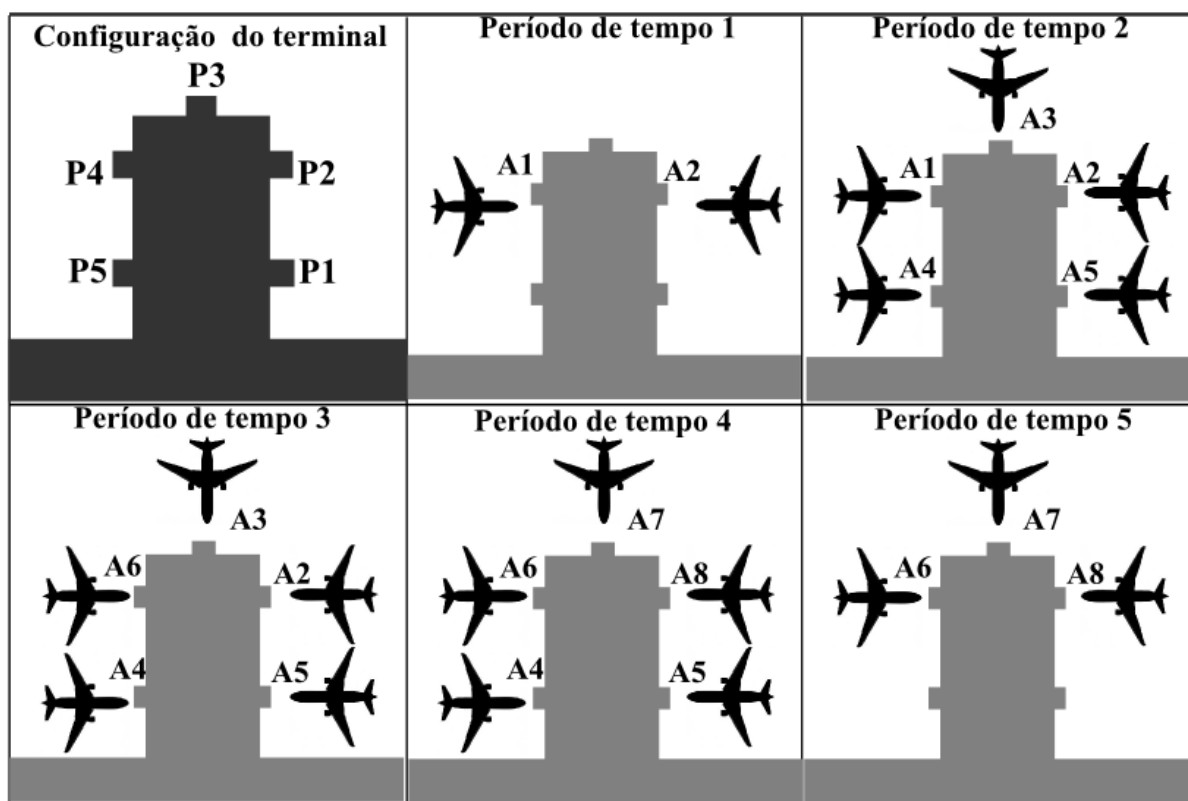


Figura 4.2 - Esquematização da atribuição dos aviões às portas.

O exemplo anterior serviu para exemplificar o funcionamento do modelo, no entanto a sua dimensão é muito reduzida, quando comparada com situações reais, por isso é importante, também, perceber qual a reação do modelo quando aplicado a problemas mais complexos.

Usando, para dados do problema, números aleatórios gerados pelo programa Xpress, considerando 24 períodos de tempo, 10 voos e um terminal com 10 portas, o modelo demora 810,6 segundos (cerca de 13 minutos) a apresentar resultados. Anteriormente considerámos que cada período de tempo correspondia a 15 minutos, ou seja este problema corresponde apenas a um período de 6 horas, e o seu tempo de resolução é já bastante elevado, tornando o modelo pouco prático.

4.2. Maximização da atribuição a portas

O modelo anterior é interessante do ponto de vista do melhoramento do serviço prestado aos passageiros, no entanto a atribuição de portas pode ser baseada em outro tipo de objetivos, nomeadamente mais ligados à operacionalidade e à maximização de receitas.

Por exemplo, para um aeroporto que tenha períodos em que está a operar no limite das suas capacidades ou mesmo acima delas, interessa tentar que a atribuição de voos as portas seja feita de modo a usar da melhor forma as portas disponíveis, para tentar minimizar os voos que não são atribuídos.

Do ponto de vista da modelação, estamos a olhar para um modelo que tem como objetivo uma maximização da atribuição de voos a portas ou uma minimização dos voos não atribuídos, ou podemos ainda considerar a maximização dos passageiros que são servidos por portas. Para este modelo, a preocupação com as distâncias percorridas pelos passageiros deixa de ser levada em consideração e consideram-se apenas os voos, o número de passageiros de passageiros que eles sevem, as portas existentes e os períodos de chegada e partida dos voos.

Ou seja, formulação do problema considera a seguinte notação:

Conjuntos: $F=\{1,\dots,F\}$ é o conjunto dos voos, $G=\{1,\dots,G\}$ é o conjunto das portas e $T=\{1,\dots,T\}$ o conjunto dos períodos de tempo.

Parâmetros: P_i é o número de passageiros servidos pelo voo i ; TA_i é o tempo de chegada do voo i ; TD_i é o tempo o tempo de partida do voo i .

A função objetivo deste modelo, maximização dos voos servidos por portas, pode ser descrita da seguinte forma:

$$MAX\ Atrb = MAX \sum_{i \in F} Y_i \quad (12)$$

Se em vez de maximizarmos apenas o número de voos não atribuídos, maximizarmos o número de passageiros que é servido por porta, obtemos a seguinte função objetivo:

$$MAX\ Atrb = MAX \sum_{i \in F} Y_i \times P_i \quad (13)$$

A variável binária Y_i assume os seguintes valores, em ambas as situações.

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{se o voo } i \text{ for atribuído} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (14)$$

Tal como no modelo anterior, temos a variável binária X_{ijt} que assume os seguintes valores:

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{se o voo } i \text{ é atribuído à porta } j \text{ no período de tempo } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (15)$$

O modelo está sujeito às restrições seguintes.

1. Cada voo pode no máximo ser atribuído a uma porta entre a sua chegada e partida.

$$\sum_{j \in G} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall i \in F, t \in T: TA_i \leq t \leq TD_i \quad (16)$$

2. Pode apenas estar um ou nenhum avião por porta no mesmo período de tempo.

$$\sum_{i \in F} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall j \in G, t \in T \quad (17)$$

3. Cada voo que é atribuído a uma porta, vai manter-se nessa porta durante o seu tempo no aeroporto.

$$X_{ijt} = X_{ijt+1} \quad \forall i \in F, j \in G, t \in T: TA_i \leq t < TD_i \quad (18)$$

4. Um voo não pode ser atribuído antes do seu tempo de chegada ou depois do seu tempo de partida.

$$\sum_{j \in G} X_{ijt} = 0 \quad \forall i \in F, t \in T: T < TA_i \vee t > TD_i \quad (19)$$

5. A seguinte restrição garante que se um voo não for atribuído ambas as variáveis assumem o valor zero e quando algum voo é atribuído este pode manter-se na porta durante o seu tempo no aeroporto.

$$\sum_{j \in G} \sum_{t \in T} X_{ijt} \geq Y_i \quad \forall i \in F \quad (20)$$

O modelo está pensado para lidar com situações de congestionamento, mas não só, o modelo é perfeitamente capaz de fazer atribuições para situações de pouco tráfego. Como forma de demonstrar a utilização do modelo, vamos começar por aplicá-lo ao mesmo exemplo que foi aplicado para o modelo de minimização de distâncias e comparar os resultados obtidos.

Vamos considerar o mesmo terminal de cinco portas, 8 aviões com chegadas e partidas distribuídas por 5 períodos de tempo, como descrito no Quadro 4.3. Se quisermos maximizar o número de passageiros, vamos precisar do número de passageiros servidos por cada aeronave; uma boa aproximação, caso não haja informação exata, é utilizar o número de lugares por aeronave. Para este exemplo vamos usar o número de lugares de algumas aeronaves *narrow-body*.

Quadro 4.5 - Número de lugares de cada avião.

Avião	1	2	3	4	5	6	7	8
Lugares	177	185	106	110	126	106	185	150

A função objetivo do modelo assume o valor 8 quando consideramos como função objetivo maximizar o número de voos atribuídos, e assume o valor 1145 quando maximizamos o número de passageiros servidos por portas, que corresponde ao número total de lugares das aeronaves. Estes valores, como seria de esperar, significam que todos os aviões foram atribuídos a uma porta, e por isso a atribuição feita é igual para ambas as funções objetivo. Sendo que a única diferença está no tempo de processamento do problema, que para o caso de maximização dos voos, demora menos de 0,1 segundos a apresentar os resultados e no caso de maximização dos passageiros servidos por portas demora 0,3 segundos.

Quadro 4.6 - Distribuição dos aviões pelas portas e pelos vários períodos de tempo.

Porta	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5
1	2	2	2	8	8
2	1	1	6	6	6
3	-	3	3	7	7
4	-	4	4	4	-
5	-	5	5	5	-

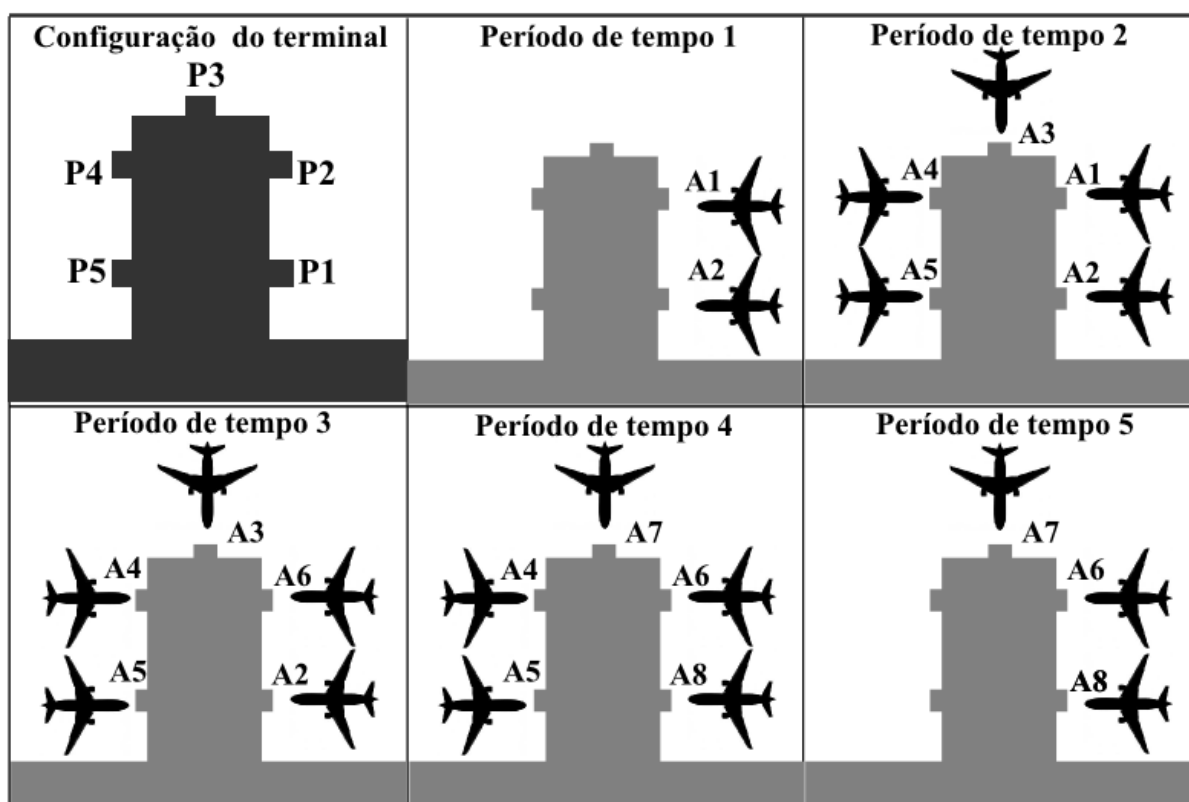


Figura 4.3 - Esquemática da atribuição dos aviões às portas.

O modelo para este caso apresenta uma solução possível de distribuição das aeronaves pelas portas e comparando com a solução anterior vemos que estas diferem, no entanto, devido às restrições do tempo de utilização das portas, ambos os modelos acabam agrupar os voos pelas portas da mesma forma, ou seja os aviões 2 e 8 e os aviões 1 e 6 partilham a mesma porta em ambas as soluções.

Neste modelo não estamos preocupados com as distâncias que os passageiros percorrem no terminal, portanto esta solução não é otimizada a esse nível, mas podemos usá-la para comparar com a do modelo anterior para termos uma ideia da diferença entre a solução otimizada e a não

otimizada. Se fizermos com que o modelo anterior dê esta solução, impondo nas restrições X_{ijt} igual a um para os valores de i, j e t que queremos, obtemos um total da distância percorrida de 29320 metros, que dá uma média de 75,2 metros por passageiro, que quase duplica a obtida na solução anterior. Este resultado mostra-nos que o modelo de minimização das distâncias pode ter um impacto significativo na solução; para o modelo de atribuição, no entanto vai interessar o seu funcionamento para problemas mais complexos e com situações de congestionamento.

De forma a termos uma perceção do nível de complexidade que podemos atingir num aeroporto vamos olhar para os números dos três aeroportos mais movimentados de 2012, segundo o *site* World Airport Codes. Em primeiro lugar temos o aeroporto Internacional de Atlanta, Hartfield Jackson, nos Estados Unidos, que recebeu mais de 90 milhões de passageiros e mais de 930 mil movimentos de aeronaves. A seguir temos o Aeroporto Internacional de Pequim, na China, com um total de 81 milhões de passageiros recebidos e mais de 550 mil movimentos de aeronaves. E em terceiro lugar o Aeroporto Internacional de Heathrow em Londres, Inglaterra, que recebeu 70 milhões de passageiros e teve e mais de 470 mil movimentos de aeronaves. O aeroporto Hartfield Jackson, segundo o seu *site* oficial, teve um total de 73899 movimentos de aeronaves em dezembro de 2012, que corresponde a uma média de cerca de 2300 por dia, que se vão distribuir pelos sete terminais do aeroporto e por cerca de 200 portas de embarque. Estes são números extremos, no entanto mostram-nos a importância de ter um modelo que responda rapidamente, mesmo quando o grau de complexidade é elevado

O desempenho do modelo para problemas de maior dimensão foi testado aplicando o modelo diferentes problemas, com dimensões variadas.

Consideram-se três terminais diferentes, um de dez portas, outro com vinte e um terceiro com trinta; para cada um destes terminais consideramos dois intervalos de análise, um de 24 períodos de tempo e outro com 48, que correspondem, respetivamente a 6 e 12 horas, ou seja temos 6 cenários diferentes. Para cada um destes cenários, fez-se correr o modelo para diferentes números de voos, entre 50 a 300 voos, aumentando em intervalos de 50 voos. Os dados usados para os períodos de chegada e partida de cada voo, assim como o número de passageiros por aeronave, são dados gerados aleatoriamente, sendo que os períodos de chegada e partida variam dentro do intervalo considerado e o número de passageiros vai assumir um valor entre 100 e 300. Como o processamento da solução pode variar conforme os dados do problema, usaram-se três conjuntos diferentes de dados aleatórios para cada caso considerado, podendo-se assim fazer uma média dos resultados, em vez de se usar um resultado particular.

Numa primeira instância considerou-se como função objetivo a maximização dos voos atribuídos a portas e observou-se para cada situação o valor da função objetivo e o tempo que o modelo demorou o obter a resposta.

Nos gráficos das Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.7 e Figura 4.8, o cenário 1 representa a situação em que temos 10 portas de embarque e consideramos um intervalo de tempo de 24 períodos de tempo; o cenário 2 continuamos com 10 portas e consideramos 48 períodos de tempo; os cenários 3 e 4 corresponde a termos 20 portas de embarque e 24 e 48 períodos de tempo, respetivamente; os cenários 5 e 6 correspondem a termos 30 portas de embarque e 24 e 48 períodos de tempo respetivamente.

O gráfico seguinte, representado na Figura 4.4 representa a média dos tempos de resposta para cada um dos casos em função do número de voos processados. Podemos ver que o tempo de processamento da resposta, de facto, aumenta com a dimensão do problema, tanto quando aumentamos o número de voos processados, como quando se aumenta o número de portas ou o intervalo de tempo. No gráfico vemos que quando temos apenas 50 voos o tempo de resposta, para os vários cenários é muito próximo, e em todos eles, inferior a um segundo, no entanto à medida que vamos aumentando o número de voos processados o tempo de resposta de cada cenário vai-se afastando. Com a exceção do cenário 6, em que o tempo de resposta em função do número de voos aumenta exponencialmente, para todos os outros cenários, o tempo de resposta é sempre inferior a 6 segundos.

No gráfico da Figura 4.5 está representada a percentagem de voos que está a ser servida em cada cenário. A capacidade de cada terminal mantém-se constante, logo quando essa capacidade é ultrapassada vamos deixar de servir todos os voos, e quanto maior for o aumento de voos menor é percentagem servida.

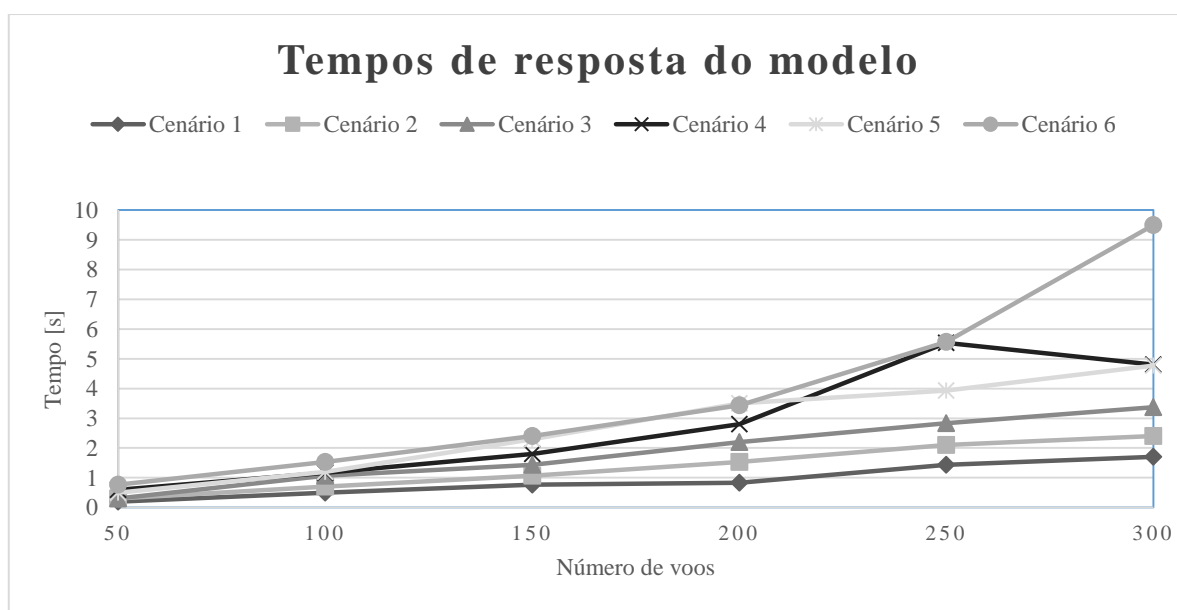


Figura 4.4 - Tempos de resposta do modelo para maximização de atribuição de voos.

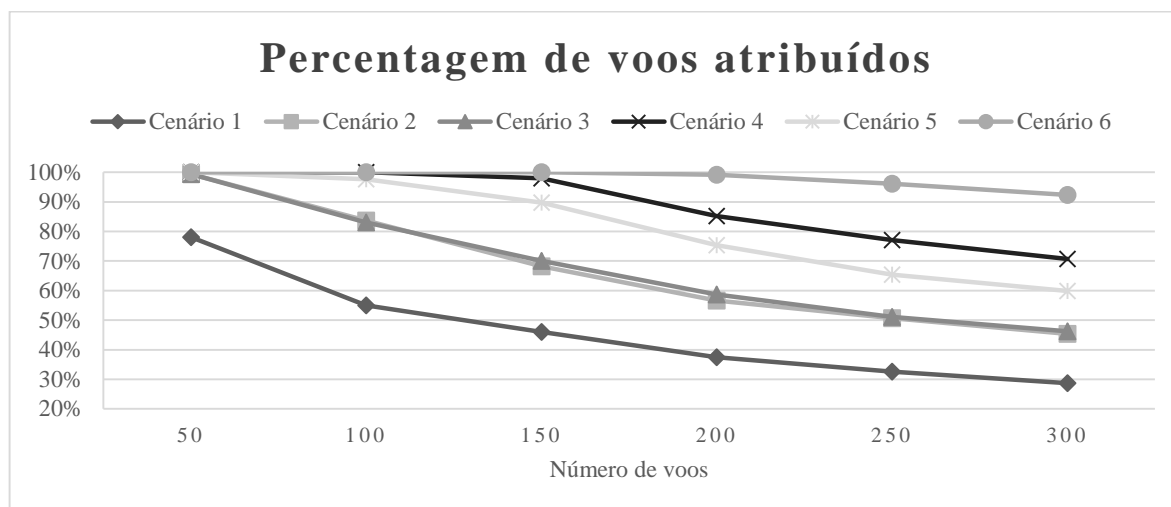


Figura 4.5 - Percentagem de voos atribuídos.

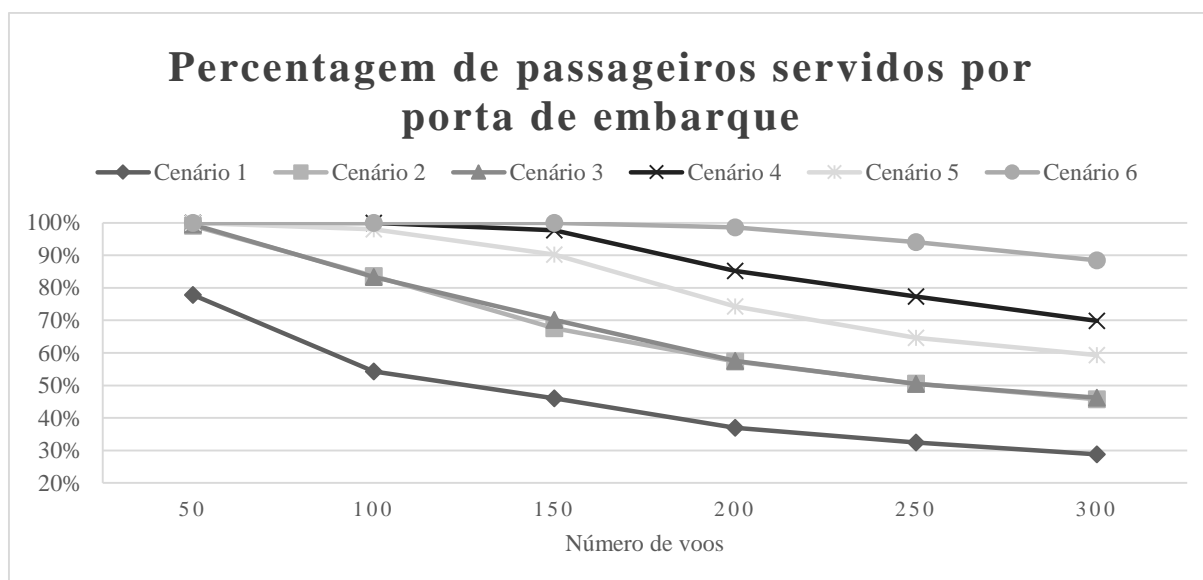


Figura 4.6 - Percentagem de passageiros servidos por porta de embarque.

Quando comparamos a percentagem de voos atribuídos a portas e a percentagem de passageiros servidos por portas, Figura 4.5 e Figura 4.6, respetivamente, vemos que ambas têm valores muito semelhantes, ou seja, neste caso, a eficácia de atribuição do modelo é idêntica quando se consideram a atribuição de passageiros ou dos aviões.

Numa segunda fase repetimos o processo anterior, mas desta vez considerando como função objetivo a maximização do número de passageiros servidos por portas de embarque, e da mesma forma analisamos o tempo de resposta do modelo, e, neste caso, a percentagem do total de passageiros que está a ser servida para cada cenário.

Os tempos de resposta, neste caso, tal como no anterior, têm tendência a aumentar com o aumento da complexidade do problema, no entanto para este caso o aumento é menos constante que no caso anterior. Vemos, para 300 voos, os tempos dos cenários 1 e 2 é inferior em relação ao anterior e para o cenário 6 o tempo duplica em relação ao obtido quando se maximiza o número de voos atribuídos, no entanto mesmo assim não chega a 20 segundos, que é ainda um valor aceitável, tendo em conta a dimensão do problema.

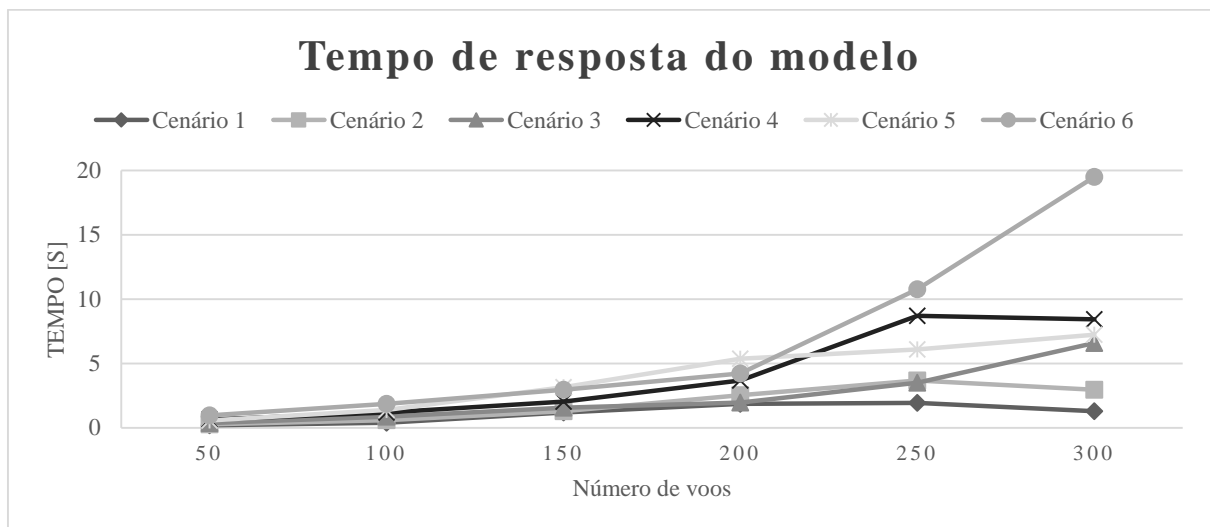


Figura 4.7 - Tempo de resposta do modelo para maximização de atribuição de passageiros.

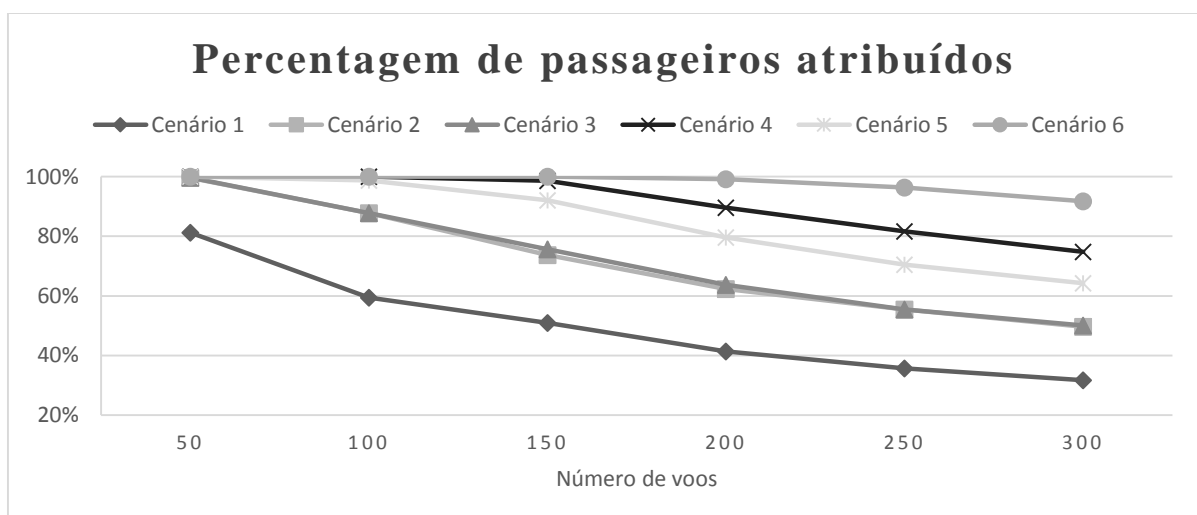


Figura 4.8 - Percentagem de passageiros servidos por porta para a função objetivo de maximização de passageiros.

Neste caso pretendemos aumentar o número de passageiros servidos por portas, e de facto, podemos ver, Figura 4.8, que existe um ligeiro aumento em relação ao obtido para a função objetivo de atribuição de voos; o aumento é em média de 3%, e para alguns casos chega aos 6%.

Os resultados obtidos mostram-nos que vale apenas explorar este modelo já que ele consegue funcionar mesmo para problemas de grandes dimensões. O passo seguinte é adaptar o modelo para que ele esteja preparado para algumas das situações que já foram referidas, nomeadamente relacionadas com a geometria dos terminais e as características dos voos e das aeronaves.

Em relação à geometria do terminal, temos duas situações a considerar, a situação em que o tipo de aeronave presente numa porta restringe o uso da adjacente e situação, menos comum, de uma porta ser bloqueada pela adjacente. Temos ainda a situação de termos voos de longa estadia, em que poderá ser vantajoso retirar o avião da porta e trazê-lo posteriormente.

Estas considerações vão levar a algumas alterações ao modelo considerado no início desta seção.

Conjuntos: $F=\{1,\dots,F\}$ é o conjunto dos voos, $G=\{1,\dots,G\}$ é o conjunto das portas, $T=\{1,\dots,T\}$ o conjunto dos períodos de tempo e $GB=\{1,\dots,GB\}$ é o conjunto das portas bloqueadas pelas adjacentes.

Parâmetros: P_i é o número de passageiros servidos pelo voo i ; TA_i é o tempo de chegada do voo i ; TD_i é o tempo o tempo de partida do voo i ; AT_i é o tipo de aeronave do voo i ; AT_j é o tipo se aeronave máximo que uma porta pode suportar sem causar problemas de adjacência; B_i é o tempo mínimo que o avião i precisa para se fazer o embarque dos passageiros; DB_i é o tempo mínimo necessário para fazer o desembarque dos passageiros do avião i .

A função objetivo é expressa da seguinte forma

$$MAX\ Atrib = MAX \sum_{i \in F} P_i (YA_i + YD_i) \quad (21)$$

A variável de decisão Y_i usada anteriormente será desdobrada em duas, YA_i e YD_i , para distinguir a chegada e a partida. A função objetivo passa a ser a maximização dos passageiros servidos tanto à chegada como à partida.

$$YA_i = \begin{cases} 1 & \text{se o voo } i \text{ for atribuído a uma porta à chegada} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (22)$$

$$YD_i = \begin{cases} 1 & \text{se o voo } i \text{ for atribuído a uma porta à partida} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (23)$$

O modelo está sujeito às restrições seguintes.

1. Cada voo pode no máximo estar atribuído a uma porta.

$$\sum_{j \in G} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall i \in F, t \in T: TA_i \leq t \leq TD_i \quad (24)$$

2. Pode apenas estar um ou nenhum avião por porta no mesmo período de tempo.

$$\sum_{i \in F} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall j \in G, t \in T \quad (25)$$

3. Cada voo que é atribuído a uma porta, pode ou não manter-se nessa porta durante a sua estadia no aeroporto (esta restrição vai permitir a retirada do avião se essa situação for mais vantajosa).

$$X_{ijt} + 1 \geq X_{ijt+1} \quad \forall i \in F, j \in G, t \in T: TA_i \leq t \leq TD_i \quad (26)$$

4. Só os voos de longa duração podem ser retirados da porta – durações superiores a 4 horas (16 períodos de tempo).

$$X_{ijt} = X_{ijt+1} \quad \forall i \in F, j \in G, t \in T: TA_i \leq t \leq TD_i \wedge (TD_i - TA_i) \leq 16 \quad (27)$$

5. Um voo não pode ser atribuído antes do seu tempo de chegada ou depois do seu tempo de partida.

$$\sum_{j \in G} X_{ijt} = 0 \quad \forall i \in F; t \in T: t < TA_i \vee t > TD_i \quad (28)$$

6. As seguintes restrições garantem que as variáveis de decisão vão assumir o valor zero quando não há atribuição e um quando há; a restrição (29) para a chegada e a restrição (30) para a partida.

$$\sum_{j \in G} X_{ijTA_i} \geq YA_i \quad \forall i \in F \quad (29)$$

$$\sum_{j \in G} X_{ijTD_i} \geq YD_i \quad \forall i \in F \quad (30)$$

7. As restrições seguintes garantem que o avião fica a porta o tempo suficiente para se proceder ao embarque e desembarque dos passageiros.

$$X_{ijt} = X_{ijt+1} \quad \forall i \in F; j \in G \quad t \in T: TA_i \leq t < (TA_i + DB_i - 1) \quad (31)$$

$$X_{ijt} = X_{ijt+1} \quad \forall i \in F; j \in G \quad t \in T: (TD_i - B_i) < t < TD_i \quad (32)$$

8. A seguinte restrição assegura a compatibilidade entre os tipos de avião em portas adjacentes. Quando um tipo de avião presente numa porta interfere com a adjacente, só uma das portas pode estar ocupada.

$$\begin{aligned} X_{ijt} + X_{oj+1t} &\leq 1 \quad \forall i, o \in F, j, k \in G, t \in T; i \neq o; \\ &j < G \wedge (TA_i \leq TA_o \leq TD_i) \vee \\ &(TA_o \leq TA_i \leq TD_o) \wedge AT_i > AT_j \vee AT_o > AT_k \end{aligned} \quad (33)$$

9. A situação em que o acesso a uma porta é bloqueado pelo uso da adjacente pode ser modelado pelas duas restrições seguintes, que garantem que o voo atribuído à porta bloqueada é o primeiro a chegar e o último a sair.

$$X_{ijt} + X_{oj+1t} \leq 1 \quad \forall i, o \in F; j \in GB, t \in T: TA_i \leq TA_o \leq TD_i \quad (34)$$

$$X_{ijt} + X_{oj+1t} \quad \forall i, o \in F, j \in GB, \in T: TA_i \leq TD_o \leq TD_i \quad (35)$$

As alterações que se fizeram ao modelo vão ter efeito no tempo de processamento dos resultados e por isso interessa novamente testar a aplicabilidade do mesmo a problemas de diferentes dimensões. O modelo foi testado, novamente usando o *software* comercial Xpress-IVE, (Xpress-IVE versão 1.23.02 e Xpress *Optimizer* versão 23.01.05) e usando um processador *quad-core* com 12GB de RAM.

Os tempos de resposta do modelo foram testados tal como se fez anteriormente, usando dados aleatórios associados aos mesmos 6 cenários que se definiram antes e a cada um deles, foi de igual modo, considerado diferentes números de voos de chegada e o número de passageiros vai também variar entre 100 e 300 por aeronave; no entanto desta vez só se está a considerar como função objetivo a maximização dos passageiros servidos. Apesar de os cenários de teste serem iguais, não se poderá comparar os resultados diretamente, já que foram usados computadores com capacidades de processamento diferentes.

No gráfico da figura seguinte, estão representados os tempos de resposta do modelo para os diferentes cenários e para diferentes números de voos. Observa-se que houve um aumento significativo no tempo de processamento do problema em relação ao observado na Figura 4.7, mesmo tendo sido usado um processador com mais capacidade.

Para uma chegada total de 100 ou menos voos observam-se tempos de processamento inferiores a 2 minutos, para todos os cenários. A partir dos cem voos o tempo de resposta do modelo aumenta significativamente. Para os cenários 1 e 2 esse aumento assume ainda valores inferiores a 4 minutos. Para os restantes cenários o aumento é bastante significativo e é por esse facto que não se chegou aos valores finais dos tempos de processamento, já que excediam os quinze minutos e tornavam o cálculo dos mesmos pouco prático.

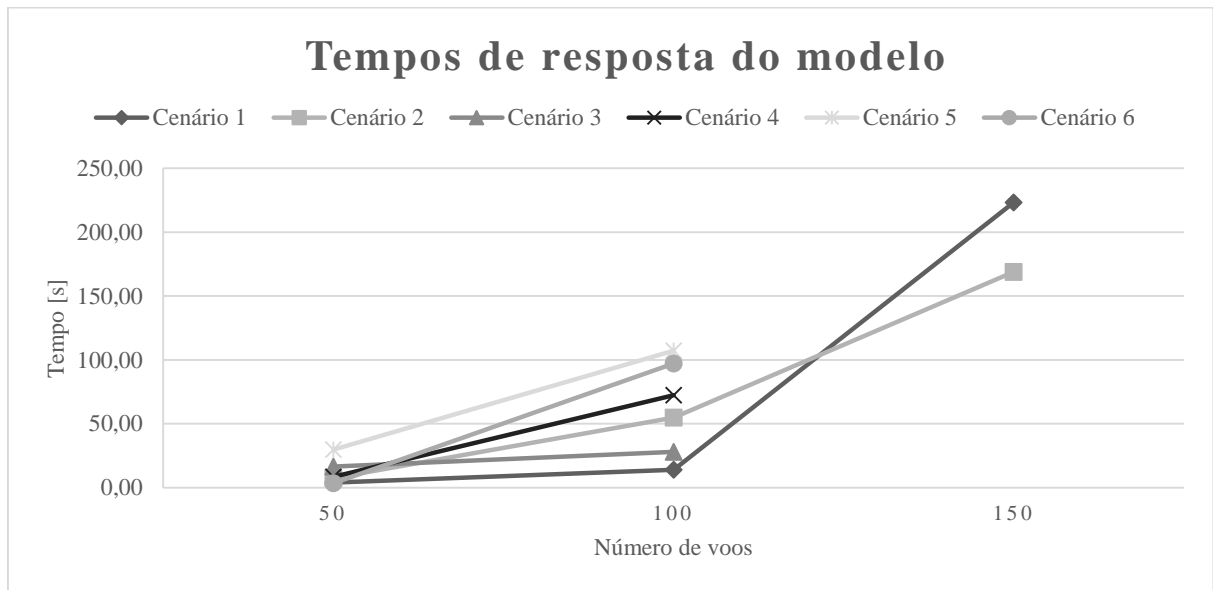


Figura 4.9 - Tempos de resposta do modelo para a maximização dos passageiros servidos por portas de embarque.

5. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso desta dissertação vai ser o Aeroporto Governador André Franco Montoro, conhecido, também como Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo, Brasil. Este iniciou as suas operações em 1985 é hoje em dia um dos principais *hubs* da América Latina - em 2012 o aeroporto recebeu 32 milhões de passageiros nos seus três terminais.

Em 2012 a gestão do aeroporto deixou de ser feita pelo Governo Federal e passou para um consórcio privado que assinou contrato por 20 anos. No seguimento desta mudança, iniciaram-se as operações de ampliação e melhoramento do aeroporto, com vista a dar resposta ao aumento de passageiros previsto para os eventos que se avizinham no Brasil, a Copa do Mundo de futebol de 2014 e os Jogos Olímpicos de 2016. Para além de melhoramentos em dois terminais, está prevista a construção de mais um terminal, com 20 mangas de embarque, que terá capacidade para receber 12 milhões de passageiros por ano. Após a conclusão das obras, o aeroporto ficará com capacidade para receber 45 milhões de passageiros por ano.

O estudo vai incidir sobre o terminal 3 do aeroporto, que é do tipo *finger pier* e tem um total de 20 posições nas portas de embarque, 20 posições remotas e 26 lugares de estadia para aviões do tipo *narrow-body*; cada duas destas posições podem acomodar um avião do tipo *wide-body* (avião de grande porte).

Neste terminal operam um total de 26 companhias aéreas, e recebe cerca de 570 aviões por semana, que dá uma média de cerca de 82 por dia e cerca de metade desse número são voos com estadia superior a 4 horas. Ao longo da semana estão planeados 115 horários de voos, sendo que 61 desses horários fazem-se diariamente.

O número de voos recebidos não difere muito de dia para dia, no entanto o dia mais movimentado é o sábado, que recebe 85 voos; o modelo será aplicado a este dia. A grande concentração de chegadas inicia-se por volta das 5 da manhã e prolonga-se até cerca das 10 horas da manhã; depois segue-se um período em que praticamente não há voos a chegar e a cerca das 16 horas e trinta volta a haver uma concentração das chegadas.

Os tempos de chegada e partida dos voos vão ser agrupados por períodos de tempo de 15 minutos. As chegadas serão agrupadas num período de tempo cujo início seja anterior ou igual ao da chegada do voo, enquanto as partidas serão agrupadas a um período de tempo que termine quando o voo parte ou depois; esta distribuição garante que os períodos de tempo vão abranger por completo a estadia do avião no aeroporto e na maioria dos casos criar uma folga entre partidas e chegadas.

O modelo será aplicado do início ao fim do dia de sábado, o que corresponde a 96 períodos de tempo. Como a chegada e partida de voos nem sempre acontece no mesmo dia, vamos ter voos no aeroporto cuja chegada aconteceu no dia anterior e voos cuja partida acontecerá no dia seguinte. Para respeitar a janela de tempo de 24 horas vai considerar-se que os voos que chegaram no dia anterior estão a chegar no período de tempo inicial e o período de tempo de partida é mantido; para os voos que só vão partir no domingo, considera-se que o tempo de partida é o período 96.

Os voos de longa duração podem ser retirados das portas após o desembarque e se possível serem trazidos de volta para se proceder ao embarque dos passageiros; esta situação implica que os voos tenham um tempo mínimo em que têm que se manter na porta, tanto após a chegada, como antes da partida. Estes tempos mínimos são definidos conforme o tipo de aeronave; para os tipos de aeronaves que temos neste estudo, os tempos são os definidos no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Tempos mínimos de embarque e desembarque.

Código da Aeronave	Tempo Chegada	Tempo Partida
C/D	45 minutos	60 minutos
E	60 minutos	90 minutos
F	90 minutos	90 minutos

O modelo lida com intervalos de tempo de quinze minutos; os tempos mínimos na porta serão também convertidos para 3, 4 e 6 períodos de tempo correspondentes aos 45, 60 e 90 minutos.

Todos os dados necessários para o modelo encontram-se no Quadro A - 1 do Anexo A; para cada um dos voos temos o código correspondente da companhia aérea, o período de tempo de chegada, o período de tempo de partida, a letra correspondente ao código da aeronave; o número de passageiros e finalmente os períodos de tempo mínimos que a aeronave tem que estar na porta.

Os voos que tem os seus períodos de chegada ou partida alterados devido a estes acontecerem no dia anterior ou no seguinte são os voos de 1 a 7, cujo período de chegada real é no dia anterior e os voos número 65, 80, 82, 84, 90, 91 e 92, cuja partida só vai acontecer no dia seguinte. Para além destas adaptações, foi ainda necessário fazer ajustes aos tempos mínimos dos voos nas portas para os voos número 9, 12, 13, 15 e 55 por serem voos que vão estar muito pouco tempo no aeroporto (tempo inferior ao considerado necessário para se proceder ao embarque), e para que fosse possível fazer a atribuição dos mesmos às portas teve que se reduzir em um período de tempo o tempo mínimo de embarque. O voo 92, como chega

no período 95 e se admite que ele só fica até ao 96, também foi necessário alterar o tempo mínimo de desembarque, para que ele pudesse ser atribuído.

A aplicação do modelo desenvolvido requer pequenos ajustes nas restrições consideradas anteriormente, que se devem apenas à geometria particular do terminal em estudo; em primeiro lugar não existe no terminal nenhuma porta que bloqueie a adjacente, logo as restrições (34) e (35) não se aplicam a este caso. Tratando-se de um terminal do tipo *finger pier*, esquematizado na figura seguinte, em que existem 10 posições de aeronaves de cada um dos lados, a restrição (33) de compatibilidade de tipos de aeronaves tem de ser aplicada independentemente às 10 posições existentes de um lado e do outro.

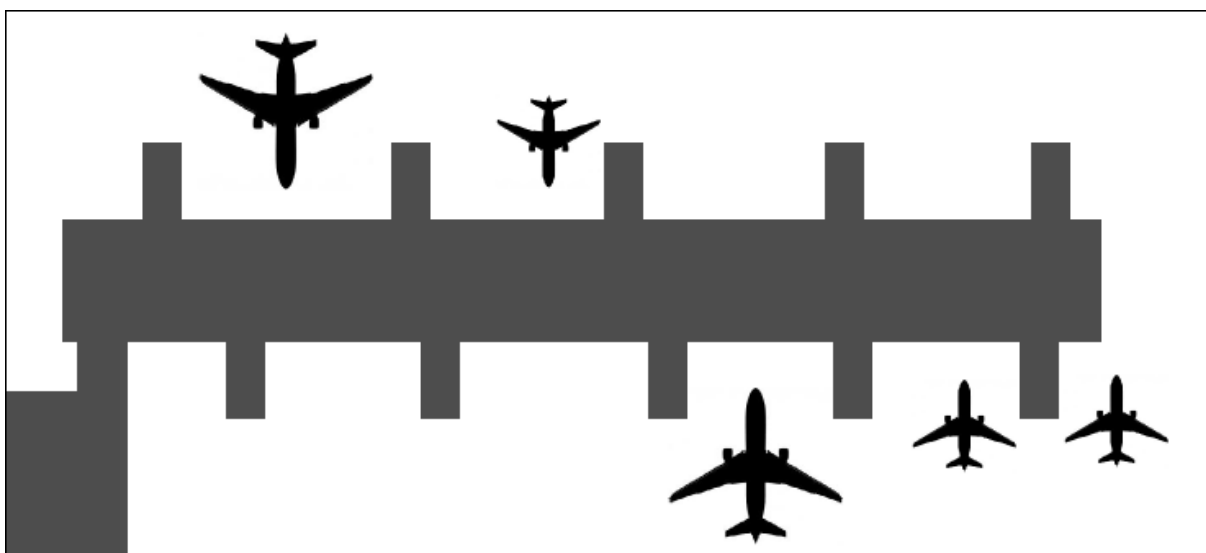


Figura 5.1 - Esquema do terminal 3 do aeroporto de Guarulhos.

Após estes ajustes pode obter-se a solução do problema: a função objetivo soma um total de 35973 passageiros servidos por porta de embarque. Estes resultados obtiveram-se em 30,3 segundos usando novamente o *software* Xpress e um processador *quad-core* com 12GB de RAM.

A atribuição resultante encontra-se no Quadro A - 2 do Anexo A, em que temos os voos distribuídos pelas portas de embarque ao longo do tempo, e em que se faz a distinção entre os voos que vão permanecer sempre na porta, os que são atribuídos apenas para embarque e desembarque, os que são atribuídos só para o desembarque (atribuídos à chegada) e os que são atribuídos apenas para o embarque (atribuídos só antes da partida). Ao longo do dia, 46 dos 52 voos de curta duração são atribuídos às portas e são os únicos que permanecem na porta da chegada à partida, estes valores correspondem a 50% do total de voos e a 88% do total de voos de curta duração; há um total de 11 voos que não são atribuídos a portas de contacto, o que

corresponde a 12% do total dos voos. Entre os voos de longa duração, temos 23 que são atribuídos à chegada e novamente antes da partida; 9 que só são atribuídos à chegada e 3 que só são atribuídos antes da partida.

Os dados já nos tinham permitido observar que as chegadas e partidas dos voos não se distribuem da mesma forma ao longo do dia; existe um pico de atividade que se inicia de madrugada e outro durante a tarde. Olhando para a atribuição feita, vê-se esta situação claramente: da meia-noite até às cinco da manhã temos um período em que a percentagem de ocupação das portas oscila de entre zero e cerca de 50%. Das cinco da manhã até às sete e quarenta e cinco temos uma taxa de ocupação elevada, em que se chega a ter todas as posições ocupadas; há um pequeno abrandamento entre as sete e quarenta e cinco e as oito e quarenta e cinco seguindo-se de nova intensidade de ocupação que se prolonga por cerca de uma hora. Após a qual há um abrandamento do uso das portas, chegando a ser praticamente nulo entre as onze e trinta e as treze e trinta. Das treze e trinta até ao final do dia temos uma taxa de ocupação sempre elevada.

É precisamente durante estes períodos de maior intensidade, em que a capacidade do terminal está a ser usada ao máximo ou bastante perto do máximo que chegam e partem os onze voos que não estão a ser atribuídos. Desses onze voos, dez deles são efetuados por aeronaves de grande porte o que os torna ainda mais difíceis de atribuir já que vão necessitar de duas posições de embarque.

O modelo foi desenvolvido pensando apenas na maximização da atribuição de passageiros a portas de embarque de contacto e portanto só temos resultados para essa atribuição. No entanto o número de lugares de estadia para as aeronaves assim como o número de portas remotas está limitado no terminal a 26 e 20 posições, respetivamente, e tal como as portas, cada par de posições pode servir 2 aeronaves de pequeno porte ou apenas uma de grande porte. Para garantir que a solução maximiza o uso das portas de embarque não ultrapassa os limites de ocupação disponíveis no estacionamento e nas portas remotas, procedeu-se a essa verificação. A solução encontrada respeita esses limites, portanto é uma solução admissível. As taxas de ocupação, tanto dos lugares de estadia como das portas remotas tem longos períodos perto da capacidade máxima, nomeadamente ao fim da manhã e início da tarde, período em que se tem menos ocupação nas portas de embarque; e para o caso das portas remotas têm, também uma grande taxa de ocupação ao fim do dia.

O Quadro A - 3 do Anexo A mostra-nos qual é a percentagem de ocupação das portas de contacto, das remotas e dos lugares de estadia ao longo do dia. Podemos ver que temos períodos de tempo em que todos estão com percentagens elevadas de ocupação, nomeadamente ao fim da tarde, mas por outro lado ao início do dia a taxa de ocupação é bastante reduzida.

Os resultados, por um lado dizem-nos que há momentos em que o terminal está a trabalhar perto do seu limite de capacidade, que do ponto de vista da rentabilização do mesmo é isso que se pretende; do ponto de vista da operacionalidade, esta proximidade aos limites de capacidade pode levar a que pequenos atrasos em alguns voos façam com que se exceda a capacidade do terminal. Quanto aos períodos de pouca atividade, ao contrário dos anteriores, estes acabam por servir como margem de segurança para se poder lidar com atrasos ou outros imprevistos; mas por outro lado não estão a ser rentabilizados como poderiam ser. Ou seja, idealmente desejar-se-ia que se pudesse ter uma distribuição mais uniforme dos voos para que nem houvesse períodos de inatividade, nem situações limites de capacidade.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho abordaram-se dois tipos de modelos de atribuição de portas, um deles voltado para a minimização das distâncias percorridas pelos passageiros e bagagens nos terminais, o outro para a maximização da atribuição de voos ou passageiros a portas.

O modelo de minimização das distâncias percorridas por passageiros dentro dos terminais tem interesse quando se pretende melhorar a qualidade do serviço prestado aos passageiros e poderá também facilitar o manuseamento de bagagens dentro do terminal. O modelo aqui apresentado lida com o problema de uma forma muito simplificada, em que se assume que os voos não excedem as capacidades das portas, não se consideram incompatibilidades entre tipos aeronaves em portas adjacentes nem é admitida a possibilidade das aeronaves serem retirados das portas, durante a estadia no aeroporto. Para o modelo apresentar resultados mais práticos e abrangentes, seria necessário desenvolvê-lo mais para que ele desse resposta a essas situações, já todas elas são bastante comuns.

O que inviabiliza o desenvolvimento do modelo é o seu tempo de resposta para encontrar uma solução. Mesmo para problemas de pequenas dimensões, o modelo demora um tempo elevado a chegar a uma solução; se o desenvolvermos vamos, também aumentar ainda mais o seu tempo de resposta o que o torna pouco prático.

A difícil aplicabilidade do modelo de minimização de distâncias aliada à crescente necessidade de lidar com congestionamentos e de rentabilizar as infraestruturas disponíveis volta-nos para os modelos de maximização de atribuição de voos ou passageiros a portas.

O modelo de atribuição, tal como o anterior, foi primeiro pensado para uma situação de atribuição simples em que não se consideram as restrições impostas pela geometria do terminal nem a possibilidade de retirada dos aviões. Esta primeira etapa permitiu verificar que este modelo tinha mais potencialidades de desenvolvimento e aplicação prática que o anterior, já que consegue solucionar problemas de grandes dimensões em muito pouco tempo, tanto quando se considera como objetivo a maximização do número de voos atribuídos a portas, como o número de passageiros.

O desenvolvimento do modelo passou por permitir a retirada das aeronaves das portas, quando estas permanecem longos períodos de tempo no aeroporto, o que vai flexibilizar mais o uso das portas de embarque e permitir que mais voos sejam servidos. Para além disto, adaptou-se o modelo para lidar com a geometria do terminal, nomeadamente considerar a situação em que uma aeronave de grande porte pode interferir com o uso da porta adjacente àquela a que foi atribuída; considerou-se ainda a situação nemos comum de a ocupação de uma porta bloquear o acesso a outra.

Estas alterações aumentam um pouco o tempo de processamento do problema, no entanto para o estudo de caso feito, aplicou-se o modelo ao dia mais movimentado do terminal e obteve-se uma solução em cerca de trinta segundos, o que nos mostra que o tempo de resposta é ainda bastante reduzido.

Inicialmente considerou-se as que a função objetivo tanto pode ser a maximização de aviões atribuídos a portas como a maximização dos passageiros servidos por portas. O uso de transporte do terminal para as portas remotas implica custos adicionais para a companhia aérea e transtorno adicional para os passageiros, por isso passou a considerar-se apenas como função objetivo a maximização dos passageiros servidos por porta de embarque. No entanto o modelo funciona para qualquer das funções objetivo.

Atrasos ou outras situações que alterem os horários previstos das chegadas e partidas dos voos não são diretamente previstos no modelo de atribuição, já que este considera como um dado o período de chegada e partida de cada um dos voos. No entanto, a rapidez de processamento do modelo torna-o viável para o uso em tempo real; a qualquer altura que haja alterações nos horários previstos, pode voltar a correr-se o modelo para a nova situação e adaptar-se a solução inicial, tendo o cuidado de garantir que voos que já estejam atribuídos ou já tenham recebido a indicação da porta para onde vão, não sofram alterações.

Conclui-se que o modelo de atribuição desenvolvido pode, tanto ser usado para fazer o planeamento dos voos a longo prazo, como ser usado em tempo real para lidar com imprevistos, o que o torna bastante útil e versátil.

Apesar da versatilidade do modelo, o estudo de caso mostrou, que para além da atribuição dos voos às portas de embarque, também seria interessante estender essa atribuição às portas remotas e aos lugares de estadia, já que estes também são limitados e poderão ter influência na solução final.

Outra questão que os modelos deixam de fora é a dos custos que estão associados às várias atividades e operações. Os modelos foram desenvolvidos pensando mais na operacionalidade, sem serem associados custos reais às diferentes opções que são tomadas.

As situações referidas nos parágrafos anteriores têm boas hipóteses de poderem ser acrescentadas ao modelo de atribuição aqui desenvolvido, o que o poderia tornar numa ferramenta ainda mais abrangente e seria um bom ponto de partida para dar continuidade a este estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlanta Airport (2013). http://www.atlanta-airport.com/Airport/ATL/operation_statistics.aspx. Estatísticas do aeroporto internacional de Atlanta, USA.
- Babic, O. e Teodorovic, D. and Tomic, V. (1984). “Aircraft stand assignment to minimize walking”. *Journal of Transportation Engineering*, vol.110, pp. 55–66.
- Bierlaire, Michel e Prem Kumar, Viswanathan (2013). “Multi-Objective Airport Gate Assignment Problem in Planning and Operations”. *Journal of Advanced Transportation*.
- Bolat, A. (2000). “Procedures for providing robust gate assignments for arriving aircraft”. *European Journal of Operations Research*, 120, pp. 63–80.
- Chen, Min-Ching e Haghani, Ali (1998). “Optimizing gate assignments at airport terminals”. *Transportation Research Part A*, Vol. 32, No. 6, pp. 437–454.
- Diepen, G., van den Akker, J. M., Hoogeveen, J. A. e Smeltink, J. W. (2007). “Using column generation for gate planning at Amsterdam Airport Schiphol”. Technical Report UU-CS-2007-18, Department of Information and Computer Sciences, Utrecht University, The Netherlands.
- Ding, H., Lim, A., Rodrigues, B. e Zhu, Y. (2005). “The over-constrained airport gate assignment problem”. *Computers & Operations Research*, vol. 32, pp. 1867 – 1880.
- Dorndorf, U., Jaehn, F., e Pesch, E. (2008). “Modelling Robust Flight-Gate Scheduling as a Clique Partitioning Problem”. *Transportation Science*, 42, pp. 292 – 301.
- Dorndorf, U., Jaehn, F., Lin, C., Ma, H. e Pesch, E. (2007b). “Disruption management in flight gate scheduling”. *Statistica Neerlandica*, 61, pp. 92 – 114.
- Drexl, A. e Nikulin, Y. (2008) Multicriteria airport gate assignment and Pareto simulated annealing. *IIE Transactions*, 40, pp. 385 – 397.
- GRU (2013). <http://www.gru.com.br/pt-br/Institucional>. Site oficial do aeroporto de guarulhos, Brasil.

- Heathrow official airport website (2013). <http://www.heathrowairport.com/about-us/company-news-and-information/company-information/facts-and-figures>. Site oficial do aeroporto de Heathrow, Inglaterra.
- Hu, X. B. e Di Paolo, E. (2009). “A Ripple-Spreading Genetic Algorithm for the Airport Gate Assignment Problem”. IEEE Congress on Evolutionary Computation. IEEE, USA, pp 1857-1864.
- ICAO (2013). <http://www.icao.int/sustainability/Pages/FactsFigures.aspx>. International Civil Aviation Organization (página internacional oficial da internet).
- INAC(2013).<http://www.inac.pt/vPT/Generico/LegislacaoRegulamentacao/Paginas/LegislacaoRegulamentacao.aspx>. Instituto Nacional de Aviação Civil (página oficial da internet), Portugal.
- Lim, A. e Wang, F. (2005). “Robust airport gate assignment”. Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2005), Hong Kong, pp. 74–81.
- Lim, A., Rodrigues, B. e Zhu, Y. (2005). “Airport gate scheduling with time windows”. Artificial Intelligence Review, 24, pp. 5 – 31.
- Mangoubi, R. e Mathaisel, D. (1985). “Optimizing gate assignments at airport terminals”. Transportation Science, 19, pp. 173–188.
- Neufville, Richard e Odoni, Amadeo (2003). ”Airport Systems: Planning, Design and Management”. McGraw-Hill
- World Airport Codes (2013) <http://www.world-airport-codes.com/>. Base de dados de pesquisa sobre aeroportos.
- Xu, J. e Bailey, G. (2001). “The airport gate assignment problem: mathematical model and a tabu search algorithm”. Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 3, pp. 10-19.
- Yan, S. e Chang, C. (1998). “A network model for gate assignment”. Journal of Advanced Transportation, vol. 32, pp. 176–189.
- Yan, S. e Huo, C. (2001) “Optimization of multiple objective gate assignments”. Transportation Research – A, vol. 35, pp.413–432.
-

Yan, S. e Tang, C. H. (2007). “A heuristic approach for airport gate assignments for stochastic flight delays”. *European Journal of Operational Research*, vol. 180, pp. 547–569.

Yan, S., Shieh, C. e Chen, M. (2002). “A simulation framework for evaluating airport gate assignments”. *Transportation Research – A*, 36, 885–898.

Quadro A - 1: Horário e características dos voos de sábado.

Voo	Companhia aérea	Período de chegada	Período de partida	Tipo de aeronave	Número de lugares	Tempo de desembarque	Tempo de embarque
1	CA20	1	11	E	253	4	6
2	CA26	1	6	E	354	4	6
3	CA10	1	93	E	346	4	6
4	CA11	1	31	C	156	3	4
5	CA11	1	90	C	156	3	4
6	CA11	1	19	C	156	3	4
7	CA11	1	5	F	223	4	5
8	CA11	1	34	C	156	3	4
9	CA11	3	5	C	156	3	3*
10	CA11	4	29	C	156	3	4
11	CA22	7	13	E	270	4	6
12	CA19	7	11	E	259	4	5*
13	CA11	11	13	C	156	3	3*
14	CA15	20	68	E	362	4	6
15	CA11	21	24	E	223	4	4*
16	CA6	21	61	E	291	4	6
17	CA11	22	31	E	362	4	6
18	CA7	22	65	E	299	4	6
19	CA11	23	32	E	223	4	6
20	CA14	23	27	C	162	3	4
21	CA11	23	41	E	223	4	6
22	CA11	23	92	E	223	4	6
23	CA23	23	64	E	268	4	6
24	CA15	23	75	E	306	4	6
25	CA11	23	42	E	363	4	6
26	CA11	24	32	E	223	4	6
27	CA17	24	74	E	219	4	6
28	CA1	24	59	D	238	3	4
29	CA3	24	86	E	245	4	6
30	CA11	25	89	E	362	4	6
31	CA5	26	63	E	303	4	6
32	CA11	26	38	E	223	4	6
33	CA10	26	61	E	342	4	6
34	CA3	26	43	E	245	4	6
35	CA18	28	34	C	156	3	4

Voo	Companhia aérea	Período de chegada	Período de partida	Tipo de aeronave	Número de lugares	Tempo de desembarque	Tempo de embarque
36	CA25	28	93	E	258	4	6
37	CA3	30	90	E	245	4	6
38	CA14	31	37	C	162	3	4
39	CA3	31	85	E	310	4	6
40	CA24	35	89	E	269	4	6
41	CA11	36	89	D	221	3	4
42	CA24	36	85	E	256	4	6
43	CA11	36	88	D	221	3	4
44	CA3	36	89	E	245	4	6
45	CA24	37	84	D	214	3	4
46	CA3	37	87	E	310	4	6
47	CA18	37	41	C	156	3	4
48	CA2	39	46	C	162	3	4
49	CA24	40	85	E	269	4	6
50	CA11	41	45	C	156	3	4
51	CA4	44	80	D	211	3	4
52	CA11	47	51	C	156	3	4
53	CA11	53	57	C	156	3	4
54	CA12	55	66	E	291	4	6
55	CA11	56	58	C	156	3	3*
56	CA3	60	94	E	245	4	6
57	CA8	60	73	E	237	4	6
58	CA14	61	78	D	221	3	4
59	CA11	62	90	E	223	4	6
60	CA18	62	75	C	156	3	4
61	CA16	63	78	D	238	3	4
62	CA21	65	71	E	278	4	6
63	CA14	66	81	C	162	3	4
64	CA23	67	90	E	268	4	6
65	CA26	67	96*	E	354	4	6
66	CA9	67	90	E	316	4	6
67	CA19	67	72	E	259	4	6
68	CA23	68	73	E	259	4	6
69	CA22	68	74	E	270	4	6
70	CA13	69	77	E	425	4	6
71	CA5	69	77	E	247	4	6
72	CA10	71	93	E	346	4	6
73	CA11	71	74	C	156	3	4

Voo	Companhia aérea	Período de chegada	Período de partida	Tipo de aeronave	Número de lugares	Tempo de desembarque	Tempo de embarque
74	CA7	72	80	E	337	4	6
75	CA2	73	77	C	162	3	4
76	CA11	76	82	C	156	3	4
77	CA11	78	90	E	363	4	6
78	CA20	79	84	E	222	4	6
79	CA11	80	96	E	223	4	6
80	CA11	80	96*	C	156	3	4
81	CA11	81	90	E	363	4	6
82	CA11	82	96*	C	156	3	4
83	CA14	82	88	C	162	3	4
84	CA18	82	96*	C	156	3	4
85	CA11	83	96	E	223	4	6
86	CA11	83	96	E	362	4	6
87	CA3	83	90	E	245	4	6
88	CA11	86	88	C	156	3	4
89	CA11	86	94	E	223	4	6
90	CA11	88	96*	C	156	3	4
91	CA16	90	96*	C	162	3	4
92	CA11	95	96*	E	223	2*	6

Quadro A - 2: Resultados da atribuição dos voos.

PT	Portas																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1			1	2	7	8	4	3	6											5
2			1	2	7	8	4	3	6											5
3			1	2	7	8	4	3	6											5
4	9		1	2	7			3	10											
5	9		1	2	7				10											
6	9		1	2					10											
7	11		1	12																
8	11		1	12																
9	11		1	12																
10	11		1	12																
11	11		1	12									13							
12	11												13							
13	11												13							

Portas PT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14																				
15																				
16																				6
17																				6
18																				6
19																				6
20																				14
21											15						16			14
22	18				17						15						16			14
23	18	24		17				20	25		15	23		19			16			14
24	18	24		17				20	25		15	23		19			16			26
25	18	24		17				20	25		30	23		19						26
26	33	24		17	10	20	25				30	23		19			31			26
27	33			17	10	20					30			19			31			26
28	33	36		17	10					35	30	4		19			31			26
29	33	36		17	10					35		4		19			31			26
30			36	17			37	35				4		19						26
31			36	17			37	35	39	4				19			8	38		26
32							37	35	39					19			8	38		26
33							37	35	39								8	38		
34									35	39							8	38		
35																		38		40
36	41	43							44	42	21						38			40
37	41	43		47	25	44	42	21	46								38			40
38	41	43		47	25	44	42	21	46								34			40
39	48				47	25	44	42	21	46							34			
40	48				47	25	49			21	46						34			
41	48				47	25	49	50		21							34			
42	48					25	49	50									34			
43	48						49	50									34			
44	48					51		50												
45	48					51		50												
46	48					51														
47																				52
48																				52
49																				52
50																				52
51																				52
52																				

Portas PT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
53						53														
54						53														
55						53							54							
56	16		33			53			28	55		54								
57	16		33			53			28	55		54								
58	16		33		31				28	55		54								
59	16		33		31				28			54								23
60	16		33		31		56	18				54								23
61	16		33		31		56	18		58		54								23
62	59				31		56	18		58		54						60		23
63	59		14		31		56	18		58		54		61				60		23
64	59		14						18			54		61				60		23
65	59		14		62				18			54		61				60		
66			14		62							54		61		63	60			
67	65		14		62		67	66						61		63	60			
68	65		14		62		67	66		68				61		63	60			69
69	65		70		62		67	66		68		71		61		63	60			69
70	65		70		62		67	66		68		71		61		63	60			69
71	73		70		62		67	72		68		71		61		63	60			69
72	73		70		74		67	72		68		71		61		63	60			69
73	73		70		74		75	72		68		71		61		63	60			69
74	73		70		74		75	72				71		61		63	60			69
75			70		74		75					71		61		63				58
76			70		74		75					71		61		63	76			58
77	51		70		74		75					71		61		63	76			58
78	51		77		74									61		63	76			58
79	51		77		74		78									63	76			
80	51		77		74		78	42		39					80	63	76			49
81			77		81		78	42		39					80	63	76			49
82	46		77		81		78	42		39		83	82	84	80		76			49
83	46		77		81		78	42		39		83	82	84	80		86			49
84	46		77		81		78	42		39		83	82	84	80		86			49
85	46		77		81		43	42		39		83	82	84	80		86			49
86	46		77		81		43	89				83	82	84	80		86			
87	46		77		81		43	89		5		83	82	84	80		86			
88	3		77		81		43	89		90	5	83	82	84	80		86			72
89	3		77		81		56	89		90	5		82	84	80		86			72
90	3		77		81		56	89		90	5	91	82	84	80		86			72
91	3		65				56	89		90		91	82	84	80		86			72

Portas PT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
92	3		65				56		89		90		91	82	84	80		86		72
93	3		65				56		89		90		91	82	84	80		86		72
94			65				56		89		90		91	82	84	80		86		
95			65						92		90		91	82	84	80		86		
96			65						92		90		91	82	84	80		86		

Voos que permanecem na porta

Voos que são atribuídos na chegada e depois na partida

Voos só atribuídos à chegada

Voos só atribuídos à partida

Quadro A - 3: Percentagem de ocupação das portas e lugares de estadia ao longo do dia.

Período de tempo	Ocupação		
	Portas	Portas remotas	Lugares de estadia
1	60%	0%	0%
2	60%	0%	0%
3	65%	0%	12%
4	50%	0%	12%
5	40%	10%	12%
6	30%	10%	15%
7	30%	10%	15%
8	30%	10%	15%
9	30%	10%	15%
10	30%	10%	15%
11	35%	10%	15%
12	15%	10%	15%
13	15%	10%	15%
14	0%	10%	15%
15	0%	10%	12%
16	5%	10%	12%
17	5%	10%	12%
18	5%	10%	12%
19	5%	10%	12%
20	10%	10%	12%
21	30%	10%	12%

Período de tempo	Ocupação		
	Portas	Portas remotas	Lugares de estadia
22	50%	10%	12%
23	95%	20%	19%
24	95%	30%	27%
25	85%	30%	31%
26	100%	30%	46%
27	70%	40%	46%
28	85%	40%	46%
29	75%	60%	62%
30	60%	60%	58%
31	80%	60%	58%
32	55%	70%	58%
33	25%	70%	58%
34	25%	80%	65%
35	15%	80%	65%
36	65%	70%	58%
37	90%	70%	58%
38	95%	60%	58%
39	70%	80%	73%
40	60%	90%	81%
41	55%	90%	81%
42	40%	90%	81%
43	25%	90%	88%
44	20%	90%	88%
45	20%	90%	88%
46	15%	90%	96%
47	5%	90%	96%
48	5%	90%	96%
49	5%	90%	96%
50	5%	90%	96%
51	5%	90%	96%
52	0%	90%	96%
53	5%	90%	96%
54	5%	90%	96%
55	15%	90%	81%
56	50%	80%	81%

Período de tempo	Ocupação		
	Portas	Portas remotas	Lugares de estadia
57	50%	80%	73%
58	55%	80%	73%
59	60%	80%	58%
60	70%	80%	58%
61	80%	80%	58%
62	75%	80%	50%
63	95%	80%	65%
64	65%	80%	65%
65	65%	80%	65%
66	50%	90%	65%
67	70%	90%	65%
68	90%	90%	65%
69	100%	90%	65%
70	100%	90%	73%
71	95%	100%	73%
72	95%	100%	73%
73	90%	100%	73%
74	80%	100%	73%
75	65%	100%	73%
76	65%	90%	65%
77	75%	90%	65%
78	60%	90%	65%
79	50%	90%	42%
80	85%	90%	42%
81	75%	90%	35%
82	95%	90%	35%
83	100%	90%	35%
84	100%	90%	27%
85	100%	90%	27%
86	80%	90%	23%
87	85%	90%	15%
88	100%	80%	8%
89	95%	80%	8%
90	100%	40%	0%
91	85%	20%	0%

Período de tempo	Ocupação		
	Portas	Portas remotas	Lugares de estadia
92	85%	20%	0%
93	85%	20%	0%
94	65%	10%	0%
95	55%	10%	0%
96	55%	10%	0%