

---

# **OTIMIZAÇÃO DA DESIGNAÇÃO DE VÔOS AOS GATES NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS**

Fabiana Todesco

Carlos Müller

Divisão de Engenharia Mecânica

Divisão de Engenharia Civil

Instituto Tecnológico Aeronáutico

## **RESUMO**

A indústria do transporte aéreo apresenta no mundo todo um contínuo crescimento na demanda. Uma das soluções de curto prazo para aliviar as restrições de capacidade dos aeroportos causada por esse contínuo crescimento da demanda é a otimização da designação dos vôos nas posições de estacionamentos (*gates*). Neste trabalho, um modelo matemático de designação para o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos (AISP/GRU) é proposto. Utilizando-se dados reais do aeroporto (AISP/GRU), a solução do modelo mostrou ser mais eficiente do que a praticada no aeroporto em 2005.

*Palavras Chave:* pesquisa operacional, otimização, designação de *gates*, pátio de aeronaves e aeroportos.

## **ABSTRACT**

The air transportation industry is facing over the world a continuous growth. A short term solution to mitigate the capacity constraint raised by this steady growth of air demand is the optimization of gate assignment to flights at airports. This paper proposes a mathematical assignment model for Sao Paulo International Airport/Guarulhos (AISP/GRU). Using airport (AISP/GRU) real data the gate assignment generated by this modeling proved to be more efficient than the one practiced by the airport in 2005.

*Key words:* operational research, optimization, gate assignment, apron and airports.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria do transporte aéreo apresenta no mundo todo um contínuo aumento na demanda. A previsão de crescimento do tráfego aéreo (passageiros-km) da ICAO (2005) para 2007 no mundo é de 6,2% e para o mercado Latino Americano/Caribe é de 5,6% (ICAO, 2005). As previsões de estudo da AIRBUS são pouco menos otimistas, para os próximos 20 anos, na ausência de maiores rupturas exógenas, a previsão é de um crescimento médio mundial de 5,3 % ao ano e, para o mercado Latino Americano, de 5,3% (Airbus, 2003).

As previsões de acentuado crescimento na demanda por transporte aéreo implicam diretamente em um esperado aumento de fluxo de operações nos aeroportos. Aeroportos que não estiverem capacitados para absorver esta demanda crescente apresentarão inúmeros problemas, tais como congestionamentos das pistas de pouso, de decolagem, de taxiamento, dos pátios de estacionamentos, dos terminais de passageiros e de carga, prejudicando assim a qualidade de serviço dos aeroportos e das empresas aéreas.

Uma solução para aeroportos que já se encontram no limite de suas capacidades é a expansão física de sua infra-estrutura, através da construção de novas pistas e terminais de passageiros. Porém, estas são soluções de longo prazo, de alto investimento e, algumas vezes, inviáveis para alguns aeroportos por falta de espaço físico.

Segundo Yan e Huo (2001), uma das soluções de curto prazo para aliviar as restrições de capacidade dos aeroportos é a otimização da designação dos vôos nas posições de estacionamentos. Para os operadores dos aeroportos o problema da designação surge, principalmente, quando a operação é realizada manualmente e envolve um grande número de aeronaves no pátio.

No pátio do aeroporto as áreas designadas às posições de estacionamento para as aeronaves são chamadas de *envelopes de aeronaves* ou em inglês de *aircraft stands*. Freqüentemente, por simplicidade, portões no terminal e posições de estacionamento no pátio são considerados correspondentes e referidos nos trabalhos como *gates*. O principal propósito da *programação de gates* é a designação dos vôos para os portões de embarque e desembarque dos passageiros no terminal.

Segundo Ding et al. (2005), a distância caminhada pelos passageiros (embarque, desembarque ou conexão) dentro do terminal é umas das medidas de desempenho da qualidade de qualquer aeroporto. Por isto existe o interesse de muitas pesquisas e das autoridades aeroportuárias em minimizar esta distância dentro de seus aeroportos.

No Brasil os aeroportos com maiores fluxos de movimentos de passageiros, aeronaves e carga aérea são os de Guarulhos (AISP/GRU) e Congonhas (CGH), administrados pela INFRAERO (Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária). Localizados na região sudeste do país, mais precisamente na região metropolitana de São Paulo (ver Tabela 1), estes aeroportos apresentaram crescimentos maiores do que os previstos pelo ICAO (2005) e AIRBUS (2003) para o mercado latino americano. Considerando apenas o transporte de passageiros (embarque, desembarque e conexão, excluindo os vôos militares), os aeroportos de Congonhas (CGH) e Guarulhos (AISP/GRU) apresentaram, respectivamente, crescimento de 26,0% e 22,4%, na

comparação de 2005 em relação a 2004 (INFRAERO, 2005). Isto indica a urgência de ações de planejamento que garantam para estes aeroportos, um bom desempenho de atendimento frente à intensa demanda.

**Tabela 1: Movimento nos principais Aeroportos do Brasil em 2005 (INFRAERO, 2005).**

Classificação do aeroporto pelo nº de pax e anv (unid)	Pax (unid.)	Anv (unid.)	Classificação do aeroporto pela carga aérea	Carga Aérea (kg)
1º Congonhas	17.147.628	228.110	1º Guarulhos	470.944.200
2º Guarulhos	15.834.797	154.339	2º Campinas	179.483.222
3º Brasília	9.426.569	130.885	3º Manaus	139.958.553
4º Galeão	8.657.139	97.332	4º Galeão	84.814.578

Pax: passageiros; Anv: aeronaves.

O objetivo deste estudo é o de desenvolver um modelo matemático de otimização para a alocação das aeronaves nos *gates*. Devido a sua importância, ao acentuado crescimento registrado nos últimos anos e a gentil presteza de sua administração em disponibilizar as informações necessárias, optou-se por realizar uma aplicação do modelo matemático desenvolvido ao Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos (AISP/GRU).

## 2. DESCRIÇÃO DO AISP/GRU.

O AISP/GRU é um dos maiores e mais importantes aeroportos da América Latina. A configuração do seu Terminal de Passageiros (TPS) é a de *fingers*, apresentando extensões na frente do edifício principal, tendo como vantagens a redução das áreas de pátio, disposição dos equipamentos de pátio em local abrigado junto às aeronaves e fluidez nas operações de pátio, não ocorrendo cruzamento de aeronaves com veículos. Porém, uma desvantagem é o aumento dos percursos feito a pé pelo passageiro (origem e destino) dentro do edifício TPS.

O sítio aeroportuário do AISP/GRU é de 14 milhões m<sup>2</sup>, o pátio das aeronaves possui uma área de 468.110 m<sup>2</sup>, as pistas são de 3.700 x 45 m e 3.000 x 45m, os terminais de passageiros 1 e 2 possuem cada um capacidade de 8,25 milhões de passageiros por ano, o TPS1 tem área de 87.850 m<sup>2</sup> e o TPS 2 tem uma área de 91.940 m<sup>2</sup>, os balcões de “check-in” são em número de 260, o número total de posições de estacionamentos de aeronaves com pontes de embarque e desembarque são 11 no TPS1 e 12 no TPS 2, e a capacidade do estacionamento de carros é de 3.500 vagas.

Segundo a administração do aeroporto, atualmente as designações dos vôos aos *gates* são realizadas manualmente pelos operadores do aeroporto. O operador, durante o turno da madrugada, com base na programação de vôos, define as posições de estacionamentos das aeronaves para as próximas 24 horas de operação. Esta tarefa é executada sobre quadros metálicos, com horários e marcações das posições de estacionamentos nos pátios, utilizando pedras magnéticas com informações dos números de vôos, tipos de vôos e empresas aéreas. A programação de alocação dos vôos é realizada com base nos horários previstos de chegada e saída dos vôos (HOTRAN), nos documentos enviados pelas empresas aéreas e nas informações com relação a vôos extras, cancelamentos, mudanças de horários e outros.

O aeroporto apresentou acentuado crescimento do fluxo de passageiros nos últimos anos. Conforme citado anteriormente, em 2005 o crescimento foi de 22,4% em relação a 2004. Em horários de pico de demanda, entre 6:00 e 10:30 e entre 19:00 às 23:00, problemas de congestionamentos e atrasos são freqüentes. Umas das soluções consideradas pela INFRAERO, a curto-prazo, para melhorar a eficiência das operações de pátio é o desenvolvimento e a utilização de modelos computacionais de alocação de aeronaves aos *gates*.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os problemas de alocação de aeronaves encontrados na literatura, segundo Lopes (1990), utilizam três abordagens distintas quanto às técnicas de solução: simulação, programação matemática e heurísticas seqüenciais. Existem outros, como Brazile e Swigger (1988) e Gosling (1990), que sugerem a implementação de *expert systems*.

Dentre os trabalhos que utilizaram simulação podemos citar Cheng (1998), que utiliza o método *network-based* para simular a designação das aeronaves aos *gates*, e Yan, Shieh e Chen (2002), que propõe uma estrutura de simulação para analisar os efeitos estocásticos dos atrasos dos vôos sobre as designações dos *gates* no nível de planejamento.

Inúmeros trabalhos utilizaram programação matemática, dentre os quais citamos Mangoubi (1980), Babic et al. (1984), Mangoubi e Mathaisel (1985), Bihr (1990) e Haghani e Chen (1998). Estes modelos são normalmente formulados como programas lineares inteiros, com o objetivo usual de minimizar a distância total percorrida pelos passageiros e/ou o número de vôos alocados em posição remota.

Como o interesse deste estudo é desenvolver um modelo de otimização para o processo de designação dos vôos aos *gates*, dois trabalhos recentes que exploraram especificamente este problema serão abordados com maior profundidade: Bolat (2000) e Ding, Lim, Rodrigues e Zhu (2005).

Bolat (2000) desenvolveu uma designação de vôos aos *gates* insensível a pequenas variações na programação dos vôos. Alguns fatores como mau tempo, falhas nos equipamentos, ou vôos atrasados não foram considerados, embora possam romper a programação planejada da operação de pátio de um aeroporto, dificultando a manutenção da operação prevista e prejudicando as eficiências do aeroporto e das companhias aéreas.

No modelo matemático de alocação de vôos aos *gates* definido por Bolat (2000), o aspecto mais interessante incorporado ao modelo, foi a equação representativa da restrição física e administrativa de designação das aeronaves aos *gates* do terminal, definida através da matriz de parâmetro binário  $P_{j,k}$ . Segue abaixo a formulação matemática da primeira restrição do modelo matemático de Bolat (2000).

$$\sum_{k=1}^M P_{j,k} y_{j,k} = 1, \quad \forall j, j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

onde:  $y_{j,k}$  é a variável binária de decisão, assumindo valor 1 (um) se o voo  $j$  for designado ao gate  $k$  e valor zero caso contrário,

$P_{j,k}$  é o parâmetro binário, assumindo valor 1 (um) quando a designação do voo  $j$  para o gate  $k$  é permitida (a alocação satisfaz todas as considerações físicas e administrativas) e valor zero em caso contrário,

$M$  é o número de gates,

$N$  é o número de vôos.

O trabalho de Ding, Lim, Rodrigues e Zhu (2005), também teve como foco o problema de designação das aeronaves aos *gates*. O modelo matemático empregado neste trabalho é composto por duas funções objetivas. A primeira função objetiva é responsável pela minimização do número de vôos designados às posições remotas e a segunda pela minimização da distância caminhada pelos passageiros (embarque, desembarque e conexão). Segue a formulação do modelo:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n y_{i,m+1} \quad (2)$$

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{m+1} \sum_{l=1}^{m+1} f_{i,j} w_{k,l} y_{i,k} y_{j,l} + \sum_{i=1}^n f_{0,i} w_{0,i} + \sum_{i=1}^n f_{i,0} w_{i,0} \quad (3)$$

Sujeito a

$$\sum_{k=1}^{m+1} y_{i,k} = 1, (\forall i | 1 \leq i \leq n) \quad (4)$$

$$y_{i,k} y_{j,k} (d_j - a_i)(d_i - a_j) \leq 0, (\forall i, j, k | 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k \leq m) \quad (5)$$

onde:  $n$  é o número total de vôos,

$m$  é o número total de posições de estacionamento,

$a_i$  é o horário de chegada do voo  $i$ ,

$d_i$  é o horário de partida do voo  $i$ ,

$w_{k,l}$  é a distância caminhada pelo passageiro do gate  $k$  ao  $l$ ,

$f_{i,j}$  é o número de passageiros transferido do voo  $i$  ao  $j$ ,

$y_{i,k}$  é a variável de decisão binária, assumindo valor 1 se o voo  $i$  for designado a posição  $k$  e o valor zero em caso contrário.

O modelo possui *variáveis artificiais* de índices (0) e ( $m+1$ ), onde (0) representa um ponto de entrada e saída do aeroporto e o gate ( $m+1$ ) representa as posições remotas, que serão utilizadas quando não houver *gates* disponíveis para o voo. A equação (4) garante que cada voo será designado a uma e somente uma posição e a equação (5) assegura que os vôos não se encontrarão na mesma posição ao mesmo tempo. Para resolver o modelo acima, Ding et al. (2005) utilizam primeiramente um algoritmo *greedy* para resolver a equação (2), e assim minimizar o número de vôos designados às posições remotas. Depois, empregam dois métodos heurísticos: *simulated annealing* e um híbrido de *simulated annealing* com o *tabu search*.

Observa-se que a segunda função objetivo do modelo matemático de Ding et al. (2005), equação (3), não é coerente com a própria definição dos autores para as distâncias caminhadas dos passageiros de origem e destino do aeroporto. Uma formulação de acordo com a definição seria:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m+1} \sum_{l=1}^{m+1} f_{i,j} w_{k,l} y_{i,k} y_{j,l} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m+1} f_{0,i} w_{0,k} y_{i,k} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m+1} f_{i,0} w_{k,0} y_{i,k} \quad (6)$$

No entanto, a equação (5) restringe bem a sobreposição das janelas de tempo dos vôos num mesmo *gate*. Porém, esta equação apresenta o inconveniente metodológico de ser *não-linear*. Na próxima seção será apresentada a proposta deste estudo para a modelagem matemática do problema de designação de vôos aos *gates* de um aeroporto. A inovação deste modelo é a introdução de artifícios para tornar linear a restrição da equação (5) do modelo de Ding et al.(2005), além da correção da função objetivo conforme apresentado em (6).

#### 4. MODELO MATEMÁTICO

O modelo proposto formula a designação de vôos aos *gates* de um aeroporto como um problema de programação linear inteira, cujo objetivo é minimizar a distância caminhada pelos passageiros dentro do terminal. Este modelo teve como referência as formulações de Bolat (2000) e Ding et al. (2005).

No trabalho de Ding et al. (2005), a restrição que evita a sobreposição das janelas de tempo dos vôos num mesmo *gate* é uma equação não-linear e de difícil solução para problemas de tamanhos reais de grande porte. Uma das soluções encontradas foi a de utilização de um artifício que mantém a propriedade da restrição (5) no modelo, mas o torna linear.

Analizando a equação, observa-se que o conflito de horário para os vôos  $i$  e  $j$  existe quando:

$$(d_j - a_i)(d_i - a_j) \geq 0. \quad (7)$$

Portanto, construiu-se um conjunto chamado de Conjunto Com Conflito (*CCC*) que reúne os vôos com janelas de tempo sobrepostas, onde se impõe que a seguinte equação linear seja válida:

$$y_{i,k} + y_{j,k} \leq 1, \quad \forall i \text{ e } \forall j, (i, j) \in CCC, \quad \forall k, \quad k \neq m+1. \quad (8)$$

Esta restrição não necessita ser imposta às posições remotas ( $m+1$ ), pois se supõe que existem suficientes posições remotas, sem precisar numerá-las no modelo.

A função objetivo não discrimina os passageiros em conexão, considerando apenas passageiros de embarque e desembarque. Segue o modelo matemático completo:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i^n \sum_k^{m+1} pe_i de_k y_{i,k} + \sum_i^n \sum_k^{m+1} pd_i dd_k y_{i,k} \quad (9)$$

Sujeito a

$$\sum_k^{m+1} P_{i,k} y_{i,k} = 1, \quad \forall i \quad (10)$$

$$y_{i,k} + y_{j,k} \leq 1, \quad \forall i \neq j, \quad (i, j) \in CCC, \quad \forall k, \quad k \neq m+1 \quad (11)$$

$$y_{i,k} = 0 \quad ou \quad 1 \quad (12)$$

onde:  $pe_i$  é o número de passageiros embarcados no vôo  $i$ ,  
 $de_k$  é a distância caminhada pelo passageiro desde do hall de entrada ao TPS até o portão de embarque (*gate*)  $k$ ,  
 $pd_i$  é o número de passageiros desembarcados do vôo  $i$ ,  
 $dd_k$  é a distância caminhada pelo passageiro desde do portão de desembarque (*gate*)  $k$  até o hall de saída do TPS1,  
 $P_{i,k}$  é a matriz de restrição do vôo  $i$  a posição de estacionamento (*gate*)  $k$ , sendo igual a 1 caso o vôo  $i$  possa ser alocado a posição  $k$ , zero caso contrário,  
 $y_{i,k}$  é a variável de decisão binária, igual a 1 se o vôo  $i$  for alocado a posição (*gate*)  $k$ ; zero caso contrário,  
 $CCC$  é o conjunto de vôos Com Conflito de horários, ou seja, existe uma sobreposição entre as janelas de tempo de permanência dos vôos  $i$  e  $j$ , no aeroporto.

Na próxima seção descrevem-se os dados e as hipóteses utilizadas para a comparação dos resultados do modelo matemático com os resultados do planejamento manual dos operadores do aeroporto de Guarulhos.

## 5. ANÁLISE DOS DADOS DA OPERAÇÃO DO AEROPORTO AIS/GRU

A operação dos pátios e dos terminais de passageiros do AIS/GRU é caracterizada por uma completa segregação por companhias aéreas, já que as instalações fixas de cada companhia (*check-in*, escritórios, etc) estão concentradas em apenas um dos terminais, aquele em que ela normalmente opera. Dessa forma, é possível gerar modelos de alocação independentes para os terminais de passageiros TPS1 e TPS2. Transforma-se assim o problema de designação dos *gates* em dois problemas independentes. Nesse estudo, modelou-se o problema de designação para os vôos destinados apenas ao TPS1.

Nesse caso, o banco de dados é constituído por 757 vôos do Aeroporto AIS/GRU entre os dias 17 e 23 de julho de 2005. Esse período foi escolhido por representar o mês de maior demanda média de pax e movimento de aeronaves (pousos e decolagens), com relação aos outros meses do ano. Os vôos considerados são da aviação comercial regular (92%), charter e outros (8%) de companhias aéreas que operaram apenas no Terminal de Passageiros 1 (TPS1). Dos 757 vôos, 403 foram vôos com operação de embarque e desembarque de passageiros no mesmo *gate*, sem realocação de aeronave para outra posição. Os 354 vôos restantes realizaram apenas operações de embarque ou de desembarque. Portanto, no TPS1, no período considerado, ocorreu uma movimentação, pouso mais decolagem, de 1.160 vôos ( $2*403 + 354$ ).

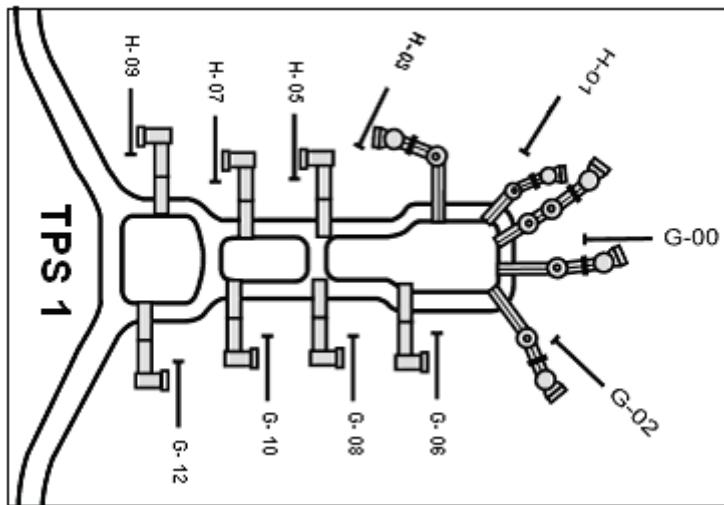
Para a utilização da modelagem matemática impõe-se o conhecimento, a priori, da tabela de horários de chegada e partida dos vôos. Essa informação permite a definição do conjunto  $CCC$ . A identificação dos vôos operados no período, obtido com a INFRAERO, permitiu também a obtenção dos horários previstos pelo HOTTRAN e dos horários realizados pelos operadores em

2005. Definiu-se, devido ao interesse de comparação da solução de designação real praticada pela INFRAERO com os resultados obtidos pelo modelo, que reais praticados pelas aeronaves para a entrada e saída nos *gates*.

No entanto, antes da utilização destes dados, foi necessário estabelecer certas premissas para os vôos que ocuparam as posições remotas por um longo período de tempo, principalmente, os vôos que realizaram operações de embarque e/ou desembarque mais estadia ou espera. O banco de dados da INFRAERO não informa quanto tempo da alocação da aeronave na posição remota foi utilizado para operações de pátio e para estadia ou espera. Sendo assim, admite-se que o tempo destas operações para as aeronaves que ocuparam as posições remotas foi de 130 minutos. Este tempo equivale a soma de um desvio padrão à média dos tempos de operação das aeronaves que não ocuparam as posições remotas (média 80 minutos, desvio padrão 50 minutos). A modelagem utilizaria a tabela de horários

Pelo modelo matemático se observa que existem restrições físicas e administrativas para a alocação de uma aeronave num *gate*. A restrição física é devida à relação entre a envergadura da aeronave e o tamanho do *gate* (“envelope da aeronave”). As envergaduras das aeronaves que ocuparam os *gates* do TPS1 variaram entre 28,1 a 64,4 metros e os *gates* apresentam larguras de envelopes de aeronaves entre 52 a 67 metros.

A restrição administrativa do aeroporto é relativa ao tipo do vôo, doméstico ou internacional. A Polícia Federal exige um maior rigor no controle e fiscalização da entrada e saída dos passageiros internacionais no aeroporto. Por esta razão não se misturam passageiros domésticos aos internacionais. No TPS1 os *gates* H05, H07 e H09 são designados aos vôos domésticos (eventualmente, também o H03 e H01, dependendo da demanda) e as outras posições aos vôos internacionais. Ver Figura 1.



**Figura 1: Esboço das posições do Terminal de Passageiros 1. Fonte: Infraero (2005).**

No modelo matemático restrinhiu-se os *gates* H03, H05, H07 e H09 aos vôos domésticos tanto no pouso como na decolagem (40% dos vôos da amostra foram alocados nestas posições). Os outros *gates* G00, G02, G06, G08, G10, G12 e H01 ficaram restritos aos vôos internacionais, no

pouso ou na decolagem (60%). Nas posições remotas não se impôs nenhuma restrição física ou administrativa para os vôos.

As distâncias consideradas no modelo foram aquelas tipicamente caminhadas pelos passageiros no aeroporto e que são freqüentemente consideradas em outros estudos:

- (1) do *check-in* até o portão de embarque,
- (2) do portão de desembarque até a área de retirada de bagagem.

No caso das posições remotas, utilizou-se um valor “alto” para a distância de caminhada, para forçar o modelo matemático a alocar as aeronaves nos *gates* que possuem portões de embarque e desembarque. E os vôos foram classificados segundo seus tempos de entrada nos *gates*, sem perda de generalidade,  $A_i \geq A_j$  se  $i \geq j$ .

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático foi implementado no software AIMMS (*Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software*) versão 3.7, utilizando o solver XA 14.

No problema de alocação de aeronaves aos *gates*, o número de vôos no modelo depende da extensão do intervalo de tempo considerado e do número de vôos que operam no aeroporto neste mesmo intervalo de tempo (horário de pico e entre pico). Após alguns testes, alterando os parâmetros (intervalo de tempo, número de vôos e número de *gates*), observou-se que o tempo de processamento depende principalmente do número de vôos e *gates*, ou seja, quanto maior o problema maior o tempo de processamento. O problema é tipicamente NP-hard.

Na solução dos primeiros 40 vôos do dia 17 de julho de 2005, após 48 h de processamento, não se chegou a uma solução ótima. A estratégia utilizada para obter os resultados num tempo de processamento viável foi a de “dividir para conquistar”, ou seja, parcelamos os 757 vôos da semana em grupos de 10 a 20 vôos a serem alocados nos *gates*. Como as alocações dos vôos num determinado tempo dependem das alocações dos vôos anteriores, por estarem ainda ocupando alguns *gates*, o problema foi implementado de forma a considerar as soluções dos vôos dos períodos anteriores. A estratégia, certamente, não garante a obtenção de solução ótima global quando se consideram todos os vôos de um dia. No entanto, como veremos a seguir, gera alocação superior à praticada pela INFRAERO, e com rapidez.

As informações de saída obtidas com as soluções do problema foram: distância média caminhada pelos passageiros dentro do TPS1 e, separadamente, número de passageiros e vôos alocados nas posições remotas. As soluções ótimas obtidas pelo modelo matemático foram comparadas com as alocações realizadas pelos operadores do aeroporto AISP/GRU. Para avaliar o desempenho do modelo foram utilizados três indicadores:

1. porcentagem diária de redução da distância média caminhada por passageiro dentro do terminal de passageiro;
2. porcentagem diária de redução do número de passageiros dos vôos designados às posições remotas;
3. porcentagem diária de redução do número de vôos alocados nas posições remotas.

Os resultados dos parâmetros de saída e dos indicadores de desempenho estão apresentados na Tabelas 2. Observa-se na Tabela 2 que no dia 22 de julho de 2005 houve uma maior redução obtida pelo modelo matemático para a distância média caminhada pelos passageiros no TPS1, sendo esta redução de 18,8%. No dia 19 de julho de 2005, segundo o modelo, 2.191 passageiros (3.177 pax menos 986 pax) poderiam ter-se utilizado as posições com pontes de embarque ao invés das remotas, evitando-se o inconveniente da locomoção por ônibus à sala de restituição de bagagens.

**Tabela 2: Resultado das soluções do modelo em comparação com o da INFRAERO por dia.**

Dias da semana	Vôos (i)	Tempo de CPU (s)	Posições do TPS1			Posições Remotas					
			Distância Média (m)			PAX			Nº de Vôos		
			Solução INFRAERO	Solução Modelo	Redução	Solução INFRAERO	Solução Modelo	Redução	Solução INFRAERO	Solução Modelo	Redução
17	1-111	42,71	197	169	14,2%	3.781	1.959	48,2%	25	20	20,0%
18	112-223	106	200	172	14,0%	3.086	1.662	46,1%	25	18	28,0%
19	224-322	1,66	197	172	12,7%	3.177	986	69,0%	21	15	28,6%
20	323-426	3,21	190	163	14,2%	2.509	1.261	49,7%	19	15	21,1%
21	427-530	3,48	195	175	10,3%	2.518	1.499	40,5%	19	16	15,8%
22	531-639	2,33	207	168	18,8%	3.561	1.985	44,3%	28	17	39,3%
23	640-757	51,54	198	170	14,1%	3.513	1.778	49,4%	25	19	24,0%
Total	1-757	210,9	197,61	169,96	14,0%	22.145	11.130	49,7%	162	120	25,9%

Pelos resultados na Tabela 2 percebe-se que, para os três indicadores de desempenho, as soluções do modelo matemático foram superiores as soluções da INFRAERO (todos os valores são positivos). Para todos os vôos da semana o programa matemático obteve uma redução de 14% em média para a distância caminhada por passageiro dentro do TPS1, uma redução significativa de aproximadamente 50% no número de passageiros embarcando e desembarcando nas posições remotas e uma redução da ordem de 26% no número de aeronaves alocadas nas posições remotas. Estes resultados evidenciam, de forma inquestionável, a superioridade da solução de alocação gerada pelo modelo sobre aquela praticada pela INFRAERO.

Outra vantagem foi o tempo de processamento resultante da estratégia de divisão dos 757 vôos em grupos de 10 ou 20 vôos para as rodadas de busca da solução no programa. O tempo total de processamento (CPU) foi de 211 segundos. Apesar de sub-ótima, a solução resultou em ganhos significativos frente à solução real praticada pela INFRAERO. Esse resultado motiva a continuação da pesquisa, que agora deve se concentrar na oportunidade de utilização de *tabu search* para número maior de vôos.

Este mesmo problema de designação dos vôos aos *gates* foi, mais recentemente, implementado no solver CPLEX 10.1 e o tempo de processamento foi inferior a 10 segundos, para um plano de programação de vôos de uma semana (17/07/05 até 23/07/05). Portanto, se obteve um tempo de resposta muito rápido, aumentando a aplicabilidade do modelo nas operações em tempos reais,

tornando possível a reprogramação da designação dos vôos aos *gates* considerando as reais mudanças nos horários dos vôos (atrasos, cancelamentos e outros).

## 7. CONCLUSÃO

O modelo matemático de otimização para a alocação das aeronaves nos *gates*, com um estudo para o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos (AISP/GRU), apresentou-se eficiente nos 3 critérios analisados: distância média caminhada por passageiro dentro do terminal de passageiro; nº de passageiros dos vôos designados às posições remotas e nº de vôos alocados nas posições remotas.

A inovação do modelo foi a introdução de artifícios para tornar lineares as restrições do modelo matemático, permitindo resolver problemas de tamanhos reais. Outra estratégia interessante foi à divisão em grupo de vôos pequenos para rodadas de busca de solução. O estudo se concentra agora em outros métodos de solução, visando maior eficiência nas soluções de problemas reais, já tendo sido alcançado resultado ótimo para a programação de uma semana em tempo reduzido. Assim, o teste de utilização do modelo em tempo real junto ao operador no aeroporto poderá ser viabilizado e as duas soluções comparadas quando submetidas à mesma realidade operacional.

## REFERÊNCIAS

- AIRBUS 2003, **Global Market Forecast 2004-2023**. (disponível em <http://www.airbus.com>)
- Babic, Obrad, Teodorovic, Dusan e Tasic, Vojin (1984). Aircraft Stand Assignment to Minimize Walking. **Journal of Transportation Engineering**, 53-66.
- Bihr R. (1990) A conceptual solution to the aircraft gate assignment problem using 0-1 linear programming. **Computers & Industrial Engineering**, 19, 280-4.
- Bolat A. (2000) Procedures for providing robust gate assignments for arriving aircraft. European **Journal of the Operational Research**, 120, 63-80.
- Brazile R e K. Swigger (1988). An Airline Gate Assignment and Tracking Expert System. **Journal of IEEE Expert**, 3, 33-9.
- Cheng Y. (1998) Network-based simulation of aircraft at gates in airport terminals. **Journal of Transportation Engineering**, 124, 188-196.
- Ding H., A. Lim, B. Rodrigues e Y. Zhu (2005) The over-constrained airport gate assignment problem. **Computers & Operationas Research**, 32, 1867-1880.
- Dorndorf U., A. Drexl, Y. Nikulin e E. Pesch (2005) Flight gate scheduling: State-of-the-art and recent developments. **The International Journal of Management Science**;1-9.

Gosling G. (1990) Design of an expert system for aircraft gate assignment. **Transportation Research**, 24A, 59-69.

Gu Y. e C.A. Chung (1999) Genetic algorithm approach to aircraft gate reassignment problem. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, 125:384-9.

Haghani A e M. Chen (1998) Optimizing gate assignments at airport terminals. **Transportation Research**, 32A, 437-454.

ICAO Journal 2005, volume 60, número 5, 2005.

INFRAERO 2005, **Movimento Operacional Acumulado da REDE INFRAERO** (dados disponível no site <http://www.infraero.gov.br>).

Lopes, D. R. (1990) **Contribuição à modelagem do problema do planejamento da operação de pátios de aeronaves em aeroporto**. Tese de Doutorado apresentado á Escola Politécnica da USP, São Paulo.

Mangoubi, R. S. (1980) A Linear Programming Solution to the Gate Assignment Problem at Airport Terminals. Flight Transportation Laboratory Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts 02139, **FTL Report R80-1**.

Mangoubi R e D. Mathaisel (1985) Optimizing gate assignments at airport terminals. **Transportation Science**, 19, 173-88.

Yan S. e C.M. Huo (2001) Optimization of multiple objective gate assignments. **Transportation Research**, 35A, 413-32.

Yan S, C.Y. Shieh e M. Chen (2002) A simulation framework for evaluating airport gate assignments. **Transportation Research**, 36, 885-98.