

## AVALIAÇÃO DOS MOVIMENTOS AÉREOS NO AEROPORTO DO GALEÃO

### Íris Firmino Cardoso

Departamento de Engenharia de Produção,  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
[iriscardoso@gmail.com](mailto:iriscardoso@gmail.com)

### Fernanda M. P. Raupp

Departamento de Engenharia de Produção,  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
[fraupp@puc-rio.br](mailto:fraupp@puc-rio.br)

### Madiagne Diallo

Departamento de Engenharia de Produção,  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
[diallo@puc-rio.br](mailto:diallo@puc-rio.br)

### Resumo

O presente trabalho propõe o uso de simulação de eventos discretos para avaliar o desempenho do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Antônio Carlos Jobim (Galeão) no que se refere à movimentação de chegadas e de saídas de aeronaves, permitindo estimar o ponto de saturação do aeroporto, e, conseqüentemente, avaliar o nível de serviço sendo prestado. Dados históricos da Infraero, relativos à movimentação de aeronaves e à infraestrutura do aeroporto, foram usados no modelo integrado de simulação. Para um período do ano sem paralisações de operações triviais, resultados preliminares de experimentos numéricos com o modelo de simulação integrado, usando dados oficiais da Infraero, indicam que o aeroporto do Galeão já opera em atraso, conforme normas do *Metropolitan Transportation Commission*.

**Palavras-chave** Simulação; Aeroporto; Galeão

### Abstract

The present work proposes the use of simulation of discrete events to evaluate the performance of the International Airport of Rio de Janeiro Antonio Carlos Jobim (Galeão) concerning its aircraft movements of arrivals and departures, which allow us to estimate the saturation point of the airport, and, consequently, to evaluate the level of service being provided. For a period of the year without standstill, preliminary results of numerical experiments with the integrated simulation model, using the Infraero official data, indicate that the Galeão airport has already been operated with delays in accordance to the regulations of the *Metropolitan Transportation Commission*.

**Keywords** Simulation; Airport; Galeão

### 1 Introdução

Segundo a Infraero (2010), a movimentação de passageiros no Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim (Galeão) vem apresentando tendência de crescimento, saindo de 4,6 milhões de passageiros no ano de 2003 e alcançando 10,7 milhões ao final de 2008. Espera-se, portanto, que esse crescimento torne-se ainda mais significativo com a proximidade dos eventos Copa do Mundo FIFA em 2014 e Jogos Olímpicos em 2016. Diante disso, fica clara a importância de primeiramente avaliar o nível de serviço sendo prestado pelo aeroporto do Galeão a fim de propor posteriormente alterações em sua infraestrutura e em seus processos operacionais para atender satisfatoriamente essa demanda crescente.

A simulação tem sido uma técnica utilizada para auxiliar processos de tomada de decisão, abrangendo decisões de investimento em infraestrutura e na melhoria de operações, entre outras. Além de reduzir prejuízos causados por investimentos contestáveis, essa técnica da Pesquisa Operacional permite também reduzir o tempo de observação dos efeitos de decisões, visto que, com o auxílio do computador, pode-se simular em alguns minutos o comportamento de um processo ou sistema real. Muitos trabalhos da literatura já estudaram a importância da simulação como aliada em gerência de operações, em particular, destacam-se os seguintes trabalhos voltados para o estudo de processos ou sistemas aeroportuários.

Almeida (1998) avaliou o desempenho de componentes de terminais de passageiros em aeroportos, usando modelos de simulação como principal ferramenta.

Doshi e Moriyama (2002) estudaram métodos de calibração e aplicaram resultados de simulação no programa de desenvolvimento do Aeroporto Internacional de Toronto. Mais tarde, Nsakanda, Turcotte, Diaby (2004) aplicaram a técnica de simulação para avaliar e analisar operações de carga aérea nas novas instalações do mesmo aeroporto.

Ribeiro (2003) fez uso da simulação para identificar parâmetros e representar operações de pátio do aeroporto de Congonhas para análise do processo de atendimento das aeronaves e do impacto de cada variável no seu tempo total. Já Moser (2007) propôs um método de avaliação operacional de intervenções no lado aéreo de aeroportos fazendo uso do SIMMOD (*Airport and Airspace Simulation Model*) com aplicação no Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos.

Meng e Yang (2007) fazem uso da simulação para analisar o modelo de uma empilhadeira do sistema logístico de armazenamento de um aeroporto, e seus resultados indicam que a aplicação do controle padrão multi-velocidade para a logística do sistema de armazenagem tem uma grande racionalidade e viabilidade.

O presente trabalho propõe avaliar a movimentação aérea do aeroporto do Galeão através do desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos integrado, usando dados históricos, tanto de aterrissagem quanto de decolagem, coletados do *site* oficial da Infraero, com o principal objetivo de avaliar o nível de serviço sendo prestado. Serão estimadas distribuições de probabilidade que melhor representam os movimentos de aterrissagem e decolagem das aeronaves a fim de utilizá-las no modelo integrado de simulação, visando avaliar o ponto de saturação do Galeão.

Como mencionado, há vários estudos da literatura voltados para avaliação de desempenho de aeroportos através de simulação nos terminais de passageiros (ALMEIDA, 1998), nos processos de atendimento de aeronaves no pátio (RIBEIRO, 2003) e nas operações de carga aérea (NSAKANDA ET AL., 2004). Especificamente, quando se aborda de forma conjunta eventos de aterrissagem e de decolagem para avaliar o desempenho de aeroportos, tal como é a proposta desse trabalho, são citados, por exemplo, os trabalhos de Baik e Trani (2008) e de Khoury et al. (2007). Em oposição à simulação de eventos discretos proposta neste trabalho, o primeiro trabalho citado adota o princípio da simulação microscópica com base no

tempo para retratar a cinemática de cada aeronave, construindo um modelo determinístico capaz de representar o comportamento do conjunto de aeronaves de forma mais realista, que podem incluir comunicações entre controladores e pilotos. Semelhante à proposta deste trabalho, o segundo trabalho citado propõe um sistema de simulação de eventos discretos tipicamente usado na construção civil e com objetivos amplos, de modo a incorporar simultaneamente as operações de aterrissagem e de decolagem de um aeroporto e as benfeitorias realizadas em etapas. Porém, os modelos de simulação de chegadas e partidas dos aviões são distintos nesse sistema. Nesse sistema os movimentos aéreos foram estudados sob dois cenários distintos proporcionados pelas condições meteorológicas: controle visual e controle por instrumentos.

A contribuição do presente trabalho tem como foco fazer um diagnóstico do nível de serviço sendo prestado pelo Galeão através da análise dos resultados de um modelo de simulação de eventos discretos, que integra os movimentos de aterrissagem e decolagem das aeronaves. Acredita-se que, antes de partir para a análise de benfeitorias a serem potencialmente incorporadas no Galeão, o modelo de simulação deva ser confrontado com a realidade, mesmo que hipóteses simplificadoras tenham sido consideradas.

### 1.1 Metodologia de pesquisa

O presente trabalho segue uma pesquisa quantitativa sobre o processo de modelagem e simulação de um sistema real de movimentos aéreos do Galeão, com coleta de dados realizada através em um *site* oficial da Infraero, visando obter um indicador para o nível de serviço.

Por Serapioni (2000), uma investigação do tipo quantitativa tem como objetivo trazer à luz dados, indicadores e tendências observáveis.

De acordo com Miguel (2007), este trabalho vem corroborar com a afirmativa de que as metodologias de pesquisa mais utilizadas em engenharia de produção são do tipo *survey*, modelagem e simulação, pesquisa-ação e estudo(s) de caso(s).

O presente trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 1, contextualizamos o problema e abordamos a técnica a ser utilizada para alcançar os objetivos do estudo, assim como a metodologia de pesquisa utilizada. Na Seção 2, são dadas informações sobre a Infraero, o sistema aeroportuário brasileiro, e, mais detalhadamente, sobre o Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (Galeão), as quais serão usadas no modelo integrado de simulação. Na Seção 3, apresentamos o procedimento de coleta dos dados e a validação dos mesmos. Na Seção 4, introduzimos e validamos o modelo integrado de simulação. Experimentos computacionais com o modelo de simulação são apresentados na Seção 5. Comentários finais estão na Seção 6.

## 2 Sistema aeroportuário brasileiro e Galeão

Nesta seção são introduzidas algumas informações retiradas do *site* da Infraero sobre o sistema aeroportuário brasileiro e sobre o Galeão, incluindo terminais de passageiros e de carga. Essas informações serão usadas como parâmetros no modelo integrado de simulação a ser proposto.

Vinculada ao Ministério da Defesa, a empresa pública Infraero administra desde grandes aeroportos brasileiros até alguns tão pequenos que realizam exclusivamente operações de soberania nacional. A Infraero administra ao todo 67 aeroportos, 69 grupamentos de navegação aérea e 51 unidades técnicas de aeronavegação, além de 34 terminais de logística de carga. Embora a Infraero somente administre 67 aeroportos, representando apenas 9,09% num total de 737 aeródromos públicos do Brasil, estes concentram aproximadamente 97% do movimento do transporte aéreo regular do Brasil, o equivalente a 2 milhões de pousos e decolagens de aeronaves nacionais e estrangeiras, transportando cerca de 113 milhões de passageiros.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

A Infraero é responsável pela infraestrutura aeroportuária brasileira, que é mantida e melhorada com receita própria, gerada principalmente pela armazenagem e por capatazia de carga aérea, concessão de espaços comerciais nos aeroportos, tarifas de embarque, pouso e permanência, e prestação de serviços de comunicação e auxílios à navegação aérea.

Localizado na Ilha do Governador a cerca de 2km da capital, o Galeão é hoje atendido pelas principais vias expressas do Rio de Janeiro. Sua história começa em 1924 com a instalação da Escola de Aviação, cujo acesso realizava-se através de lancha. Somente a partir de 1945, com a substituição dos hidroaviões por aeronaves, o Galeão passou a ser oficialmente Aeroporto Internacional, porém com acesso ainda precário. O Terminal 1 de embarque e desembarque de passageiros somente foi inaugurado em 1977, enquanto que o Terminal 2 foi inaugurado vinte e dois anos depois.

O Galeão possui dois sistemas de pistas com operações de pousos e decolagens não simultâneas. São 167 balcões de *check in*, 35 esteiras de bagagens, 23 pontes de embarque e 23 posições remotas. Ao todo 20 empresas aéreas prestam serviços nos dois terminais, atendendo um movimento diário de 30 mil passageiros. Ele tem a maior pista de pouso e decolagem do Brasil e conta com um dos maiores e mais modernos Terminais de Logística de Cargas do Continente.

Atualmente, são realizadas no Galeão operações de movimentação domésticas/internacionais, regulares ou não regulares de passageiros, de carga e de correio, diurnas ou noturnas; movimentações não regulares de empresas de táxi aéreo; e voos de aviação geral.

### 2.1 Terminal de passageiros

O Terminal de Passageiros (TPS) é a área do aeroporto destinada à circulação dos passageiros. Nele são executadas as etapas necessárias para embarque ou desembarque. Os passageiros que embarcam, por exemplo, compram/retiram suas passagens, fazem o *check in*, despacham as bagagens e seguem para o portão de embarque; já os passageiros que desembarcam passam pela vistoria da imigração, caso necessário, prosseguem para as esteiras de distribuição de bagagem para retirar as bagagens despachadas e passam, quando solicitados, pela vistoria alfandegária.

Tabela 1: Dados relativos aos terminais de passageiros do Galeão

	TPS 1	TPS2
<b>Balcões de <i>check in</i></b>	115	56
<b>Carrinhos de bagagem no</b>		
Saguão	500	500
Saguão de distribuição de bagagens	1000	1000
<b>Cadeiras no</b>		
Saguão de embarque	192	272
Sala pré-embarque	1904	1706
<b>Esteiras de bagagens no embarque</b>	14	5
<b>Esteiras de distribuição bagagens no desembarque</b>	17	17
<b>Portões de embarque (total)</b>	13	19
Acesso a posições remotas	5	4
<b>Portões de desembarque</b>	2	2
<b>Capacidade da sala de embarque (PAX/h)</b>	9000	3875
<b>Área da sala de embarque (m<sup>2</sup>)</b>	7200	3100
<b>Capacidade da sala de desembarque (PAX/h)</b>	7079	10643
<b>Área da sala de desembarque (m<sup>2</sup>)</b>	9910	14900
<b>Capacidade PAX/ano</b>	7000000	8000000
<b>Área total dos terminais (m<sup>2</sup>)</b>	147834	132847

Fonte: Gomes e Noutel (2005)

Há vários pontos a serem considerados na avaliação do nível de serviço sendo prestado, porém, neste trabalho, vamos considerar como relevantes os serviços realizados nos terminais

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

de passageiros ou sações de embarque e de desembarque, pois o tempo que um passageiro permanece nele está diretamente associado à pontualidade ou atraso dos voos e a frequência dos mesmos.

No Galeão existem dois terminais de passageiros. Por Gomes e Noutel (2005), informações sobre a infraestrutura dos TPSs do Galeão estão resumidas na Tabela 1. (PAX/h é uma medida universal que significa passageiros por hora.)

### 2.2 Terminal de carga

O Galeão possui um Terminal de Carga Aérea Internacional (TECA), constituído por pátio exclusivo para aeronaves, instalações para as empresas aéreas e para a Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos (ECT), além de dois grandes terminais de carga da Infraero.

The screenshot shows the 'Vôos Online' website interface. At the top, there is a yellow header with 'Ministério da Defesa' and 'Destaque do governo'. Below this is the 'INFRAERO AEROPORTOS' logo and a navigation bar. A large image shows people boarding an aircraft. To the right of the image is an 'INFORMAÇÕES' box with details for Galeão Airport: 'Aeroporto Internacional Do Rio de Janeiro/Galeão - Antonio Carlos Jobim', 'Distância do centro: 20 km', 'Telefone: (21) 3398-5050', and 'Endereço: Av. 20 de Janeiro, s/nº, Ilha do Governador, Rio de Janeiro - RJ'. Below the image is a search bar with 'RIO DE JANEIRO - GALEAO-RJ' selected and a 'PESQUISA AVANÇADA' button. To the right of the search bar is a 'VÔOS ONLINE' section with a 'Deseja Atualização Automática?' checkbox checked 'Sim'. Below this is a table of flight arrivals and departures for Galeão Airport.

Cia Aérea	Vôo	Destino	Data	Previsto	Confirmado	Escalas	Status	Detalhes
GOL	07654	Buenos Aires -	01/02	22:30	00:18		Finalizado	✓
TAM	08054	Paris -	01/02	23:50	00:49		Finalizado	✓
GOL	01570	Teresina - PI	02/02	01:20	01:45	GRU - Sao Paulo - Guarulhos-SP	Finalizado	✓
GOL	01744	Recife - PE	02/02	02:45	02:52	GRU - Sao Paulo - Guarulhos-SP	Finalizado	✓
GOL	01743	Porto Alegre - RS	02/02	04:37	04:31		Finalizado	✓
GOL	01571	Londrina - PR	02/02	05:00	04:50		Finalizado	✓
GOL	01383	S. Paulo-Congonhas - SP	02/02	05:00	05:02		Finalizado	✓
GOL	01093	S. Paulo-Congonhas - SP	02/02	05:10	05:13		Finalizado	✓
GOL	01650	Goiânia - GO	02/02	05:50	05:45		Finalizado	✓
GOL	01968	Brasília - DF	02/02	05:59	05:55		Finalizado	✓
WEBJET	06734	Fortaleza - CE	02/02	06:00	06:04		Finalizado	✓
WEBJET	06772	S. Paulo-Guarulhos - SP	02/02	06:03	06:00		Finalizado	✓
TAM	08082	Nova York -	02/02	06:05	06:19		Finalizado	✓
TAM	08055	S. Paulo-Guarulhos - SP	02/02	06:05	06:19		Finalizado	✓

Figura 1: Vôos Online. Fonte: Infraero (2010)

Os ambientes no TECA são separados de acordo com a temperatura exigida para o transporte da carga. As instalações destinadas a cargas vivas são consideradas as mais adequadas do Brasil. O Galeão também é o único aeroporto do país que mantém estrutura independente para cargas perigosas. A carga radioativa é destinada a um *bunker*, o qual é revestido com chumbo e equipado com medidores de riscos de contaminação.

### 3 Coleta e validação de dados

Para a realização desse estudo, dados sobre chegadas e partidas de aeronaves no aeroporto do Galeão foram coletados do *link* “Vôos Online” do *site* da Infraero, ilustrado na Figura 1. Nele, informações sobre horários previstos e efetivos de chegadas e de partidas dos aviões foram obtidas. Também foram coletadas informações sobre origem/destino de cada voo, diferenciando cada voo entre doméstico e internacional, bem como o terminal utilizado. Informações relativas aos portões de embarque e de desembarque foram descartadas.

Devido à atualização diária de informações sobre voos no *site* da Infraero, os dados sobre voos foram coletados diariamente por um período de 13 dias seguidos, precisamente, de 28 de janeiro a 9 de fevereiro de 2010. Nesse esquema de atualização diária do *site* próxima a meia noite, algumas observações sobre os últimos voos de um dia somente podiam ser coletadas nas primeiras horas do dia seguinte. O máximo de informações completas sobre os voos eram coletadas, porém algumas informações referentes aos últimos voos finalizados foram perdidas devido à forma com que o *site* era atualizado. No *site* da Infraero os dados diários dos voos não são guardados.

Organizados segundo *status* do voo (coluna 8 do *link* “Voos Online”), os dados coletados do *site* da Infraero ao final do período de monitoramento são apresentados na Tabela 2. É importante mencionar que durante esse período não ocorreu paralisação de operações triviais por fatores climáticos ou outro fator.

Tabela 2: Dados coletados num período de 13 dias corridos segundo *status* do Voo

Status do voo	Chegadas		Partidas		Total	
	N	%	N	%	N	%
Aeronave decolando	-	-	19	0,96	19	0,48
Aeronave no pátio	24	1,23	-	-	24	0,61
Atrasado	1	0,05	2	0,10	3	0,08
Atraso inferior a 1h	2	0,10	-	-	2	0,05
Atraso inferior a 4h	1	0,05	-	-	1	0,03
Cancelado	32	1,64	47	2,37	79	2,01
Confirmado	37	1,90	19	0,96	56	1,42
Despacho aberto	-	-	13	0,65	13	0,33
Embarque imediato	-	-	4	0,20	4	0,10
Embarque próximo	-	-	1	0,05	1	0,03
Finalizado	1749	89,83	1750	88,07	3499	88,94
Previsto	101	5,19	131	6,59	232	5,90
Última chamada	-	-	1	0,05	1	0,03
<b>Total geral</b>	<b>1947</b>	<b>100</b>	<b>1987</b>	<b>100</b>	<b>3934</b>	<b>100</b>

Durante a coleta de dados, foi observado que para alguns voos atrasados o *status* Confirmado (coluna 6 do *link* “Vôos Online”) não possuía valores coerentes, isto é, a hora prevista do movimento de decolagem ou aterrissagem estava igual a hora confirmada. Para evitar a perda de 7,8% (307) do total dos dados coletados, os mesmos foram ajustados, partindo da premissa de que esse montante não influenciaria na avaliação de desempenho médio do Galeão. A transformação usada para ajustar esses dados é explicada a seguir.

Denote por  $I$  o conjunto das observações incoerentes dos *status* dos voos Despacho Aberto, Embarque Imediato, Embarque Próximo, Previsto e Última Chamada. Denote por  $J$  o conjunto das observações coerentes para *status* dos voos. As observações incoerentes foram ajustadas aplicando a seguinte expressão:

$$\tilde{x}_i = x_i + \sum_{j \in J} \frac{a_j}{n} \quad \forall i \in I,$$

onde  $\tilde{x}_i$  é a hora confirmada proposta para substituir a hora confirmada igual a hora prevista  $x_i$ ,  $a_j$  é o atraso do voo  $j$  com dados completos, e  $n$  é o total de observações em  $J$ . Após os ajustes, observamos no Quadro 1 os resultados preliminares com relação ao atraso médio e desvio-padrão dos voos referente ao período de coleta de dados.

Quadro 1: Estatística dos voos durante o período de coleta de dados

Dados completos	Chegadas	Partidas	Total
<b>Número de voos</b>	1947	1987	3934
<b>Atraso médio (h:min:s)</b>	00:04:52	00:06:29	00:05:44
<b>Desvio-padrão (h:min:s)</b>	01:08:18	00:23:11	00:50:50

### 3.1 Avaliação preliminar do nível de serviço

Tal como Moser (2007), para avaliar preliminarmente o nível de serviço do Galeão, durante o período de 28 de janeiro a 9 de fevereiro 2010, tomou-se por base o relatório da *Metropolitan Transportation Commission* (MTC), que classifica o nível de serviço em função dos atrasos médios dos voos no Quadro 2. Vale observar que, mesmo sendo um período de férias escolares, ele estava afastado do feriado de ano novo e do carnaval. Ainda, observa-se que durante esse período não houve paralisações de operações triviais no Galeão.

Calculados os atrasos médios dos voos do Galeão no período considerado, o nível de serviço sendo prestado pelo Galeão, segundo a MTC, é revelado no Quadro 3. É interessante observar que os atrasos médios dos voos podem sofrer influência dos atrasos médios dos voos realizados no dia anterior.

Quadro 2: Classificação do nível de serviço segundo MTC

Atraso médio (min)	Nível de serviço
<b>0 a 3</b>	fluxo livre
<b>3 a 5</b>	aceitável
<b>5 a 7</b>	congestionado
<b>7 a 9</b>	seriamente congestionado
<b>mais de 9</b>	saturado

Por exemplo, o atraso médio nas decolagens/aterriçagens do dia 9 de fevereiro é mais afetado pelos atrasos ocorridos no dia anterior, pois existe Fluxo Livre na primeira metade do dia, cujo efeito foi derivado dia anterior. Por outro lado, durante todo o dia 2 de fevereiro, o nível de serviço ficou Congestionado por influência do fluxo do dia anterior que terminou Seriamente Congestionado. Percebe-se também que não há evidências para afirmar que um determinado dia da semana é mais congestionado que qualquer outro dia.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Quadro 3: Indicador preliminar para o nível de serviço do Galeão segundo MCT

Data	Dia da semana	Manhã	Final da Manhã	Meio-Dia	Começo da Tarde	Tarde	Noite
28/jan	Quinta-feira	Livre					
29/jan	Sexta-feira	Aceitável	Congestionado				
30/jan	Sábado	Congestionado	Aceitável		Congestionado		
31/jan	Domingo	Congestionado		Saturado	Congestionado		
1/fev	Segunda-feira	Congestionado	Aceitável		Congestionado		Seramente Congestionado
2/fev	Terça-feira	Congestionado					
3/fev	Quarta-feira	Saturado					
4/fev	Quinta-feira	Aceitável		Congestionado			Seramente Congestionado
5/fev	Sexta-feira	Congestionado	Livre	Congestionado			
6/fev	Sábado	Livre		Aceitável			
7/fev	Domingo	Saturado	Seramente Congestionado				
8/fev	Segunda-feira	Livre					
9/fev	Terça-feira	Livre			Congestionado	Seramente Congestionado	

### 4 Modelo de simulação e validação

O modelo de simulação de eventos discretos dos movimentos aéreos no aeroporto do Galeão será desenvolvido visando à avaliação do nível do serviço. Vamos considerar que os serviços a serem executados são pouso de aviões/desembarque de passageiros, espera/parada no pátio e decolagem de aviões/embarque de passageiros. Dependendo da programação do voo, a etapa intermediária pode ser eliminada.

Com relação aos serviços de embarque e desembarque de passageiros, considerou-se como capacidade de atendimento do Galeão ao total de “Portões de embarque (total)” mais “Portões de desembarque”, conforme dados de infraestrutura dispostos na Tabela 1. Conseqüentemente, o número de vagas disponíveis para as aeronaves no pátio do Galeão foi considerado como sendo igual a esse total neste modelo.

No modelo de simulação aqui proposto, considerou-se como hipótese simplificadora a seguinte regra de fila “o primeiro avião a chegar ao aeroporto será o primeiro a sair”, denotada por FIFO. Essa regra garante que somente um único avião utiliza a pista para decolar ou pousar no Galeão, como de fato ocorre. Além disso, essa regra vai de encontro à necessidade das companhias aéreas em reduzir o tempo em solo de seus aviões a fim de minimizarem seus custos. Quando um terminal estiver lotado, o avião aguardará no pátio até a liberação de uma vaga para proceder ao desembarque ou embarque de passageiros.

#### 4.1 Modelagem do Sistema Real

A seguir são detalhadas as etapas para a construção do modelo integrado de simulação dos movimentos aéreos de pouso e de decolagem do Galeão, que será usado para estimar o ponto de saturação do aeroporto.



Quanto maior o nível de complexidade de um sistema real, maior a necessidade de simplificações nas suposições do modelo que o representa para que obtenhamos um modelo tratável. Por isso, o modelo proposto está restrito aos serviços aeroportuários básicos, tais como, desembarque, espera no pátio e embarque. Somente uma pista foi considerada no modelo de simulação. Essa simplificação é possível, visto que operações de decolagem e de aterrissagem não são realizadas simultaneamente no Galeão até o presente momento.

A seguir são definidos outros aspectos relevantes do modelo.

Locais:

- Pista,
- Desembarque nos Terminais 1 e 2,
- Embarque nos Terminais 1 e 2,
- Estacionamento.

Entidades:

- Chegada,
- Saída.

Atributos:

- aTerminal – Terminal para o qual o avião se dirige,
- aSentido – Sentido que o avião deve seguir: 1- Terminal de embarque de passageiros, 2- Estacionamento, 3- Terminal de desembarque de passageiros.

Variáveis:

- vChegada – Hora em que o avião entrou no sistema;
- vSaída – Hora em que o avião saiu do sistema.

Uma etapa importante do processo de modelagem é estabelecer o padrão de chegadas e de saídas dos aviões no aeroporto. Para isso, foram selecionados os dados dos voos do dia 28 de janeiro, visto que neste dia a média de movimentos aéreos foi igual a média de movimentos correspondente a uma semana, com fluxo livre em todas as horas. Após a análise dos dados sobre os voos, as distribuições de probabilidade das chegadas e das partidas dos aviões foram estudadas em duas bases de dados distintas para cada terminal. Como existia grande variação entre os intervalos de tempo, os dados de cada base foram divididos em grupos. Com auxílio do *software* de simulação ProModel (2012), a cada grupo de dados foi associada uma distribuição do tipo Normal com média e desvio-padrão calculados em função do intervalo de tempo entre chegadas ou partidas dos voos. No Quadro 4, coluna 6, são apresentadas as estimativas das distribuições de probabilidade associadas aos grupos de dados de cada base e de cada terminal para chegadas e partidas de aviões. Nas linhas onde o *software* não foi capaz de indicar uma única distribuição de probabilidade, são apresentadas as frequências dos dados no grupo; nas demais linhas as médias e desvios-padrões das distribuições normais são dados em minutos. Somente o horário da chegada da primeira aeronave foi fixado.

Cada avião que chega ao Galeão, ou seja, cada aterrissagem autorizada pela entidade Chegada recebe primeiramente o atributo aTerminal, que define o terminal destino de desembarque. Ao chegar ao local Pista, o avião se dirige para o terminal de destino. Se este estiver vago, o avião recebe o atributo aSentido=1. Se o terminal de destino encontra-se lotado, então o avião recebe o atributo aSentido=2, e dirige-se ao local Estacionamento onde aguardará por uma vaga no terminal de destino. Mais tarde, ao terminar o processo de desembarque o avião recebe o atributo aSentido=3 e se dirige ao pátio e aguarda até obter autorização para iniciar o embarque de passageiros. A entidade Chegada segue a distribuição de probabilidade de chegadas dos voos de acordo com o terminal associado.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Quadro 4 Estimativas das distribuições de probabilidade de chegadas e partidas

Entidade	Local	Quantidade	Primeira Vez	Ocorrências	Frequência	Lógica
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 12:15 AM	5	N(197,7)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 12:30 AM	5	N(331,12)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 12:50 AM	5	N(316,16)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 12:40 AM	5	N(310,4)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 01:50 AM	9	N(160,4)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 02:05 AM	5	N(275,3)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 04:55 AM	11	N(37,5)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 05:55 AM	5	N(73,9)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 09:10 AM	7	N(4,1)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 07:10 AM	11	N(88,8)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 07:16 AM	5	N(234,4)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 07:30 AM	5	N(225,5)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 07:30 AM	4	N(16,16)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 09:30 AM	4	N(243,10)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 08:19 AM	3	N(335,2)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 08:50 AM	4	N(301,6)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 09:40 AM	4	N(276,5)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 10:00 AM	4	N(231,7)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 08:59 AM	3	N(319,16)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	2	Thu, Jan 28 2010 @ 10:20 AM	4	N(261,16)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 04:58 PM	4	N(2,2)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	4	Thu, Jan 28 2010 @ 06:00 PM	1	1	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 08:09 PM	4	N(38,10)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 02:05 PM	5	N(26,20)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	2	Thu, Jan 28 2010 @ 08:15 PM	3	N(46,2)	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 05:10 PM	3	N(127,6)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	2	Thu, Jan 28 2010 @ 08:15 PM	1	1	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 09:33 PM	1	1	aTerminal = 1
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 07:20 PM	12	N(11,10)	aTerminal = 2
Aviao	Chegada	1	Thu, Jan 28 2010 @ 10:35 PM	1	1	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 01:20 AM	14	N(100,9)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 09:30 AM	16	N(7,7)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	2	Thu, Jan 28 2010 @ 05:00 AM	5	N(251,10)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 01:50 AM	7	N(106,6)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 06:00 AM	12	N(34,7)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 06:05 AM	6	N(69,14)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 06:05 AM	9	N(133,15)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 12:00 PM	4	N(183,5)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 06:40 PM	11	N(30,11)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 03:20 PM	6	N(16,11)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 08:50 AM	3	N(12,2)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 05:10 AM	8	N(18,18)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 12:25 PM	3	N(325,2)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 07:31 PM	4	N(79,8)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 10:40 AM	3	N(282,2)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	3	Thu, Jan 28 2010 @ 07:35 PM	4	N(80,13)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 07:44 PM	3	N(82,1)	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 03:25 PM	4	N(16,13)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 05:55 PM	6	N(8,6)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 09:06 PM	2	66	aTerminal = 1
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 08:29 PM	6	N(7,5)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 10:00 PM	12	N(5,5)	aTerminal = 2
FechamentoPortas	Embarque	1	Thu, Jan 28 2010 @ 10:55 PM	1	1	aTerminal = 1

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

O avião no pátio com atributo  $aSentido=3$  iniciará o embarque de passageiros no terminal de desembarque já assinalado por ocasião de sua chegada. Esse processo é controlado pela entidade Saída. O avião somente dirige-se ao terminal de embarque caso ele esteja vago, caso contrário ele aguarda no estacionamento até a liberação de uma vaga no terminal de embarque. A entidade Saída segue a distribuição de probabilidade de partida dos voos, garantindo que os aviões saiam do Galeão de acordo com a programação dos voos de partida do dia corrente.

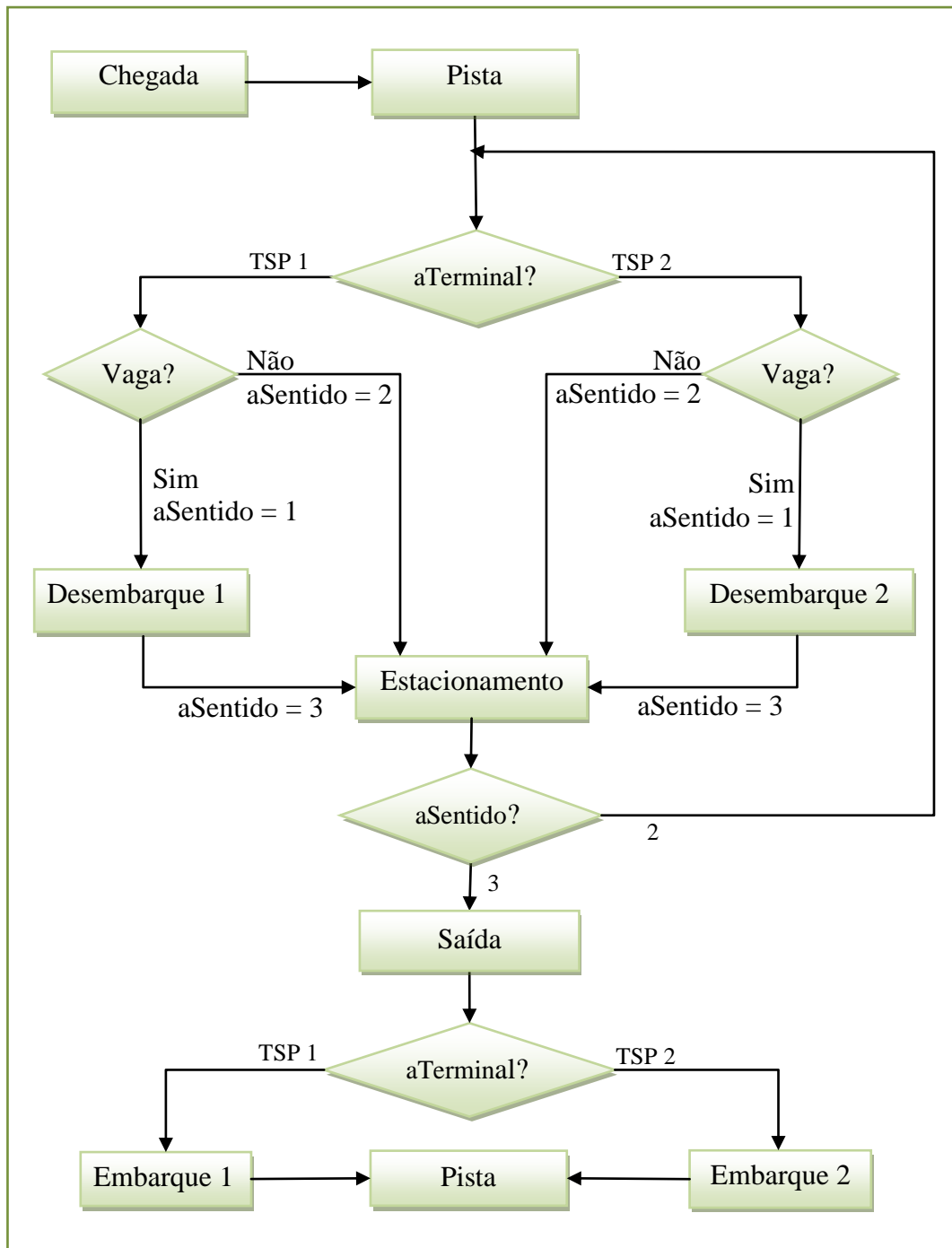


Figura 2: Fluxograma representativo do modelo de simulação integrado

Repare que no Estacionamento há dois tipos de avião: aqueles que já desembarcaram passageiros e aguardam o momento para embarcar novos passageiros, e aqueles que aguardam por uma vaga no terminal para desembarcar passageiros. Observa-se que a integração dos movimentos de chegada e de saída dos aviões num mesmo modelo de simulação foi possível quando se considerou que o procedimento de embarcar passageiros fosse iniciado para um avião que aguardava no pátio, já que o *software* não permite especificar os horários de partidas na entidade Chegada.

As variáveis vChegada e vSaída foram criadas com o objetivo de coletar a hora em que as entidades chegam e saem do aeroporto, respectivamente. No momento em que um avião aterrissa o horário do relógio do *software* é registrado na variável vChegada, e, quando o avião decola o horário do relógio do *software* é registrado na variável vSaída. Dessa forma, os atrasos registrados pelo modelo de simulação serão dados pela diferença entre o horário previsto para o voo e o horário contido nas variáveis em questão. Neste trabalho, não foram considerados os tempos dos trajetos dos aviões de terminais para estacionamento e vice-versa.

Embora Embarques 1 e 2 ocupem o mesmo espaço que os Desembarques 1 e 2, respectivamente, foi necessário criar uma distinção entre eles no modelo de simulação para garantir que um avião realize todos os processos antes de sair do aeroporto. A Figura 2 apresenta um fluxograma do modelo de simulação que integra os três grandes processos: desembarque de passageiros, espera no estacionamento, embarque de novos passageiros.

#### 4.2 Validação do modelo

A fim de validar o modelo de simulação, vamos considerar o tempo de simulação de 24h. Para isso, foram utilizados os dados dos voos do dia 28 de janeiro de 2010 para estimar as distribuições de chegadas e de partidas de aeronaves no Galeão. Além de ter apresentado fluxo livre (Quadro 3), nesse dia o número de movimentos aéreos coincidiu com a média de movimentos diários observada no período original, o que permite medir a proximidade do modelo integrado de simulação com relação ao sistema real. Os voos desse dia estão classificados conforme Quadro 5.

Quadro 5: Voos do dia 28 de janeiro de 2010

Voos	Terminal 1	Terminal 2
<b>chegadas</b>	92	63
<b>partidas</b>	92	63
<b>Total</b>	184	126

Devido à inexistência de um padrão único na movimentação aérea no Galeão no dia 28 de janeiro de 2008, foram utilizadas as estimativas de distribuição de probabilidade de chegadas e de partidas para cada terminal apresentadas no Quadro 4.

A validação do modelo de simulação é realizada via regressão linear, a qual avalia a proximidade dos resultados da simulação com relação aos dados dos voos observados. O ideal é que a fração de dados explicados ( $R^2$ ) pela regressão linear apresente valor próximo de 1, o que indica o ajuste perfeito entre os dados coletados e o modelo de simulação; que o Coeficiente Linear seja bem próximo de zero, significando que, por exemplo, um voo originalmente observado às 00:00h será gerado às 00:00h pelo modelo de simulação; e que o Coeficiente Angular seja bem próximo de 1, indicando a relação direta entre os dados dos voos e os voos gerados pela simulação.

Com o auxílio do *software* estatístico SPSS (Willis, 1969) analisou-se a proximidade dos dados observados contra os resultados da simulação referente ao dia de 28 de janeiro, a qual é

resumida no Quadro 6. Resultados da regressão linear indicam que o modelo de simulação dos movimentos aéreos do Galeão mimetiza o sistema real estudado, validando o modelo proposto.

Quadro 6: Resultados da regressão linear por SPSS

Resultados	Chegadas	Partidas
<b>Coefficiente angular</b>	0,99892	0,99960
<b>Coefficiente linear</b>	0,00000	0,00000
<b>Significância</b>	0,00000	0,00000
<b>R<sup>2</sup></b>	0,99782	0,99919

## 5 Resultados

Executada, em geral, em ambiente computacional com o auxílio de um *software*, a simulação de eventos discretos gera amostras representativas de um sistema real que serão analisadas para avaliar seu desempenho.

É importante destacar que fatores como condições iniciais, amplitude do período de execução e precisão do próprio modelo interferem na qualidade dos resultados da simulação. Alguns *softwares* de simulação, tal como ProModel (2012), versão 7.0.0.191 de janeiro de 2006, que foi utilizado neste estudo, dispõem de ferramentas que minimizam o impacto desses fatores. Na Figura 3, a partir de uma imagem do Galeão, são definidos os Locais, áreas fixas onde são executados os processos, no menu de configurações do software ProModel.

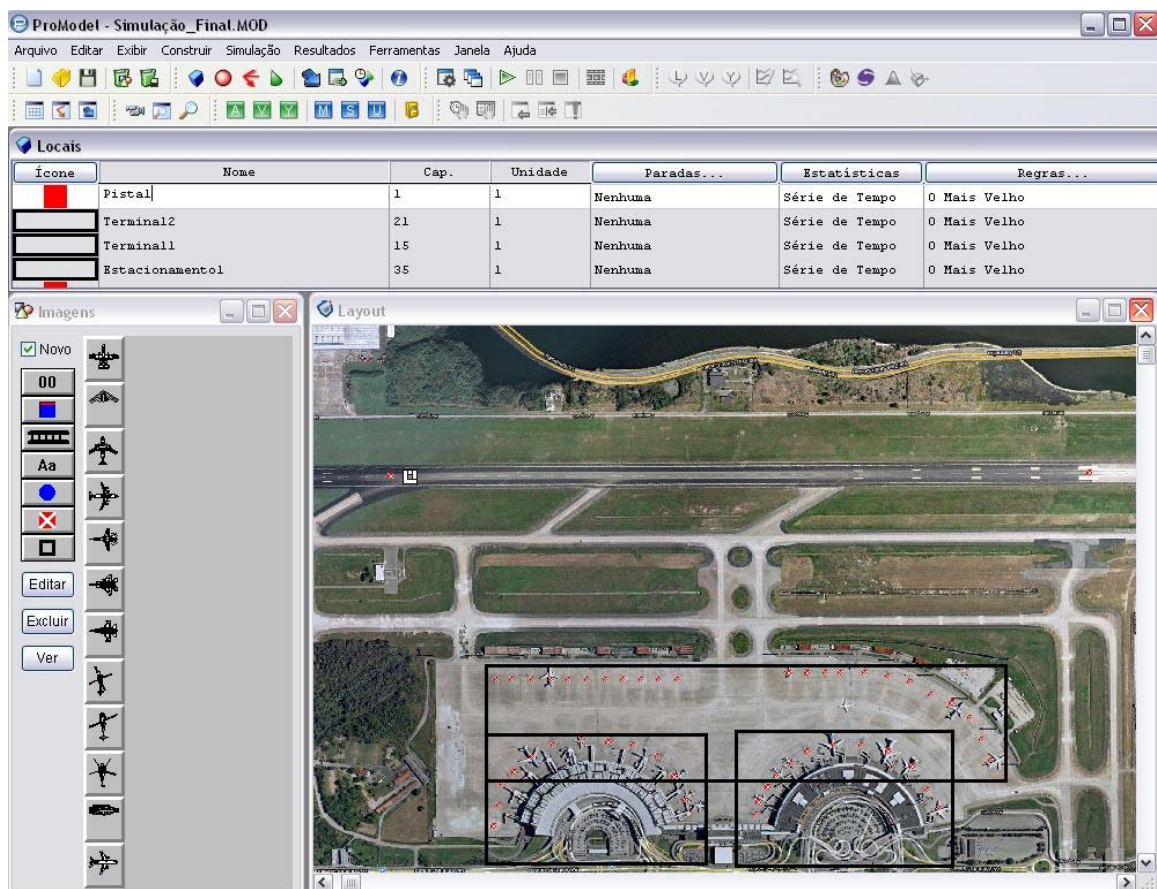


Figura 3: Definição de Locais no menu de configurações do software ProModel

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Estendendo o tempo de simulação para 288h (12 dias consecutivos), os atrasos médios dos voos resultantes, já classificados de acordo com a MTC, estão resumidos no Quadro 7. Como pode ser observado, o nível de serviço do Galeão dado pela simulação apresentou fluxo livre somente no primeiro dia, os dois dias seguintes obtiveram fluxo aceitável (atrasos médios entre 3 e 5 minutos). O quarto e décimo dias e a primeira metade do décimo primeiro dia apresentaram média de atrasos dos voos entre 5 e 7 minutos. O quinto dia iniciou com fluxo saturado (atraso médio superior a 9 minutos), e de sua segunda metade até o final do sexto dia, o atraso médio estimado encontrou-se entre 7 e 9 minutos. Durante a primeira metade do quinto dia e o sétimo dia, o nível de serviço do Galeão esteve crítico de acordo com a MTC, pois os atrasos médios foram superiores a 9 minutos.

Analisando os resultados do Quadro 7, observa-se que os reflexos da saturação do fluxo no sétimo dia foram sentidos nos dias seguintes até o décimo primeiro dia da simulação. Bastou um evento acontecer com prejuízo para o nível de serviço no sétimo dia, para que o nível de serviço, que já era Seriamente Congestionado no dia anterior, ficasse Saturado. Isso indica que um maior esforço por parte da Infraero deva ser feito para que as operações sejam reestabelecidas o mais rápido possível para um nível de serviço aceitável.

Percebe-se também que não há evidências para afirmar que um determinado dia da semana é mais congestionado que qualquer outro dia.

Quadro 7: Resultados da simulação para o nível de serviço segundo MTC

Dia	1ª metade do dia	2ª metade do dia
1	Livre	
2	Aceitável	
3	Aceitável	
4	Congestionado	
5	Saturado	Seriamente Congestionado
6	Seriamente Congestionado	
7	Saturado	
8	Seriamente Congestionado	
9	Seriamente Congestionado	
10	Congestionado	
11	Congestionado	Aceitável
12	Aceitável	

## 6 Conclusões

Realizar modificações de infraestrutura sem qualquer garantia de que essas possam oferecer algum tipo de benefício tangível ou intangível, certamente, é um aspecto a ser evitado pelos tomadores de decisão de uma organização.

Com a futura realização de eventos esportivos de grande porte no Rio de Janeiro, as atenções se voltam para a logística de operações, principalmente para os aeroportos, questionando suas capacidades de atendimento satisfatório em face de um aumento esperado da demanda.

A contribuição do presente trabalho tem como foco fazer um diagnóstico do nível de serviço sendo prestado pelo Galeão através da análise dos resultados de um modelo de simulação de eventos discretos, que integra os movimentos de aterrissagem e decolagem das aeronaves.

Para avaliar o atual nível de serviço do Galeão de acordo com o relatório da MTC, foi necessário coletar dados no *site* da Infraero relativos à hora prevista de aterrissagem/decolagem de cada voo e à hora em que cada movimento foi finalizado. Porém, os intervalos de atualização do servidor prejudicaram a coleta integral dos dados em série de tempo. Para

contornar tal dificuldade, algumas observações dos voos foram ajustadas de modo a evitar a perda total.

Como pousos e decolagens em um aeroporto são programados sem um padrão em específico, foram propostas mais de uma distribuição de probabilidade para simular as chegadas e as partidas das aeronaves no modelo de simulação, para cada terminal existente, a fim de melhor representar o sistema real.

O modelo integrado de simulação proposto representa a realidade do Galeão sem considerar fatores externos, isto é, ele não é sensível a mudanças climáticas, existência de falhas mecânicas em aeronaves, presença de feriados ou quaisquer outros fatores que possam influenciar diretamente a movimentação de aeronaves. Mesmo assim, os resultados do modelo apontam dificuldades no fluxo das aeronaves semelhantes às observadas diretamente dos dados coletados dos voos, pois existem dias com saturação no fluxo de aeronaves, ou seja, dias em que atrasos médios no pouso e decolagem de aeronaves são superiores a nove minutos.

Resultados da validação do modelo de simulação mostraram que o modelo é capaz de fornecer adequadamente o padrão de chegadas e de saídas de aeronaves e de representar os processos básicos de desembarque, espera, e decolagem do Galeão. Ainda, a validação do modelo mostrou que o ajuste feito nos dados coletados incompletos foi adequado.

Os resultados da simulação mostram que a infraestrutura atual do aeroporto não será capaz de atender satisfatoriamente a demanda crescente por seus serviços, apontando para necessidade de realização de investimentos.

Finalmente, como futuro trabalho, propomos uma análise do nível de serviço do Galeão considerando diferentes cenários com introdução de benfeitorias em potencial com relação à infraestrutura atual.

### REFERÊNCIAS

Almeida, P. M. S. (1998). Utilização de Simulação na Análise de Componentes de Terminais de Passageiros de Aeroportos Brasileiros. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeroportuária, Instituto de Tecnologia da Aeronáutica, São José dos Campos, SP.

Baik, H. & Trani, A.A. (2008). *Framework of a Time-Based Simulation Model for the Analysis of Airfield Operations*. Journal of Transportation Engineering, v. 134, n. 10, p. 397-413.

Doshi, N. & Moriyama, R. (2002). *Application of simulation models in airport facility design*. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, p.1725-1730, 8 a 11 de dezembro.

Gomes, A. F. & Noutel, E. C.(2005). A380: Requisitos Para Viabilizar a Operação Comercial de Passageiros no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, Maestro Antonio Carlos Jobim, Publicação E-TA-006A/05, Monografia do Curso de Especialização em Gestão de Aviação Civil, Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65p.

Infraero – Disponível em <http://www.infraero.gov.br/>. Último acesso em 10 de agosto de 2010.

Khoury, H.M., Kamat, V.R. & Ioannou, P.G.. (2007). Evaluation of General-Purpose Construction Simulation and Visualization tools for Modeling and Animating Airside Airport Operations. Simulation, v. 8, n. 9, p. 663-679.

Meng, J. & Yang, C. (2007). *The Simulation Research on Stacker Control in Airport Logistics System*. IEEE International Conference on Automation and Logistics, p.1225-1229, 18-21 de Agosto, Jinan, China.

*Metropolitan Transportation Commission*. Relatório de 27 de setembro de 2000. Disponível em [http://www.mtc.ca.gov/planning/air\\_plan/RASP\\_FinalReport.pdf](http://www.mtc.ca.gov/planning/air_plan/RASP_FinalReport.pdf).

- Miguel, P. A. C. (2007). Estudo de Caso na Engenharia de Produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Produção*, v.17, n.1, p. 216-219.
- Moser, R. F. (2007). Simulação e análise de configurações aeroportuárias utilizando visual SIMMOD: aplicação ao Aeroporto Internacional de São Paulo / Guarulhos. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Nsakanda, A.L., Turcotte, M. & Diaby, M.. (2004). *Air cargo operations evaluation and analysis through simulation*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, p.1790-1798, 5 a 8 de dezembro.
- Promodel – Disponível em <http://www.promodel.com/products/promodel/>. Último acesso em 2 de fevereiro de 2012.
- Ribeiro, F.R. (2003). Modelo de simulação para análise operacional de pátio de aeroportos. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Serapioni, M. (2000). Métodos qualitativos e quantitativos na pesquisa social em saúde: algumas estratégias para a integração. *Ciência e Saúde Coletiva Online*, vol.5, n.1, pp. 187-192.
- Willis, C.A. (1969). *GPSS simulation for airport capacity and facilities expansion analysis*, Winter Simulation Conference - Proceedings of the 3rd Conference on Applications of Simulation, p.165-170, 8 a 10 de dezembro de 1969, Los Angeles, California, Estados Unidos.