

Tese apresentada à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica na Área de Transporte Aéreo e Aeroportos.

**Érico Soriano Martins Santana**

**ANÁLISE DE NOVOS CENÁRIOS OPERACIONAIS PARA O AEROPORTO  
INTERNACIONAL DE SÃO PAULO / GUARULHOS**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados.

Prof. Dr. Carlos Müller

Orientador

Prof. Dr. Homero Santiago Maciel

Chefe da Divisão de Pós-Graduação

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP – Brasil.  
2002

**ANÁLISE DE NOVOS CENÁRIOS OPERACIONAIS PARA O AEROPORTO  
INTERNACIONAL DE SÃO PAULO / GUARULHOS**

**Érico Soriano Martins Santana**

Composição da banca examinadora:

Prof. Dr. Protógenes Pires Porto..... Presidente – ITA  
Prof. Dr. Carlos Müller..... Orientador – ITA  
Prof. Dr. Cláudio Jorge Pinto Alves..... ITA  
Prof. Dr. Jorge Eduardo Leal Medeiros..... EP-USP  
Dr. Erivelton Pires Guedes..... IAC

**ITA**

# ÍNDICE GERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>X</b>
<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>XIV</b>
<b>I. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
I.1. MOTIVAÇÃO .....	1
I.2. OBJETIVOS.....	8
I.3. ESCOPO DA ANÁLISE .....	9
I.4. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	10
<b>II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
II.1. CAPACIDADE DO LADO AÉREO .....	13
II.2. FATORES RESPONSÁVEIS PELO AUMENTO DE CAPACIDADE DO LADO AÉREO .....	14
II.3. MODELOS DE CAPACIDADE.....	18
II.4. MODELOS EMPÍRICOS.....	19
II.5. MODELOS ANALÍTICOS .....	20
II.6. MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	22
II.6.1. Caracterização de um Modelo de Simulação.....	23
II.6.2. Verificação e Validação .....	27
<b>III. SIMMOD.....</b>	<b>29</b>
III.1. COMPONENTES DO SIMMOD .....	30
III.1.1. O Pré - Processamento .....	30
III.1.2. O Instrumento de Simulação .....	31
III.1.3. O Pós – Processador.....	34

III.2. PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS.....	35
III.3. TIPOS DE DADOS NECESSÁRIOS AO SIMMOD.....	40
<i>III.3.1. Lista dos Dados.....</i>	<i>40</i>
III.4. CONCLUINDO.....	43
<b>IV. O AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO - AISP/GRU.....</b>	<b>44</b>
IV.1. OS ATUAIS TERMINAIS DE PASSAGEIROS.....	46
IV.2. LADO AÉREO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO.....	47
<b>V. MODELAGEM DOS CENÁRIOS - CONCEPÇÃO.....</b>	<b>50</b>
V.1. O TERCEIRO TERMINAL DE PASSAGEIROS – TPS 3.....	51
V.2. A TERCEIRA PISTA.....	53
V.3. UTILIZAÇÃO DAS PISTAS.....	57
V.4. O MODELO CONCEITUAL.....	59
V.5. MODELOS PROPOSTOS.....	61
V.6. MODELO DA SITUAÇÃO ATUAL.....	62
V.7. MODELO COM A NOVA TERCEIRA PISTA DE POUSOS E DECOLAGENS.....	64
V.8. MODELO COM O NOVO TERMINAL DE PASSAGEIROS (TPS-3).....	65
<i>V.8.1. Estratégias Operacionais no Terceiro Terminal de Passageiros (TPS-3).....</i>	<i>65</i>
<b>VI. RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>71</b>
VI. 1. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	72
VI.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	75
<i>VI. 2. 1. Atrasos.....</i>	<i>75</i>
<i>VI. 2. 2. Tempos de Viagem.....</i>	<i>82</i>
<i>VI. 2. 3. Análise Conjunta dos Fatores.....</i>	<i>85</i>
<b>VII. CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
VII.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
VII.2. FINALIZANDO.....	92
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>A</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>F</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Crescimento do Número de Passageiros Transportados pelo Modal Aéreo de Transporte no Mundo.1</i>	
<i>Figura 2 – Crescimento do Número de Passageiros Transportados pelo Modal Aéreo de Transporte no Brasil (Empresas Brasileiras - Dom+Reg).....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3 – Crescimento dos Movimentos na Área de Controle Terminal São Paulo.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4 – Movimento de Passageiros no AISP/GRU.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 5 – Movimento de Aeronaves no AISP/GRU.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 6 – Exemplo de Envelope de Capacidade de um Sistema de Pista.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7 – Idéia de Funcionamento do SIMMOD.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8 – Representação dos Processos que Envolvem a Criação de um Estudo no SIMMOD.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 9 – Evolução no Movimento de Passageiros nos Principais Aeroportos do Brasil.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 10 – Esboço da Situação Atual dos Terminais de Passageiros do AISP/GRU.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 11 – Planta baixa do AISP/GRU.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 12 – Projeto do Novo AISP/GRU.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 13 – Previsão do Número de Movimentos de Aeronaves no AISP/GRU.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 14 – Previsão do Número de Movimentos de Aeronaves na Hora Pico no AISP/GRU.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 15 – Projeto da Terceira Pista de Pousos e Decolagens no AISP/GRU.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 16 – Distribuição Percentual entre os Cenários elaborados.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 17 – Comparações entre os valores simulados e os valores reais.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 18 – Distribuição da operação no modelo 1 sob o aumento de 30% na demanda.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 19 – Resultados Gerados pelas Simulações – Todos os Modelos.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 20 – Resultados Gerados pelas Simulações – M1- Situação Atual, M2-RWY3.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 21 – Resultados Gerados pelas Simulações – M1-Situação Atual, M2-RWY3, M6-TPS3(b).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 22 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M1- Situação Atual.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 23 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M5-TPS3(a).....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 24 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M6-TPS3(b).....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 25 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M2-RWY3.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 26 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M3- RWY3 &amp; TPS3(a).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 27 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M4- RWY3 &amp; TPS3(b).....</i>	<i>82</i>

<i>Figura 28 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempos de Viagem Total – Todos Modelos.</i> .....	83
<i>Figura 29 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempo de Viagem Médio – Todos os Modelos.</i> .....	84
<i>Figura 31 – Resultados Gerados pelas Simulações – Número de Operações.</i> .....	88
<i>Figura 32 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempo de Viagem Total – Iterações.</i> .....	B
<i>Figura 33 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempo de Viagem Médio – Iterações.</i> .....	C
<i>Figura 34 – Resultados Gerados pelas Simulações – Atrasos Totais – Iterações.</i> .....	D
<i>Figura 35 – Resultados Gerados pelas Simulações – Atrasos Médios – Iterações.</i> .....	D

## ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1. Mix de Aeronaves para o AISP/GRU segundo MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1999).</i> .....	57
<i>Tabela 2. Pousos e decolagens no AISP/GRU segundo MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1999).</i> .....	58
<i>Tabela 3. Porcentagem da Utilização das Pistas quanto às Aeronaves segundo MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1999).</i> .....	58
<i>Tabela 4. Companhias Aéreas no Aeroporto Internacional de São Paulo.</i> .....	63
<i>Tabela 5. Distribuição Operacional por Empresas nos Terminais (TPS – 3).</i> .....	68
<i>Tabela 6. Distribuição das Empresas Aéreas segundo dados de 2000.</i> .....	69
<i>Tabela 7. Valores dos Atrasos Médios por Operação.</i> .....	86

## SUMÁRIO

Propõe-se no presente trabalho uma metodologia de planejamento aeroportuário baseada em modelos de simulação, aplicado ao Aeroporto Internacional de São Paulo / Guarulhos (AISP/GRU).

Foram representadas hipóteses com diferentes configurações de cenários, leiautes físicos e operacionais, no Aeroporto. Utilizou-se para tanto a ferramenta de simulação SIMMOD Plus! 4.0, desenvolvida para retratar a operação no espaço aéreo e lado aéreo de aeroportos.

O escopo da pesquisa foi delineado para as operações realizadas no solo, pistas de rolamento e pátio de estacionamento das aeronaves, onde as análises realizadas facilitaram a visualização dos diagnósticos a partir da variação da demanda (número de operações).

Os resultados gerados neste trabalho atestaram a viabilidade do uso da metodologia, além da indicação de soluções valiosas capazes de combater os atrasos, diminuindo assim os custos para os usuários do sistema.

Indicou também alternativas para um melhor uso do Aeroporto, auxiliando a tomada de decisão quanto à implantação, ou não, de determinadas instalações ou a adoção de estratégias operacionais, nos seus respectivos momentos.



## **ABSTRACT**

The present work considers a methodology of airport planning based on simulation models applied to the São Paulo International Airport / Guarulhos (AISP/GRU).

Different airport physical and operational scenarios had been analyzed by means of simulation. SIMMOD Plus! 4.0, the computational tool developed to represent aircraft operation in the airspace and airside of airports, was used to perform these analysis.

The research was mainly focused on aircraft operations on ground, at the airport runway, taxi-lanes and aprons. The visualization of the operations with increasing demand facilitated the analyses.

The results generated in this work certify the viability of the methodology, they also indicated the solutions able to solve the delay problem, thus diminishing the costs for the system users.

It also indicated alternatives for airport operations, assisting the decision-making process and in the appropriate timing of the proposed changes in the existing infrastructure.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me guiou desde os momentos mais críticos enfrentados na minha vida até aqueles de descontração; à minha família, à qual devo todo meu aprendizado e tudo aquilo obtido nesta caminhada ao longo do tempo; e aos meus amigos mais antigos e os mais novos, que nunca saem do meu coração.

Ao Professor Carlos Müller, sobretudo um amigo, sempre atento aos meus deslizes, mostrando as inúmeras dificuldades encontradas no caminho do desenvolvimento deste trabalho e incentivando a resolvê-las de maneira objetiva, fato que acrescentou à minha formação uma visão mais profissional.

Aos Professores Cláudio Jorge e Protógenes Porto, cuja contribuição para que este trabalho se concretizasse ocorreu não apenas na etapa final, mas ao longo de todo o projeto.

Ao Professor Jorge Leal pela participação na banca examinadora do mestrado, e pelas contribuições oriundas de discussões acerca da área de aviação e transporte aéreo.

Ao Dr. Erivelton Guedes pela participação na banca examinadora do mestrado, e pelas várias contribuições neste trabalho, sobretudo com o manuseio da ferramenta SIMMOD Plus! 4.0, bem como seu extenso banco de dados.

Ao laboratório de simulação do Instituto de Aviação Civil, nas pessoas: atual diretor Cel.-Av. Hamilton Antonio Machado, Cap.-Eng. Christiano Miranda, Eng. Milton Feitosa, Arq. Beatriz Delpino e Dr. Erivelton Guedes, por todo apoio no desenvolvimento dos modelos até a busca dos resultados.

Ao Instituto de Proteção ao Vôo, nas pessoas: ex-diretor Cel.-Av. R/R Rubens Ribeiro Cardoso Filho, atual diretor Cel.-Av. Júlio Cezar Pereira Passos, Maj.-Int.-Aer. Luiz Carlos Rodrigues Calheiros, e Ten.-Esp.-CTA Renny Apolinário da Silva, por todo o suporte técnico quanto à ferramenta SIMMOD, seu uso e fornecimento do material técnico, e o aprendizado das regras essenciais do controle de tráfego aéreo, além do crédito depositado em mim no desafio da criação de um novo laboratório de simulação no Brasil.

Ao Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea, nas pessoas: atual diretor Cel.-Av. R/R Ricardo Nogueira, Maj.-Esp.-CTA R/R J. Carlos, Sgt.-BCT Celso Figueiredo, pela ajuda quanto à obtenção de dados junto aos órgãos operacionais de tráfego aéreo.

À Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária, nas pessoas: do Eng. Jiro Hashizume, e José Myron, não medindo esforços quanto aos dados necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Economista Alessandro Vinicius Oliveira, que sempre foi para mim um exemplo acadêmico a ser seguido, sendo amigo e debatedor de idéias.

Aos Engenheiros Paulo Marcos e Marcos Girão, que souberam transferir-me todo o seu entusiasmo pelo desenvolvimento desta área, incentivando-me no aprendizado, e participando como amigos e profissionais na minha formação.

Aos amigos do ex-Grupo de Transporte Aéreo, atual Sociedade Brasileira de Pesquisa em Transporte Aéreo, comunidade da qual me orgulho de ter criado, participando ainda na sua oficialização. Aqui vale a lembrança de Érika Spoljaric, Marcelo Sáfadi, Leonardo Meneses, Milton Feitosa, Alessandro Vinicius, Rogéria Eller, sem os quais não teríamos conquistado a união de tantas pessoas num fórum de discussão único no país sobre transporte aéreo.

Aos amigos do Programa de Mestrado da Divisão de Engenharia de Infra-estrutura Aeronáutica: Cap.-Av. Mauricio Ferreira Hupalo, Denílson Sodré, Weber Maciel, Cristiane Coscarelli, Cristiani Siqueira, Erik Jenichen, Ten.-Cel.-Eng. Marcos Flores (FAV), Marcelo Guterres, Douglas Targa, Janaína Rizzi, Márcio Galvão, Aislan Bühler, Adival Magri Jr., Marcius Souza, Vinícius Silveira, Kétnes Lopes, Renée Ferraz e aos demais que formam o corpo discente da pós-graduação da Infra e que são muitos.

Aos grandes amigos Vladimir Braga e João Moreira, sempre companheiros.

Aos amigos que moram ou moraram no mesmo apartamento do Hotel de Trânsito dos Oficiais do CTA, dividindo momentos alegres e tristes durante esta caminhada: Fernando Barbieri, Alexander Melo, Karlus Macedo, Firmino Veroneze, Miguel Lanna, Brício Melo, Duane Muradas, Rodolfo Machado, Paulo Pavani, Milton Feitosa, Haroldo Nascimento, Adriano Bedo, Aníbal Miranda, Paulo Zdansk.

À todos os professores e funcionários da Divisão de Engenharia de Infra-estrutura Aeronáutica pela amizade e pelas inúmeras conversas e idéias trocadas neste tempo.

Aos Professores Eliseu Lucena e José Antônio Hernandes, por acreditarem no meu real desejo em cursar o mestrado no ITA, autorizando a minha saída temporária em 1998 para um estágio no exterior.

À Sra. Glória Pinotti, pelo auxílio e compreensão nas questões acerca da minha re-entrada no ITA após estágio no exterior.

Ao Professor Akio Baba, pela amizade e pelas inúmeras ajudas prestadas, além das conversas em algumas madrugadas de trabalho.

À todos os companheiros integrantes da Rede SBTA, de onde saíram inúmeras discussões aproveitadas no meu aprimoramento profissional.

À CAPES, pelo financiamento do meu curso de mestrado fornecendo a bolsa de estudos durante boa parte dele.

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Mariane e Raimundo, a quem devo todo aprendizado da minha vida e seus valores.

Em especial ao meu primo Rodrigo e meu amigo Cláudio: Saibam que vocês estão fazendo muita falta neste mundo, por vezes justo, mas também injusto em outros momentos. É verdade que estamos aqui temporariamente, embora seja difícil pensar assim. Mas o que vale realmente é possuir verdadeiros amigos, coisa que certamente vocês foram para mim. Onde quer que estejam, saibam que ao escrever este trabalho, por muitas vezes me apanhei pensando em vós, mas logo imaginei que naquele momento já deveriam estar bem, olhando para mim lá de cima dando toda a força dos verdadeiros amigos e irmãos.

Como diria Milton Nascimento: *“amigo, um dia a gente se encontra”*.

*Scientia via Lucis*

# I. INTRODUÇÃO

## I.1. Motivação

Ao longo dos anos, pode-se observar um aumento quanto ao número de usuários de transporte aéreo em todo mundo (Figura 1). Embora os atentados ocorridos em Nova Iorque (Estados Unidos), no dia 11 de setembro de 2001, tenham gerado uma conservação nestes números, todo o setor da aviação espera a retomada dos índices de crescimento a curto prazo.

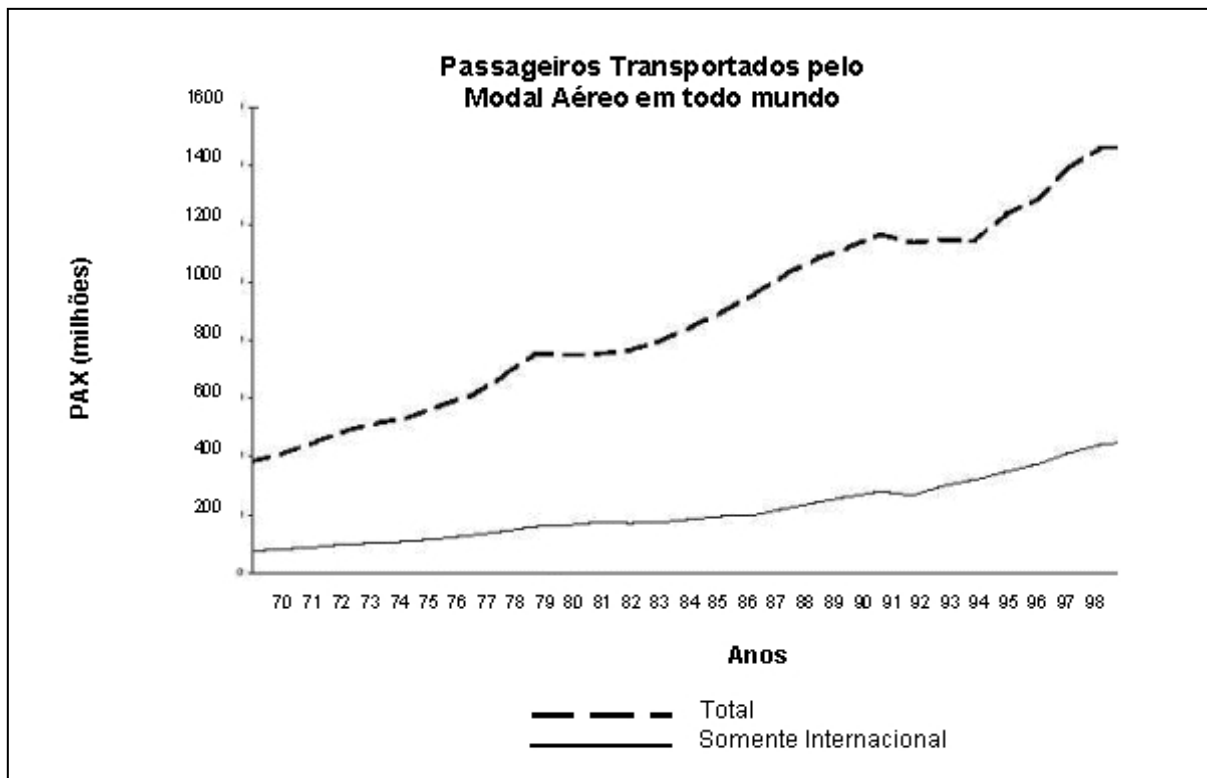


Figura 1 – Crescimento do Número de Passageiros Transportados pelo Modal Aéreo de Transporte no Mundo. Fonte: Anuário Estatístico da OACI<sup>1</sup>, 1999.

<sup>1</sup> OACI – Organização de Aviação Civil Internacional



Apesar da aparente parada no crescimento, os congestionamentos no espaço aéreo e aeroportos continuam ocorrendo e provocando freqüentes atrasos, prejudiciais a todos usuários do sistema. A procura por soluções já mobiliza desde empresas aéreas até órgãos de controle de tráfego aéreo.

Buscando estas soluções, várias transformações foram inseridas na criação de projetos dos sistemas aeroportuários ao longo do tempo, e um planejamento cada vez mais complexo tornou-se necessário. Os aeroportos e espaços aéreos controlados são vistos atualmente como um emaranhado de caminhos nas suas pistas de rolamento, pistas de pouso e procedimentos, resultando na maioria das vezes inúmeros pontos de convergência e conflitos.

No Brasil, um crescimento quanto ao uso do modo aéreo de transporte durante os últimos anos tem sido observado (Figura 2). Este aumento causa transtorno direto às operações em alguns aeroportos onde existe concentração de vôos, gerando atrasos. A Figura 2 mostra a quantidade de passageiros embarcados por empresas nacionais em vôos domésticos e regionais.

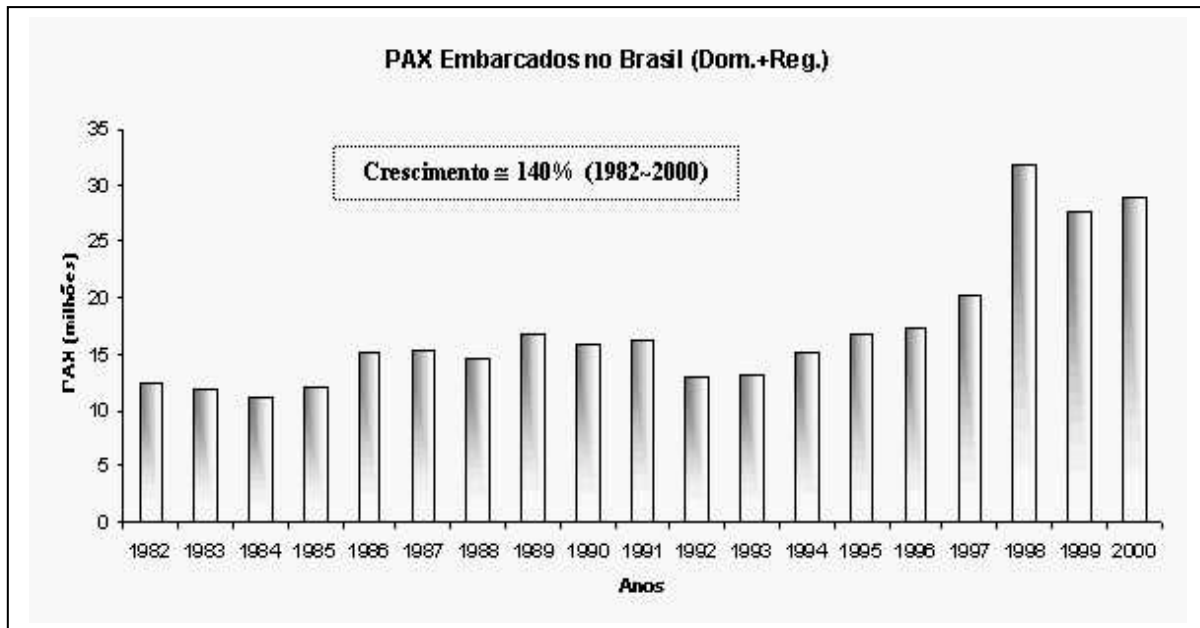


Figura 2 – Crescimento do Número de Passageiros Transportados pelo Modal Aéreo de Transporte no Brasil (Empresas Brasileiras - Dom+Reg).  
 Fonte: Anuário Estatístico do DAC<sup>2</sup>, 2000.

Entendendo esse crescimento como um possível gerador de conflitos – média anual superior a 13% na área de controle terminal (TMA) São Paulo (Hupalo *apud* SRPV, 2000) – constata-se que a demanda de vôos começa a exceder as capacidades de alguns setores do espaço aéreo e de aeroportos (Figura 3).

<sup>2</sup> Departamento de Aviação Civil

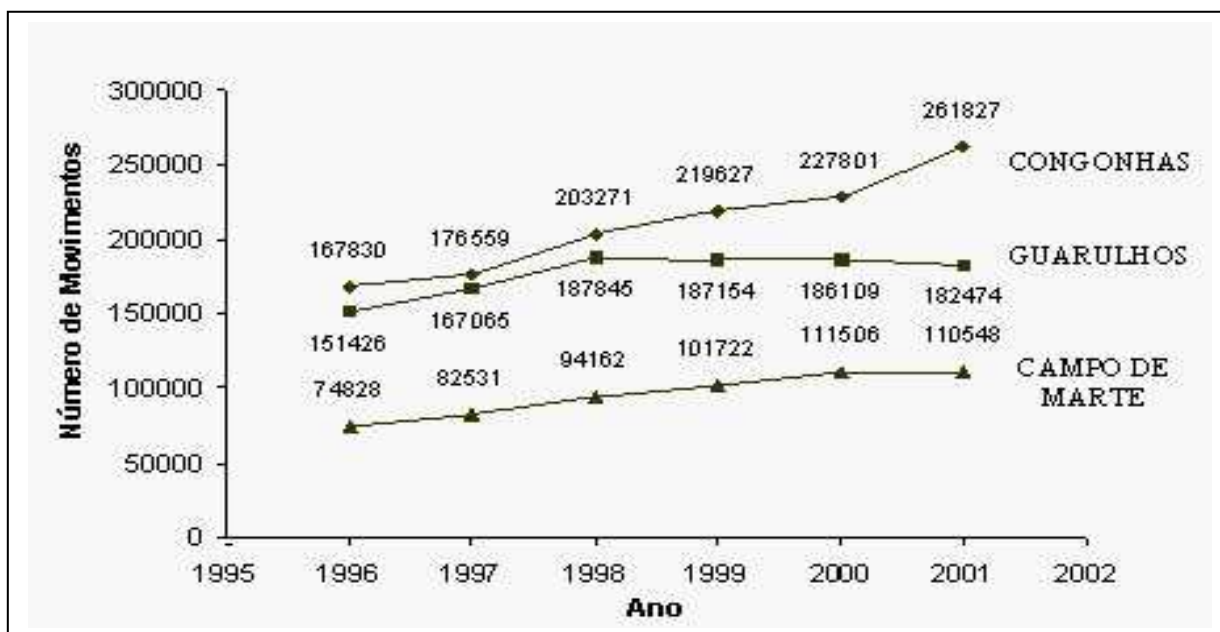


Figura 3 – Crescimento dos Movimentos na Área de Controle Terminal São Paulo.  
 Fonte: GEIPOT, 2002.

Diante destas situações as autoridades aeronáuticas vêm sendo obrigadas a tomar medidas consideradas restritivas ao voo, causando atrasos que, por conseguinte, geram um certo nível de insatisfação aos usuários, principalmente das empresas aéreas (investidoras de grandes quantidades de capital) que dependem diretamente dos Serviços de Controle de Tráfego Aéreo, e de controle dos aeroportos. Como parâmetro pode-se citar o caso de uma empresa aérea brasileira, onde os custos nas órbitas de espera causaram um prejuízo de R\$ 1,6 milhão em novembro de 2000 (Targa, 2001).

O AISP/GRU não poderia ser exceção, haja vista sua importância no contexto do país. Vem mantendo um movimento significativo de passageiros nos últimos anos, acarretando problemas quanto à sua operacionalidade. A Figura 4 mostra a evolução no número de passageiros transportados desde o início de sua operação. É importante verificar que o baixo número de passageiros observado em 1985 deve-se ao fato da inauguração ter sido realizada por etapas.

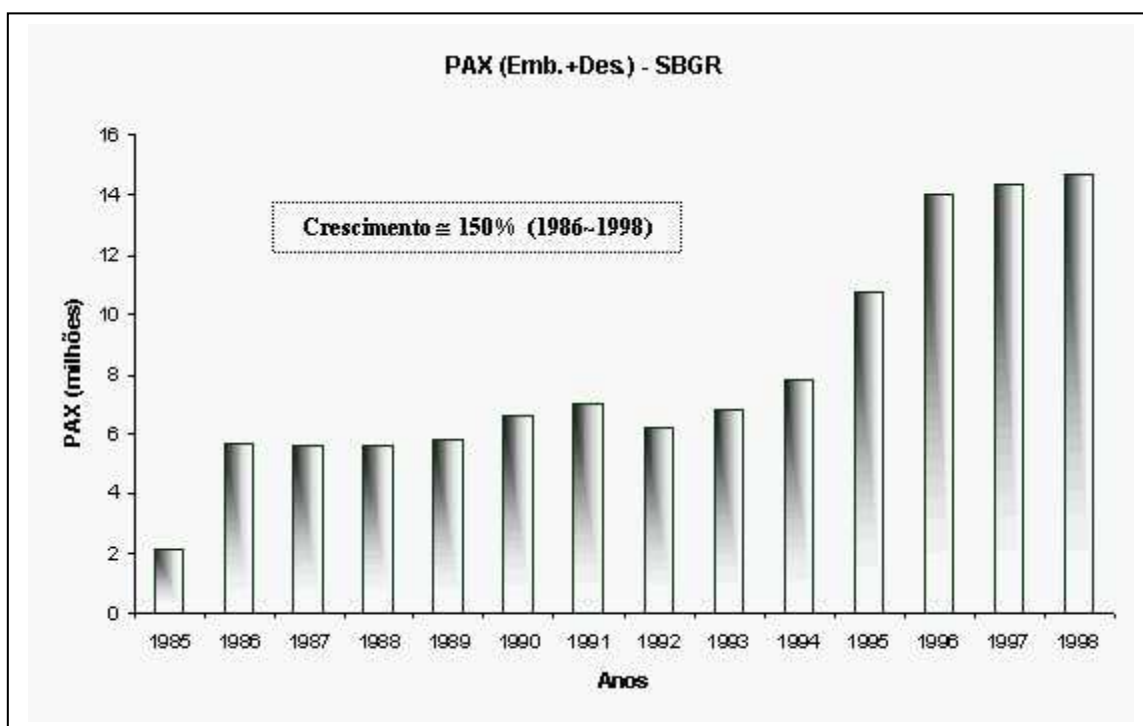


Figura 4 – Movimento de Passageiros no AISP/GRU.  
 Fonte: MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999.

Devido à crescente demanda, faz-se necessário que o AISP/GRU, principal aeroporto da América do Sul, tenha sua configuração modificada novamente. Embora exista um Plano Diretor, elaborado em 1981, onde eram previstos 4 terminais de passageiros (capazes de processar 7,5 milhões de PAX/ano cada) e uma terceira pista operando simultaneamente com as existentes, foi verificada a necessidade da construção de terminais maiores, plenamente justificado pelo aumento de movimentos na TMA-SP, gerando uma maior concentração de aeronaves no pátio de estacionamento, e conseqüentes atrasos em vôos.

Aliado ao problema do terminal de passageiros (TPS), apesar da sua taxa de crescimento ser menor, o movimento de aeronaves também sugere a necessidade da construção da terceira pista, já prevista no Plano Diretor. Este crescimento (1986 à 1998) foi da ordem de 90% (Figura 5).

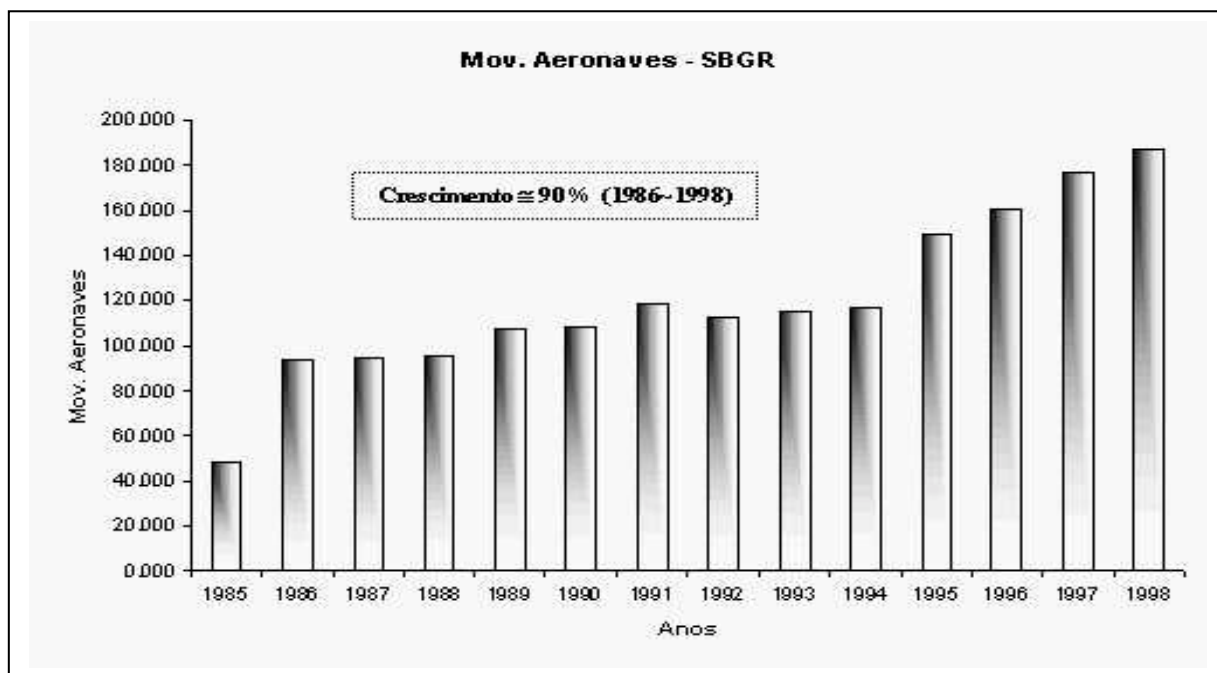


Figura 5 – Movimento de Aeronaves no AISP/GRU.  
Fonte: MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999.

Possuindo o conhecimento do interesse por parte da Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária – INFRAERO – em construir um novo terminal e uma nova pista de pousos e decolagens no aeroporto, apresenta-se neste trabalho uma aproximação à realidade, e das supostas propostas para aumento de capacidade, por meio de um modelo de simulação, onde serão analisadas, e comparadas, algumas alternativas apontadas para viabilizar o atendimento da crescente demanda, sendo empregado para tanto como ferramenta o *software* SIMMOD Plus! 4.0.

Nesse contexto, a construção de modelos de simulação por computador tem sido uma alternativa de resultados bastante satisfatórios em análises de capacidade de aeroportos (TransSolutions, 2000). Tal metodologia baseia-se numa representação lógico-matemática do sistema em estudo (modelo), capaz de converter parâmetros e dados de entrada em saídas que caracterizam o sistema em questão (Pereira, B. D. *et al.*, 2000).

A ferramenta SIMMOD é bastante poderosa, principalmente à simulação operacional do lado aéreo de um aeroporto. É um programa desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* – FAA, órgão responsável pela aviação civil nos Estados Unidos e tem sido bastante utilizado na área de transporte aéreo trazendo resultados coerentes.

A partir dos dados adquiridos, um modelo de simulação foi planejado de maneira a estabelecer, aos futuros estudos e pesquisas, um elo consistente entre a área terminal (TMA – SP) e o AISP/GRU.

A Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, está desenvolvendo estes estudos com alunos dos programas de pós-graduação e graduação, e com o apoio fornecido pelo Instituto de Proteção ao Vôo – IPV, com o suporte técnico dos seus profissionais, e a licença para utilização do SIMMOD Plus! 4.0.

A partir destes estudos onde hipóteses modificadas foram consideradas, poderá ser verificada a viabilidade das prováveis alternativas e soluções para o problema em questão, descrito detalhadamente adiante.

O presente estudo pode ser considerado também como uma continuidade da dissertação de Barros (1994), o que facilitou muitas questões acerca das peculiaridades do Aeroporto.

## **I.2. Objetivos**

O principal objetivo do estudo é implementar o uso de uma metodologia de análise para estudos de planejamento aeroportuário e atestar sua viabilidade no auxílio à tomada de decisão. Estas análises estão focadas nas variáveis relacionadas à capacidade do sistema como: atrasos e tempo gasto em movimentações para diferentes configurações e níveis de demanda.

A pesquisa no lado aéreo do AISP/GRU possuiu seu escopo definido desde seus marcadores externos até os portões de embarque, local da total parada das aeronaves, apresentando um segundo objetivo do trabalho: a indicação de prováveis alternativas de operação.

### **I.3. Escopo da Análise**

Buscando direcionar as análises para um meio possível e viável, foram adotadas algumas diretrizes quanto aos processos considerados importantes na atividade do AISP/GRU.

A identificação e a procura pelas melhores diretrizes no presente trabalho não foram tarefas fáceis de serem realizadas. Várias visitas técnicas à torre de controle do aeroporto, exaustivos diálogos com os responsáveis pelo tráfego no solo (lado aéreo do aeroporto), aprendizado pleno da ferramenta SIMMOD, e o entendimento sobre a operação do novo terminal de passageiro (TPS – 3) e pista de pousos e decolagens, serviram de exemplos para a completa compreensão do sistema.

As análises tiveram seu escopo delineado para as operações realizadas no solo – lado aéreo do aeroporto, principalmente nas pistas de rolamento e pátio de estacionamento das aeronaves, onde existem vários pontos de conflito no Aeroporto.

Diante da incógnita relativa à operação dos novos terminal de passageiros e pista de pousos e decolagens, neste trabalho foram considerados alguns critérios, como suposições de possíveis operações, baseados em estudos já existentes, comparando-as entre as mesmas seus resultados, apontando no final, os instantes apropriados para intervir em modificações na infra-estrutura ou mesmo na adoção de alguma outra estratégia operacional.



## **I.4. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. Nos Capítulos II e III são descritas as bases teóricas para o desenvolvimento do trabalho, a revisão bibliográfica. Revisões sobre capacidade do lado aéreo de aeroportos e o uso de técnicas de simulação, além de uma descrição mais detalhada da plataforma utilizada como ferramenta (SIMMOD Plus! 4.0).

No Capítulo IV desenvolve-se uma descrição do objeto de estudo, apontando as suas características e peculiaridades.

O Capítulo V aborda a metodologia utilizada para modelagem dos cenários, as demandas relacionadas ao movimento de passageiros e ao movimento de aeronaves, regras de utilização das pistas, a verificação e validação do modelo, além das dificuldades encontradas nesta etapa. Também são descritas as informações referentes ao projeto da terceira pista e do terceiro terminal de passageiros (TPS – 3) que serviram de base para alguns modelos.

O Capítulo VI mostra e analisa os resultados das simulações, comparando os atrasos e tempos de viagem observados nos diferentes cenários e indicando as melhores opções sob o ponto de vista operacional.

No Capítulo VII, são apresentadas as conclusões do trabalho, abrangendo uma visão geral do que foi realizado e sugerindo propostas de extensão em trabalhos futuros.

Finalizando, encontram-se no Apêndice e Anexos algumas informações acerca do trabalho com as simulações, as dificuldades encontradas e os modelos com a série de arquivos

do SIMMOD Plus! 4.0, de onde foram originados os resultados dos modelos elaborados e algumas informações adicionais relativas ao objeto de estudo.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca da representação das operações de um aeroporto por meio de modelos nos últimos 15 anos avançou significativamente, e a sua utilização enquanto ferramentas de decisão têm crescido firmemente (Andreatta *et al.*, 1998).

Entretanto, os modelos existentes ainda sofrem uma falta de integração e limitações severas quanto às suas flexibilidade e utilização. Há uma separação nítida entre modelos de elementos do lado terra do aeroporto (terminal de passageiros, esteira de bagagem, e acessibilidade) e de elementos do lado aéreo (pistas de pousos e decolagens, pistas de rolamento etc.), o que torna o planejamento uma atividade complicada de ser desenvolvida.

Diante das dificuldades, verificam-se como as decisões tomadas em relação ao desenvolvimento da infra-estrutura da maioria dos aeroportos são determinantes para a visualização do aumento de capacidade do sistema como um todo. Porém, nem sempre é disponível aos planejadores fazer uso de soluções como a construção de uma nova pista de pouso e decolagem, ou de um novo terminal de passageiros.

Entretanto, a capacidade do sistema não aumenta somente com o desenvolvimento da infra-estrutura (pistas e terminais). A limitação está localizada no fator mais fraco do sistema onde está inserido, quer seja a capacidade de espaço aéreo, da pista de pousos e decolagens,

de pátio de estacionamento, do terminal de passageiros ou simplesmente a acessibilidade dos passageiros ao terminal.

Diante desta informação percebe-se o quão enorme é o problema de aumento de capacidade (diminuição dos “gargalos”) de um sistema aeroportuário. Como consequência, observa-se uma necessidade na busca de soluções, quer seja para o sistema completo – espaço aéreo até o acesso ao terminal – ou simplesmente para cada fator que a envolve.

## **II.1. Capacidade do Lado Aéreo**

Um aeroporto é um complexo e interativo sistema de filas onde vários componentes contribuem, no lado aéreo, para causar restrições ao fluxo das aeronaves e, portanto, congestionamentos e atrasos. Desses componentes a pista de pouso e decolagem é o principal “gargalo” sendo merecedora de especial atenção (Hupalo *et al.*, 2000).

A capacidade de um sistema de pistas pode ser definida como o máximo número de operações de aeronaves possíveis de serem realizadas durante um específico intervalo de tempo, sob condições de demanda contínua, sem violar os padrões de separações do controle de tráfego aéreo (Peres, 1992).

Existem dois tipos de capacidade, as quais podem exercer uma influência fundamental principalmente devido à busca de aproximações com a realidade. São elas: capacidade prática e capacidade máxima (Wells, 1992).

A capacidade prática resulta do conservadorismo de pilotos e controladores que tendem a “praticar” separações maiores que as previstas. A capacidade máxima é definida como número máximo de operações (pousos e decolagens) que podem ser executados, em média, em uma hora, sem violar as regras de controle de tráfego aéreo e assumindo demanda contínua.

## **II.2. Fatores Responsáveis pelo Aumento de Capacidade do Lado Aéreo**

Segundo Hupalo (Hupalo *et al.*, 2000), são os seguintes os principais fatores que afetam a capacidade de um sistema de pistas de pousos e decolagens de um aeroporto:

- Separações longitudinal e lateral mínimas: as separações são impostas por motivos de segurança tanto para evitar colisões como para que uma aeronave não entre na esteira de turbulência de outra, o que é mais crítico quando próximo ao pouso ou durante a decolagem, devido às baixas velocidades e altitudes praticadas.

- Configuração das pistas: a posição relativa e distância entre pistas de pouso determinam a interferência dos movimentos de uma em relação aos das demais pistas do aeroporto.

Vale a pena lembrar que, segundo a OACI, as operações podem acontecer em pistas paralelas, caso:

*i* - As aproximações sejam realizadas de forma independente quando a separação mínima entre os eixos das pistas é de pelo menos 1300m;

*ii* - As aproximações dependentes, sejam realizadas quando a separação mínima entre os eixos for igual ou superior a 760m;

*iii* - As operações sejam segregadas, uma pista utilizada para pousos e a outra para decolagens, quando a separação mínima entre os eixos também for igual ou superior a 760m. Porém, esta separação pode ser diminuída de 30m para cada 150m que a pista utilizada para pousos for deslocada na direção contrária à do pouso, e deve ser incrementada em 30m para cada 150m que a pista for deslocada na direção do pouso (Barros, 1994).

Constitui-se, portanto, em um dos principais fatores que limitam a capacidade.

- Condições meteorológicas: sob condições meteorológicas adversas (teto e visibilidade baixos) as separações são aumentadas.

- Direção e intensidade do vento: determina as pistas que podem ser utilizadas uma vez que as operações devem ser realizadas em sentido contrário ao do vento.

- *Mix* das aeronaves: a categoria e performance das aeronaves determinam o tempo entre duas operações consecutivas. Blumstein (Hupalo *et al. apud* Blumstein, 2000) mostrou que o intervalo entre pousos entre uma aeronave pesada e uma leve é muito maior quando a pesada pousa primeiro. Este fato sugere a possibilidade de um seqüenciamento ótimo para aeronaves que esperam pousar em determinado aeroporto. O seqüenciamento ou *runway*

*sequencing problem* é tipicamente formulado como um problema de otimização com restrições, com o objetivo de encontrar seqüências que maximizem a razão de serviço de pistas sem penalizar em demasia alguns tipos de aeronaves;

- Tipo de operação (razão pousos/decolagens): as separações entre movimentos dependem dos tipos das operações envolvidas, ou seja, um pouso que sucede uma decolagem necessita de separação diferente de, por exemplo, uma decolagem sucedendo outra decolagem. A capacidade varia com a relação entre as quantidades de pousos e decolagens executados. Assim sendo não faz sentido uma indicação única de capacidade e sim um envelope de capacidade determinado pelo *mix* de operações. A Figura 6 ilustra o conceito de envelope;

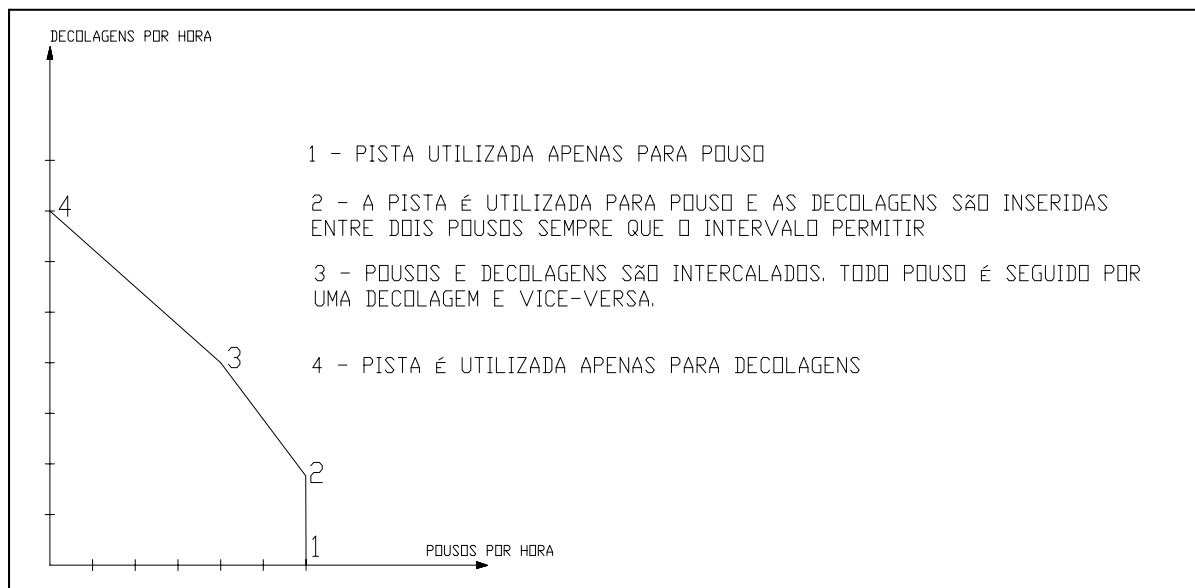


Figura 6 – Exemplo de Envelope de Capacidade de um Sistema de Pista.  
Fonte: Hupalo *et al.*, 2000.

- Qualidade e desempenho dos sistemas de navegação, vigilância e controle: sistemas confiáveis e com boa exatidão permitem diminuir a separação entre as aeronaves aumentando a capacidade. A utilização de uma ferramenta computacional de suporte à decisão que auxilie

o controlador, por exemplo, a prever o seqüenciamento ótimo das aeronaves que se aproximam para pousar em determinado aeroporto confere segurança e racionalidade às operações;

- Fatores humanos (controladores e pilotos): controladores e pilotos com maior experiência dão maior agilidade às operações;

- Localização e tipo das saídas de pista: as saídas de pista de pouso quando corretamente localizadas permitem que os pilotos possam abandonar a pista de pouso em direção ao sistema de pistas de táxi tão logo tenham reduzido suficientemente a velocidade. Se a saída for rápida, ou seja, fizer um ângulo menor do que  $90^\circ$  com a pista de pouso, não existe a necessidade de redução demasiada da velocidade o que diminui o tempo de ocupação da pista;

- Ruído: o ruído pode restringir a operação sobre determinadas áreas habitadas funcionando como uma restrição adicional a ser considerada na determinação de rotas de saída;

- Estratégia utilizada: em aeroportos congestionados, com apenas uma pista, controladores costumam usar a estratégia de alternar decolagens e pousos. As separações na aproximação final entre aeronaves sucessivas devem ser aumentadas afim de comportar uma decolagem entre o intervalo de tempo entre dois pousos. Este procedimento pode aumentar a capacidade total de operações, entretanto, requer perícia para ser corretamente utilizado. Aeroportos com mais de uma pista requerem estratégias que irão variar em função de parâmetros como *mix* de aeronaves, comprimento das pistas etc.



### II.3. Modelos de Capacidade

Na investigação de determinado sistema, surgem duas alternativas iniciais a serem seguidas: realizar experimentos com o próprio sistema, ou com um modelo desse sistema. A realização de experimentos com o próprio sistema nem sempre é viável. No caso de um aeroporto, por exemplo, intervir no sistema real geraria uma série de inconvenientes, incorrendo em elevados custos e atrasos, além de por em risco a segurança das operações. Se o próprio experimento em si já não seria algo simples de ser conduzido, mais difícil ainda seria reproduzi-lo repetidas vezes e sob exatamente as mesmas condições. No caso do modelo, diferentemente, as condições experimentais estão sob total controle de quem está realizando o experimento. O sistema, embora fictício, “pertence” ao analista (Feitosa, 2000).

Partindo destas premissas pode-se buscar na literatura algumas definições que envolvem o termo modelo. Uma delas é apresentada de forma bastante clara por Feitosa (Feitosa *apud* De Neufville *et al.*, 2000):

“Modelo consiste numa série de hipóteses sobre o comportamento de um sistema visando reproduzir idealizadamente a realidade, dando importância às interações entre os fatores envolvidos e às suas relações de dependência causal”.

Esta definição já incorpora o fato de que a um modelo sempre estarão amarradas hipóteses, de vez que o sistema em si nunca é perfeitamente conhecido. Modelar sua realidade significa, portanto, assumir certos comportamentos ideais nos processos existentes e a definição dessas hipóteses é uma tarefa muito importante, pois terão grande influência na qualidade dos resultados oriundos do modelo (Feitosa, 2000).

Relacionado à questão da capacidade do lado aéreo nos aeroportos, vários modelos foram propostos e desenvolvidos ao longo do tempo.

Os modelos desenvolvidos são encontrados na literatura sob o enfoque de três grupos:

- Modelos Empíricos;
- Modelos Analíticos;
- Modelos de Simulação.

Esta classificação tem uma ordem cronológica, onde os primeiros modelos relacionavam a capacidade de pistas a um atraso tolerável para a realização de uma operação (Peres, 1992).

Os aspectos relevantes na construção de tais modelos foram: a configuração geométrica de sistemas de pistas, as condições ambientais, as características da demanda, as regras do controle do tráfego aéreo, entre outras, descritas anteriormente.

#### **II.4. Modelos Empíricos**

São modelos simples, os quais geralmente se baseiam em extensas pesquisas de tráfego, dados experimentais, em determinados aeroportos, de onde se extraem tabelas e gráficos resultando assim nas análises para objeto de estudo.

Apesar de superficiais, a maioria deles tornam-se muito importantes nas etapas de verificação e validação de modelos analíticos e de simulação, que possuem uma estrutura mais complexa.

## **II.5. Modelos Analíticos**

Os modelos analíticos encontram-se localizados em um nível superior aos modelos empíricos. Relacionam a capacidade do sistema aos atrasos, estimando-os, gerando resultados que obedecem a certas condições de contorno e intervalos de tempos. Assim como os modelos empíricos podem ajudar na construção de modelos mais complexos, compondo blocos ou partes dos mesmos.

Os primeiros modelos analíticos utilizados para o cálculo de capacidade de pistas foram baseados na teoria das filas (valores médios de atraso), empregados para pistas simples, de uso exclusivo para pousos e decolagens (Barros, 1994), porém não forneciam uma estimativa precisa dos atrasos.

Diante da evolução, vários autores começaram a utilizar uma nova metodologia baseada na representação gráfica das trajetórias das aeronaves durante os procedimentos de pouso e decolagem, denominada diagramas espaço-tempo (Peres, 1992). A nova metodologia tinha relação com o manual de capacidade de aeroportos elaborado em 1976 pela FAA – *Federal Aviation Administration* (Barros, 1994),

Entre os autores podem ser citados Horonjeff & McKelvey (Horonjeff & McKelvey, 1994), os quais apresentaram um conceito bem didático e simples de se analisar.

A utilização do inverso do tempo médio de serviço das aeronaves foi a definição de capacidade proposta por eles. O tempo médio de serviço foi definido como o maior valor absoluto entre a separação no ar em termos de tempo e o tempo de ocupação da pista.

A partir desta definição, Kanafani (Kanafani, 1983) sugeriu em seu modelo um aumento na velocidade de aproximação das aeronaves.

Partindo do princípio de que a capacidade é inversamente proporcional ao tempo de separação ( $t$ ), e que ( $t$ ) pode ser escrito como  $t = d / v$ , onde ( $v$ ) é a velocidade de aproximação e ( $d$ ) é a separação entre as aeronaves (Eq. 1), existiria o aumento da capacidade caso a velocidade de aproximação das aeronaves fosse aumentada. (Barros *apud* Kanafani, 1994)

$$C = \frac{1}{t} = \frac{v}{d} \quad (1)$$

Tais modelos buscavam estabelecer uma relação entre a análise de capacidade e os tempos gastos nos procedimentos realizados pelas aeronaves – *mix* de aeronaves. A partir da elaboração destes, várias hipóteses começaram a incrementar o problema da capacidade de pistas.

## II.6. Modelos de Simulação

Modelos de Simulação são aqueles que, utilizando representações matemáticas e lógicas do mundo real, convertem parâmetros e dados de entrada em saídas que caracterizam o sistema em questão. Em síntese buscam retratar o comportamento real do sistema, prevendo-se conseqüências e resultados (Almeida, 1998).

Os primeiros modelos de simulação de fluxo de aeronaves na área de movimento e espaço aéreo terminal de aeroportos foram desenvolvidos nos Estados Unidos no final dos anos 60, pela *Federal Aviation Administration* – FAA, com o objetivo de investigar os problemas associados a congestionamentos e atrasos nos aeroportos em decorrência do aumento substancial da demanda pelo transporte aéreo (Pereira, B. D. *et al.*, *apud* Moraes, 2000). O ADSIM (Modelo de Simulação de Atrasos em Aeroportos) e o RDSIM (Modelo de Capacidade e Atrasos de Pistas), são dois exemplos. O primeiro leva em conta possíveis atrasos na aproximação desde a entrada na área terminal (setor do espaço aéreo em que se realizam os procedimentos de aproximação). O último foi especificamente desenvolvido para o cálculo de capacidade de pistas e, portanto, economiza tempo de execução em relação ao primeiro (Barros, 1994).

Partindo destes modelos, a FAA, gerou o SIMMOD, um *software* desenvolvido para realizar simulações em espaços aéreos e aeroportos, aliando os conceitos dos anteriores em uma única plataforma. Utiliza um modelo discreto, dinâmico e estocástico, e apresenta a possibilidade de fornecer, entre outras informações, dados de capacidade, tempos de viagens, atrasos e consumo de combustível, que serão descritos de forma mais detalhada no próximo capítulo.

Assim como o SIMMOD, outras ferramentas com modelos computacionais foram bastante difundidos a partir das duas últimas décadas em virtude do rápido aprimoramento dos computadores digitais, implicando na realização de simulações cada vez mais detalhadas em intervalos de tempo gradativamente menores. Isso tem contribuído para colocar a simulação em primeiro lugar dentre os recursos de auxílio ao planejamento de sistemas aeroportuários (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2000).

### ***II.6.1. Caracterização de um Modelo de Simulação***

Simulações de um sistema ou de um organismo podem ser definidas sob vários aspectos e percepções:

- É a operação de um modelo ou algo similar, que constitui uma representação deste sistema ou organismo. O modelo é sensível a manipulações que seriam impossíveis, muito caro ou de execução impraticável nas entidades que representam. A operação do modelo pode ser estudada e, a partir daí, propriedades relacionadas com o comportamento do sistema real, ou de seus subsistemas, podem ser inferidas (Naylor, 1966).
- É o processo de elaborar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com esse modelo, tendo como propósito a compreensão do comportamento do sistema ou a avaliação de diversas estratégias (dentro do limite imposto por um critério ou conjunto de critérios) para a operação do sistema (Shannon, 1975).

- É a técnica empregada na análise numérica de modelos a partir de dados coletados para estimar as reais características do sistema (Law *et. al.*, 1991).

As duas primeiras definições deixam bem evidente a idéia de experimentação associada à simulação. As variáveis em jogo podem ser manipuladas e, a partir dos resultados, podem ser feitas inferências acerca do sistema real. Para executar o processamento numérico necessário à análise do modelo, ao qual se refere a terceira definição, lança-se mão dos computadores digitais (Feitosa, 2000). Esses, na medida em que se tornam mais eficientes e disponíveis, têm contribuído para a disseminação das técnicas de simulação, que, nos anos 90, já ocupavam a segunda posição entre as técnicas mais utilizadas pelos estudiosos da área de Pesquisa Operacional (Trani *apud* Hillier *et al.*, 1999).

As origens da simulação remontam aos anos 40, quando von Neumann e Ulam, realizando as pesquisas que resultariam na construção da primeira bomba atômica, se depararam com problemas matemáticos cujo tratamento analítico não se mostrava viável. A saída proposta foi utilizar um método baseado em amostragens aleatórias para a determinação das variáveis de interesse, o qual ficou conhecido por “Método de Monte Carlo”. No início da década de 50, com o advento dos primeiros computadores, a idéia do método foi estendida para a solução de problemas probabilísticos de caráter mais geral, como os que envolviam “filas”, e viu-se com isso a possibilidade de simular um processo e estimar seus principais parâmetros de operação (Feitosa *apud* Saliby, 2000).

Entre as principais vantagens da simulação, pode-se citar (TransSolutions, 2000):

- Conceito básico de fácil entendimento;

- Facilidade em se encontrar justificativas;
- Credibilidade;
- Risco mínimo;
- Flexibilidade na elaboração dos diversos cenários.

Por sua vez, o processo de simulação conta também com algumas desvantagens, entre elas:

- Incapacidade de gerar soluções ótimas por conta própria (modelo ruim = resultados péssimos);
- Grande demanda de tempo para o seu desenvolvimento;
- Grande demanda de dados.

Quanto à consideração dos aspectos aleatórios associados ao sistema que se propõe a retratar, os modelos de simulação podem ser determinísticos ou estocásticos. O modelo é determinístico se todos os eventos<sup>3</sup> que nele ocorrem têm início e duração previamente definidos, não havendo, portanto, qualquer incerteza associada ao seu comportamento no decorrer do período em que é analisado. No modelo estocástico, um ou mais valores associados aos eventos não são previamente conhecidos, sendo determinados no decorrer da simulação a partir das distribuições de probabilidade que os representam (Feitosa, 2000).

---

<sup>3</sup> Qualquer ocorrência, num determinado instante do tempo, que gera uma mudança de estado significativa no sistema.



No que se refere ao comportamento dinâmico das variáveis, os modelos de simulação podem ser classificados em três grupos (Pidd, 1994):

*i* - Discretos: As variáveis do sistema modificam-se instantaneamente em pontos discretos ao longo do tempo.

*ii* - Contínuos: As variáveis do sistema têm seu valor modificado continuamente ao longo do tempo. As mudanças de valor dessas variáveis são descritas por sistemas de equações diferenciais.

*iii* - Híbridos: As variáveis do sistema modificam-se tanto instantaneamente como continuamente ao longo do tempo. Essa classe surgiu mais recentemente, por se perceber que a separação contínua/discreta estava se tornando por demais artificial.

Pidd (Pidd, 1994) refere-se ainda a uma classificação quanto ao avanço do tempo, segundo a qual os modelos de simulação podem ser de tempo fracionado – *time slicing* – ou se basear na técnica do próximo evento. No primeiro caso, o relógio<sup>4</sup> da simulação sofre avanços em iguais intervalos de tempo, ao passo que, no segundo, o relógio somente é atualizado quando é prevista a ocorrência de um evento.

Os modelos de simulação indicados para a operação aeroportuária mais conhecidos são SIMMOD, TAAM, ARCTERM.

---

<sup>4</sup> Parte do modelo destinada ao monitoramento e controle do avanço do tempo na simulação.

### ***II.6.2. Verificação e Validação***

A verificação e a validação são etapas essenciais para obtenção de resultados satisfatórios oriundos da modelagem conceitual e computacional.

Esta fase é onde o modelo elaborado é testado logicamente (verificação) e numericamente (validação). Na verificação, testa-se o modelo através de uma pequena simulação com dados conhecidos analisando então se o modelo apresenta resultados numéricos de mesma ordem de grandeza dos esperados (Almeida, 1998).

A verificação e a validação são etapas de crucial importância em qualquer projeto de simulação. Embora não exista uma terminologia padrão associada aos dois termos em questão, as definições encontradas na literatura estão centradas nos mesmos princípios básicos (Feitosa, 2000).

Na verificação a idéia é checar se o programa feito em computador (modelo computacional) comporta-se conforme o esperado. Essa é uma etapa comum a qualquer atividade de programação, na qual o programador procura erros de lógica que causam resultados inconsistentes com o que se esperaria obter do programa. O objetivo é depurar ao máximo o modelo computacional (Feitosa, 2000).

Por outro lado, na validação o objetivo é determinar se o modelo de simulação conceitual é uma representação acurada do sistema estudado. Não se almeja alcançar uma representação perfeita da realidade, já que o modelo perfeito seria o próprio sistema real (por definição, qualquer modelo é uma representação simplificada da realidade). O que se coloca

em questão é a credibilidade dos resultados gerados pelo modelo numa situação de aplicação prática. O modelo deve trazer resultados precisos o suficiente. O quão preciso é suficiente depende do objetivo da análise. Assim, o processo de validação pressupõe a existência de parâmetros representativos do sistema real, que possam ser confrontados com os mesmos parâmetros, porém provenientes da simulação. Dessa análise comparativa, podem ser identificadas as necessidades de se conduzir modificações e/ou reconsiderações em determinadas partes do modelo lógico-matemático buscando torná-lo mais representativo. Paralelamente, são detectados os parâmetros internos do modelo a serem ajustados, de modo a se melhorar a acurácia dos resultados em relação aos dados reais. Essa última atividade, que está inserida no processo de validação, é a calibração do modelo (Feitosa, 2000).

Na prática, a verificação e a validação constituem duas etapas que, merecem grande atenção dentro do ciclo de construção do modelo. Um programa que contenha erros pode gerar resultados claramente absurdos, ou, o que é pior, resultados incoerentes e que passam despercebidos. Em decorrência, um modelo não validado pode levar a tomadas de decisões erradas em relação ao sistema ao qual é aplicado (Feitosa, 2000).

Como a ferramenta SIMMOD é um *software* específico para aeroportos e planejamento aeroportuário, as etapas de verificação e validação estão diretamente relacionadas ao conjunto do modelo e seus resultados, uma vez que já se encontram embutidas na ferramenta todos os padrões de criação das entidades. Para esta geração de entidades, os testes estatísticos não precisam ser realizados.

### III. SIMMOD

Como descrito no capítulo anterior, os modelos de simulação são bastante eficientes na resolução de problemas complexos. Possuem o custo bem inferior se comparado à realização de uma experiência utilizando o sistema real. Com o modelo já construído, previamente verificado e validado, permite em pouco tempo fazer prognósticos para vários anos, e no contexto do transporte aéreo, lado aéreo dos sistemas aeroportuários, o SIMMOD é bastante utilizado, apresentando resultados bastante satisfatórios.

O SIMMOD é uma ferramenta capaz de representar modelos de simulação compostos por eventos discretos. Representa um sistema que se desenvolve no decorrer do tempo por meio de uma lógica matemática, onde as mudanças de estado são realizadas em pontos discretos dentro de um determinado período. Esses pontos são aqueles nos quais ocorre algum evento (Scheel, 2000).

A ferramenta representa aeroportos e sistema de espaço aéreo como uma série de nós conectados por arcos (*links*). Um nó é uma posição definida em um sistema de coordenadas onde a simulação avalia a posição de uma aeronave com respeito a outras aeronaves do sistema. Um arco define um caminho entre dois nós.

### III.1. Componentes do SIMMOD

A ferramenta computacional utilizada neste trabalho foi o SIMMOD Plus! 4.0 para *Windows*, o qual funciona sob a idéia de três programas principais: (Figura 7).

Pré – Processador: etapa de transformação dos dados brutos em dados de entrada apropriados (*flat files*) usados pelo instrumento de simulação;

Instrumento de Simulação: produz os dados de saída (*flat files*), pela simulação do sistema, a partir dos dados de entrada tratados;

Pós – Processador: gera os resultados, animações e relatórios, a partir dos dados de saída gerados pelo instrumento de simulação.



Figura 7 – Idéia de Funcionamento do SIMMOD.  
Fonte: Delcaire & Feron, 1997.

#### III.1.1. O Pré - Processamento

O pré-processador, como definido anteriormente, é responsável pela adaptação dos dados brutos (*flat files*) em dados legíveis pelo instrumento de simulação.

Sem a existência do pré-processador, haveria uma grande perda de tempo na modelagem. Toda a construção da rede de nós e arcos (*links*), quer seja no solo – lado aéreo do aeroporto ou no espaço aéreo, teria que ser realizada com base em muitos cálculos e medições. Esta é a razão pela qual todas as versões do SIMMOD possuem um *network builder*<sup>5</sup>. Em geral é possível superpor um arquivo CAD, facilitando mais ainda a tarefa da construção da rede de nós e arcos.

O operador ainda pode editar e modificar os arquivos de entrada no pré-processador, de uma maneira clara, algumas vezes em planilhas de dados, no momento que desejar.

### ***III.1.2. O Instrumento de Simulação***

O Instrumento de Simulação é um programa que gera vários dados de saída baseados nos dados de entrada, responsáveis pelas definições do aeroporto e dos eventos que nele acontecem. Contém uma lógica específica de manuseio para todas as operações das aeronaves necessárias no modelo. Consegue aproximar muito bem todas as regras executadas pelo controle de torre, tornando o SIMMOD uma ferramenta capaz de analisar diversas condições impostas pelo sistema analisado.

Uma simulação é plenamente definida por 4 conjuntos de dados de entrada. O instrumento de simulação do SIMMOD considera como arquivos de entrada aqueles conjuntos relacionados às definições do espaço aéreo, do solo – lado aéreo do aeroporto, dos

---

<sup>5</sup> Interface criada sob a plataforma windows para facilitar a modelagem dos cenários.

eventos – pousos e decolagens previstos – e das aeronaves com suas características operacionais, desempenho etc.

Estes arquivos possuem toda a informação necessária para que o instrumento de simulação consiga modelar o movimento das aeronaves no sistema. Os 4 conjuntos de dados são partes específicas do sistema modelado.

O arquivo de espaço aéreo (*airspace.xxx*) contém todos os registros que definem o comportamento das aeronaves quanto à estrutura do espaço aéreo, as rotas, os procedimentos de pousos e decolagens, entre outras.

Quanto ao conjunto relativo ao solo (*airfield.xxx*) – lado aéreo dos aeroportos – os arquivos definem a geometria das pistas de pousos e decolagens, as filas de decolagem, os portões de embarque, e todas as características operacionais dessa parte do sistema aeroportuário.

Todos os eventos ocorridos durante a simulação, as chegadas e partidas dos vôos, mudanças no tempo, utilização das pistas de pousos e decolagens, são descritas pelo arquivo dos eventos (*events.xxx*).

As aeronaves são caracterizadas em um arquivo próprio (*aircraft.xxx*), onde todas as informações técnicas, incluindo desempenho, são descritas. Este arquivo já vem inserido no SIMMOD, onde há uma infinidade de tipos de aeronaves, bastando ao usuário somente associá-las à sua necessidade.

Diante da grande quantidade de informação disponibilizada pelo modelo, o instrumento de simulação gera dados capazes de descrever todos os fenômenos que aconteceram durante a simulação.

Basicamente são quatro grupos de arquivos:

- *echo.xxx*;
- *log.xxx*;
- *debug.xxx*;
- *outcome.xxx*.

O arquivo *echo.xxx* descreve o processamento dos dados de entrada. Caso haja problema no processamento, pode-se verificar qual dado de entrada está incorreto. Não havendo correção, a simulação não prossegue.

Uma vez conseguindo prosseguir com a simulação, o SIMMOD continua gerando mais arquivos como o *log.xxx*, capaz de indicar a localização do erro nas operações internas da ferramenta, sem interferir na continuação da simulação. Bastante utilizado como último recurso para busca de erros provenientes dos dados de entrada.

O arquivo mais utilizado na procura dos erros associados aos dados de entrada é o *debug.xxx*. Mostra claramente onde o problema está localizado, além de mostrar a causa do erro associado à simulação.



Entretanto, o arquivo mais valioso, gerado pelo instrumento de simulação, é o *outcome.xxx*. Pode ser considerado como tal devido ao fornecimento em detalhes de todas as informações ocorridas na simulação, descrevendo a cada momento, por exemplo, a posição da aeronave.

Estando cada um destes arquivos verificados, os relatórios para análise de pontos específicos do sistema certamente apresentarão resultados satisfatórios.

### ***III.1.3. O Pós – Processador***

Quando o modelo de simulação está verificado e validado, o mesmo torna-se capaz de gerar uma lista de arquivos de saída bastante interessantes e relevantes ao estudo em questão. Estes arquivos podem ser convertidos em relatórios estatísticos, gráficos e animações a partir do pós-processamento, porém esta atividade depende exclusivamente do analista.

Porém, após gerar esta lista de arquivos de saída, o processo de verificação e validação pode estar ainda em andamento, havendo uma grande interação destes com as animações, muito úteis na próxima etapa.

Animações são totalmente usuais, especialmente quando os planejadores do sistema conseguem unir as informações dos relatórios gerados pela simulação com a verificação real do sistema. Segundo a Empresa TransSolutions (TransSolutions, 2000), especializada na ferramenta, uma animação pode explicar melhor do que mil palavras.

## III.2. Procedimentos Operacionais

A seguir são enumerados alguns procedimentos operacionais e como os mesmos são observados sob o ponto de vista do SIMMOD Plus! 4.0.

### - Vôos:

Um vôo é representado por uma aeronave com uma única identificação (*ID*) e um conjunto de dados, incluindo: tipo de vôo, início do vôo, e rota.

### - Chegadas:

No SIMMOD um vôo que chega sempre começa no espaço aéreo. Uma chegada básica consiste em um vôo que: atravessa uma rota do espaço aéreo, pousa em uma pista, segue para um portão de embarque, desembarca passageiros, e sai da simulação.

### - Escalas (Parada) – *Turnaround*:

Uma aeronave que chega pode também realizar um *turnaround* em um aeroporto e decolar. Isto permite uma chegada e uma saída serem dependentes uma da outra. Se um vôo se atrasa em função de congestionamentos, a saída dependente deve esperar a aeronave que chega até que esta possa ocupar um portão de embarque, embarcar passageiros e decolar. A chegada seguida de uma saída com *turnaround* consiste de um vôo que: atravessa uma rota do espaço aéreo, pousa em uma pista, segue para um portão de embarque, desembarca passageiros, embarca passageiros, segue para uma pista, é autorizado a decolar de uma pista, ou sai da simulação.

- Sobrevôos (*Overflights*):

Um sobrevôo é uma chegada que não pousa em um aeroporto. O fim da rota de chegada não é um aeroporto, então o vôo começa e termina no espaço aéreo. Após atravessar sua rota, o sobrevôo sai da simulação.

- Saídas:

Um vôo de saída no SIMMOD sempre tem início em um aeroporto. Uma decolagem básica, que é chamada de *emplane* para os propósitos da simulação, consiste em um vôo que é criado em um portão de embarque e embarca passageiros, segue para uma pista, decola de uma pista, atravessa uma rota do espaço aéreo, ou sai da simulação.

Uma saída pode ser criada como um dado de entrada para gerar uma chegada em outro aeroporto.

- Definição de aeronave:

Todo vôo criado pela simulação é identificado como um determinado modelo de aeronave. Este e outros dados a respeito de aeronaves permitem a simulação distinguir entre diferentes aeronaves e assinalar para elas diferentes regras de separação.

A simulação referencia uma aeronave por três modos:

*i* - Pelo número do modelo;

*ii* - Pelo número do grupo da aeronave no espaço aéreo;

*iii* - Pelo número de grupo de aeroporto.

- Estrutura do espaço aéreo:

O espaço aéreo no SIMMOD é composto por uma rede de rotas para aeronaves. As rotas são definidas por meio de nós e *links*. Quando duas ou mais rotas convergem, alguns nós e *links* irão aparecer na definição de mais de uma rota.

- Rotas:

Uma rota é definida como uma série de nós conectados por *links* listados seqüencialmente na direção do voo.

- Nós:

A definição de um nó determina muitos parâmetros de controle importantes para as aeronaves que passam por estes nós, incluindo, necessidades de separação, características de padrão de espera, regras de ultrapassagem, e estratégia de espera e chegada.

- Nós de interface:

Alguns nós são definidos como nós de interface. Indicam a transição entre a simulação no solo e no ar.

- Arcos (*links*):

Aeronaves se movem de um nó para outro apenas por arcos (*links*) definidos. Arcos do espaço aéreo tipicamente representam segmentos de um caminho de voo. Rotas são compostas por vários arcos.

- Vento:

O efeito do vento pode variar para cada arco. Arcos podem ser agrupados quando possuem o mesmo efeito de vento. Estes grupos são chamados de *winds sets*.

- Setores:

A simulação pode medir a capacidade combinada de um grupo de arcos definidos como um setor. A capacidade de setor inclui o número total de aeronaves (a) nos arcos pertencentes ao setor ou (b) executando espera em nós dentro do setor ou (c) executando espera em nós pertencentes ao perímetro do setor.

- Planos:

O grupo de rotas (planos) é mais complexo do que uma simples lista de nós e arcos. Um grupo de rotas pode ser definido para manusear diferentes operações para um aeroporto.

Um aeroporto pode estar operando com fluxo em determinada direção e então ter de mudá-la, devido a mudanças de condições ou requisitos operacionais. A simulação considera cada tipo de operação um plano. Em um plano determinadas rotas estão disponíveis para uso. Se o plano muda, um conjunto diferente de rotas torna-se disponível.

- Solo – Lado Aéreo (*airfield*):

É definido como uma série de nós e arcos de conexão. Estes blocos de construção definem os elementos estruturais principais do SIMMOD *airfield*:

- Pistas de rolamento - (*taxipaths*):

Para o movimento das aeronaves entre os portões de embarque e as pistas de pouso;

- Pista de pousos e decolagens (*runways*):

Para pousos e decolagens;

- Filas de espera na partida (*departures queues*):

Para espera e seqüenciamento de aeronaves que decolam;

- Portões de Embarque (*gates*):

Para carga e descarga das aeronaves.

Por meio da definição de como estes elementos irão operar e como serão utilizados, os usuários do SIMMOD podem modelar uma variedade de operações.

Os nós na superfície do *airfield* são interseções de pistas de taxi, saídas ou cruzamentos de pista de pouso, portões de embarque ou filas para decolagem.

A lógica do *airfield* considera as características do arco na determinação do movimento da aeronave. Cada arco com uma numeração exclusiva é definido por meio de seu ponto de nó início e de término. Também recebe várias características incluindo estas:

*i* – Regras de passagem e limitações;

*ii* – Comprimento;

*iii* – Reserva para aeronaves que chegam ou que partem;

*iv* – Capacidade de aeronaves;

*v* – Restrição de tamanho de aeronave;

*vi* – Direção do movimento das aeronaves.

### III.3. Tipos de dados necessários ao SIMMOD

O SIMMOD requer dados em 3 áreas. A quarta área, aeronaves, já vêm definida em arquivos da própria ferramenta:

- i* – Controle de tráfego aéreo;
- ii* – Características operacionais;
- iii* – Configuração do aeródromo.

#### III.3.1. Lista dos Dados

Dentro destas três áreas, os dados são obtidos por meio de visitas técnicas (ACC's<sup>6</sup>, APP's<sup>7</sup> e TWR's<sup>8</sup>), coletas de dados em campo e por interação com o pessoal das instituições envolvidas no processo (DAC<sup>9</sup>, IPV<sup>10</sup>, DECEA<sup>11</sup>, INFRAERO, Departamentos Aeroviários e demais administradoras).

- i* – Controle do tráfego aéreo (APP's / DECEA / IPV):
  - Configuração do espaço aéreo (TMA);
  - Separação mínima entre aeronaves;
  - Probabilidade de violação quanto à separação mínima (procedimentos utilizados pelos controladores);

---

<sup>6</sup> Centro de Controle de Área.

<sup>7</sup> Centro de Controle de Aproximação.

<sup>8</sup> Torre de Controle de Aeródromo.

<sup>9</sup> Departamento de Aviação Civil.

<sup>10</sup> Instituto de Proteção ao Voo.

<sup>11</sup> Departamento de Controle e Espaço Aéreo.

- Comprimento da trajetória comum de aproximação;
  - Estratégias utilizadas pelos controladores no seqüenciamento de aeronaves com velocidades diferentes;
  - Verificar os estudos para a implantação de sofisticação nos sistemas de controle de tráfego (CNS/ATM<sup>12</sup>);
  - Implantação da política de *slots*.
- ii* – Características operacionais (INFRAERO / DAC / DECEA / TWR / Sala AIS):
- Horários e planos de voo (HOTRAN<sup>13</sup>, OAG<sup>14</sup>, antiga ficha IPV 100-34);
  - Dados da hora pico;
  - Equipamentos existentes no aeroporto;
  - Tipos de operações no aeroporto – mínimos meteorológicos;
  - Estatística de fechamento do aeroporto;
  - Dados de previsão quanto à demanda;
  - Características das aeronaves operantes;
  - Capacidade de manobras;
  - Velocidade de aproximação;
  - *Mix* de aeronaves, porcentagem da demanda composta por aeronaves pequenas, médias, grandes ou super pesadas;
  - Razão entre pousos e decolagens;
  - Distribuição de probabilidade de atraso de voo;
  - Política de utilização dos portões de embarque – aeronaves e empresas aéreas.

---

<sup>12</sup> Sistema de Comunicações, Navegação e Vigilância/Gerenciamento de Tráfego Aéreo.

<sup>13</sup> Horário do Transporte Aéreo.

<sup>14</sup> Official Airline Guide.



*iii* – Configuração do aeródromo (INFRAERO / Departamentos Aeroviários / IAC<sup>15</sup>):

- Plantas atualizadas do aeroporto desejado (formato dxf do AutoCAD), contendo o sistema de pistas, pouso, decolagem e rolamento;

- Planta de obstáculos;

- Planta de marcação de pátio.

Vale ressaltar que para a finalidade do presente estudo, não se faz necessário a aquisição de todos esses dados citados anteriormente.

---

<sup>15</sup> Instituto de Aviação Civil.

### III.4. Concluindo

O fluxograma descrito abaixo representa sinteticamente todos os processos que envolvem o desenvolvimento de um modelo com a utilização da ferramenta SIMMOD.

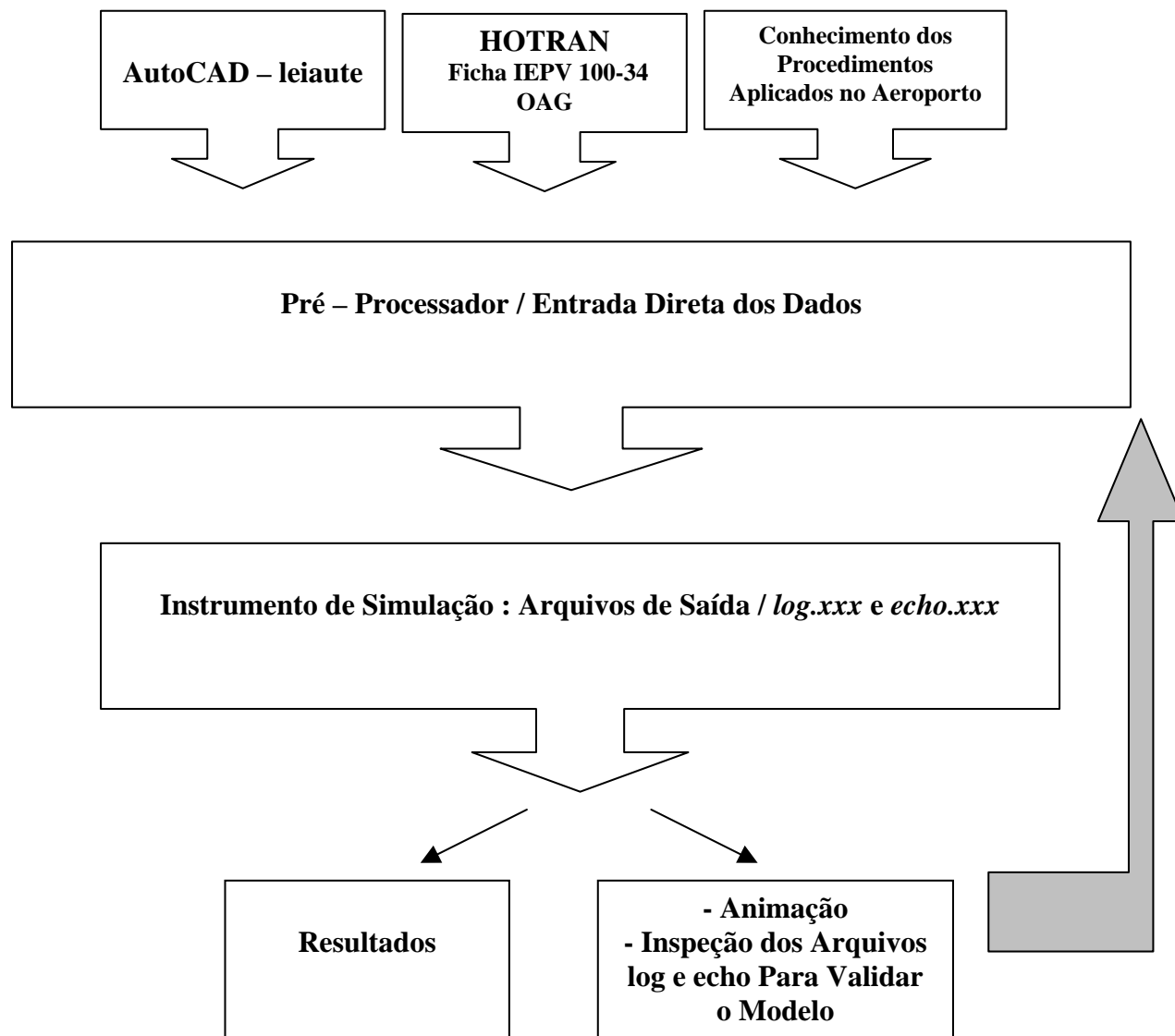


Figura 8 – Representação dos Processos que Envolvem a Criação de um Estudo no SIMMOD.  
Fonte: Delcaire & Feron, 1997.

#### **IV. O AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO - AISP/GRU**

Maior complexo aeroportuário do país, o AISP/GRU foi concebido originalmente para atender na área da grande São Paulo à demanda de vôos domésticos que utilizavam o Aeroporto de Congonhas, com exceção da ponte aérea Rio - São Paulo, bem como os vôos internacionais relacionados com os países integrantes do Cone Sul<sup>16</sup>, servindo também como uma alternativa do Aeroporto de Campinas.

Embora tenha sido planejado para atender um determinado cenário e objetivo, os responsáveis pela administração do Aeroporto não conseguiram manter a idéia inicial, tornando necessária a implantação de novas estratégias capazes de absorver a demanda não prevista.

O AISP/GRU, sem dúvida alguma, o grande “portão de entrada” do país atualmente, é responsável pelo processamento de mais de 70% dos passageiros internacionais (origem/destino). Concentra, no Brasil, o maior movimento total de passageiros regulares, responde pela primeira colocação relativa ao volume total de carga e mala postal, além do grande movimento de aeronaves de tráfego total regular (INFRAERO, 2000).

---

<sup>16</sup> Países localizados no sul da América do Sul.

Desde a sua inauguração, em 1985, a 2000, cerca de 130 milhões de passageiros dos cinco continentes utilizaram o AISP/GRU (INFRAERO, 2000). A Figura 9 mostra claramente como o Aeroporto desponta como aeroporto de maior movimento no país.

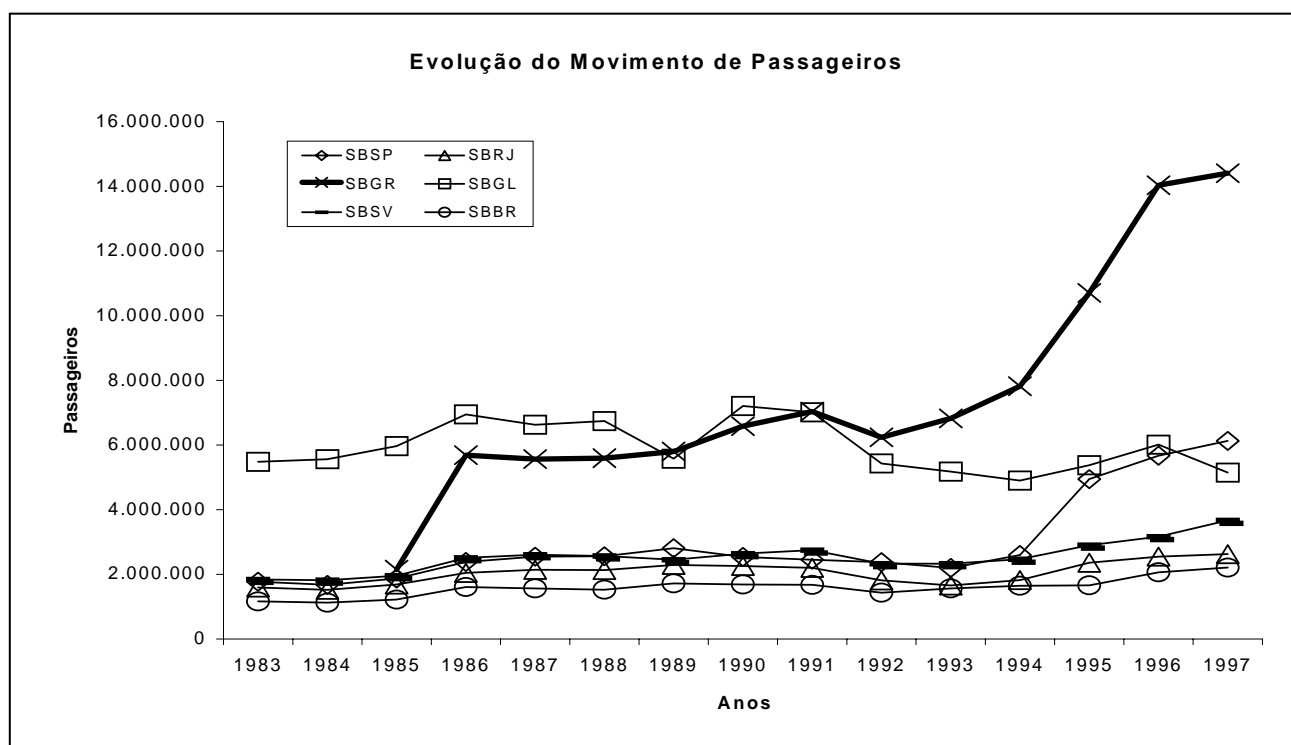


Figura 9 – Evolução no Movimento de Passageiros nos Principais Aeroportos do Brasil.  
 Fonte: Demanda Detalhada dos Aeroportos Brasileiros, MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999.

O Aeroporto possui 2 pistas paralelas, com afastamento de 375m uma da outra. Os terminais de passageiros 1 e 2 têm capacidade projetada para receber, cada um, até 7,5 milhões de passageiros/ano.

Localiza-se na cidade de Guarulhos, em São Paulo, e possui 14  $km^2$  de área patrimonial. Distante 25  $km$  da capital paulista, seu acesso é garantido por um sistema viário próprio com 5  $km$  de extensão.

Sistemas de pistas de pouso e decolagem, torre de controle, radares e sistemas de auxílio à navegação aérea, sistemas de energia elétrica, de captação de águas e tratamento de afluentes, incinerador de lixo, parque de combustível para aviação, viveiro de plantas para urbanização e revestimento vegetal e terminais de carga aérea compõem a estrutura necessária ao perfeito funcionamento deste grande complexo aeroportuário. Para conforto dos passageiros, o Aeroporto dispõe de centro de convenções com diversos auditórios, salas *vips*, espaço cultural, capela ecumênica e amplo estacionamento de veículos. Oferece também uma rede comercial com 150 lojas e serviços, distribuídos nos três pavimentos dos terminais 1 e 2. Além da variedade de serviços prestados aos usuários. O Aeroporto também representa um significativo mercado de trabalho, que abriga 370 empresas. Liga São Paulo a 215 cidades (135 destinos internacionais e 80 destinos brasileiros) de 63 países de todos os continentes. São 38 companhias aéreas, 212 balcões de *check in* e 28 portões de embarque (INFRAERO, 2000).

#### **IV.1. Os Atuais Terminais de Passageiros**

O Aeroporto Internacional de São Paulo (AISP/GRU) encontra-se atualmente operando com 2 terminais de passageiros, com capacidade projetada para processar até 7,5 milhões de passageiros/ano (mencionado anteriormente), divididos entre as companhias operadoras nacionais e estrangeiras.

A localização das companhias dentro dos terminais de passageiros respeita critérios de alianças, *code share* e tamanho das aeronaves operantes (dentro dos limites de capacidade dos próprios terminais) (Figura 10).

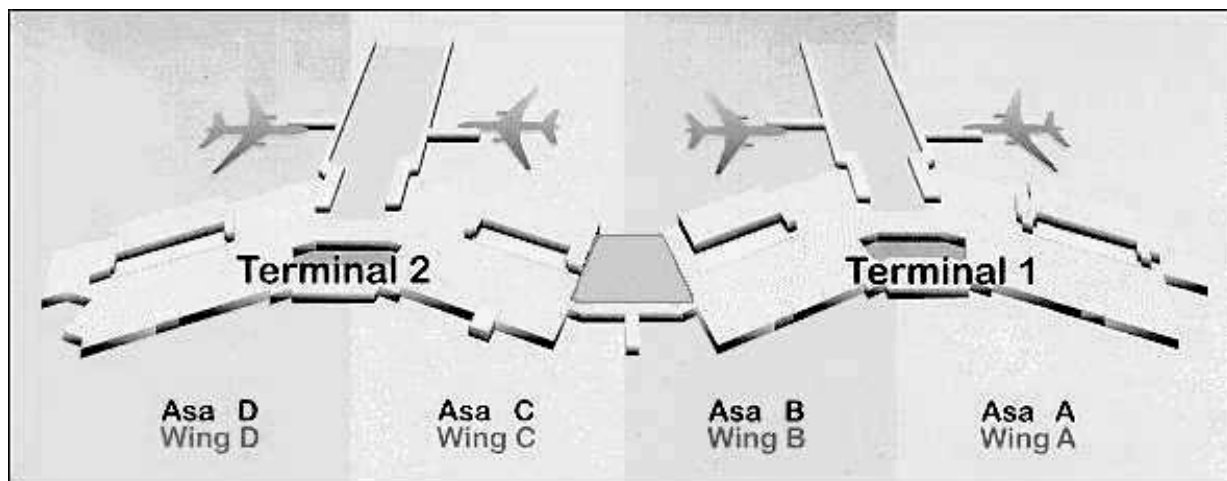


Figura 10 – Esboço da Situação Atual dos Terminais de Passageiros do AISP/GRU.  
Fonte: INFRAERO, 2000.

Esta divisão operacional dentro dos terminais de passageiros entre as companhias aéreas, consiste num processo muito variável no tempo. Inúmeras mudanças são observadas constantemente neste quesito.

## IV.2. Lado Aéreo do Aeroporto Internacional de São Paulo

O Aeroporto Internacional de São Paulo possui atualmente duas pistas de pousos e decolagens paralelas, sendo uma com 3000m de comprimento (09R/27L) e a outra com 3700m (09L/27R). A separação entre os eixos das pistas é de 375m (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2002).

Na direção 09, a decalagem entre as cabeceiras é de 500m, sendo que a 09R, utilizada prioritariamente para as operações de pousos, está deslocada no sentido contrário da

aproximação (em relação à pista 09L). A pista 09L é utilizada na maioria das vezes para as operações de decolagens (Figura 11).

A existência desta decalagem entre as pistas permite considerar uma separação efetiva entre as pistas de 485m (adição de 30m para cada 150m de decalagem). No entanto, a separação mínima sugerida pela OACI é de 760m para operações, sob condição VFR, segregadas de pousos e decolagens em pistas paralelas (Barros *apud* Nagid, 1994). Todavia, pistas com separação maior que 300m podem operar no sistema *dual lane*, ou seja, decolagens autorizadas quando a aeronave pousando toca o solo (Barros, 1994).

Segundo o IAC (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999), a proporção de utilização das cabeceiras é de 85% para operações na cabeceira 09 e 15% para a cabeceira 27.

O plano diretor do Aeroporto Internacional de São Paulo prevê a existência de duas pistas de rolamento paralelas (PR-A e PR-B) para fluir o tráfego entre as pistas de pouso e decolagem e os pátios. Atualmente só a PR-B encontra-se totalmente construída, a PR-A possui somente um pequeno trecho concluído. Por enquanto, o fato da PR-A não se encontrar totalmente pronta para operação não implica em maiores problemas. Como relatado anteriormente, a maioria das operações acontece na cabeceira 09. Entretanto, caso exista um terceiro terminal de passageiros, será imprescindível a sua finalização, até porque a idéia do terminal vem associada à terceira pista de pousos e decolagens.

Quanto ao seu pátio de estacionamento de aeronaves, o AISP/GRU, possui dois terminais de passageiros, duas áreas de estacionamento remotas e uma área de terminal de carga (Figura 11).

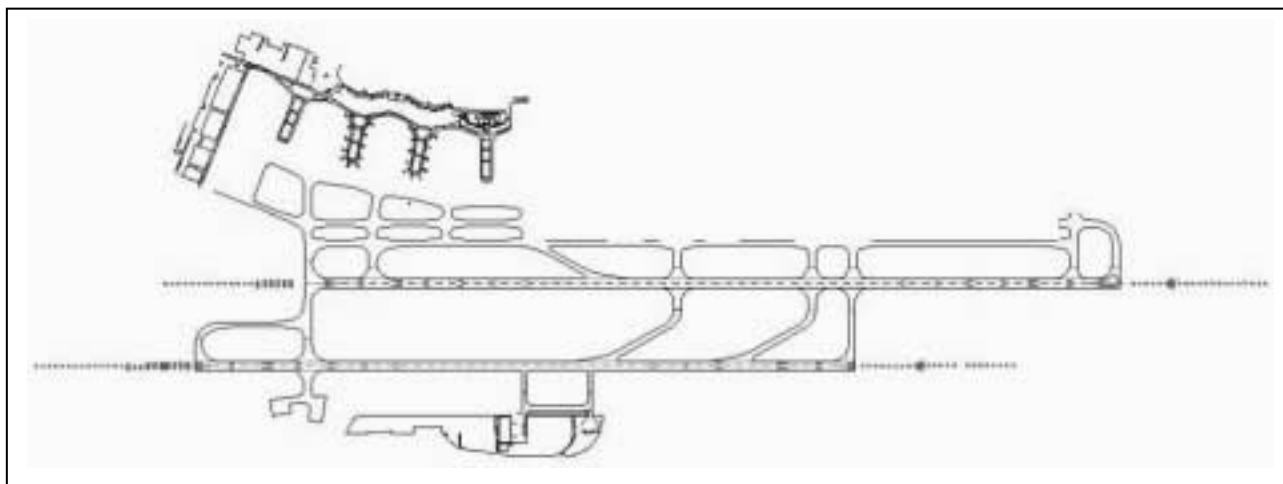


Figura 11 – Planta baixa do AISP/GRU.  
Fonte: INFRAERO, 2000.

Cada terminal de passageiros possui a forma de um *finger*, com onze posições de parada cada um, sendo que apenas as três posições da extremidade do *finger* podem receber aeronaves maiores do que o *Boeing 767*. Este fato deve-se à proposta inicial para a qual o aeroporto fora planejado, aquela de atender vôos somente dos países do cone sul.

Diante das mudanças, e adaptações, o plano diretor do aeroporto foi modificado, de maneira que os novos terminais 3 e 4 (previstos no planejamento) fossem projetados para movimentar 12 milhões de passageiros cada um deles, totalizando a capacidade de movimentar 39 milhões de passageiros/ano quando forem concluídas todas as etapas da obra.



## V. MODELAGEM DOS CENÁRIOS - CONCEPÇÃO

A concepção dos modelos seguiu os planos de ampliação da infra-estrutura do AISP/GRU propostos pela INFRAERO.

A partir da definição do problema, o primeiro passo da metodologia consistiu em listar os dados e informações necessárias para a concepção dos modelos e os meios para obtê-los.

Para isso, basicamente, o modelo exigiu que fossem detalhados os aspectos inerentes à demanda, operação das aeronaves (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1987) e configuração geométrica da infra-estrutura aeroportuária e do espaço aéreo terminal (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1993) existente hoje. Segundo Pereira (Pereira et al., 2001), a construção do modelo é um trabalho computacional no qual todas estas informações são inseridas no SIMMOD.

A última fase para conclusão do modelo básico consiste na verificação e validação dele. Selecionam-se algumas métricas geradas pela simulação para serem comparadas com dados reais da operação aeroportuária, verificando assim se os desvios obtidos encontraram-se dentro dos limites de tolerância máximos estipulados.

## V.1. O Terceiro Terminal de Passageiros – TPS 3

A Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária - INFRAERO, possuindo conhecimento de estudos de demanda realizados pelo IAC, “Demanda Detalhada dos Aeroportos Brasileiros” (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999), onde era apontado para o ano de 2017 um movimento de passageiros na ordem de 39 milhões de passageiros/ano, licitou o projeto para a construção do terceiro terminal cujas as premissas deveriam ser as seguintes:

- Capacidade de atendimento para 12 milhões de passageiros/ano;
- Partido arquitetônico deveria acomodar o maior número de aeronaves possível atracadas em *nose in*, sendo duas posições destinadas às *NLA's* (*new large aircraft*) e o mínimo de sete posições para aeronaves tipo *Boeing 747-400*;
- Capacidade de expansão, possibilitando a execução do quarto terminal com dimensões idênticas ao terceiro;
- Edifício garagem com capacidade para 3600 vagas;
- A área construída para o terminal deveria situar-se entre 160.000 e 200.000  $m^2$ ;
- Áreas destinadas ao uso comercial na proporção de 15% superior à dos terminais 1 e 2 do aeroporto.

Além destas exigências, a INFRAERO buscou aliar fatores inovadores à operação do TPS-3 em relação aos atuais, TPS-1 e TPS-2, podendo ser enumerados:

A circulação de acesso às pontes foi dividida em dois níveis de forma a separar os fluxos de embarque e desembarque dos passageiros;

- *Mix* de atracação de aeronaves que varia de 13 posições para aeronaves de grande e médio porte e 22 posições para aeronaves de médio e pequeno porte com o uso de pontes duplas, atendendo as aeronaves maiores, como: *NLA (new large aircraft)* e *Boeing 747-400*;
- Sistema semi-automatizado de docagens de aeronaves.

O complexo em sua fase final comportaria ainda a construção de mais uma área de estacionamento remota para as aeronaves de grande, médio e pequeno porte, acesso a terceira pista e ainda um pequeno terminal linear, que absorverá parte do trânsito doméstico (Figura 12) (INFRAERO, 2000).

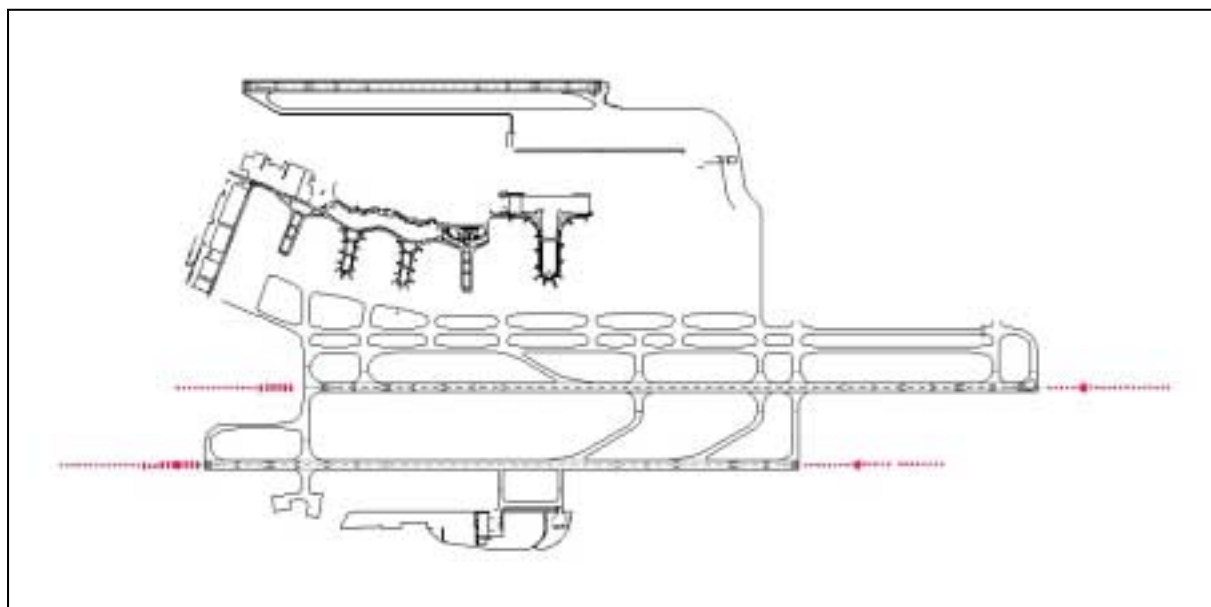


Figura 12 – Projeto do Novo AISP/GRU.  
Fonte: INFRAERO, 2000.

## V.2. A Terceira Pista

Após 17 anos de operação do Aeroporto, com duas pistas paralelas separadas em 375m, já é sentida a necessidade de aumentar a capacidade de operação no movimento de aeronaves. Cenários otimistas estimavam que em 2002, a capacidade horária, na condição VFR (visual), do sistema atingiria o valor de 58 movimentos por hora, ultrapassando o atual limite que é de 50 à 55 movimentos por hora (INFRAERO, 2000). Entretanto valores coletados junto a INFRAERO (INFRAERO, 2002), não ultrapassaram 50 operações horárias, valores que se mostraram coerentes com os resultados obtidos nas simulações apresentados posteriormente.

A implantação do novo sistema de pistas, constituído de uma pista de pouso e decolagem e pista de táxi paralela, aumentará a capacidade anual do aeroporto para 450.000 movimentos, o que atenderia ao volume previsto (média) de aeronaves para o horizonte de 2017, estimado em aproximadamente 425.000, também VFR (Figura 13).



Figura 13 – Previsão do Número de Movimentos de Aeronaves no AISP/GRU.  
 Fonte: Demanda Detalhada dos Aeroportos Brasileiros, MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999.

A capacidade horária será elevada para 96 movimentos, na condição IFR (98% das operações), valor inferior ao previsto para o horizonte final, de 115 movimentos (Figura 14). Desta forma, não ocorrendo uma mudança nas características do tráfego, como o aumento da participação de aeronaves de maior porte na composição da frota operando no aeroporto, deverão ser adotadas medidas buscando o aumento desta capacidade, cabendo até mesmo nova expansão da infra-estrutura aeroportuária, a fim de atender à demanda potencial de passageiros.

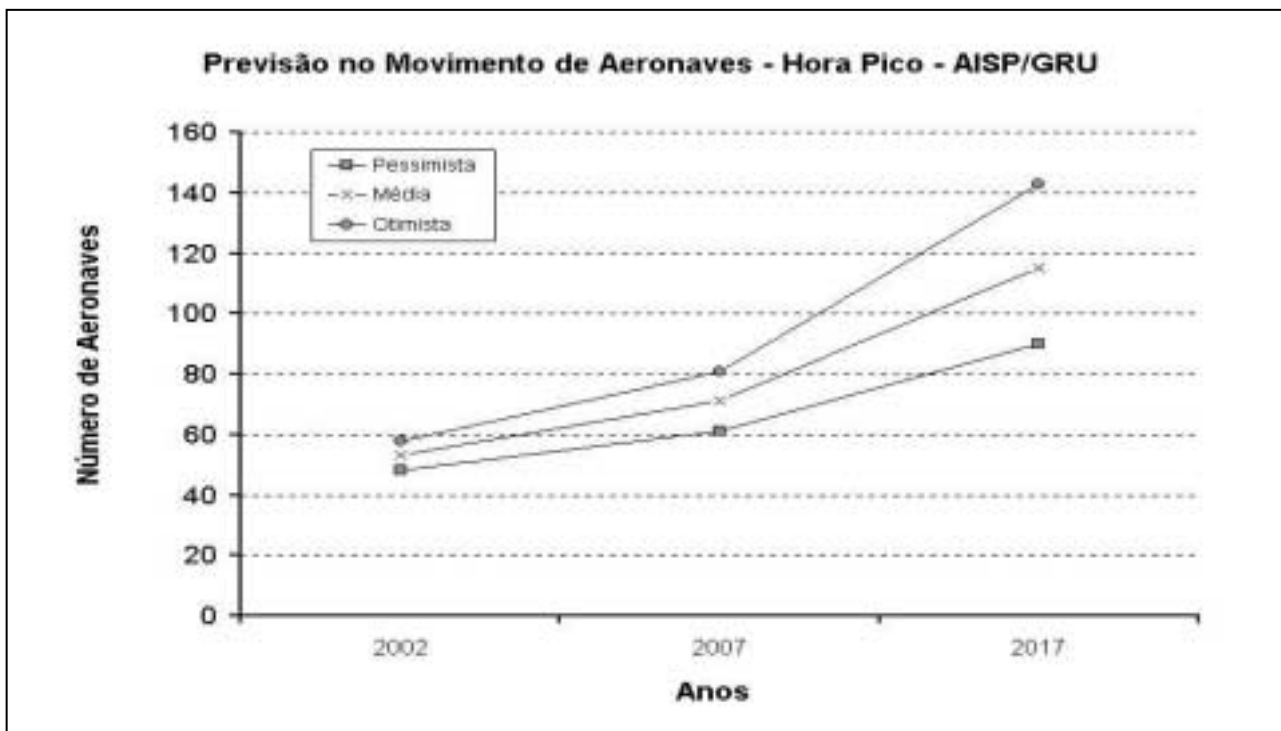


Figura 14 – Previsão do Número de Movimentos de Aeronaves na Hora Pico no AISP/GRU.  
 Fonte: Estudo de Hora-Pico - MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999.

O Plano Diretor estabelecia uma terceira pista de pouso e decolagem com 2025m de extensão. Para agilizar a implantação da mesma, foi adotado como premissa básica, que sua construção seria realizada dentro da área patrimonial existente, sob a responsabilidade da INFRAERO. Assim, a solução encontrada foi localizar a pista a 1462m da pista 09L/27R, reduzindo o comprimento original para 1800m.

Em consulta ao Horário de Transporte Aéreo (HOTRAN) de junho de 1999, o IAC constatou que uma pista de 1800m permitiria o pouso e decolagem, na maioria dos casos com 100% dos pesos máximos admissíveis, de aeronaves até o porte do *Boeing 767*, que representam cerca de 80% do tráfego do aeroporto. Caso seja viabilizada a incorporação de nova área no futuro, será possível atingir o comprimento previsto no Plano Diretor, mediante a expansão na direção da cabeceira 27.

Como a terceira pista (em seu projeto) encontra-se afastada da atual (09L/27R) em uma distância acima de 1350m, será permitida a operação simultânea de maneira segregada, na condição de *IFR Precisão*, elevando consideravelmente o número de operações do Aeroporto.

No posicionamento da pista de rolamento paralela, que foi mudada do lado norte para o lado sul, em relação à pista de pouso, adotou-se o critério da FAA (*Federal Aviation Administration*), que estabelece um afastamento de 120m do eixo da nova pista, compatível com aeronaves com envergaduras menor ou igual às do Grupo IV (até 52m de envergadura).

A posição mais adequada para a implantação da terceira pista dentro dos limites patrimoniais ficou distante 1462m do eixo da atual pista 09L/27R, resultando nas dimensões de 1800m X 45m, podendo ser ampliada para os 2025m, previstos no plano diretor, mediante incorporação de novas áreas ao aeroporto. Entretanto, em ambos os casos é fundamental a remoção dos obstáculos observados na Zona de Proteção de Aeródromo, em particular os identificados nas Áreas de Aproximação, de modo a possibilitar a operação das aeronaves até o porte do *Boeing 767*, que atualmente correspondem cerca de 80% do movimento total (Figura 15).

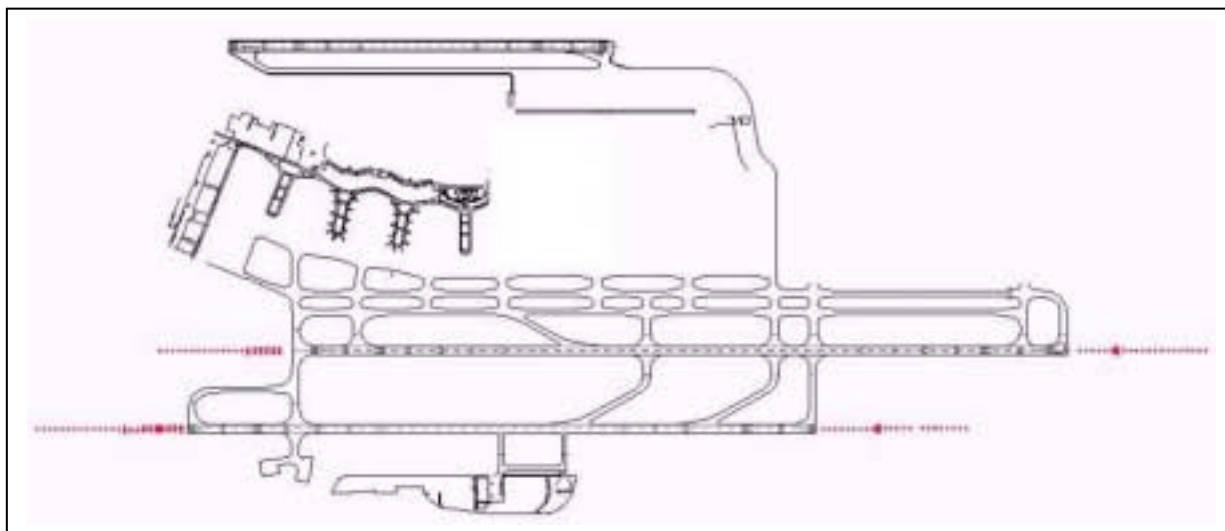


Figura 15 – Projeto da Terceira Pista de Pousos e Decolagens no AISP/GRU.  
Fonte: INFRAERO, 2000.

### V.3. Utilização das Pistas

O IAC (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999), em sua análise quanto aos pesos de decolagem e de pouso admissíveis para a operação de aeronaves em função do novo comprimento de pista, admitiu que os equipamentos (aeronaves) de menor porte não apresentarão restrições operacionais significativas. Com isso atesta que cerca de 80% das operações programadas para o aeroporto poderão ser realizadas na futura terceira pista, excluindo somente as aeronaves que realizam vôos internacionais.

Tabela 1. *Mix* de Aeronaves para o AISP/GRU segundo MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1999).

<b>Tipo de Aeronave</b>	<b>Mov./Ano</b>	<b>Percentual do total</b>
EMB 120	9000	1,99%
F100	49500	10,97%
F50	9000	1,99%
B737/300	189000	41,90%
B767	99000	21,95%
A300	27500	6,09%
MD11	49500	10,97%
B747	18500	4,14%



Tabela 2. Pousos e decolagens no AISP/GRU segundo MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1999).

<b>Pistas</b>	<b>Mov./ano</b>	<b>Pousos e decolagens</b>
09L/27R	146.000 mov/ano	100% decolagem
09R/27L	141.000 mov/ano	60% pouso – 83.500 40% decolagem – 57.500
09/27 – Terceira Pista	162.000 mov/ano	90% pouso – 141.400 10% decolagem – 20.600

Tabela 3. Porcentagem da Utilização das Pistas quanto às Aeronaves segundo MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1999).

<b>Porcentagem da utilização da pista</b>			
<b>Aeronave</b>	<b>Terceira Pista</b>	<b>09L/27R</b>	<b>09R/27L</b>
B737	100% pouso	35,13% decolagem	64,87% decolagem
F100	100% pouso 37,4% decolagem	62,6% decolagem	-
E120	100% pouso e decolagem	-	-
F50	100% pouso e decolagem	-	-
B767	26,56% pouso	100% decolagem	73,44% pouso
MD11	-	100% decolagem	100% pouso
B747	-	100% decolagem	100% pouso
A300	-	100% decolagem	100% pouso

A partir destas informações, os dados referentes à questão do *mix* de aeronaves para as pistas encontram-se solucionados, inserindo-os posteriormente no SIMMOD.

#### **V.4. O Modelo Conceitual**

Buscando avaliar melhor o objeto de estudo, e produzir resultados que pudessem gerar análises significativas quanto à capacidade do lado aéreo aeroportuário, verificou-se que a variação da demanda associada às simulações nos modelos consistiria no passo mais importante das análises, configurando-se como metodologia proposta.

A partir disto, buscou-se junto ao estudo “Demanda Detalhada dos Aeroportos Brasileiros” (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999) o valor percentual do crescimento do número de operações para o horizonte de 5 anos. Foi observado que neste caso, esta taxa representa um aumento de cerca de 30% no movimento de aeronaves no AISP/GRU.

Entretanto, indo contra a idéia de simular os modelos somente nesta condição de crescimento (demanda=30%), foram realizadas análises considerando 16 níveis de demanda, variando-se em intervalos de 2% o acréscimo no número de operações, entre 0% até 30% (inclusive). Para cada nível de tráfego, foram obtidos os respectivos atrasos.

Foram concebidos seis modelos, relativos a duas novas configurações, além da simulação da situação vigente. Cada uma das configurações foi simulada com a demanda presente (registrada em março de 2000) e com acréscimos. Os resultados para cada um deles foram convertidos em atrasos (custo), confrontado-os com o crescimento da demanda. As análises comparativas foram geradas a partir destes resultados, evidenciando desta forma, os instantes apropriados para intervir na infra-estrutura instalada.

A estrutura do espaço aéreo teve sua representação minimizada em 2 procedimentos: as chegadas de aeronaves à cabeceira 09 (fixo PERUS), e as saídas pela cabeceira 27 (fixo MENA), onde o intuito principal seria apenas gerar as aeronaves na simulação, bem como fazê-las desaparecer no final do processo. Os modelos detêm-se a analisar somente os processos efetuados no solo do Aeroporto, neste caso, pistas de pousos e decolagens, pistas de rolamento e pátio de aeronaves.

No caso do modelo desenvolvido para representar as operações da nova pista de pousos e decolagens, foram criados procedimentos hipotéticos de operação segregada entre as demais pistas de pousos e decolagens a partir dos marcadores externos, de maneira a se visualizar o ganho de tal procedimento.

Devido à facilidade de acesso aos dados, foram utilizados os dados relativos ao primeiro semestre do ano de 2000, adotando o dia pico do período como aquele responsável pela “alimentação” dos modelos propostos às simulações.

Neste período identificou-se o mês de março de 2000 cuja demanda foi a mais alta em relação ao número de operações. No seu dia pico foram observadas 555 operações (INFRAERO, 2000).

Para não inviabilizar o trabalho, foi validado o número de operações realizadas atualmente. Atestou-se que em fevereiro de 2002 o número de operações no dia pico ficou em 534 operações (INFRAERO, 2002). Ou seja, nestes dois anos a mudança não foi significativa, havendo uma conservação nos números, não inviabilizando o trabalho. Esta conservação por sua vez foi originada por fatos ocorridos recentemente no cenário brasileiro e mundial, onde

podem ser citados: os atentados ocorridos em Nova Iorque em 11 de setembro de 2001, a oscilação da economia do país, além da saída de operação da companhia aérea Transbrasil, que em fevereiro de 2002, detinha grande faixa do mercado com vôos domésticos e internacionais.

## **V.5. Modelos Propostos**

Os 6 modelos construídos e simulados na ferramenta SIMMOD, foram:

- M1: Situação Atual;
- M2: Hipótese com a adição da terceira pista de pousos e decolagens;
- M3: Hipótese com a adição da terceira pista e terceiro terminal - primeira estratégia operacional;
- M4: Hipótese com a adição da terceira pista e terceiro terminal - segunda estratégia operacional;
- M5: Hipótese com a adição do terceiro terminal - primeira estratégia operacional;
- M6: Hipótese com a adição do terceiro terminal - segunda estratégia operacional.

Em face da inexistência de informação acerca do comportamento e da operacionalidade do novo terminal de passageiros, em projeto, neste trabalho foram adotadas duas opções de estratégias operacionais, descritas adiante.

## V.6. Modelo da Situação Atual

O modelo construído para retratar a situação atual do AISP/GRU, seguiu exatamente os dados do AIP (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2000). Possui duas pistas de pousos e decolagens paralelas, sendo uma com 3000m de comprimento (09R/27L) e a outra com 3700m (09L/27R). A separação entre os eixos das pistas é de 375m. Na direção 09, a decalagem entre as cabeceiras é de 500m, sendo que a 09R, utilizada prioritariamente para as operações de pousos (85%) (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999), está deslocada no sentido contrário da aproximação (em relação à pista 09L). A pista 09L é utilizada na maioria das vezes para as operações de decolagens.

Na área de pátio existem dois terminais de passageiros (TPS) do tipo *finger*, com onze posições de parada cada um, sendo que apenas as três posições da extremidade do *finger* podem receber aeronaves maiores do que o *Boeing 767*.

A distribuição das companhias aéreas entre os 2 terminais adotada foi aquela relativa às operações de março de 2000, pela facilidade de acesso aos dados. Apesar das diferenças encontradas entre esta alocação e a mais atual, o movimento de aeronaves permaneceu constante, não havendo impactos quanto às análises de capacidade do lado aéreo do Aeroporto.

A distribuição visualizada naquela época está descrita na Tabela 4.

Tabela 4. Companhias Aéreas no Aeroporto Internacional de São Paulo.

TPS1		TPS 2	
Asa A	Asa B	Asa C	Asa D
AFR - Air France	EEA – Ecuatoriana	DAL – Delta	AAL - American Airlines
AMX – AeroMexico	ITB - Inter Brasil Star	JKK – Spanair	AFL - Aeroflot
ARG - Aerolíneas Argentinas	SAB – Sabena	PUA – Pluna	CDN - Canadian
AVA – Avianca	TBA – Transbrasil	SAS - Scandinavian Air	CUB - Cubana
AZA – Alitalia	VSP – Vasp	VRG – Varig	DLH - Lufthansa
BAW - British Airways	COA – Continental	RSL - Rio Sul	KAL - Korean Airlines
IBE – Ibéria			KLM – KLM
JAL - Japan Airlines			LAN - Lan Chile
LLB – Lloyd Aéreo Boliviano			SWR - Swissair
TAP - Air Portugal			TAM – TAM
UAL - United Airlines			

Fonte: INFRAERO, 2000.

Todas as regras quanto à movimentação das aeronaves dentro do pátio, nas pistas de pousos e decolagens, bem como nas pistas de rolamento foram copiadas desde a torre do aeroporto, por meio de várias visitas técnicas, com uma grande intensidade na troca de informações.

Também houve um contato estreito com a equipe brasileira que estava acompanhando os estudos da Consultoria realizada pela Mitre Co., Fundação americana contratada pelo DAC no ano de 2000 – 2001, com o objetivo de apontar soluções alternativas para o problema de

capacidade de espaço aéreo da Área Terminal São Paulo, utilizando ferramentas baseadas nas técnicas de simulação.

Este contato agregou muitas informações acerca das características operacionais do Aeroporto em análise.

## **V.7. Modelo com a Nova Terceira Pista de Pousos e Decolagens**

O desenvolvimento deste modelo está diretamente ligado ao novo projeto que a INFRAERO está realizando.

A posição mais adequada para a implantação da terceira pista dentro dos limites patrimoniais, ficou então a 1462m do eixo da atual pista 09L/27R, resultando nas dimensões de 1800m X 45m, podendo ser ampliada para os 2025m, previstos no plano diretor, mediante incorporação de novas áreas ao aeroporto.

Os dados relativos ao *mix* de aeronaves considerados foram aqueles fornecidos no estudo de viabilidade técnica do IAC (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1999) descritos na Tabela 1.

## **V.8. Modelo com o Novo Terminal de Passageiros (TPS-3)**

Assim como o desenvolvimento do modelo anterior, a implantação de um novo terminal de passageiros no modelo buscou seguir as premissas dos projetos licitados pela INFRAERO, aproximando à realidade as futuras operações.

### ***V.8.1. Estratégias Operacionais no Terceiro Terminal de Passageiros (TPS-3).***

A operação do novo terminal de passageiros (TPS-3) do AISP/GRU é uma incógnita que atinge todos os usuários do sistema.

Uma vez que não é objetivo do presente trabalho traçar os melhores caminhos para obter a melhor operação, nem tratar sobre alocação de portões de embarque, decidiu-se apresentar 2 propostas de operação e submetê-las à simulação.

As 2 propostas foram baseadas em:

- Divisão percentual das operações por cada empresa aérea;
- Alianças entre as empresas aéreas;
- Capacidade do pátio – tamanho da aeronave e suas restrições;
- Características das etapas de voo a serem cumpridas;
- Equilíbrio de operação entre os 3 terminais.



Desta maneira foram gerados 2 cenários operacionais (Figura 16), onde procurou-se preservar uma proporcionalidade à capacidade projetada para processamento dos passageiros, TPS-1 e TPS-2 com 7,5 milhões de passageiros/ano.

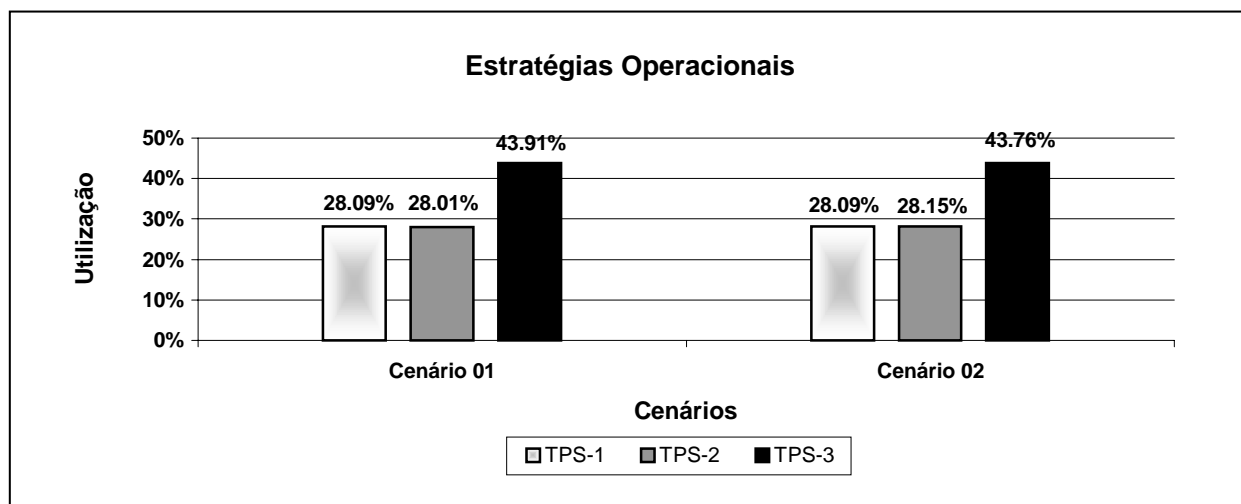


Figura 16 – Distribuição Percentual entre os Cenários elaborados.

Para atribuir os valores percentuais, relativos à demanda de passageiros de cada empresa aérea, buscaram-se informações no trabalho que vem sendo desenvolvido por Álvares em sua dissertação de mestrado, sendo apresentado sobre forma de seminário (Álvares, 1999), onde são tratadas questões relacionadas ao lado terrestre do novo terminal de passageiros do AISP/GRU.

O método de cálculo para a demanda de passageiros nos terminais do Aeroporto foi desenvolvido a partir de dados provenientes do guia PANROTAS (Álvares, 1999).

Em sua proposta, Álvares atesta as inúmeras dificuldades em conseguir os dados diretamente das empresas aéreas, recorrendo à adoção de alguns critérios alternativos. Um

deles foi a consulta do guia PANROTAS, onde os dados relativos ao tipo de aeronave, suas capacidades e empresas aéreas operantes estavam disponibilizados.

A partir deles, foi adotado para cada voo o valor médio de 35% para o *load factor* de todas as operações, resultando então em um número de passageiros relacionados ao embarque e ao desembarque nos terminais de passageiros existentes, os TPS – 1 e 2.

Como o trabalho estava sendo desenvolvido baseado em informações do mesmo período deste, optou-se então, por facilidade, visto que não é objetivo determinar melhores estratégias operacionais ao novo terminal de passageiros do AISP/GRU, utilizar o método para cálculo da demanda de passageiros nos terminais.

Partindo dos valores percentuais da demanda observada em cada empresa aérea foram agregados às hipóteses os demais critérios para alcançar a coerência operacional entre os três terminais.

Com relação ao critério das alianças entre as empresas aéreas, também foram consideradas as operações chamadas *code share*, onde as empresas possuem acordos comerciais que proporcionam facilidades aos passageiros para os quais a empresa original não possui voos à determinada localidade.

A adoção deste critério está ligada à importância da manutenção do passageiro próximo ao seu portão de embarque em caso de troca de aeronave para executar a continuação do percurso da sua viagem. A distância percorrida pelo passageiro desde a aeronave até o desembarque, e possível re-embarque é essencial quando trata-se de um conexão de voo

internacional de longa duração. O AISP/GRU possui a característica de centralizador/distribuidor de vôos no país.

Outro critério utilizado foi o de observar a questão de acomodação no pátio das diversas aeronaves. Para os terminais 1 e 2, sabe-se que existem restrições quanto ao uso de determinados portões de embarques a aeronaves maiores. Entretanto, para o terceiro terminal em projeto, todas as posições estão aptas a receber aeronaves do porte do *Boeing 747*.

Sendo assim, procurou-se realizar uma distribuição percentual simples quanto ao uso das empresas aéreas operantes.

Uma vez que os terminais existentes possuem capacidade projetada para processar 7,5 milhões de passageiros/ano, e o projeto do novo terminal indica a capacidade de 12 milhões de passageiros/ano, obtém-se uma relação percentual para os TPS – 1 e 2 onde os mesmos teriam que absorver no máximo 27,78%, enquanto que o novo terminal seria capaz de atender a 44,44% do movimento total de passageiros do Aeroporto.

Na Tabela 5, apresentam-se os números obtidos a partir da adoção dos critérios.

Tabela 5. Distribuição Operacional por Empresas nos Terminais (TPS – 3).

<b>Cenário 01</b>	Star Alliance e algumas	43,91%	<b>TPS-3</b>
	TAM e Grupo	28,01%	<b>TPS-2</b>
	Vasp e Grupo	28,09%	<b>TPS-1</b>
<b>Cenário 02</b>	Internacionais de longa distância e brasileiras	43,76%	<b>TPS-3</b>
	Vasp e Grupo	28,15%	<b>TPS-2</b>
	Nacionais Dom e Int. America do Sul	28,09%	<b>TPS-1</b>

Os cenários foram separados em 2 grandes grupos que podem ser visualizados de maneira mais detalhada na Tabela 6. Foram indicados os valores percentuais relativos a cada empresa aérea, em março de 2000, relacionados ao valor estimado da sua demanda.

Tabela 6. Distribuição das Empresas Aéreas segundo dados de 2000.  
Fonte: PANROTAS, 1999-2000

CENÁRIO 01			CENÁRIO 02		
TPS 1 (28,09%)	TPS 2 (28,01%)	TPS 3 (43,91%)	TPS 1 (28,09%)	TPS 2 (28,15%)	TPS 3 (43,76%)
LLB (0,26%)	TAP (1,92%)	UAL (3,01%)	VSP – Doméstico (14,69%)	ARG (0,69%)	TAP (1,92%)
EEA (0,33%)	AMX (0,31%)	JAL (0,60%)	VSP – Internacional (12,81%)	VRG – Doméstico (3,01%)	AMX (0,31%)
VSP – Doméstico (14,69%)	AZA (0,75%)	BAW (1,38%)	LLB (0,26%)	PUA (0,48%)	AZA (0,75%)
VSP – Internacional (12,81%)	AVA (0,33%)	COA (0,42%)	EEA (0,33%)	TAM – Doméstico (4,41%)	AVA (0,33%)
	IBE (0,49%)	SAS (0,51%)		TBA – Doméstico (8,42%)	UAL (3,01%)
	ARG (0,69%)	PUA (0,48%)		LAN (1,14%)	IBE (0,49%)
	AFR (0,46%)	AAL (3,24%)			JAL (0,60%)
	SAB (1,28%)	DLH (1,71%)			AFR (0,46%)
	DAL (0,65%)	JKK (1,33%)			BAW (1,38%)
	AFL (0,79%)	SWR (1,88%)			TBA – Internacional (3,80%)
	TAM – Doméstico (4,41%)	KLM (0,85%)			SAB (1,28%)
	TAM – Internacional (2,56%)	KAL (0,76%)			COA (0,42%)
	CDN (0,72%)	LAN (1,14%)			VRG – Internacional (3,01%)
	CUB (0,41%)	VRG – Doméstico (13,01%)			AAL (3,24%)
	TBA – Doméstico (8,42%)	VRG – Internacional (13,59%)			DLH (1,71%)
	TBA – Internacional (3,80%)				JKK (1,33%)
					SWR (1,88%)
					DAL (0,65%)
					KLM (0,85%)
					AFL (0,79%)
					TAM – Internacional (2,56%)
					CDN (0,72%)
					CUB (0,41%)
					SAS (0,51%)
					KAL (0,76%)

Os valores encontrados para os TPS – 1 e 2, a partir da distribuição das empresas nos cenários, ultrapassaram o valor anteriormente definido que era de 27,78%. Entretanto, por ser uma estimativa, este valor tolera uma certa faixa de erro. Na visão do autor este erro pode ser tolerado, haja vista as inúmeras variáveis existentes no problema, não precisando maior atenção. Outro detalhe está ligado à dinâmica do processo de alocação de portões de embarque, os quais variam de acordo com a necessidade da operação do Aeroporto.

Para todos os modelos desenvolvidos, foram utilizadas as regras de operação executadas atualmente no AISP/GRU, buscando-se inseri-las de forma coerente e racional na ferramenta.

## VI. RESULTADOS E ANÁLISES

Uma vez desenvolvidos os modelos, com a inclusão dos dados de entrada, resta ao usuário executar a ferramenta, obtendo assim seus resultados.

De posse dos resultados gerados nas simulações, o trabalho de ajuste “fino” começa a existir, onde este irá melhorar a qualidade dos modelos, aproximando-os cada vez mais à realidade observada nas operações do Aeroporto, tornando as análises mais valiosas.

Para gerar resultados estatisticamente significativos, efetuou-se 20 iterações de cada modelo analisado, número superior ao que tem sido adotado na prática, em que a experiência sugere 5 iterações como número suficiente para obtenção de resultados estatisticamente válidos (TransSolutions, 2000) (Apêndice A).

Segundo Trani (Trani, 2002), efetuar 20 iterações nos modelos propostos junto à ferramenta SIMMOD Plus! 4.0 é sinônimo da obtenção de resultados confiáveis.

## VI. 1. Verificação e Validação do Modelo

Após executar a simulação, a primeira preocupação que surgiu foi aquela referente à validação do modelo, tornando-o assim apto para realizar as demais análises propostas. A etapa de validação foi realizada a partir da comparação dos resultados do sistema simulado com o sistema real, nas operações efetuadas, testando lógica e numericamente o modelo.

Para efetuar a validação do modelo foi necessário estabelecer uma seqüência que assegurou ao modelo uma qualidade desejável, facilitando, posteriormente, a análise de cenários propostos à operação do aeroporto.

A validação foi separada em:

- Escolha do dia representativo = dia pico da base de dados fornecida (março de 2000);
- Período total utilizado na simulação = 1 dia de operações no aeroporto = ciclo completo;
- Processo de verificação e validação = comparação dos resultados gerados (Figura 17).

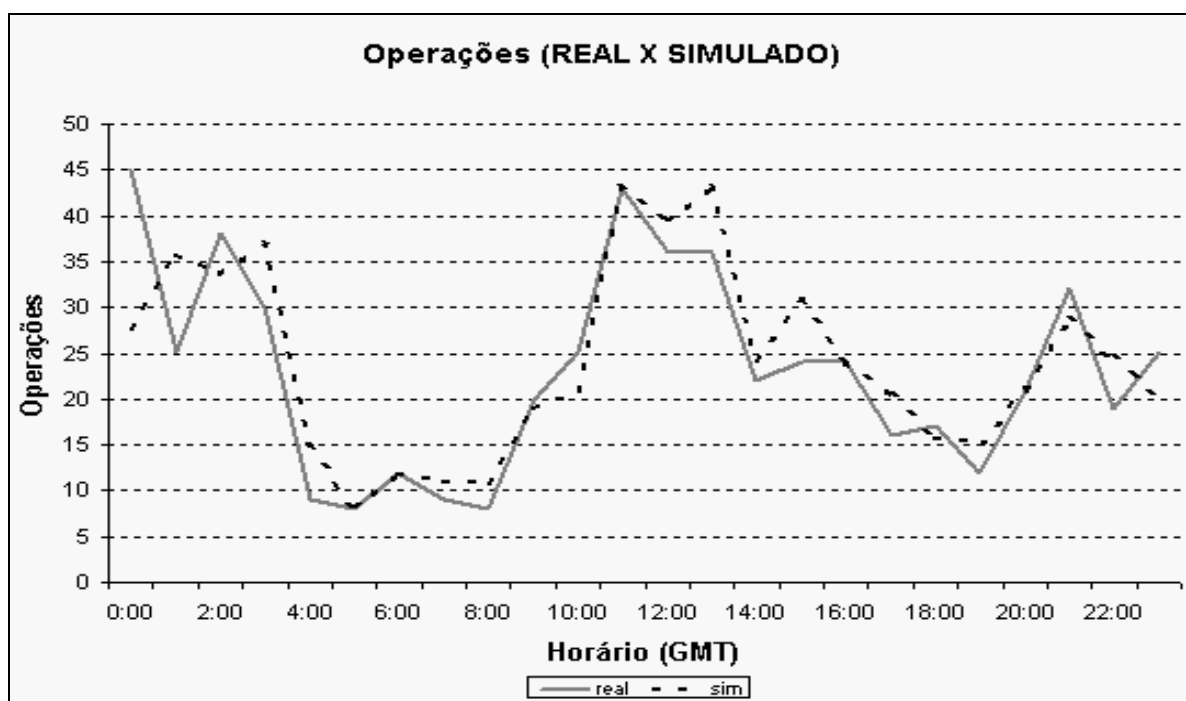


Figura 17 – Comparações entre os valores simulados e os valores reais.

Analisando a Figura 17, observa-se que os valores simulados ao longo de um dia atingiram um comportamento bastante semelhante ao visualizado no “mundo real”. Houve diferenças em alguns picos no início da simulação, porém este fato pode ser justificado pelas considerações dos relatórios gerados pelo SIMMOD e por aqueles gerados pela INFRAERO no momento do início da simulação, que atribuem diferentes conceitos quanto ao fechamento dos números das operações.

Além do número de operações, o processo de verificação do modelo da situação atual consistiu na validação junto aos dados provenientes do relatório da Consultoria Internacional contratada pelo Departamento de Aviação Civil (DAC) junto à MITRE Co. (MITRE, 2001). Neste relatório a MITRE Co. cita que a capacidade máxima do AISP/GRU está entre 46 e 49 operações, variando esse número conforme o tipo de operação, partida ou chegada.



Os resultados observados no modelo 1, desenvolvido no SIMMOD, submetido a um aumento de 30 % na sua demanda obedeceu exatamente a estes números, chegando ao número máximo de 50 operações atingindo seu limite de capacidade (Figura 18).

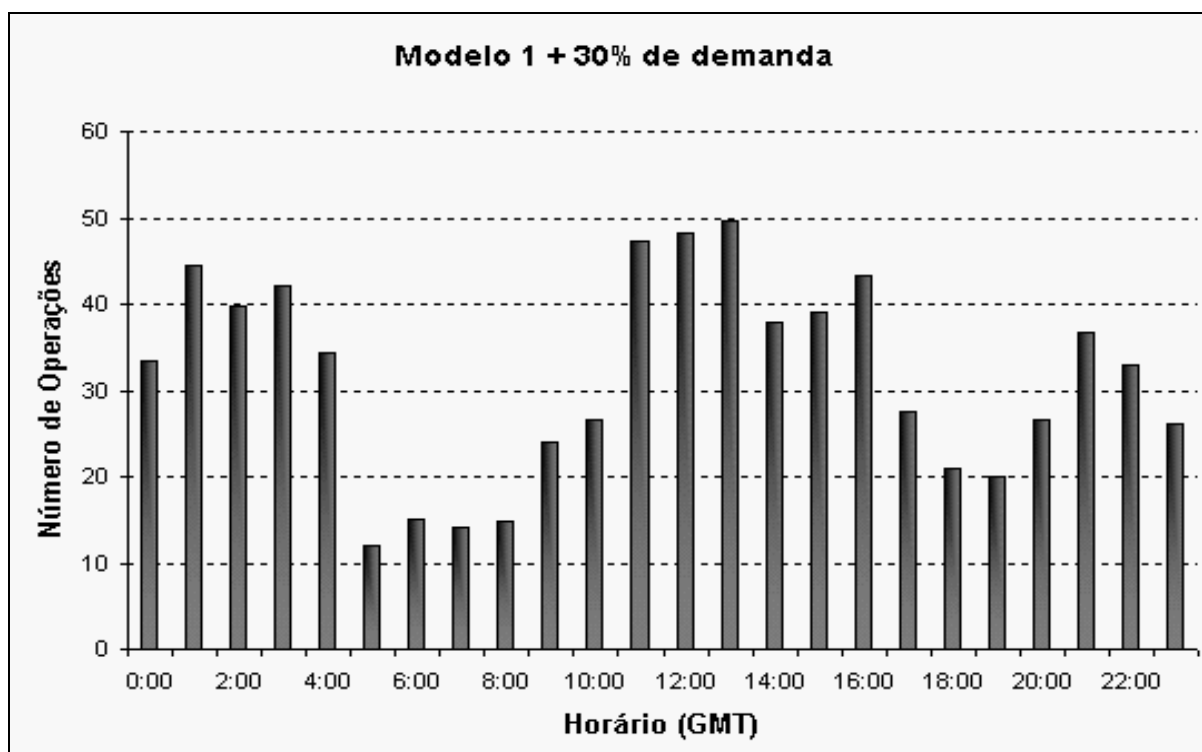


Figura 18 – Distribuição da operação no modelo 1 sob o aumento de 30% na demanda.

Outra métrica verificada foi àquela relacionada ao número de aeronaves na fila de decolagem, que coincidiu com os números da INFRAERO (INFRAERO, 2002). Na hora pico estes valores chegaram, seja no modelo desenvolvido, seja na operação real, a 9 aeronaves na fila de espera no solo.

Avaliando estas métricas, pode-se aferir confiança ao modelo 1, validando-o para qualquer cenário que possa ser planejado no futuro.

## **VI.2. Análise dos Resultados**

A análise dos modelos operacionais simulados encontra-se ligada à demanda e oferta do sistema, além da capacidade instalada do aeroporto.

A chave da solução do problema encontra-se no balanceamento de todos estes fatores. Poder observar os instantes no quais a capacidade está sendo atingida, indica aos planejadores e administradores dos Aeroportos um caminho para a resolução do problema.

Nesta pesquisa, as análises ficaram focadas quanto às variáveis atrasos e tempos de viagem gastos pelas aeronaves em suas operações no solo do Aeroporto.

### ***VI. 2. 1. Atrasos***

Para o presente estudo, a percepção quanto ao real valor do atraso em operações aeroportuárias, é um fato de suma importância, afinal significa, sobretudo, prejuízo a todos os usuários do transporte aéreo, desde o passageiro à empresa aérea.

Diante disto, procurou-se enfatizar a relação percentual entre os atrasos e a variação da demanda nas operações das aeronaves.

Observando a Figura 19, onde todos os modelos simulados estão representados, percebe-se primeiramente a influência da terceira pista de pousos e decolagens na diminuição dos atrasos. É nítida a existência da divisão, entre os modelos, em 2 grupos com

características parecidas quanto à variação na evolução da demanda. Estes, por sua vez, são diferenciados entre si apenas pela inclusão da terceira pista em seus cenários.

É demonstrado também na mesma Figura 19, que o crescimento percentual dos atrasos não depende muito da escolha quanto à estratégia operacional do terceiro terminal de passageiros (TPS-3). O comportamento é praticamente idêntico tanto para o caso com terceira pista de pousos e decolagens como na hipótese onde não há a ocorrência dela. Porém, em ambos os casos, acompanharam a taxa de crescimento percentual dos atrasos.

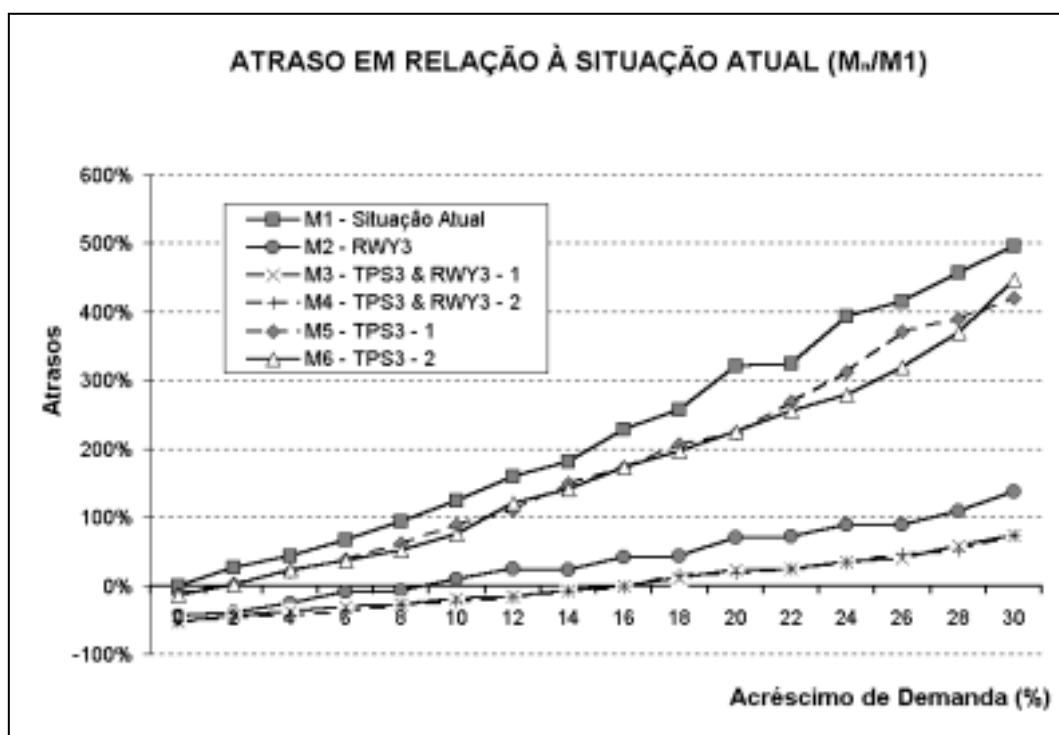


Figura 19 – Resultados Gerados pelas Simulações – Todos os Modelos.

Como esperado, os resultados gerados a partir da simulação dos modelos 3 e 4 foram aqueles que apresentaram os menores valores quando aplicados ao aumento de 30% na demanda de aeronaves. Quase 75% de aumento percentual de atrasos nos modelos 3 e 4, contra 495% no modelo 1 (situação atual de infra-estrutura).

Entretanto, a construção de um novo terminal de passageiros junto com uma nova pista de pousos e decolagens significa um investimento muito alto para o curto prazo. Adotando como prioritário a construção de apenas uma instalação para o curto prazo, decisão mais acertada, a simulação pode fornecer um embasamento para que a escolha seja efetuada.

Analisando somente o impacto da entrada em operação da terceira pista de pousos e decolagens na diminuição dos atrasos, pode-se perceber o quanto esta instalação poderá ser benéfica à diminuição dos atrasos operacionais no Aeroporto. Na Figura 20, a análise fica direcionada para a existência ou não da terceira pista de pousos e decolagens.



Figura 20 – Resultados Gerados pelas Simulações – M1- Situação Atual, M2-RWY3.

Os resultados gerados no modelo 2 foram aqueles que apresentaram os menores valores quando aplicados ao aumento de 30% na demanda de aeronaves. Quase 130% de

aumento percentual de atrasos no modelo 2, contra 495% no modelo 1 (situação atual de infra-estrutura).

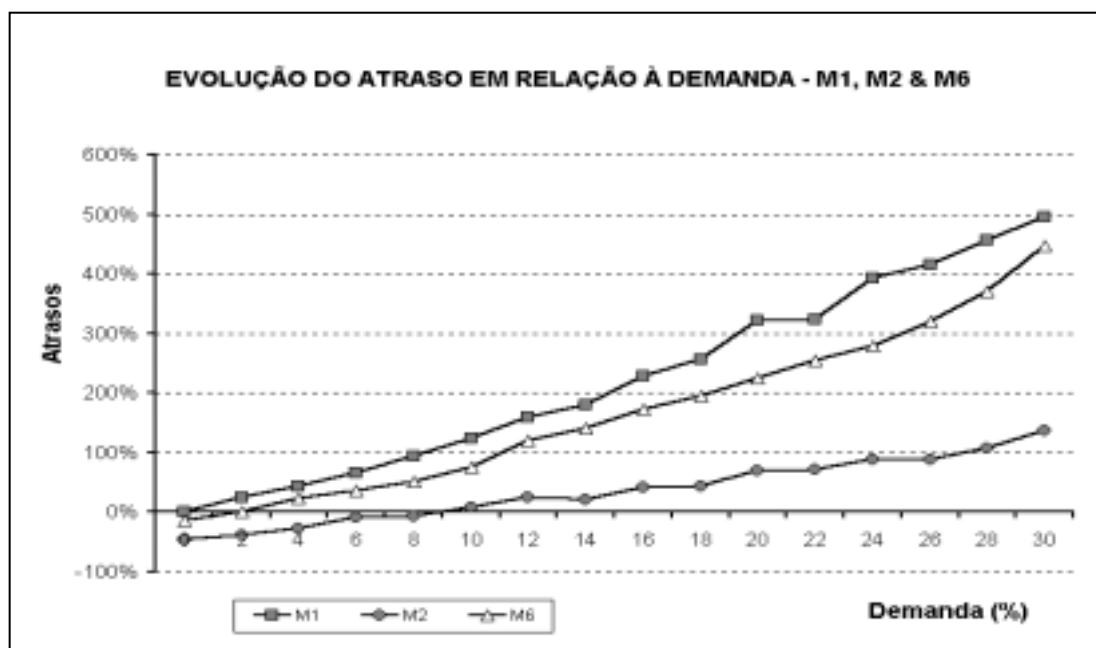


Figura 21 – Resultados Gerados pelas Simulações – M1-Situação Atual, M2-RWY3, M6-TPS3(b).

Buscando analisar também a diferença, quanto aos atrasos, entre os modelos 2 e 6, foi elaborada a Figura 21. Nela, pode-se verificar que o fato da entrada em operação do novo terminal de passageiros não beneficiou as operações do lado aéreo no Aeroporto. Ao contrário, acabou gerando mais atrasos que aqueles no modelo 2, onde a terceira pista de pousos e decolagens indicou um menor aumento percentual nos atrasos para a maioria das operações.

Porém além de apontar um provável cenário operacional ideal, pode-se também buscar, por meio das simulações, as informações relativas ao melhor instante onde tais mudanças de infra-estrutura possam ser efetuadas.

Além do atraso puro e simples, a ferramenta SIMMOD elabora um relatório onde agrega informações relacionando a quantidade de operações ao tempo de atraso, separando estas em intervalos de 5 minutos. Esta análise fornece mais informação ao responsável pela decisão no que tange ao momento correto de corrigir problemas operacionais por meio de mudanças na infra-estrutura aeroportuária, aproximando-o cada vez mais da melhor estratégia a ser adotada na melhor hora.

No modelo 1 (Figura 22), a partir de um aumento de 10% na demanda, a simulação indica uma maior taxa de crescimento dos valores dos atrasos maiores que 15 minutos, enquanto o comportamento observado na primeira faixa (CHEG + PART < 5 min) tende a manter um decréscimo constante.

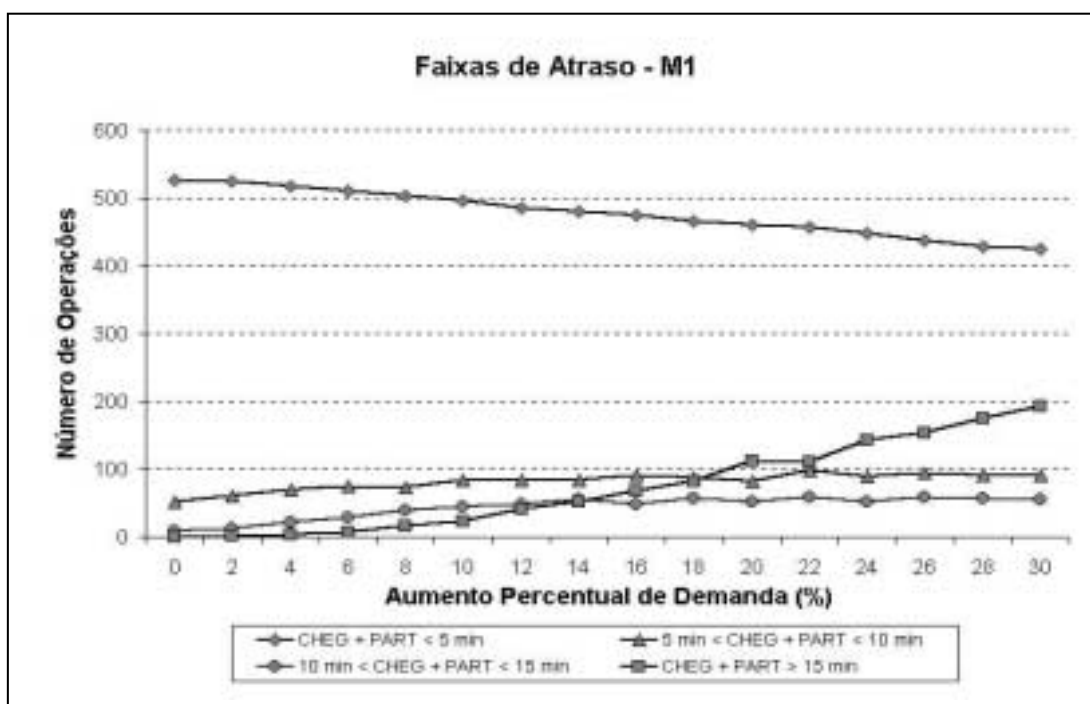


Figura 22 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M1- Situação Atual.

Nos modelos 5 e 6 (Figuras 23 e 24), onde não há a terceira pista de pousos e decolagens, o comportamento do gráfico foi semelhante. A partir de um aumento de 10% na

demanda, a simulação indicou uma maior taxa de crescimento dos valores dos atrasos maiores que 15 minutos, enquanto o comportamento observado na primeira faixa (CHEG + PART < 5 min) tendeu a manter um decréscimo constante.

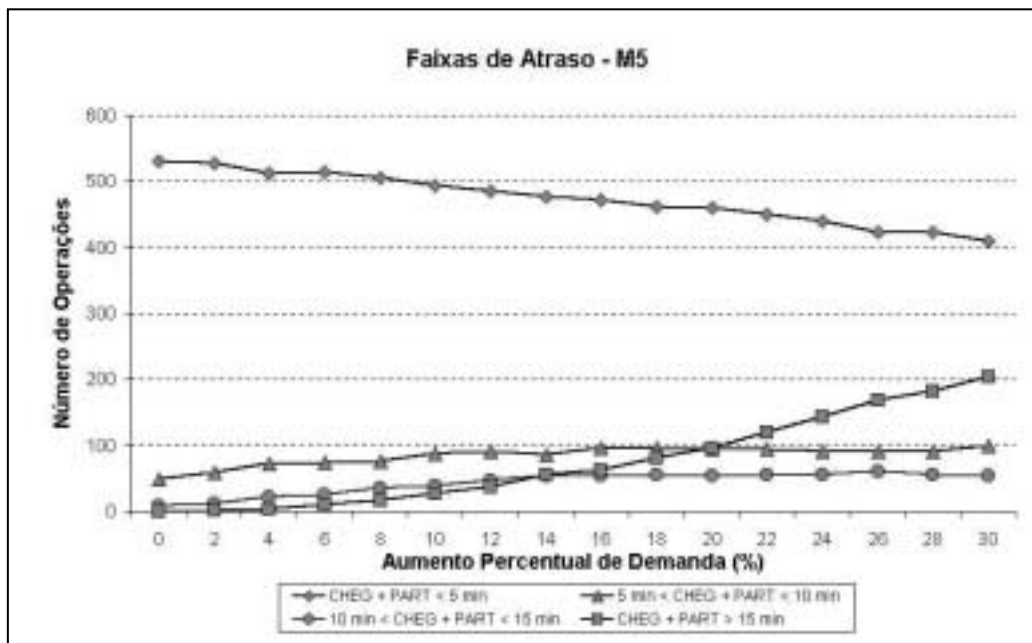


Figura 23 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M5-TPS3(a).

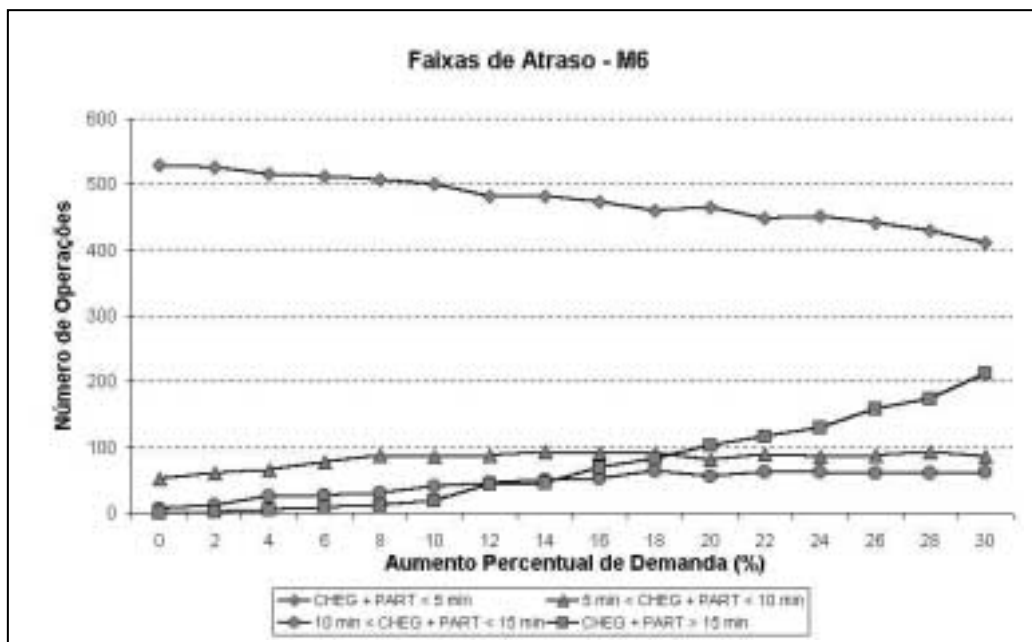


Figura 24 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M6-TPS3(b).

De forma contrária aos modelos 5 e 6, os modelos 2, 3 e 4, apresentaram uma constância nos seus valores para os respectivos aumentos de demanda (Figuras 25, 26 e 27).

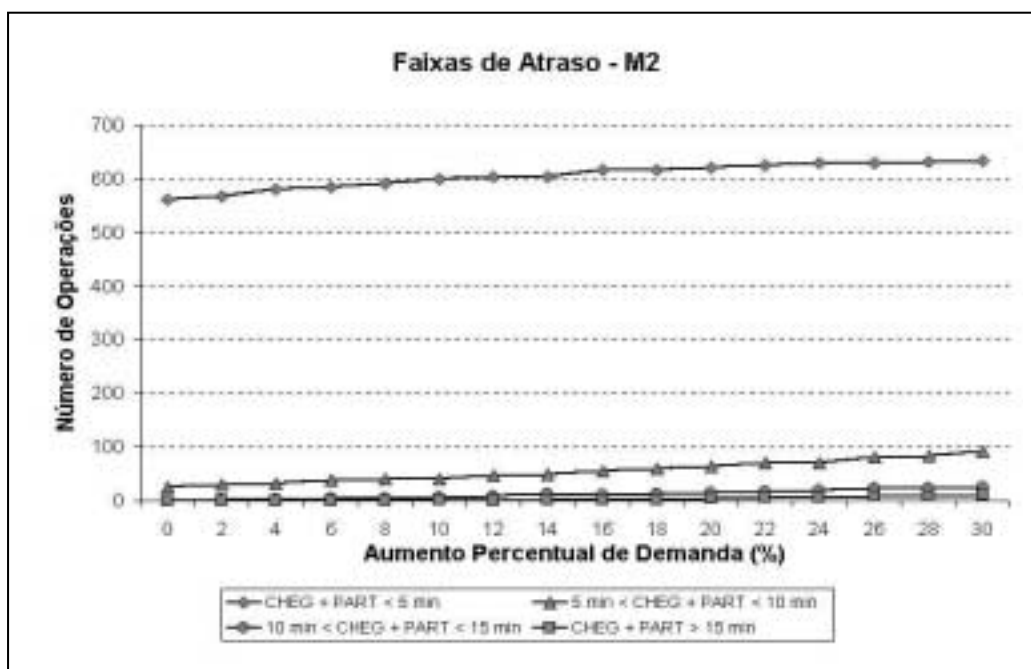


Figura 25 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M2-RWY3.

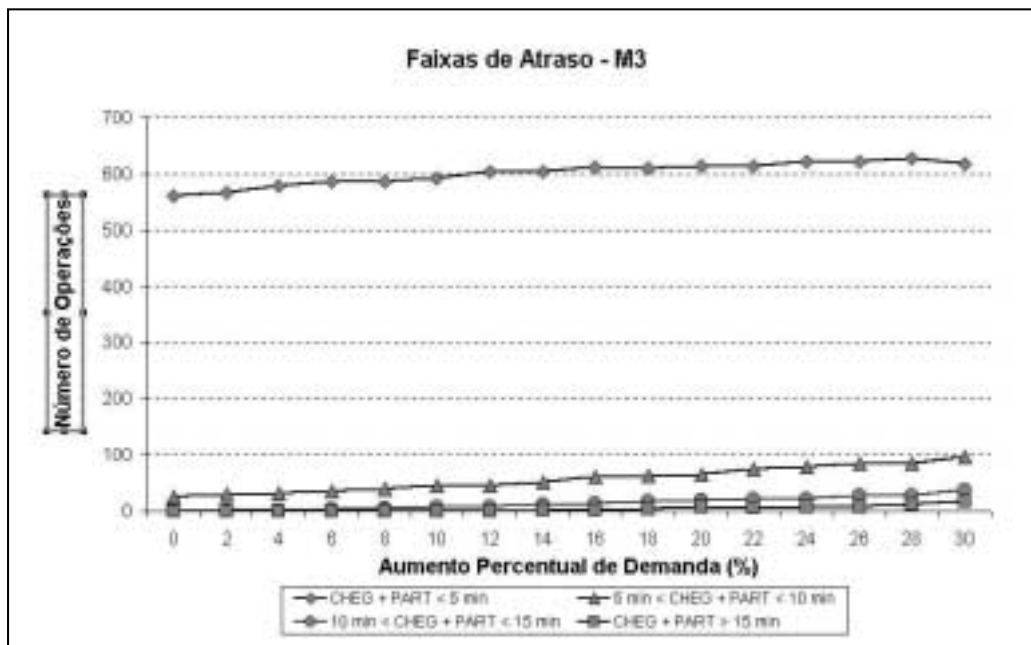


Figura 26 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M3- RWY3 & TPS3(a).



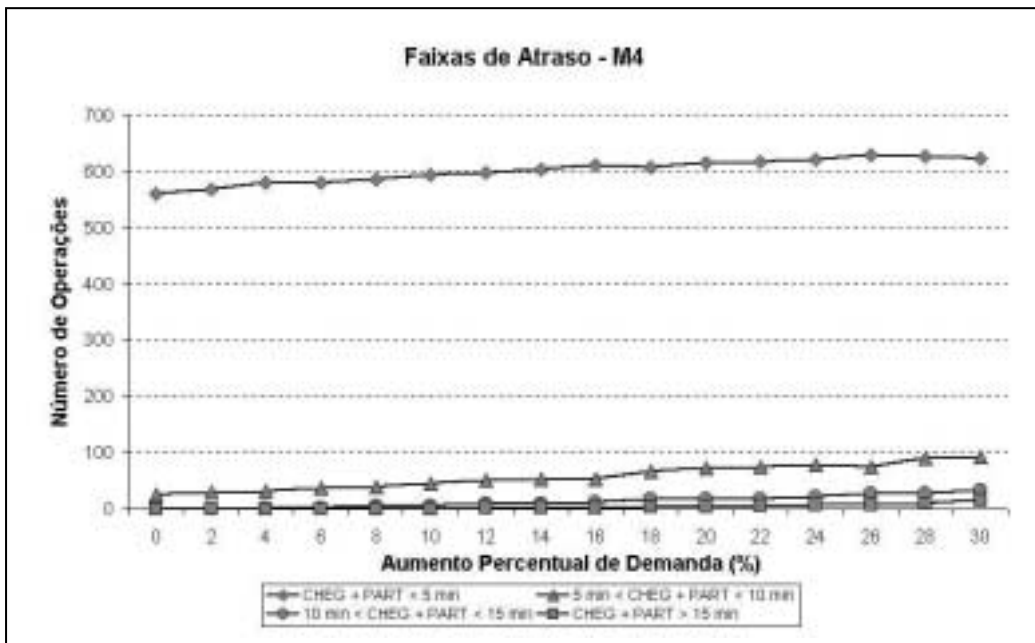


Figura 27 – Resultados Gerados pelas Simulações – Faixas de Atraso – M4- RWY3 & TPS3(b).

A partir dos gráficos de faixas de atraso e crescimento percentual dos atrasos, pode-se afirmar para a situação descrita nos modelos, que a inclusão da nova pista de pousos e decolagens apresenta mais benefícios, ou menos prejuízos operacionais no lado aéreo do AISP/GRU dentre os modelos.

Os resultados obtidos permitiram também, identificar o potencial comportamento do atraso médio por operação contra o crescimento da demanda, evidenciando, desta forma, os instantes apropriados para intervir na infra-estrutura instalada.

## VI. 2. 2. Tempos de Viagem

Completando as análises relativas aos atrasos, torna-se necessário observar o tempo de viagem realizado pelas aeronaves em seus percursos no solo.

A terceira pista de pousos e decolagens planejada possui um pequeno problema quanto à sua operação. Para que as aeronaves atinjam a “nova” cabeceira 09, segundo seu projeto, as mesmas teriam que fazê-lo contornando uma grande área, aumentando assim o tempo de viagem no solo.

A aeronave estaria menos sujeita aos atrasos, uma vez que os trajetos não conflitariam com os procedimentos existentes nas atuais pistas de rolamento. Porém o tempo do caminho percorrido até a cabeceira 09 “nova”, no caso de decolagens, seria alto. O tempo gasto para os procedimentos de chegada não seria tão acentuado, uma vez que a maior dificuldade seria alcançar a cabeceira 09 “nova” para decolagem.

Na Figura 28, observa-se a diferença entre os tempos de viagens dos diversos modelos.

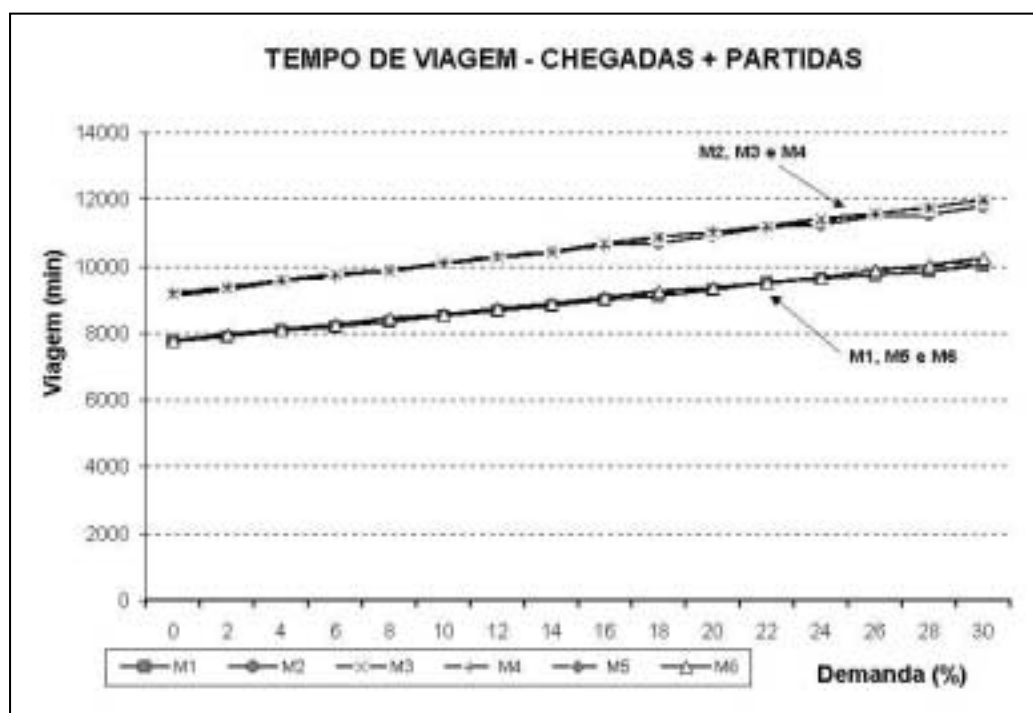


Figura 28 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempos de Viagem Total – Todos Modelos.

Os resultados foram praticamente iguais, onde o diferencial mais uma vez foi a inclusão da terceira pista de pousos e decolagens.

A demanda variou normalmente e o tempo de viagem também da mesma forma, segundo a mesma taxa de crescimento.

Para tentar mensurar isto num valor médio, foi elaborado um gráfico a partir de informações dos valores médios dos tempos de viagem para tentar visualizar uma razão entre aqueles modelos que possuem a terceira pista de pousos e decolagens, e os que não a possuem. Na Figura 29, está representada esta busca.

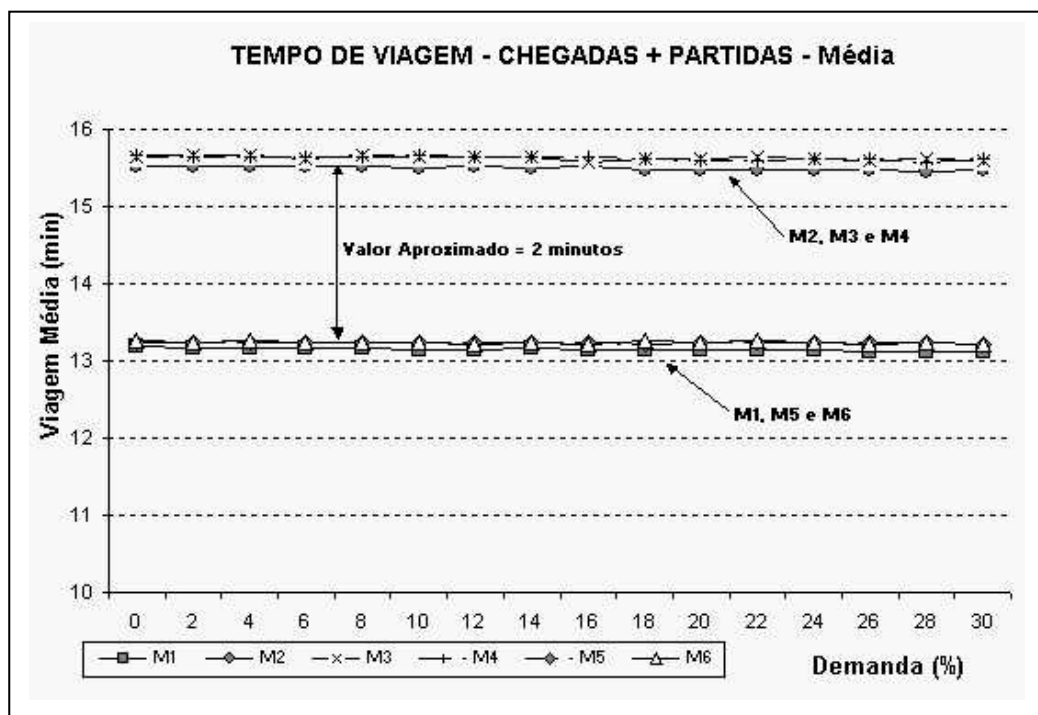


Figura 29 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempo de Viagem Médio – Todos os Modelos.

Analisando a Figura 29, verifica-se que a taxa de crescimento do tempo de viagem seguiu exatamente à taxa de crescimento da demanda, gerando um gráfico constante para seus valores médios. Uma vez constante, pode-se mensurar a diferença entre o tempo médio gasto pelas aeronaves nos modelos onde há a inclusão de uma nova pista de pousos e decolagens, e também nos modelos em que as operações seguem todas para a mesma pista.

Este tempo observado na Figura 29 é de 2 minutos. Ou seja, nos modelos onde a nova pista apareceu, suas operações foram acrescidas em 2 minutos em relação àqueles que não a possuíam.

Vale ressaltar que o tempo de viagem analisado é um valor médio entre todos aqueles observados nos diversos procedimentos de chegadas e partidas. Foi adotado o valor médio do tempo de viagem devido à adoção do valor médio para os tempos de atrasos, viabilizando a análise comparativa.

### ***VI. 2. 3. Análise Conjunta dos Fatores***

Como observado anteriormente, os dois fatores (atrasos e tempos de viagem) analisados indicaram possibilidades variadas para implementação das estratégias vislumbradas. Entretanto torna-se necessário, uma análise dos números médios de atraso (min/operação) contra a variação da demanda, onde poderá ser visualizada a diferença entre os tempos médios de atraso de todos os modelos.

Na Tabela 7, apresentam-se os valores para os modelos 2, 5 e 6. Na Figura 30 está descrito o valor médio de atraso por operação contra a variação da demanda.

Tabela 7. Valores dos Atrasos Médios por Operação.

<b>ATRASSO – Chegadas + Partidas – minutos/operação</b>					
<b>Aumento da Demanda (%)</b>	<b>Modelo 2 Min/OPER</b>	<b>Modelo 5 min/OPER</b>	<b>Modelo 6 Min/OPER</b>	<b>Diferença M5-M2 (min)</b>	<b>Diferença M6-M2 (min)</b>
0	1,00	1,57	1,56	0,58	0,56
2	1,10	1,85	1,81	0,75	0,71
4	1,33	2,19	2,23	0,86	0,90
6	1,64	2,50	2,47	0,86	0,83
8	1,68	2,91	2,74	1,23	1,06
10	1,97	3,40	3,16	1,43	1,19
12	2,26	3,79	3,98	1,53	1,72
<b>14</b>	<b>2,21</b>	<b>4,50</b>	<b>4,36</b>	<b>2,30</b>	<b>2,15</b>
16	2,56	4,93	4,93	2,38	2,37
18	2,59	5,55	5,34	2,96	2,75
20	3,06	5,83	5,87	2,77	2,81
22	3,10	6,67	6,42	3,57	3,32
24	3,39	7,44	6,84	4,04	3,44
26	3,42	8,51	7,59	5,09	4,16
28	3,76	8,86	8,49	5,10	4,73
30	4,29	9,39	9,90	5,10	5,61



Figura 30 – Resultados Gerados pelas Simulações – Atrasos Médios – Todos os Modelos.

Segundo a Tabela 7, onde os modelos se diferenciam pela existência da nova pista de pousos e decolagens, e do novo terminal de passageiros, pode-se verificar que a partir de um aumento de 14% na demanda das operações no Aeroporto, a diferença entre seus atrasos médios ultrapassa 2 minutos. Este valor havia sido citado com o padrão de referência como tempo médio de viagem gasto a mais pelas aeronaves por utilizarem a nova pista de pousos e decolagens.

Analisando a Figura 30, percebe-se que ao incrementar-se 30% na demanda do movimento de aeronaves, a diferença entre os valores médios de atraso por operação ultrapassa 5 minutos. O valor 5 minutos representa então para um aumento de 30% na demanda, um prejuízo maior do que aquele observado na diferença entre os valores de tempos de viagem.

Entretanto, para valores inferiores ao aumento de 14% da demanda, o atraso entre os modelos 2 e 5, 2 e 6, torna a diferença menor que 2 minutos, combatendo assim a hipótese da construção da terceira pista de pousos e decolagens, uma vez que o tempo de viagem médio se manteve constante em 2 minutos para qualquer aumento de demanda.

A capacidade instalada não foi completamente utilizada para quaisquer dos casos mencionados, uma vez que há momentos onde o número de operações realizadas não atinge o máximo permitido, e a taxa de crescimento permanece constante (Figura 31). Porém há uma grande tendência, a partir de 30% no aumento da demanda do movimento das aeronaves, que o AISP/GRU, atinja rapidamente seu limite de operação, sobretudo no modelo 1 que

representa a situação de operação vivenciada nos dias de hoje, com muitos pontos de conflito operacional.

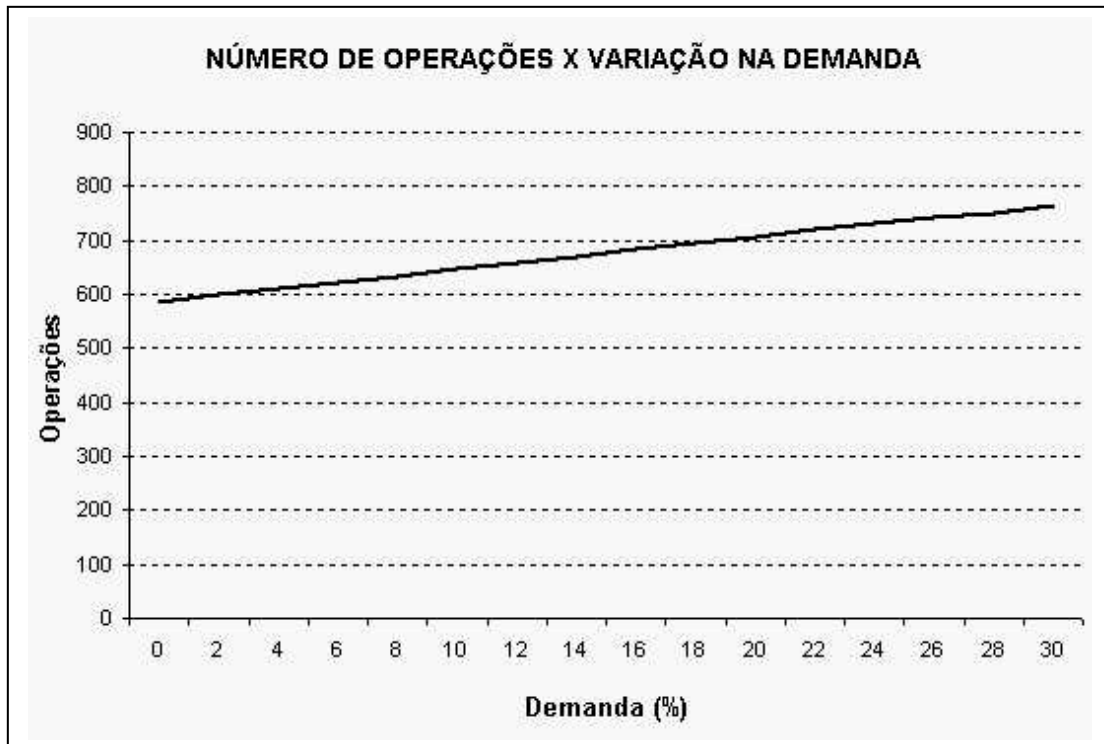


Figura 31 – Resultados Gerados pelas Simulações – Número de Operações.

Porém, um dos grandes problemas visualizados atualmente no aeroporto diz respeito à concentração de vôos em determinados horários (Figuras 17 e 18), acarretando atrasos excessivos em determinadas horas do dia. A existência de ociosidade durante outras horas do dia viabilizou as operações nas simulações, entretanto com muitos atrasos em alguns modelos.

## VII. CONCLUSÕES

Diante dos resultados dos modelos, observa-se a viabilidade de utilização da metodologia no auxílio à tomada de decisão no âmbito do planejamento aeroportuário. Também é atestada sua capacidade de análise, capaz de fornecer maiores subsídios na busca da resolução de problemas a medida em que descreve o comportamento das variáveis de forma detalhada.

Sob o aspecto do objeto de estudo, verificou-se que a construção de uma terceira pista de pousos e decolagens, conjuntamente com pistas de rolamento, traria mais benefícios em longo prazo do que simplesmente a construção de um novo terminal de passageiros (TPS-3) na operação do lado ar.

Entretanto, a melhor opção seria a construção das 2 instalações, um novo terminal de passageiros, conjuntamente com a nova pista de pousos e decolagens. Os prejuízos seriam bem pequenos relacionados aos atrasos, uma vez que para um acréscimo de 30% na demanda, os valores médios nos atrasos atingiriam marcas próximas as encontradas atualmente.

O novo terminal de passageiros, isoladamente, seria, operacionalmente menos prejudicial em relação à terceira pista de pousos e decolagens até o valor de 14% no aumento da demanda operacional do Aeroporto.



Em contrapartida, para um acréscimo de 14% dos vôos, a capacidade do lado terra, não considerada neste estudo, certamente atingiria seu limite, uma vez que os terminais de passageiros existentes estão próximos de não suportar a demanda atual, tornando as operações no lado terra do aeroporto problemáticas.

Assim, como resultado do estudo, verifica-se que para o lado aéreo do AISP/GRU a terceira pista de pousos e decolagens representa um ganho operacional superior à implantação de um terceiro terminal de passageiros (TPS – 3).

Para as situações onde não há hipótese da construção de uma nova pista de pousos e decolagens, a partir de um aumento de 10% na demanda dos vôos verificados no AISP/GRU, os atrasos começam a atingir valores altos, considerando a mesma distribuição dos vôos ao longo do dia.

Este fato pode ser explicado por meio da geração de conflitos novos nas pistas de rolamento já existentes. Nos modelos onde foi considerada a inclusão do novo terminal de passageiros, o pátio seria maior, a capacidade de processamento dos passageiros nos terminais seria aumentada, entretanto seus procedimentos continuariam acontecendo da mesma forma que os já existentes, acarretando um maior congestionamento no solo, provocando a parada das aeronaves nos portões de embarque.

Com a terceira pista de pousos e decolagens, boa parte desse tráfego não conflitaria entre si, evitando o surgimento de maiores atrasos, uma vez que os congestionamentos seriam menores, justificando os valores encontrados nas simulações.

De qualquer forma, percebe-se que a busca por um equilíbrio das operações nos horários ociosos poderia trazer grande ganho quanto à diminuição dos atrasos gerados no solo, haja vista a concentração dos vôos em determinadas horas do dia.

## **VII.1. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser enumerados alguns caminhos:

- Estudar o impacto da operação da terceira pista de pousos e decolagens do AISP/GRU, nos movimentos da Área Terminal São Paulo;

- Analisar o comportamento isolado da terceira pista de pousos e decolagens do AISP/GRU para a situação de operação dependente não segregada em relação às pistas já existentes;

- Adotar hipóteses de novas pistas de rolamento ligando a cabeceira 09 “nova” aos terminais de passageiros 1 e 2, além de verificar os seus impactos, de forma que o acesso a nova pista fosse facilitado;

- Estudar modelos de gerenciamento de tarifas aeroportuárias, re-distribuindo o programa de vôos diários do Aeroporto a partir do modelo desenvolvido;

- Extrapolar o valor de 30% no aumento da demanda, e verificar qual a capacidade simulada de operação do Aeroporto para alternativas de operação diferentes;
  
- Analisar a entrada em operação das *NLA's (New Large Aircrafts)* no terceiro terminal de passageiros;
  
- Desenvolver modelos com o quarto terminal de passageiros;
  
- Analisar a transferência de vôos dos Aeroportos Centrais, e verificar o impacto em relação ao AISP/GRU.

## **VII.2. Finalizando**

Por fim, é necessário, para um melhor rendimento das propostas e aproveitamento dos modelos a serem empregados, que as informações relacionadas ao estudo de caso sejam atuais.

Enfim, para que o uso da técnica de simulação seja mais difundida no Brasil, há que se implantar uma cultura de busca por análises mais complexas aos problemas existentes hoje.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, P. M. S., *Utilização de Simulação na Análise de Componentes de Terminais de Passageiros de Aeroportos Brasileiros*. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, 1998.
- Álvares, M. S., *Análise Operacional dos Terminais de Passageiros do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos - AISP-GRU: Equalização da Demanda de Passageiros nos Terminais*. Seminário de Tese, ITA, São José dos Campos, 1999.
- Andreatta, G., Brunetta, L., Odoni, A. R., Righi L., Stamatopoulos, M. A. & Zografos, K. G., *A Set of Approximate and Compatible Models for Airport Strategic Planning on Airside and Landside*. 2<sup>nd</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Orlando, 1998.
- Ashford, N. et al., *Airport Operations*. McGraw-Hill, Inc., 2<sup>nd</sup> ed., New York, 1997.
- Ashford, N., Wright, P., *Airport Engineering*. John Wiley & Sons, 3<sup>rd</sup> ed., New York, 1992.
- Barros, A. G., *Análise de Capacidade do Lado Aéreo do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos*. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, 1994.
- Caves, R. E., Wu, C. L., *Modelling and Simulation of Aircraft Turnaround Operations at Airports*. TRB, National Research Council, Washington, D. C., 2001.
- COMANDO DA AERONÁUTICA, *AIP-MAP*. Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Vôo, Rio de Janeiro, 2000 & 2002.
- COMANDO DA AERONÁUTICA, *Horário de Transporte Aéreo – HOTRAN*. Departamento de Aviação Civil, Rio de Janeiro, 2000.
- Coscarelli, C. H., *Estudos de Capacidade da Infra-Estrutura Aeroportuária Brasileira: Análise do Emprego de Novas Tecnologias de Simulação*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- Delcaire, B., Feron, E., *Development of an on-site Ground Operations Model for Logan International Airport*. FAA Air Transportation Center of Excellence in Operations Research, Research Report RR-97-09, MIT, Cambridge, 1997.

- Eads, G. C., Kiefer, M. R., Mehndiratta, S. R., *Short-term Delay Mitigation Strategies for San Francisco International Airport*. TRB, National Research Council, Washington, D. C., 2001.
- Feitosa, M. V. M., *Um Modelo de Simulação para Terminais de Passageiros em Aeroportos Regionais Brasileiros*. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, 2000.
- Feitosa, M. V. M., *Utilização do ARENA na Simulação de Terminais de Passageiros*. Trabalho de Graduação, ITA, São José dos Campos, 1998.
- Goetz, A. R., Szyliowicz, J. S., *Revisiting Transportation Planning and Decision making Theory: The Case of Denver International Airport*. Transportation Research-A, Vol. 31, No. 4, 1997, pp. 263-280.
- Gualda, N. D. F., *Terminais de Transportes: Contribuição ao Planejamento e ao Dimensionamento Operacional*. Tese de Livre Docência, USP, São Paulo, 1995.
- Haghani, A., Chen, M. C., *Optimizing Gate Assignments at Airport Terminals*. Transportation Research-A, Vol. 32, No. 6, 1998, pp. 437-454.
- Horonjeff, R., McKelvey, F. X., *Planning and Design of Airports*. McGraw-Hill, N.Y., 4<sup>th</sup> ed., 1994.
- Hupalo, M. F.; Feitosa, M. V. M.; Santana, E. S. M.; Silva, R. A. e Porto, P. P., *Aspectos Relacionados com a Determinação da Capacidade de Sistemas de Pistas de Pouso*. I Simpósio de Transporte Aéreo – SITRAER, ITA, São José dos Campos, 2000.
- INFRAERO, *Boletim de Informações Gerenciais*. Diretoria de Operações, Brasília, 2000.
- INFRAERO, *Boletim de Informações Gerenciais*. Diretoria de Operações, Brasília, 2002.
- INFRAERO, *Relatório Técnico sobre a Implementação da Terceira Pista de Pousos e Decolagens e Terceiro Terminal de Passageiros (TPS-3)*. Centro de Negócios São Paulo, São Paulo, 2000.
- Kanafani, A., *Operational Procedures to Increase Runway Capacity*. Transportation Engineering, vol. 109, nº 3, 1983.
- Kanafani, A., Cao, J. M., *The Value of Runway Time Slots for Airlines*. European Journal of Operation Research 126, 2000, pp. 491-500.
- Kleijnen, J. P. C., *Statistical Techniques in Simulation - Part II*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1975.
- Kleijnen, J. P. C., *Verification and Validation of Simulation Models*. European Journal of Operation Research 82, 1995, pp. 145-162.
- Law, A M., Kelton, W. D., *Simulation Modeling & Analysis*. McGrall Hill, 1991.

- MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, *Glossário de Termos Técnicos de Aviação Civil*. Departamento de Aviação Civil, Rio de Janeiro, 1989.
- MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, *IMA 100-12 - Regras do Ar e serviços de Tráfego Aéreo*. Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Vôo, Rio de Janeiro, 1987.
- MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, *Carta de Planejamento de Vôo e Rotas Aéreas*. Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Vôo, Rio de Janeiro, 1993.
- MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, *Demanda Detalhada dos Aeroportos Brasileiros*. Departamento de Aviação Civil, Rio de Janeiro, 1999.
- MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, *Parecer Técnico n° 407/IAC-DPT-4/99*. Departamento de Aviação Civil, Rio de Janeiro, 1999.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, *Anuário Estatístico dos Transportes – 2002*. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Brasília, GEIPOT, 2002.
- MITRE Co., *Airports and Airspace System Planning for the São Paulo Region – Task 2: Analysis of Current Operations*. Departamento de Aviação Civil, Rio de Janeiro, 2001.
- Müller, C., Gosling, G. D., *A Framework for Evaluating Level of Service for Airport Terminals*. Transportation Planning and Technology, v. 16, 1991, p. 45-61.
- Mumayiz, S. A., *Overview of Airport Terminal Simulation Models*. Transportation Research Record 1273, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1990.
- Mumayiz, S. A., Ashford, N., *Methodology for planning and Operations Management of Airport Terminal Facilities*. Transportation Research Record 1094, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1986.
- Naylor et al., *Computer Simulation Techniques*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966.
- OACI, *Anuário Estatístico*. Montreal, 1999.
- PANROTAS, *Guia de Horários e Tarifas Aéreas Nacionais e Internacionais*. 1999-2000
- Pereira, B. D.; Silva, C. M.; Guedes, E. P. e Feitosa, M. V. M., *Análise de Capacidade da Área de Movimento do Aeroporto Santos Dumont via Modelo de Simulação por Computador*. Anais do XIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Gramado, 2000, v. 1, p. 31-39;
- Pereira, B. D.; Silva, C. M.; Guedes, E. P. e Feitosa, M. V. M., *Estudo dos Atrasos na Área Terminal São Paulo: Situação Atual e Futura via Modelo de Simulação*. Anais do XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Campinas, 2001, Vol. 3. p. 157-161.

- Pereira, B. D.; Silva, C. M.; Guedes, E. P. e Feitosa, M. V. M., *Aeroporto Santos Dumont: Análise de Propostas de Melhorias na Infra-estrutura Aeroportuária via Modelo de Simulação*. Anais do XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Campinas, 2001, Vol. 3 p. 151-155.
- Peres, A. E., *Modelos para Avaliação de Capacidade de Pistas com Operações Semi-dependentes: Aplicação ao Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos*. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, 1992.
- Pidd, M., *Computer Simulation in Management Science*. John Willey & Sons, Chichester, 1994.
- Scheel, T., *Análise da Capacidade do Lado Aéreo do Aeroporto Internacional de Campinas Utilizando SIMMOD*. Trabalho de Graduação, ITA, São José dos Campos, 2000.
- Shannon, R., *Systems Symulation: the Art and Science*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1975.
- Siewerdt, E., *Gestão de Aeroportos e Espaços Aéreos no Limite de suas Capacidades*. II Simpósio de Transporte Aéreo – SITRAER, ITA, São José dos Campos, 2001.
- Silva, S. J., *Impactos Sócio-Ecômnicos do Congestionamento de Tráfego Aéreo no Brasil*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- Targa, D., *Uma Ferramenta Automatizada no Auxílio à Alocação de Slots para o Problema de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Brasileiro*. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, 2001.
- Trani, A. A., *Airport Air Side and Land Side Simulation and Modeling*. Apostila de curso, ITA, São José dos Campos, 1999.
- Trani, A. A., *Validação dos Modelos em Ferramentas de Simulação*. Comunicação pessoal via mensagem eletrônica, 2002.
- Trani, A. A., Wing-Ho, F., *Enhancements to SIMMOD: A Neural Network Post-processor to Estimate Aircraft Fuel Consumption*, NEXTOR Research Report RR-97-8, Department of Civil Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, 1997.
- TransSolutions, *The Airport and Aispace Simulation Model*. Basic Simmod Training Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- Wells, A. T., *Airport Planning & Management*. 2<sup>nd</sup> edition, TAB Books, 1992.

## APÊNDICE

Como mencionado no capítulo VI, para gerar resultados estatisticamente significativos, efetuou-se 20 iterações de cada modelo analisado. Este valor foi adotado em todos os modelos como número de iterações padrão.

Embora não seja o valor adotado na prática, a experiência sugere 5 iterações como número suficiente para obtenção de resultados estatisticamente válidos (TransSolutions, 2000). Trani (Trani, 2002) relata que ao efetuar 20 iterações nos modelos propostos junto à ferramenta SIMMOD Plus! 4.0 os resultados gerados são totalmente confiáveis.

Manter o número de 20 iterações em todos os modelos para todas as situações de aumento de demanda, não foi uma tarefa fácil de se realizar. A ferramenta possui limitações, que para esse tipo de análise, variação da demanda a qual foi o aspecto essencial para a obtenção de resultados significativos.

A maior das suas limitações foi o aparecimento dos chamados “*grid-locks*”. Os “*grid-locks*” caracterizou-se pelo total bloqueio das operações aeroportuárias no lado aéreo do Aeroporto, parando a simulação não gerando os resultados. Este problema foi observado principalmente quando o acréscimo de demanda já estava alto, e as condições de infraestrutura aeroportuária atingiam os seus limites de operação em determinados horários.



Diante disto, para algumas situações de acréscimo de demanda, o valor de 20 iterações não foi alcançado. Porém este número nunca ficou abaixo de 15 iterações, fato que não prejudicou os resultados.

Para evidenciar isto, foram efetuadas simulações para o modelo 1, onde o número de iterações teve seu valor variável para um mesmo nível de demanda, no caso 0%.

Primeiramente pode-se analisar o comportamento para a variável tempo total de viagem (Figuras 32 e 33).

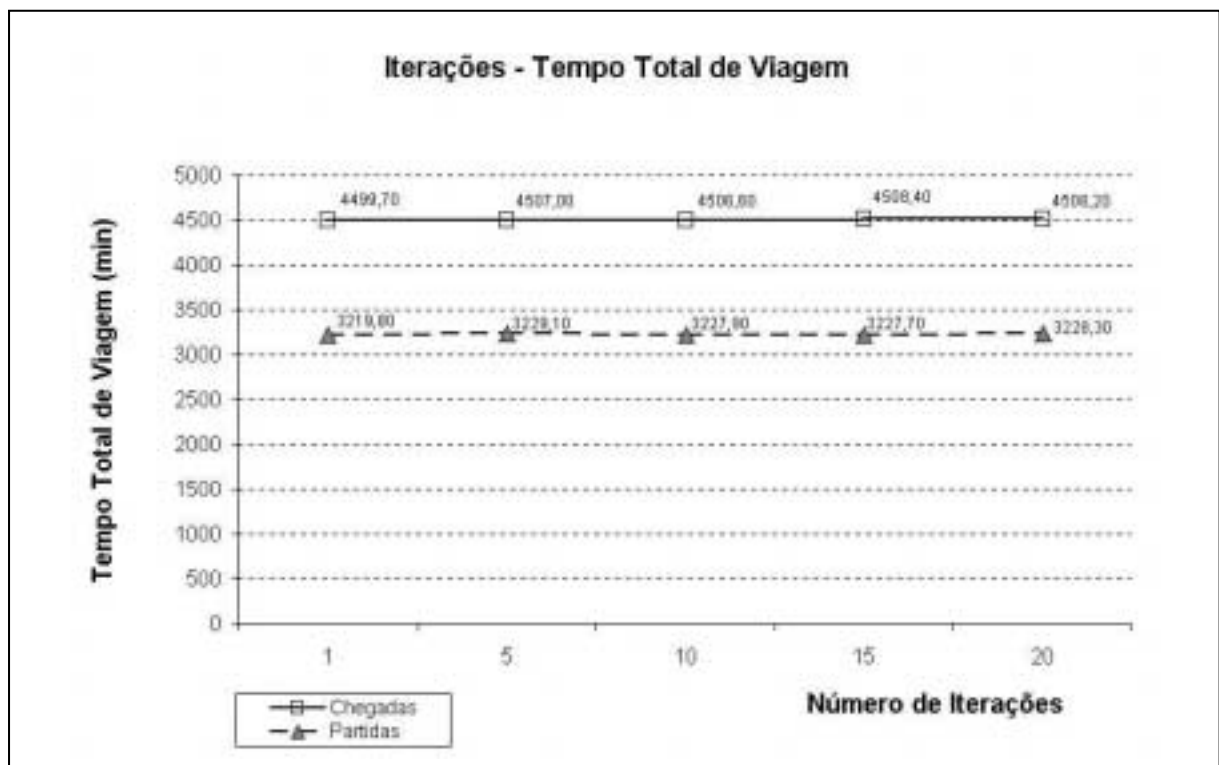


Figura 32 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempo de Viagem Total – Iterações.

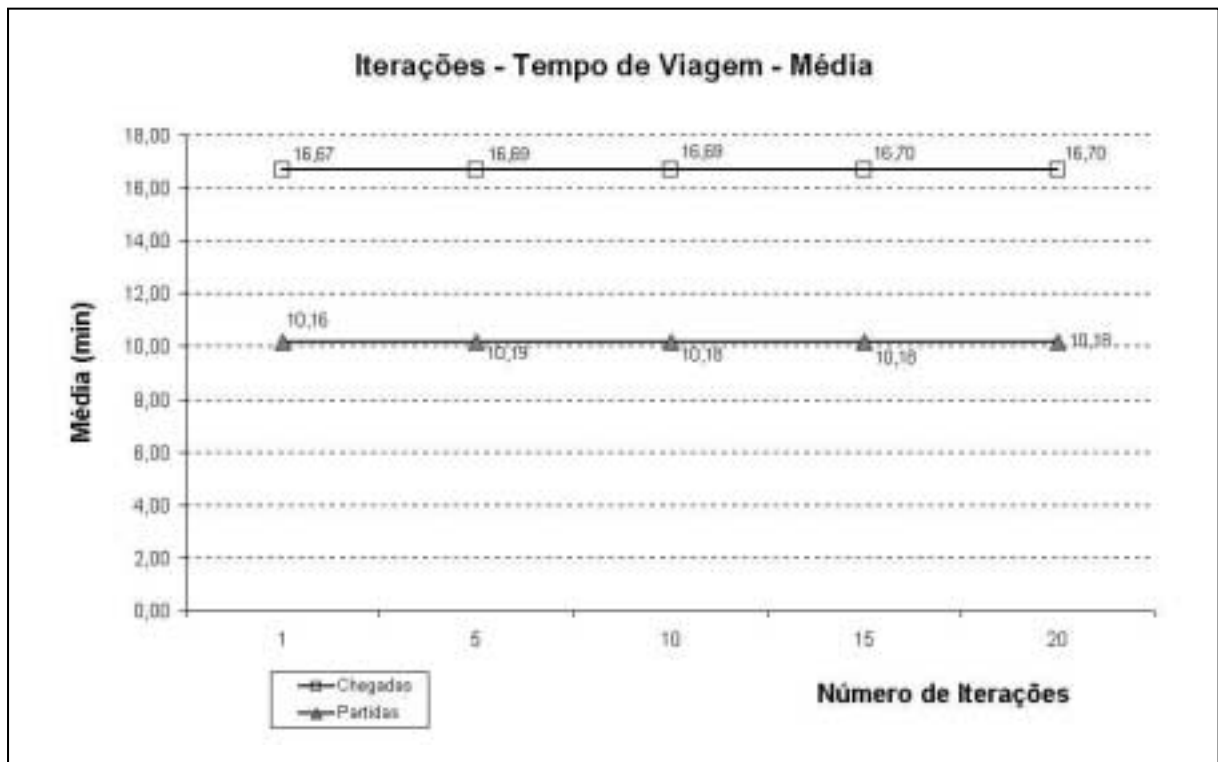


Figura 33 – Resultados Gerados pelas Simulações – Tempo de Viagem Médio – Iterações.

Verificando os dois gráficos, percebe-se o quão pequena é a diferença entre os valores para os casos relativos a 5, 10, 15 e 20 iterações. Como neste trabalho o menor valor foi 15 iterações, implica que as possíveis diferenças que poderiam existir são mínimas, não influenciando nem modificando os resultados gerados pelas simulações.

Para a variável atraso, foram elaborados os mesmos gráficos. (Figuras 34 e 35).

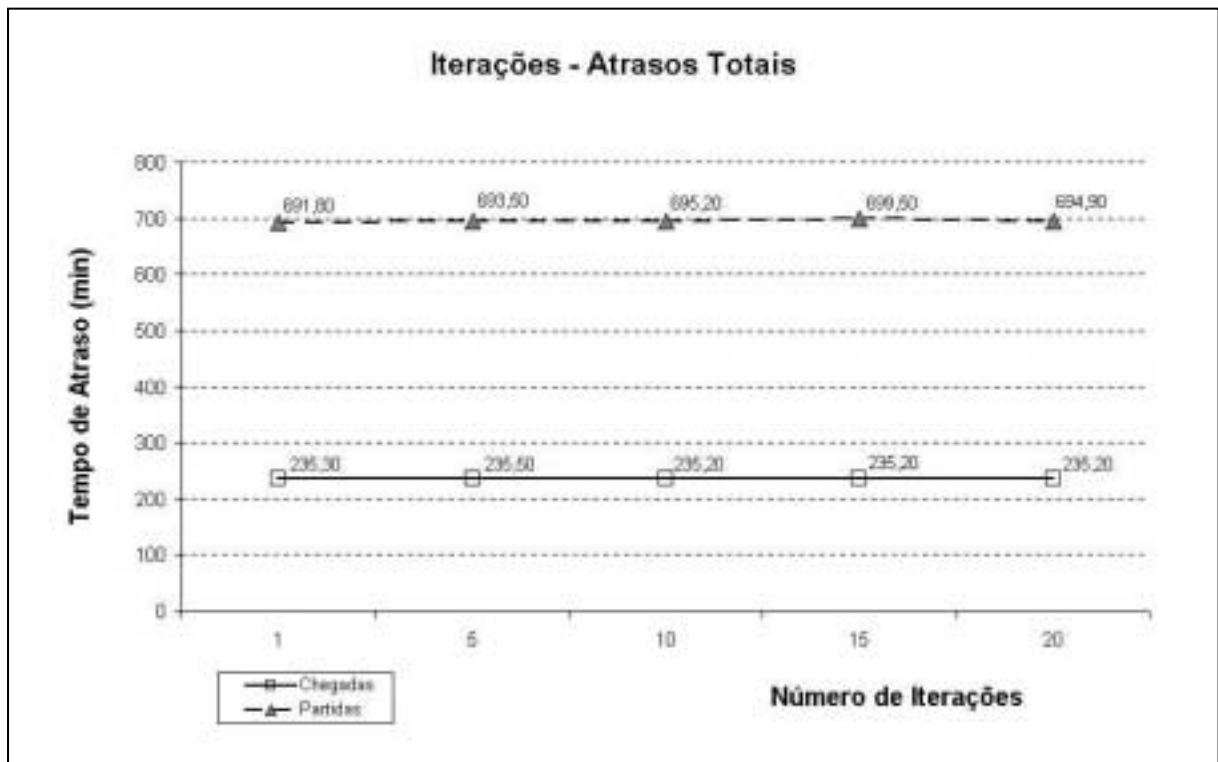


Figura 34 – Resultados Gerados pelas Simulações – Atrasos Totais – Iterações.

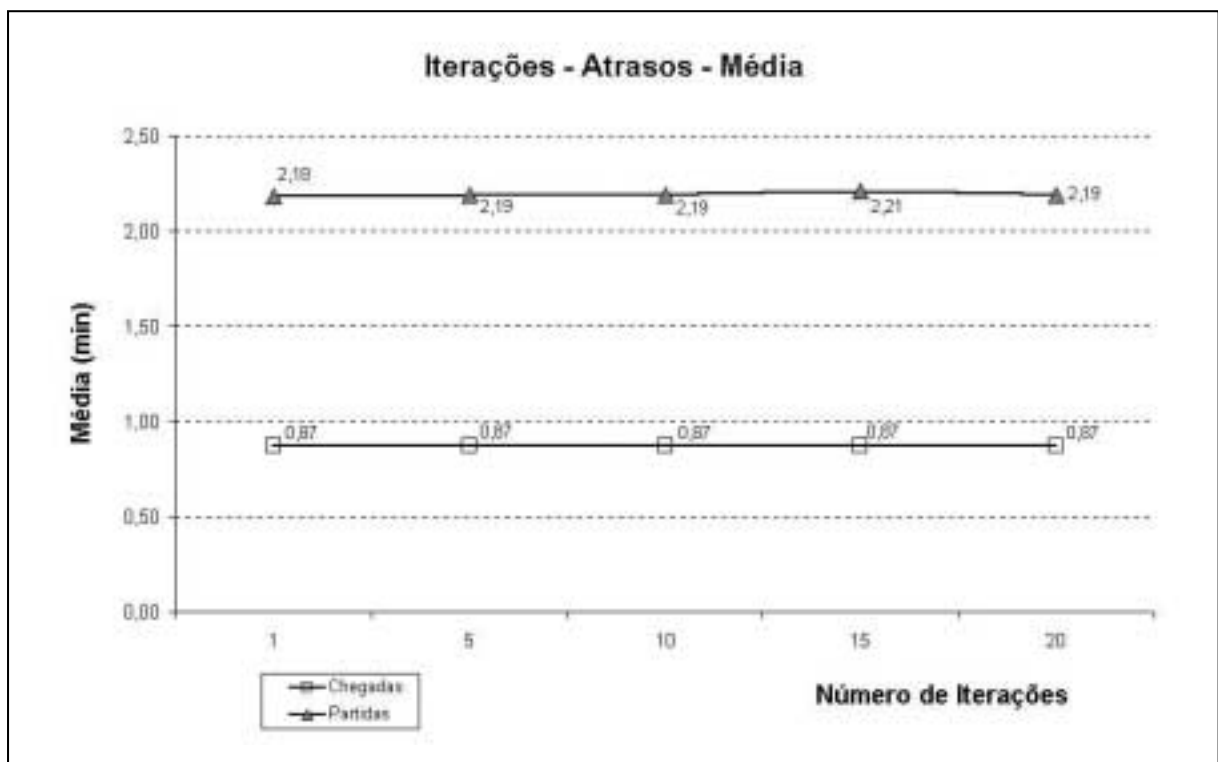


Figura 35 – Resultados Gerados pelas Simulações – Atrasos Médios – Iterações.

De forma análoga, pode-se observar que não houve grandes variações, mas atrasos ao longo do número de iterações considerado. Este comportamento também afere confiabilidade

ao modelo, haja vista os diferentes números aleatórios existentes responsáveis pela geração de cada iteração.

Fica claro que para o presente trabalho, o valor de 10 iterações já seria suficiente na busca de resultados confiáveis.

## ANEXOS

- AIP (2002) - AISP/GRU.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO  TM	2. DATA  17 Outubro 2002	3. DOCUMENTO N°  CTA/ITA-IEI/TM-006/2002	4. N° DE PÁGINAS  121
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise de novos cenários operacionais para o aeroporto internacional de São paulo / Guarulhos			
6. AUTOR(ES): <b>Érico Soriano Martins Santana</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: AEROPORTOS, CAPACIDADE, SIMULAÇÃO.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Planejamento de aeroportos; Simulação computadorizada; Administração de transportes; Transporte aéreo; Engenharia aeronáutica; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO:  ITA, São José dos Campos, 2002. 121 páginas		<b>X Nacional</b>	<b>Internacional</b>
11. RESUMO:  Propõe-se no presente trabalho uma metodologia de planejamento aeroportuário baseada em modelos de simulação, aplicado ao Aeroporto Internacional de São Paulo / Guarulhos (AISP/GRU). Foram representadas hipóteses com diferentes configurações de cenários, leiautes físicos e operacionais, no Aeroporto. Utilizou-se para tanto a ferramenta de simulação SIMMOD Plus! 4.0, desenvolvida para retratar a operação no espaço aéreo e lado aéreo de aeroportos. O escopo da pesquisa foi delineado para as operações realizadas no solo, pistas de rolamento e pátio de estacionamento das aeronaves, onde as análises realizadas facilitaram a visualização dos diagnósticos a partir da variação da demanda (número de operações). Os resultados gerados neste trabalho atestaram a viabilidade do uso da metodologia, além da indicação de soluções valiosas capazes de combater os atrasos, diminuindo assim os custos para os usuários do sistema. Indicou também alternativas para um melhor uso do Aeroporto, auxiliando a tomada de decisão quanto à implantação, ou não, de determinadas instalações ou a adoção de estratégias operacionais, nos seus respectivos momentos.			
12. GRAU DE SIGILO:  <b>(X) OSTENSIVO</b> <b>( ) RESERVADO</b> <b>( ) CONFIDENCIAL</b> <b>( ) SECRETO</b>			