Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, área de Transporte Aéreo e Aeroportos.

Rafael de Araújo Almeida

AUMENTO DA CAPACIDADE DE PISTAS PARALELAS E PRÓXIMAS: UM ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:

Prof. Dr. Carlos Müller Orientador

Prof. Dr. Luiz Carlos Sandoval Góes Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro São José dos Campos, SP – Brasil 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Almeida, Rafael de Araújo

Aumento da capacidade de pistas paralelas e próximas: um estudo de caso do aeroporto internacional de Guarulhos / Rafael de Araújo Almeida.

São José dos Campos, 2014.

132f.

Tese de mestrado – Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica e área de Transporte Aéreo e Aeroportos – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2014. Orientadores: Prof. Dr. Carlos Müller.

1. Capacidade de Pista. 2. Pistas Paralelas e Próximas. 3. Simulação. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II.Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, Rafael de Araújo. Aumento da capacidade de pistas paralelas e próximas: um estudo de caso do aeroporto internacional de Guarulhos. 2014. 132f. Tese de mestrado em Transporte Aéreo e Aeroportos – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafael de Araújo Almeida

TÍTULO DO TRABALHO: Aumento da capacidade de pistas paralelas e próximas: um estudo

de caso do aeroporto internacional de Guarulhos

TIPO DO TRABALHO: Tese / 2014

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

Rafael de Araújo Almeida

Refl of sy Al-de

Av. Shishima Hifumi 2940, apto 64 – Urbanova

CEP 12.244-000 – São José dos Campos – SP

AUMENTO DA CAPACIDADE DE PISTAS PARALELAS E PRÓXIMAS: UM ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS

Rafael de Araújo Almeida

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Cláudio Jorge Pinto Alves Presidente - ITA
Prof. Carlos Müller Orientador - ITA

Prof. Rogéria de Arantes Gomes Eller - ITA Prof. Li Weigang - UnB

Dedico este trabalho a Deus, que até aqui tem me ajudado, a minha família por sempre estar ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus, o autor da vida, que tem me ajudado e sustentado até aqui.

A minha esposa, Débora, pela compreensão, por estar sempre ao meu lado e por me apoiar nessa trajetória.

Aos meus pais, José e Soraya, e minha irmã, Hosana, que sempre me apoiaram e fizeram parte do empenho para que eu alcançasse meus objetivos.

Aos meus sogros, Elias e Ernest, que me ajudam e incentivam.

Ao Professor Müller, pela contribuição para o desenvolvimento do trabalho e pelo conhecimento transmitido.

À equipe da Pesquisa Aplicada do ICEA, TCel Victor, Maj Bastos, Maj McWillian, Cap Carlos Eduardo, Cap Rodrigues, 1º Ten Alencar, Paschoal, Evenilton, Átila, Tatiane, Germano e Tassinari, pela amizade, pelo empenho em sanar as dúvidas, pela solicitude em transmitir o conhecimento e pelo envolvimento com o trabalho realizado no Laboratório.

"O temor do Senhor é o princípio da sabedoria..." (Provérbios 1:7)

RESUMO

O aumento da capacidade pistas dos aeródromos congestionados é uma necessidade que pode ser suprida usando pistas paralelas de forma mais eficiente. Existem diversas limitações quando se trata do incremento de capacidade de pista paralelas, essas dificuldades agravam-se quando a configuração das pistas são próximas devido a interferência da esteira de turbulência nas operações da pista adjacente. Diante disso, o desafio de superar a restrição dos procedimentos de aproximação devido aos vórtices gerados pelas aeronaves motiva o estudo de alternativas para operações de pouso na configuração de pista paralela e próxima de forma mais eficiente. Com base nesse objetivo são analisadas capacidades de pista sob diversos cenários em simulação computacional, em que o software TAAM (Total Airspace and Airport Modeller) foi utilizado. Os cenários propostos abrangem operações regulamentadas e outras inovadoras, tais como SGAP (Staggered Approach Procedure) e SEAP (Steeper Approach Procedure), de forma a permitir aproximações simultâneas ou ainda reduções das separações longitudinais entre aeronaves nas aproximações para pouso. Verificou-se que melhorias tecnológicas que permitem reduções de separação no cenário atual poderiam aumentar em 17% a quantidade de movimentos, o procedimento SEAP levaria a um aumento de 22% de operações, além de procedimentos visuais que chegam a incrementar em 39% os movimentos de pouso.

ABSTRACT

Increasing the runway capacity of the congested aerodrome is a need that can be met by using parallel runways most efficiently. There are several limitations when it concerns the increasing the parallel runway capacity, these difficulties are compounded when the configuration of runways are closely-spaced parallel due to interference of the wake turbulence in the operations of adjacent runway. Thus, the challenge of overcoming the restriction of approach procedures due to the vortices generated by aircraft motivates the study of alternatives for landing operations in closely-spaced parallel runways more efficiently. Based on this purpose runway capacities are analyzed in several scenarios on computer simulation, in which the TAAM (Total Airspace and Airport Modeller) software was used. The proposed scenarios include regulated operations and other innovative such as SGAP (Staggered Approach Procedure) and SEAP (Steeper Approach Procedure), in order to allow simultaneous approaches or decreases of longitudinal separations between aircraft approaches to land. It was found that technological improvements that allow decrease separation in the current scenario could increase by 17% the amount of movement, SEAP procedure would result in an increase over 22% operations, beyond visual procedures that reach to increase over 39% landing movement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2 - Tipos de pistas paralelas
Figura 4 - Operações em função do espaçamento entre pistas paralelas
Figura 5 - Modos de operação
Figura 6 - Exemplo de NTZ e NOZ40
Figura 7 - Aproximações paralelas dependentes41
Figura 8 - Decolagens independentes divergindo em 45° e radar não requerido42
Figura 9 - Decolagens independentes divergindo pelo menos de 15° e radar requerido43
Figura 10 - Operações segregadas independentes
Figura 11 - Aproximações paralelas e próximas em condições VMC46
Figura 12 - Operações segregadas independentes com pistas decaladas
Figura 13 - Geometria do procedimento SOIA48
Figura 14 - Exemplo de geometria SOIA com cabeceira decalada49
Figura 15 - Aproximação SGAP50
Figura 16 - Aproximação SEAP52
Figura 17 - Propagação da esteira de turbulência53
Figura 18 - Transporte lateral da esteira de turbulência54
Figura 19 - Capacidade x Atraso59
Figura 20 - Capacidade de saturação x Atraso60
Figura 21 – Capacidade dos tipos de saturação x Atraso61
Figura 22 - Imagem de satélite de SBGR66
Figura 23 - Anemograma de frequência do Aeroporto de Guarulhos
Figura 24 - Procedimentos STAR para a cabeceira 09R de SBGR68
Figura 25 - Procedimentos SID para a cabeceira 09L de SBGR68
Figura 26 - Histograma de movimentos do mês de jun/201370
Figura 27 - Mix horário de aeronaves
Figura 28 - Mix horário de operações
Figura 29 - Média de movimentos no período de 3h no mês de jun/201373
Figura 30 - Anemograma de frequência do Aeroporto de Guarulhos no período de pico73
Figura 31 - Esquema de operação do cenário 178
Figura 32 - Esquema de operação do cenário 2
Figura 33 - Soluções para decalagem de cabeceiras
Figura 34 - Esquema de operação do cenário 381
Figura 35 - Esquema de operação do cenário 482
Figura 36 – Esquema da aproximação SGAP83
Figura 37 - Esquema de operação do cenário 584
Figura 38 - Vista superior e de perfil do procedimento SGAP (sem escala)86
Figura 39 - Esquema da aproximação SEAP87
Figura 40 - Esquema de operação do cenário 6
Figura 41 - Vista superior e de perfil do procedimento SEAP (sem escala)89
Figura - 42 Esquema de operação do cenário 7
Figura 43 - Vista superior e de perfil do mix dos procedimentos SGAP e SEAP (sem escala)
93
Figura 44 - Envelope de capacidade do cenário 1
Figura 45 - Envelope de capacidade do cenário 2
Figura 46 - Envelope de capacidade do cenário 3

Figura 47 - Envelope de capacidade do cenário 4	104
Figura 48 - Envelope de capacidade do cenário 5	
Figura 49 - Envelope de capacidade do cenário 6	
Figura 50 - Envelope de capacidade do cenário 7	
Figura 51 - Comparação entre movimentos de pousos	108
Figura 52 - Comparação entre movimentos de decolagem	
Figura 53 - Comparação entre movimentos totais	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo do tráfego mundial dos aeroportos	.16
Tabela 2 - Ranking dos aeroportos com maior número de movimentos de aeronaves no mui	ndo
em 2012 e suas configurações de pistas	.19
Tabela 3 - Evolução dos movimentos de aeronaves nos aeroportos brasileiros	.20
Tabela 4 - Ranking dos aeroportos brasileiros de maior movimento de aeronaves em 2012.	.21
Tabela 5 - Comparativo entre níveis de modelagem	.30
Tabela 6 - Máxima separação longitudinal (em segundos) em função do espaçamento entre	
pistas e o vento perpendicular (crosswind)	.54
Tabela 7 - Mínimo de separação por esteira de turbulência em NM	.56
Tabela 8 - Frequência de aeronaves	.70
Tabela 9 - Diferenças em cada parâmetro de saturação	.77
Tabela 10 - Resumo dos cenários	.96
Tabela 11 - Resultados dos cenários	.97
Tabela 12 - Resumo dos resultados	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI – Airports Council International

ADC – Aerodrome Chart

ADS-B – Automatic Dependent Surveillance-Broadcast

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil

ARR – *Arrival* (chegada/pouso)

ATC – Air Traffic Control

ATM – Air Traffic Management

ATS – Air Traffic Service

BADA – Base of Aircraft Data

CGNA – Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea

CTR – Zona de Controle

CW - Crosswind

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DEP – *Departure* (partida/decolagem)

FAA – Federal Aviation Administration

FAG – Final Approach Gate

GS – Glide Slope

HALS – High Approach Landing System

ICEA – Instituto de Controle do Espaço Aéreo

IFR – Instrument Flight Rules

ILS – Instrument Landing System

IMC – Instrument Meteorological Conditions

KATL - Atlanta/Hartsfield-Jackson International Airport

KCLT – Charlotte Douglas International Airport

KDEN – Denver International Airport

KDFW – Dallas-Fort Worth International Airport

KIAH – Houston International Airport

KLAS – Las Vegas McCarren International Airport

KLAX – Los Angeles International Airport

KORD - Chicago O'Hare International Airport

LDA – Localizer Directional Aid

LFPG – Paris/Charles De Gaulle International Airport

MLS – Microwave Landing System

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NM – milhas náuticas

OGE – Out of Ground Effect

PND – Programa Nacional de Desestatização

PRM – Precision Runway Monitor

SAP – Stabilized Approach Point

SBBR – Aeroporto Internacional de Brasília

SBGL - Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão

SBGR – Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos

SBMT – Aeroporto de Campo de Marte

SBSP – Aeroporto de São Paulo/Congonhas

SEAP – Steeper Approach Procedure

SGAP – Staggered Approach Procedure

SGTC – Sistema de Gerenciamento de Torre de Controle

SID – Standard Instrument Departure

SOIA – Simultaneous Offset Instrument Approach

SOIR – Manual on Simultaneous Operations on Parallel or near-Parallel Instrument Runways

SSR – Secondary Surveillance Radar

STAR – Standard Terminal Arrival

TAAM – Total Airspace and Airport Modeller

TMA – Área de Controle Terminal

TPS – Terminal de Passageiros

TRB – Transportation Research Board

UTC - Coordenated Universal Time

VFR – Visual Flight Rules

VMC – Visual Meteorological Conditions

ZBAA – Beijing Capital International Airport

SUMÁRIO

1	INTRO	DDUÇÃO	16
	1.1 OB	JETIVOS	21
	1.1.1	Objetivos gerais	21
	1.1.2	Objetivos específicos	22
	1.2 ES	TRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVIS	ÃO DE LITERATURA	24
	2.1 CA	PACIDADE DE PISTA	25
	2.1.1	Fatores que influenciam a capacidade de pistas	25
	2.1.2	Métodos para o cálculo da capacidade de pistas	29
	2.2 OP	ERAÇÕES EM PISTAS PARALELAS	33
	2.2.1	Pistas paralelas distantes e intermediárias	38
	2.2.1	.1 Aproximações paralelas independentes (modo 1)	39
	2.2.1	.2 Aproximações paralelas dependentes (modo 2)	41
	2.2.1	.3 Decolagens independentes (modo 3)	42
	2.2.1	1 3 6 6	
	2.2.2	Pistas paralelas e próximas	
	2.2.2	r . ,	
	2.2.2	1 3 6 6 1	
	2.2.2		
	2.2.2		
	2.2.2	1 11 /	
		TEIRA DE TURBULÊNCIA	
		GRAS ATC	
3		DOLOGIA	
		TODO DE CAPACIDADE COM SIMULAÇÃO	
		AM	
		RÂMETROS	
4		PORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS	
		SE DE DADOS	
		NÁRIOS	
	4.2.1	Cenário 1	
	4.2.2	Cenário 2	
	4.2.3	Cenário 3	
	4.2.4	Cenário 4	82

	4.2.5	Cenário 5	83
	4.2.6	Cenário 6	87
	4.2.7	Cenário 7	91
5	RESU	LTADOS E ANÁLISES	96
5	5.1 DIS	SCUSSÃO	96
	5.1.1	Cenário 1 - Base	100
	5.1.2	Cenário 2 - Visual	101
	5.1.3	Cenário 3 - SOIR	102
	5.1.4	Cenário 4 - SOIA	103
	5.1.5	Cenário 5 - SGAP	104
	5.1.6	Cenário 6 - SEAP	105
	5.1.7	Cenário 7 - SGAP e SEAP	106
5	5.2 VA	ALIDAÇÃO	108
6	CONC	LUSÃO	110
RE	FERÊN	CIAS	115
M(OVIMEN	E A - RANKING DOS AEROPORTOS COM MAIOR NÚMERO DE NTOS DE AERONAVES NO MUNDO EM 2012 E SUAS	
		RAÇÕES DE PISTAS	
		E B - PLANOS DE VOO BASE	
		- MATRIZ PARA ESCOLHA DO NÍVEL DE MODELAGEM	
AN	EXO B	- AEROPORTOS AMERICANOS COM PISTAS PARALELAS	126
AN	EXO C	- CARTA ADC – SBGR	130

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte aéreo possui destaque no contexto mundial. Sua importância se deve a demanda elevada do transporte de pessoas e cargas de maneira rápida, segura e eficiente, reduzindo as distâncias globais.

Sua relevância fica evidenciada através dos relatórios internacionais que apresentam a evolução da demanda do setor. Segundo o ACI (*Airports Council International*), no período de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014, o movimento de passageiros foi de, aproximadamente, 5,4 bilhões, representando um aumento de 4,3 % em relação ao mesmo período do ano anterior. Respectivamente, o transporte de carga foi de 87 milhões de toneladas com um crescimento de 0,3 %, e o movimento de aeronaves foi de 65 milhões com um crescimento de 0,3 %, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo do tráfego mundial dos aeroportos

	Anual*	Variação**
Passageiros	5 402 501 268	4,3 %
Carga	87 050 743 t	0,3 %
Aeronaves	65 075 294	0,3 %

Fonte: (ACI [1]). * Dados relativos a fevereiro de 2013 a janeiro de 2014, contando com a participação de 1 082 aeroportos. ** Variação em relação ao mesmo período do ano anterior.

A evolução mensal do tráfego pode ser comparada em relação ao mesmo mês do ano anterior, segundo o ACI e conforme apresenta a Figura 1. Nota-se que para o caso de movimento de passageiros a tendência é sempre positiva, ou seja, todos os meses tiveram um acréscimo de demanda se comparados aos respectivos meses do ano anterior, sendo que o maior índice foi alcançado nos meses de dezembro de 2013 e janeiro de 2014, apresentando 6,3 % de variação. No mesmo período, o movimento de cargas apresentou alguns índices negativos e outros

positivos, de forma que os pontos extremos atingiram -6,3 % de variação em fevereiro de 2013 e 4,1 % em outubro de 2014.

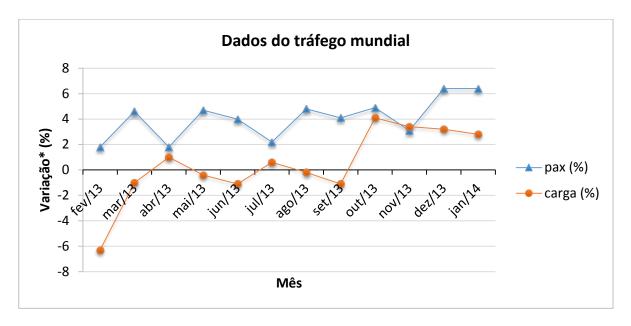


Figura 1 - Dados do tráfego mundial

Fonte: (ACI [2]). *Variação em relação ao mesmo mês do ano anterior.

Conhecendo a tendência da demanda do transporte aéreo surge a necessidade de avaliar a capacidade aeroportuária, mais especificamente a capacidade de pista de pouso e decolagem dos aeródromos, que limita a quantidade de movimentos no aeródromo. O aumento da demanda e a existência de limitações para ampliação da capacidade geram cada vez maiores atrasos nos aeroportos.

A capacidade de pista de pouso e decolagem é a quantidade de movimentos de pouso e decolagem que pode ser alocada dentro de um intervalo de tempo em uma pista ou conjunto de pistas em questão. Frequentemente, mede-se para o intervalo de uma hora ou quinze minutos. Tal capacidade é função, principalmente, da configuração do sistema de pistas para um dado aeroporto, sendo definida na concepção do aeroporto, assim como no seu plano diretor, e é determinada por dois fatores principais: condições de vento e demanda de tráfego.

São três os parâmetros relevantes para as condições de vento: frequência, direção e intensidade. Esses fatores determinam a quantidade e a direção das pistas necessárias para atender o aeródromo de forma a garantir as operações nos seus horários de funcionamento. A estimativa de demanda de tráfego, por sua vez, determina a quantidade e a configuração das pistas que proporcionam a capacidade desejada.

Os principais tipos de configuração de pistas são simples, paralelas, quase paralelas ou cruzadas. De forma prática quando existe apenas uma pista diz-se que é simples, quando existem duas ou mais pistas e as cabeceiras possuem mesmas orientações diz-se que são paralelas, se não possuem intersecção e os prolongamentos de centro de pistas divergem/convergem de 15° ou menos então são quase paralelas, por fim, se possuem intersecção ou divergem/convergem por mais de 15° então são cruzadas.

Dentre as pistas paralelas existe a seguinte classificação: as próximas, com espaçamento entre eixos menor do que 760 m (2 500 ft); intermediárias, com espaçamento entre eixos de 760 m a 1 310 m (2 500 – 4 300 ft); e distantes, com espaçamento entre eixos maior do que 1 310 m (4.300 ft) (Wald, Fay, & Gleich, 2010; NASA, s.d.).

As pistas cruzadas podem impossibilitar aproximações e decolagens simultâneas para as diferentes pistas, enquanto que pistas paralelas reduzem a quantidade de conflito nas trajetórias dos procedimentos de pouso e decolagem, possibilitando assim um fluxo mais eficiente das aeronaves. Na situação de pistas quase paralelas não há uma regra definida, varia de caso a caso. Por esse motivo pistas paralelas são largamente utilizadas nos principais aeroportos do mundo.

A Tabela 2 apresenta o ranking dos 5 aeroportos com o maior número de movimentos de aeronaves do mundo em 2012 (uma lista com mais detalhes encontra-se no Apêndice A), de acordo com o ACI, e suas respectivas configurações de pistas analisadas em pares (assim como se deu a necessidade de novas pistas), desconsiderando a opção *dual-lane*, que nada mais é do que dois pares de pistas próximas separadas por mais de 1 310 m. Verifica-se que entre as pistas desses cinco aeroportos 40% são pistas paralelas e próximas, 6,7% são pistas paralelas

intermediárias, 36,7% são pistas paralelas distantes e 16,7% as demais, ou seja, 83,3%, são pistas paralelas.

Tabela 2 - Ranking dos aeroportos com maior número de movimentos de aeronaves no mundo em 2012 e suas configurações de pistas

Aeroporto	Movimentos*	Layout
Atlanta (KATL)	930 310	
Chicago (KORD)	878 108	
Los Angeles (KLAX)	698 619	
Dallas (KDFW)	650 124	
Denver (KDEN)	612 567	

Fonte: *(ACI, 2013).

Esse tipo de configuração de pistas possui a vantagem de possibilitar operações simultâneas, que, por sua vez, surge da necessidade de aumentar a capacidade dos aeródromos

congestionados. Esse aumento de capacidade pode ser feito usando pistas paralelas de forma mais eficiente ou pela construção de novas pistas. No entanto, o custo da construção de novas pistas pode ser muito alto ou até inviável devido à ocupação do solo no entorno do aeroporto. Embora exista a necessidade e o interesse em aumentar a capacidade de pista através do aumento da eficiência do sistema de pistas dos aeroportos, a operação simultânea nem sempre é possível. A situação se torna cada vez mais restritiva quanto menos espaçados estiverem os eixos de pistas paralelas, logo as pistas paralelas e próximas são as mais limitadas. Essas limitações são ocasionadas pela esteira de turbulência de restrições meteorológicas.

Nesse contexto, há necessidade de estudar alternativas para operações de pouso nas pistas paralelas e próximas, inclusive com a abordagem de procedimentos inovadores, tais como SGAP (*Staggered Approach Procedure*) e SEAP (*Steeper Approach Procedure*), a fim de avaliar as capacidades para cada alternativa.

Observa-se na Tabela 3 a evolução da demanda em relação a quantidade de movimentos de aeronaves nos aeroportos da rede Infraero, antes das concessões. Embora a variação de 3,76% em 2012 tenha sido menor que os demais anos, a taxa crescente de demanda se manteve.

Tabela 3 - Evolução dos movimentos de aeronaves nos aeroportos brasileiros

Ano	Movimentos	Variação (%)
2008	2 128 823	-
2009	2 290 950	7,62
2010	2 647 918	15,58
2011	2 893 203	9,26
2012	3 001 946	3,76

Fonte: (INFRAERO, 2013)

-

¹ A esteira de turbulência é a turbulência gerada por uma aeronave devido aos vórtices formados nas asas da aeronave.

Tabela 4 - Ranking dos aeroportos brasileiros de maior movimento de aeronaves em 2012

Aeroporto	Movimentos	Partc. Rede* (%)	Freq. Ac.** (%)
SBGR	273 884	9,11	9,11
SBSP	213 419	7,11	16,22
SBBR	188 528	6,28	22,50
SBGL	154 318	5,14	27,64
SBMT	143 799	4,79	32,43

Fonte: (INFRAERO, 2013)

*Participação da rede de aeroportos Infraero, antes das concessões. **Participação Acumulada da rede com os aeroportos acima posicionados.

Dentre os aeroportos da rede Infraero alguns são referência devido sua demanda anual, como pode ser verificado na Tabela 4. A quantidade de movimentos de aeronaves em 2012 foi maior no Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR), sendo o primeiro do ranking com 273 mil movimentos representando, aproximadamente, 9,11% dos movimentos nos 66 aeroportos da rede.

A representatividade do Aeroporto Internacional de Guarulhos e sua configuração de pistas, que é um par de pistas paralelas e próximas, o nivela à situação dos principais aeroportos do mundo. Por isso esse aeroporto será utilizado como um estudo de caso para avaliar as alternativas de aumento de capacidade de pistas paralelas e próximas, através do método de simulação computacional.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo analisar a capacidade de pistas paralelas e próximas através do estudo de alternativas para operações de pouso nessa configuração de pista a fim de possibilitar o uso mais eficiente do sistema.

Vale ressaltar que procedimentos diferentes de decolagem não estão no escopo do estudo, por isso as decolagens seguirão, no geral, o mesmo padrão adotado no cenário atual.

Os cenários propostos abrangem operações regulamentadas e outras inovadoras, tais como SGAP (*Staggered Approach Procedure*), SEAP (*Steeper Approach Procedure*) e um arranjo entre perfis de operações de forma a permitir aproximações simultâneas.

Com foco em uma situação real é realizado um estudo de caso do Aeroporto Internacional de Guarulhos, que apresenta a maior demanda em termos de movimentos anuais do país e suas pistas são paralelas e próximas.

A análise da capacidade de pista sob os diversos cenários é realizada com uso de simulação computacional, em que o *software* a ser utilizado é o TAAM (*Total Airspace and Airport Modeller*).

O estudo consiste na simulação de sete cenários, o primeiro é o cenário base, que indica o modelo de operação segregada atual em um dia típico. O segundo cenário avalia a situação menos restritiva de operações em condições VMC (*Visual Meteorological Conditions*) com aproximações simultâneas. O terceiro cenário prevê a operação segregada simultânea. O quarto aplica o tipo de operação SOIA (*Simultaneous Offset Instrument Approach*) às operações de aproximação. O quinto e o sexto cenários aplicam, respectivamente, os procedimentos SGAP e SEAP às aproximações, enquanto o sétimo cenário combina esses dois tipos de procedimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que o trabalho busca alcançar são:

- Realizar uma revisão de literatura dos procedimentos de operação em pistas paralelas e próximas;
- Propor novos procedimentos para pistas paralelas e próximas;
- Avaliar a capacidade de pistas sob os diversos procedimentos; e

• Comparar as diferentes capacidades de pistas para os diferentes padrões de operação.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta Seção 1 introduz o contexto em que o trabalho está inserido, sua motivação e objetivos. Dando sequência à Seção 2, que explicita os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho, onde são apresentados: os principais conceitos e métodos de capacidade de pista e fatores que impactam tal capacidade; os conceitos de operação em pistas paralelas e mais especificamente as operações em pistas paralelas e próximas; o problema da esteira de turbulência; as regras de tráfego aéreo relevantes à modelagem; e uma visão geral da ferramenta TAAM.

A Seção 3 apresenta a metodologia do trabalho para alcançar os objetivos pretendidos. Os tópicos abordados são: capacidade de pista com o TAAM; parâmetros relevantes para avaliar os cenários; características físicas, regras de operação e regras de tráfego aéreo relativas ao Aeroporto Internacional de Guarulhos; as premissas adotadas no estudo; as características da base de dados; e a explicação detalhada de cada cenário proposto.

A seção 4 traz os resultados e discussões de cada cenário estudado, organizando ainda uma comparação entre cenários.

A seção 5 apresenta as conclusões obtidas através do trabalho, evidenciando os objetivos, reforçando a importância do assunto e relembrando as premissas e limitações do estudo.

Por fim, a seção 6 visa a indicação de propostas de continuidade da pesquisa para enriquecer as conclusões e estudos do setor aéreo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Na literatura sobre capacidade de pistas aeroportuárias encontram-se autores que analisam aproximações, procedimentos e tecnologias diferentes que impactam a capacidade aeroportuária atuando diretamente na capacidade de pista dos aeródromos.

Almeida (2012) pesquisou alternativas para ampliar a capacidade operacional de pistas paralelas, no entanto os resultados de capacidade para o cenário com separações longitudinais por esteira de turbulência apresentaram redução da capacidade, apesar de um aumento de 7% das operações de pouso, por exemplo.

Por exemplo, procedimentos inovadores como o SGAP e o SEAP, que tratam de procedimentos de aproximação com trajetórias decaladas (SGAP) e com ângulo mais elevado (SEAP), foram abordados por Janic (2008), o autor desenvolve um modelo da capacidade para esses dois novos procedimentos (JANIC, 2008).

Burnham, Hallock e Greene (2001) tratam do aumento de capacidade de pistas aeroportuárias com procedimentos modificados de aproximação por instrumentos, que seria procedimentos de aproximação utilizando separação diagonal em função das categorias de aeronaves e limites de ventos cruzados (*crosswinds*), em pistas paralelas e próximas.

Em outro momento Burnham, Hallock e Greene (2002) estuda o comportamento das esteiras de turbulência em aproximações para pistas paralelas. Nesse trabalho os autores encontram valores de decaimento da esteira de turbulência em função do espaçamento de pistas e do vento lateral.

Ogata (2003) avalia os riscos de perigo em operações convencionais de aproximação de pistas paralelas. Nessa pesquisa é utilizado o Método de Monte Carlo com as incertezas de proa, posição lateral, posição longitudinal e velocidade.

Além desses, de forma complementar, Subramanian (2002) apresenta uma metodologia para avaliação de capacidade utilizando simulação e indicando ainda parâmetros de interesse para análise da eficiência da utilização de pistas.

2.1 CAPACIDADE DE PISTA

Segundo Horonjeff, a definição de capacidade designa o limite de processamento de um serviço em um intervalo de tempo, tipicamente definido como número máximo de operações que um serviço pode acomodar durante um período específico de tempo. Para tal serviço atingir a capacidade máxima ou final deve submetido à demanda contínua (HORONJEFF, MCKELVEY e SPROULE, 2010).

Mais especificamente a capacidade de pista de pouso e decolagem é a quantidade de movimentos de pouso e decolagem que pode ser alocada dentro de um intervalo de tempo em uma pista ou conjunto de pistas em questão, sendo medido, frequentemente, em intervalos de uma hora ou quinze minutos.

Tal capacidade influencia o dimensionamento de outros componentes do aeródromo, como pátio de aeronaves, pontes de embarque, TPS (terminal de passageiros), etc. Esse valor também permite efetuar o planejamento e gerenciamento do tráfego aéreo para manter a segurança, a eficiência e a fluidez.

2.1.1 Fatores que influenciam a capacidade de pistas

A fim de avaliar a capacidade é necessário entender fatores que influenciam na capacidade do sistema de pista de pouso e decolagem, pois tais fatores podem afetar de maneira mais ou menos intensa a capacidade.

Um ou mais fatores podem ser otimizados para maior processamento de aeronaves, ou seja, incremento de capacidade. Em seguida são apontados alguns fatores que afetam a capacidade da pista do aeródromo:

- Configuração do sistema de pistas está relacionada com a quantidade e o posicionamento das pistas de pouso e decolagem, por exemplo, se possui uma ou mais pistas, se são cruzadas ou paralelas no caso de mais de uma pista, assim como a separação lateral entre eixos. Essas características definem a relação entre as pistas de rolamento e sua influência nas operações do aeródromo.
- Tipo de operação do sistema de pista define que padrão de operação com relação aos movimentos é adotado para cada pista. Por exemplo, quais pistas são destinadas apenas para pousos ou apenas para decolagens ou para ambas as operações. Pode-se especificar ainda o tipo de aeronave que utiliza cada pista.
- Esteira de turbulência é a turbulência gerada por uma aeronave à medida que passa através do ar. Os efeitos da esteira de turbulência sobre a aeronave seguidora são a perda de controle, perda de sustentação ou de velocidade de subida e os esforços da estrutura.
 Por causa dessa esteira são exigidas separações mínimas entre aeronaves durante o voo e procedimentos.
- Condições meteorológicas (VMC ou IMC) A capacidade de pista pode variar ainda com as condições meteorológicas do aeródromo. As principais variáveis para definir o tipo de condição meteorológica são a visibilidade e a distância vertical da base das nuvens (teto). Os mínimos meteorológicos de aeródromo para condições visuais, VMC (Visual Meteorological Conditions), são de 1 500 ft de teto e 5 000 m de visibilidade (DECEA, 2013), abaixo desses limites tem-se condições instrumento, IMC (Instrument Meteorogical Conditions).
- Regra de voo (VFR ou IFR) existem dois tipos de conjunto de regulamentos e
 procedimentos que se aplicam ao voo, o VFR (Visual Flight Rules) e o IFR (Instrument
 Flight Rules). Essas regras estão associadas ao nível de visibilidade e ao teto da

- aeronave (condições meteorológicas), as mesmas influenciam nos procedimentos das aeronaves, tais como separação, procedimentos de saída e chegada, etc.
- Mix de aeronaves é a proporção da categoria de aeronaves, que pode ser relativa ao seu peso (mais usado) ou a velocidade de cruzamento da cabeceira. Existem, basicamente, três categorias de aeronave segundo o peso: pesada, média e leve (DECEA, 2013 e ICAO, 2007). O tipo de aeronave afeta diversas etapas como, por exemplo, a separação devido à esteira de turbulência e a ocupação da pista.
- Mix de operação é a proporção entre operações de pouso e decolagem na pista ou no sistema de pistas para o caso de operações dependentes. Esse índice influencia na capacidade pelo fato de que os movimentos de pouso demandam maior tempo para execução do movimento e afeta a separação entre tipos de operação, por exemplo, decolagem seguida de decolagem ou pouso seguido de decolagem.
- Saídas de pista são saídas para aeronaves que realizaram o pouso. Para aumentar a eficiência desse componente existem as chamadas saídas rápidas, localizadas ao longo da pista com um ângulo de desvio baixo que possibilite a saída da aeronave com uma velocidade alta, diminuindo assim o tempo de ocupação da pista de pouso.
- Operação de toque e arremetida é a operação que a aeronave executa ao realizar o procedimento de pouso e por algum motivo de segurança como falhas no procedimento do pouso, há a necessidade de interromper o pouso, mesmo após o toque na pista, retornando ao voo. No entanto, esse procedimento é realizado com frequência onde há treinamento de pilotos, sendo pouco comum onde há fluxo de passageiros.
- Separação mínima corresponde à separação longitudinal e lateral mínima imposta, por meio de regulamento, entre aeronaves. As separações exigidas nos procedimentos de aproximação e decolagem são as que mais afetam a capacidade da pista. As

- aproximações por sua vez são afetadas pela esteira de turbulência, condições de equipamentos (radar), capacitação e familiarização de pilotos e controladores de voo.
- Fatores humanos referem-se aos profissionais envolvidos diretamente na operação.
 Quanto maior a capacitação e experiência dos pilotos e controladores, maior será a agilidade e até mesmo a possível aplicação de regras com menores separações.
- Restrições estão relacionadas as limitações climatológicas, onde condições adversas implicam em separações maiores, e a exigências no entorno do aeródromo que restringem as operações no aeroporto, por exemplo, decorrentes do ruído sobre áreas habitadas.
- Tipo de sistema de navegação remete ao nível de tecnologia de navegação disposta no aeroporto e na aeronave. Ou seja, quanto mais confiáveis e precisos forem os equipamentos de auxílio à navegação maior será a segurança de operações mais próximas.
- Procedimento de saída (SID) as características das SID (*Standard Instrument Departure*) utilizadas por aeronaves que decolam sucessivamente afetam na separação de decolagem entre as aeronaves. Por exemplo, para partidas seguidas que realizam procedimento de saída com rumos iguais devem manter uma separação mínima entre operação de decolagem de 2 (dois) minutos, enquanto com rumos distintos a exigência mínima de separação é de 1 (um) minuto, segundo a ICA 100-37.
- Procedimento de chegada (STAR) a trajetória dos procedimentos de STAR (Standard Terminal Arrival) pode limitar a quantidade de aeronaves e separações no sequenciamento para pouso. Isso acontece quando os diversos procedimentos de STAR para um aeródromo converge para um ponto ou segmento comum, que se torna um gargalo para o sequenciamento.

2.1.2 Métodos para o cálculo da capacidade de pistas

A representação simplificada do sistema é chamada de modelo, o qual é projetado a fim de obter aspectos relevantes do sistema ao operador. Esse processo procura imitar e criar a atuação do sistema real.

O tipo e grau de modelagem dependem, basicamente, do objetivo e complexidade do sistema em estudo. Existem vários tipos de modelos que são usualmente empregados, como modelos matemáticos, descritivos, estatísticos e de simulação.

O relatório de avaliação de capacidade de aeródromo da *Transportation Research Board* (TRB) classifica em cinco os níveis de modelagem para análise de capacidade de aeródromo. A Tabela 5 apresenta os cinco níveis de modelagem assim como suas principais características, como aplicação, atributos e limitações, dados requeridos e exemplos.

No entanto, de modo resumido existem três métodos para o cálculo da capacidade de pista de aeroportos, os quais apresentam os diferentes níveis de simplificação de modelos. São eles o método empírico, analítico e de técnicas de simulação.

O método empírico é aquele em que através da observação da experiência atual é possível relacionar os demais casos. O principal método empírico é o da FAA (*Federal Aviation Administration*) destinado ao cálculo de capacidade de pistas e atrasos, presente no Advisory Circular 150/5060-5 (FAA, 1983).

Os capitulos 2 e 3 desse documento da FAA prevêm o cálculo da capacidade através de tabelas e/ou ábacos elaborados com base em aeroportos americanos e variam de acordo com a regra de voo (VFR ou IFR), a quantidade e configuração de pistas. Em cada ábaco existem ainda outros parâmetros para o cálculo da capacidade horária, tais como fator de toque e arremetida, porcentagem de pousos, índice mix (baseado em quatro categorias de peso máximo de decolagem das aeronaves) e fator de saída de pista.

Tabela 5 - Comparativo entre níveis de modelagem

Nível	Descrição	Exemplos	Aplicação	Atributos/ Limitações	Dados
1	Consulta de tabela	Capítulo 2 do AC*	Planos estaduais, planos diretores dos aeroportos onde a capacidade não é problema	Somente pistas de pouso e decolagem, aeródromos simplificados, aeroportos pequenos, apenas hipóteses padrão	Mínimo, requer somente uma visão geral da configuração de pista do aeroporto e o mix de aeronaves
2	Gráficos e planilhas	Capítulo 3 do AC*	Planos estaduais, planos diretores dos aeroportos onde a capacidade não é problema	Somente pistas de pouso e decolagem, aeródromos pouco complexo, aeroportos médios, alguma flexibilidade na entrada de dados	Menor, requer a configuração de pista, mix de aeronaves, localização das saídas de pista e percentual de chegadas
3	Modelos analítico	Método CGNA	Estudo especializado de capacidade de aeródromo, estudos do plano diretor, planejamento regional do sistema de aeroporto	Somente pistas de pouso e decolagem, aeródromos de média complexidade, considerações implícitas de taxiways e espaço aéreo, flexibilidade nas hipóteses de entrada	Mais exigente, inclui mix de aeronaves, velocidade da aeronave no segmento de aproximação final, separações entre aeronaves e regras de tráfego aéreo
4	Modelos de simulação de capacidade	runway Simulator **	Planejamento da capacidade de aeródromos complexos ou sistema do espaço aéreo regional	Somente pistas de pouso e decolagem, aeródromos e espaço aéreos complexos, flexibilidade de hipóteses	Dados de entrada mais detalhados do que o nível 3, incluindo detalhes de chegada e partida, geometria da pista e mix de aeronave na pista
5	Modelos de simulação de atraso	RamsPlus, TAAM	Planejamento detalhado de aeródromos ou sistema do espaço aéreo regional complexos	Pista de pouso e decolagem, taxiways, pátio, portão de embarque e/ou espaço aéreo; aeródromo complexo, dados de entrada flexíveis	Maior nível de detalhe sobre configurações do plano de voo da aeronave, aeródromo e espaço aéreo, rotas de taxi e posições de parada da aeronave

Fonte: (TRB, 2012) adaptado pelo autor. *Advisory Circular 150/5060-5 (FAA,1983). ** Simulador da operação em pista desenvolvido pelo MITRE.

Os métodos analíticos para o cálculo da capacidade de pista são baseados no cálculo do valor esperado do tempo de uma operação. Esse tempo leva em consideração a probabilidade de

ocorrência da sequência de movimentos, o tempo de ocupação de pista e a separação mínima exigida entre movimentos. O cálculo da capacidade então é realizado através do inverso do valor esperado do tempo de ocupação de pista.

No Brasil, o método utilizado pelo CGNA (Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea) para o cálculo de capacidade de pista é analítico. O método em questão é apresentado no documento MCA 100-14 do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) (DECEA, 2009).

Por exemplo, o MCA 100-14, inicialmente, determina a velocidade média entre o marcador externo e a cabeceira da pista, para cada categoria de aeronave, a qual é classificada de acordo com a velocidade de cruzamento da cabeceira. Utilizando a velocidade média e o mix de aeronaves por categoria, calcula-se a média ponderada para obter a velocidade média de pouso. Da mesma forma, calcula-se o tempo médio de ocupação da pista por categoria de aeronave. Em seguida é calculada a média ponderada da velocidade e do tempo de ocupação de pista conforme o mix de aeronaves.

A partir dos valores de velocidade e tempo de ocupação médios, obtém-se a separação de segurança através do produto dessas variáveis. A esse valor de separação de segurança soma-se a separação mínima regulamentar, estabelecendo um novo parâmetro que é a separação total entre dois pousos consecutivos.

Com isso é possível calcular o tempo médio ponderado entre dois pousos consecutivos pela divisão da separação total e a velocidade média. E, por sua vez, torna possível obter a quantidade de pousos dentro de uma hora, pela simples divisão de uma hora pelo tempo médio ponderado entre dois pousos consecutivos.

A quantidade de decolagens para a pista é de uma entre cada operação de pouso. Subtraindo uma aeronave do total de pousos encontra-se a capacidade de decolagens. Logo, a capacidade total da pista é equivalente à soma dos pousos e decolagens, e a capacidade total do sistema de

pistas é dado pela média ponderada das capacidades de cada pista por percentual de utilização das pistas.

Por fim, tem-se o método de simulação, que é definido de forma objetiva por Pegden como sendo o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação (PEGDEN, SANDOWSKI e SHANNON, 1995).

Os modelos de simulação não são modelos de otimização, não possibilitam a busca de uma solução ótima, seu objetivo principal é analisar comportamentos do sistema sob condições específicas. No entanto, a observação de diversos modelos de simulação permite obter uma solução para um dado problema.

A simulação oferece alguns benefícios na análise do problema, dentre os quais se destaca a possibilidade de verificar comportamentos diferentes, às vezes sutis, devido aos níveis de detalhamento, à visualização gráfica animada durante a simulação, além da economia de tempo e recursos.

A ferramenta TAAM citada na Tabela 5 como exemplo do modelo de simulação de atraso, basicamente permite avaliar a capacidade de pista através da saturação de movimentos em um intervalo de tempo. Essa saturação implicará em um aumento de atraso tal que a cada acréscimo de movimento no intervalo planejado ocasionará mais atraso sem que esse movimento seja processado no intervalo previsto.

A escolha da álgebra, cálculos e teoria das filas é aceitável quando o sistema é simples e com relações bem definidas entre seus componentes. De maneira geral um modelo analítico resolve problemas matemáticos, derivados de fórmulas matemáticas e algoritmos. A solução é então usada para obter medidas de desempenho de interesse.

No entanto, os sistemas reais, que são mais complexos, quando simplificados a modelos analíticos conduzem a soluções simplistas e pobres, enquanto a modelagem de simulação representa mais fielmente a situação real, obtendo medidas de desempenho mais coerentes. Segundo o TRB não é simples selecionar qual método utilizar, pois existem muitos fatores que

contribuem para o tipo de modelo que melhor se adequa ao objetivo. Contudo, para orientar

qual método utilizar deve-se analisar as seguintes perguntas:

- Qual a limitação de tempo e dinheiro?
- Qual o propósito da análise de capacidade?
- Quais dados estão disponíveis?
- Quais fatores se precisa obter?
- Qual o grau de interesse dos *stakeholders* do aeroporto nos resultados do estudo?

O Anexo A apresenta um quadro dos principais pontos avaliados para cada uma das questões acima e seus respectivos níveis sugeridos de análise, conforme o TRB.

Não raramente essas perguntas levam a mais de uma resposta, ou seja, mais de um nível de modelagem possível para se utilizar no estudo. É necessária a ponderação para cada estudo, avaliando qual o conjunto de fatores mais relevantes que proporcionará análises mais satisfatórias (TRB, 2012).

2.2 OPERAÇÕES EM PISTAS PARALELAS

As pistas paralelas são classificadas em três tipos: distantes, intermediárias e próximas. Tal classificação é dependente do espaçamento entre os eixos de pistas.

De forma geral, a classificação está disposta da seguinte maneira: as próximas, com espaçamento entre eixos menor do que 760 m (2 500 ft); intermediárias, com espaçamento entre eixos de 760 m a 1 310 m (2 500 – 4 300 ft); e distantes, com espaçamento entre eixos maior do que 1 310 m (4 300 ft). Quando existem quatro pistas agrupadas duas a duas com um

espaçamento maior do que 1 310 m (4 300 ft) entre os pares diz-se que são *dual-lane* (Wald, Fay, & Gleich, 2010; NASA, s.d.), conforme mostra a Figura 2.

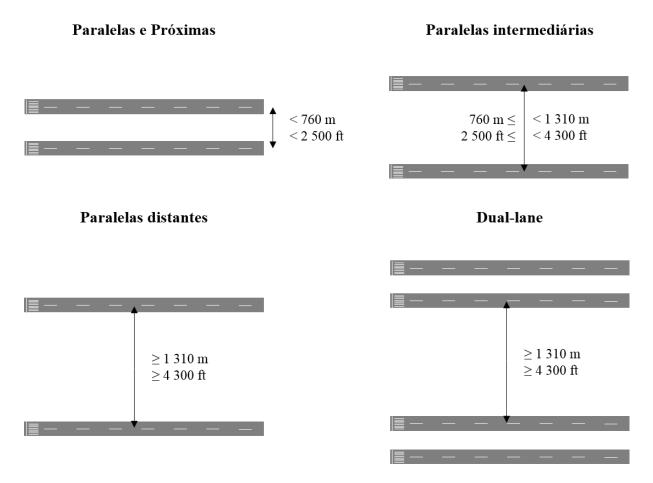


Figura 2 - Tipos de pistas paralelas

Fonte: autor

Na Europa, os 4 aeroportos mais movimentados operam com pistas paralelas: Frankfurt opera com um par de pistas paralelas e próximas, Paris Charles de Gaulle opera com um par de pistas paralelas próximas e um par de distantes; Londres Heathrow e Amsterdam Schiphol operam com um par e um trio de pistas paralelas distantes, respectivamente (JANIC, 2008).

Nos Estados Unidos, entre os mais movimentados aeroportos, operam 28 pares de pistas paralelas e próximas, 10 pares de pistas paralelas intermediárias e 28 pares de pistas paralelas distantes (JANIC, 2008).

No relatório da NASA, de 1998, sobre aeroportos com pistas paralelas são apresentados 29 pares de pistas paralelas e próximas, 10 pares de intermediárias e 28 pares de distantes. Dentre

as quais, devido a quantidade de movimentos, destacam-se, por exemplo: Atlanta com 2 pares de pistas paralelas e próximas, e espaçadas por mais de 1 310 m entre si; Chicago com 3 pares de pistas paralelas distantes; e Dallas com 2 pares de pistas paralelas distantes e 2 pares de pistas paralelas e próximas. No Anexo B é possível observar os dados de todas essas pistas paralelas nos aeroportos americanos.

No Brasil destacam-se Guarulhos e Congonhas com um par de pistas paralelas e próximas, Natal (Parnamirim) com um par de pistas intermediárias e Brasília com um par de pistas paralelas distantes.

Sucintamente, a configuração de pistas presente nos dez aeroportos de maior movimento no mundo se distribuem da seguinte forma: 16% de pistas cruzadas ou quase paralelas e 84% de pistas paralelas, das quais 52,4% são paralelas e próximas, 4,8% são paralela intermediárias e 42,9% são paralelas distantes (Apêndice A).



Figura 3 - Imagem de satélite do Aeroporto Internacional de Atlanta (KATL) em 2013 Fonte: (GOOGLE EARTH, 2013)

A Figura 3 apresenta, como exemplo, o Aeroporto Internacional de Atlanta (KATL), que foi o mais movimentado do mundo em 2013 com 930 310 operações de pouso e decolagem, e vem mantendo o status de mais movimentado em relação ao número de aeronaves desde 2005, segundo dados do aeroporto. O aeroporto possui cinco pistas, sendo:

- 08R/26L e 08L/26R: paralelas e próximas, espaçadas por 300 m, aproximadamente;
- 09R/27L e 09L/27R: paralelas e próximas, espaçadas por 320 m, aproximadamente;
- 10/28: (nomenclatura adotada pela ICAO para definir mais pistas paralelas) paralela em relação a 09R/27L, espaçadas por 1 280 m, aproximadamente; e
- 09R/27L e 08L/26R: espaçadas por 1 342 m, aproximadamente, tornando o conjunto 09/27 e 08/26 *dual-lane*.

Ou seja, a demanda do aeroporto mais movimentado em 2013 é suportada por um sistema de pistas composto por dois pares de pistas paralelas e próximas, formando entre si a configuração *dual-lane*, e uma quinta pista paralela isolada das demais.

Cada classificação de pista paralela determina quais são as características das operações. Como regra geral, quanto mais próximas forem as pistas mais restritivos serão os movimentos de pouso e decolagem, incidindo assim em operações dependentes, que significa operar em uma pista sob a interferência da operação em outra pista. E, consequentemente, quanto mais espaçadas forem as pistas menos restritivas serão, permitindo operações independentes, que significa operar em uma pista sem a interferência da operação em outra.

Na faixa de espaçamento que categoriza as pistas paralelas existem pontos notáveis, os quais definem particularidades de operações. A Figura 4 apresenta as operações padrão possíveis em função do espaçamento entre pistas paralelas (ICAO, 2004; ICAO, 2006; ICAO, 2007; ICAO, 2009; ANAC, 2009), onde o eixo horizontal indica o eixo central da pista de referência e os eixos verticais representam o espaçamento, medido em pés e metros, até o eixo central da

segunda pista. Cada tipo de operação em função dos espaçamentos será detalhada nos itens subsequentes.

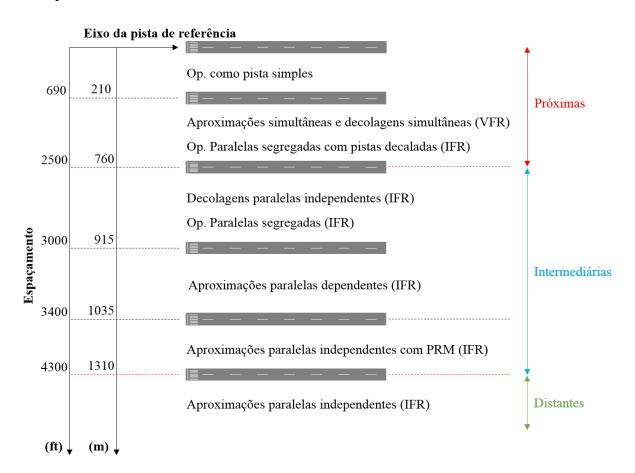


Figura 4 - Operações em função do espaçamento entre pistas paralelas

Fonte: Autor

A Figura 4 apresenta as operações e a faixa de espaçamento que cada classificação de pistas paralelas abrange. Nota-se que:

- Nas pistas paralelas e próximas as operações simultâneas de pousos ou decolagens são possíveis para voos VFR, ou seja, em condições VMC, essa configuração possibilita ainda a operação paralela segregada simultânea para voos IFR, contanto que obedeça alguns critérios específicos de decalagem entre cabeceiras.
- Nas pistas paralelas intermediárias é possível operar com regras IFR para o caso de decolagens independentes, operações segregadas independentes, aproximações paralelas dependentes e aproximações independentes, esse último caso somente é

autorizado para a condição em que o equipamento PRM (*Precision Runway Monitor*) está operante no aeródromo.

 Nas pistas paralelas distantes é possível operar com regras IFR para o caso de aproximações paralelas independentes.

Vale destacar que as operações permitidas em pistas mais restritivas também são admitidas para aquelas menos restritivas, ou seja, as operações possíveis em pistas paralelas e próximas também podem ser executadas em pistas paralelas intermediárias, que por sua vez é suportada pelas pistas paralelas distantes.

Nos itens subsequentes são apresentados os modos de operação previstos em pistas paralelas, abordando sua operacionalidade bem como seus parâmetros condicionantes.

2.2.1 Pistas paralelas distantes e intermediárias

O documento que orienta a operação entre pistas paralelas por instrumento é o Doc 9643, ou SOIR (*Manual on Simultaneous Operations on Parallel or near-Parallel Instrument Runways*) (ICAO, 2004). Esse manual apresenta, basicamente, quatro modos de operações para pistas paralelas: modo 1, que define o procedimento de aproximações paralelas independentes, modo 2, que define o procedimento de aproximações paralelas dependentes, modo 3, que define o procedimento de decolagens independentes, e modo 4, que define o procedimento de operações segregadas independentes.

A Figura 5 apresenta as operações possíveis em pistas paralelas e os respectivos modos de operação que definem os requisitos para o procedimento, conforme o SOIR (ICAO, 2004).

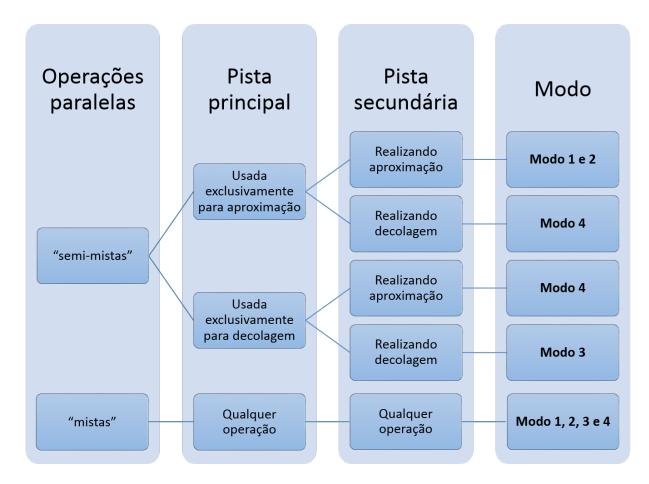


Figura 5 - Modos de operação

Fonte: (ICAO, 2004) adaptado pelo autor.

2.2.1.1 Aproximações paralelas independentes (modo 1)

As aproximações paralelas independentes são aproximações simultâneas em pistas paralelas ou quase paralelas sob IFR. Esse modo de operação apresenta os seguintes requisitos principais:

- Disponibilidade do equipamento SSR (*Secondary Surveillance Radar*) com uma precisão mínima de azimute de 0,06°, um período de atualização de 2,5 s ou menor e uma tela de alta resolução que forneça previsão de posição e alerta de desvio, por exemplo, o PRM. Esses requisitos são para o caso de espaçamento entre eixos de pista entre 1035 m (3400 ft) e 1310 m (4300 ft);
- Disponibilidade do equipamento SSR com precisão mínima de azimute de 0,3° e um período de atualização de 5 s, quando determinado que a segurança da aeronave não é

- afetada. Esses requisitos são válidos para o caso de espaçamento entre eixos de pistas entre 1310 m (4300 ft) e 1525 m (5000 ft);
- Disponibilidade de radar de vigilância com precisão mínima de azimute de 0,3° e um período de atualização de 5 s. Esses requisitos são válidos para o caso de espaçamento entre eixos de pistas maior do que 1525 m (5000 ft);
- Procedimentos de aproximação ILS e/ou MLS (*Microwave Landing System*) para ambas as pistas;
- Trajetórias de aproximações perdidas divergentes em pelo menos 30°;
- Avaliação de obstáculos;
- Uma zona de não transgressão NTZ (No Transgression Zone) de pelo menos 610 m
 (2000 ft) equidistante dos eixos de pistas e representado na tela do radar, assim como uma zona operacional normal para realização do procedimento, como representado na Figura 6; e
- Monitores de controle do radar separados para aproximação em cada pista.

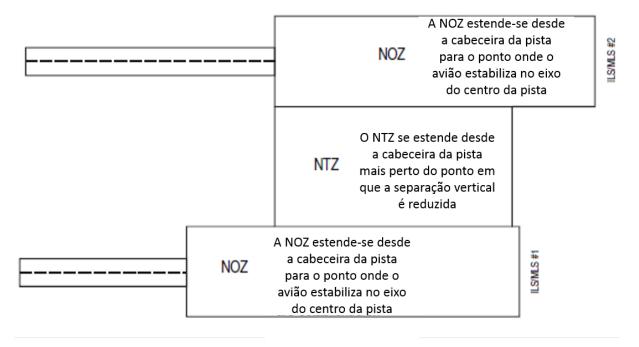


Figura 6 - Exemplo de NTZ e NOZ

Fonte: (ICAO, 2004), adaptado pelo autor.

2.2.1.2 Aproximações paralelas dependentes (modo 2)

Quando o espaçamento entre os eixos de pistas não forem adequados para aproximações independentes, aproximações paralelas dependentes sob IFR são permitidas se o espaçamento entre pistas for de pelo menos 915 m (3000 ft). Esse modo de operação apresenta os seguintes requisitos principais:

- Vetoração radar para interceptar a aproximação final feita por controladores radar exclusivos, que são responsáveis pelo sequenciamento e separação de chegadas de aeronaves em cada pista;
- Disponibilidade de radar de vigilância com precisão mínima de azimute de 0,3° e um período de atualização de 5 s;
- Procedimentos de aproximação ILS e/ou MLS para ambas as pistas;
- Trajetórias de aproximações perdidas divergentes em pelo menos 30°; e
- Mínima separação radar fornecida entre aeronaves estabilizadas no curso do ILS e/ou
 MLS de 3 NM para aeronaves aproximando no mesmo curso do ILS ou MLS e 2 NM
 entre aeronaves sucessivas em cursos de ILS ou MLS adjacentes, como pode ser
 observado na Figura 7.

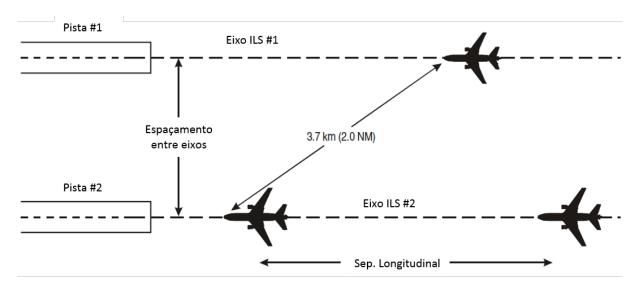


Figura 7 - Aproximações paralelas dependentes

Fonte: (ICAO, 2004), adaptado pelo autor.

2.2.1.3 Decolagens independentes (modo 3)

Decolagens independentes sob IFR em pistas paralelas são permitidas em duas condições específicas dada pela separação entre eixos de pistas:

- Quando o espaçamento é maior ou igual a 1525 m (5000 ft), nessa situação não existe a necessidade de radar e os cursos das decolagens devem divergir de 45° pelo menos, conforme mostra a Figura 8; e
- Quando o espaçamento é maior ou igual a 760 m (2500 ft), nessa situação é requerido um radar de vigilância e que os cursos das descolagens devem divergir de 15° pelo menos imediatamente após a decolagem, de acordo com a Figura 9.

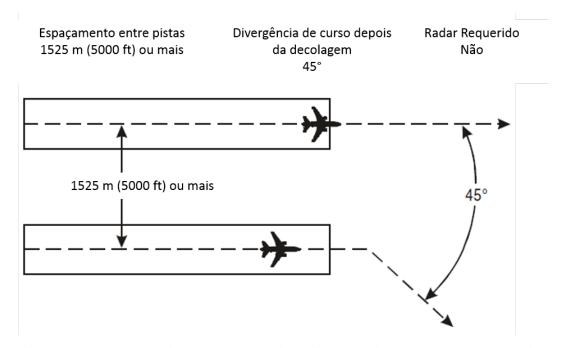


Figura 8 - Decolagens independentes divergindo em 45° e radar não requerido Fonte: (ICAO, 2004), adaptado pelo autor.

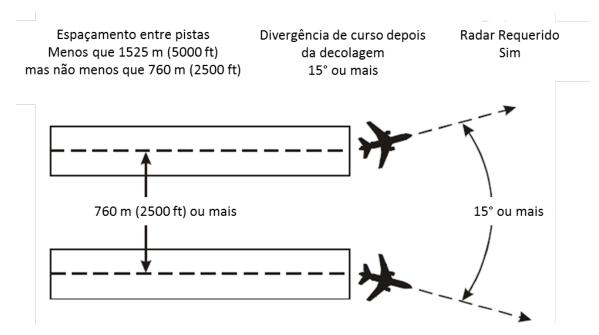


Figura 9 - Decolagens independentes divergindo pelo menos de 15° e radar requerido Fonte: (ICAO, 2004), adaptado pelo autor.

2.2.1.4 Operações segregadas independentes (modo 4)

Operações segregadas é a situação em que uma pista é utilizada para pouso e outra para decolagem, exclusivamente. Existe algumas vantagens nesse tipo de operação como, por exemplo, a redução da possibilidade de erro de pilotos na seleção de frequência errada do ILS ou MLS, além de exigir uma carga de trabalho menor do controlador devido a menor complexidade do sistema. Esse modo de operação apresenta os seguintes requisitos principais:

- Espaçamento entre eixos de pistas maior ou igual a 760 m (2500 ft);
- Trajetórias de decolagem e aproximação perdida adjacente divergindo de pelo menos 30°; e
- Aproximações podem ser conduzidas quando é disponibilizado radar de vigilância, auxílios e facilidades adequados para cada tipo de aproximação como: aproximação ILS e/ou MLS; radar de vigilância ou radar de precisão de aproximação e aproximação visual.

Os requisitos descritos são apresentados na Figura 10. Existe ainda a operação segregada para pistas paralelas e próximas, ou seja, com espaçamento entre eixos menor do que 760 m, que será exposto nos próximos itens.

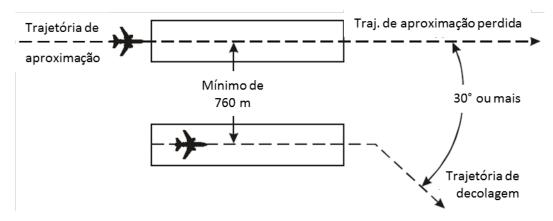


Figura 10 - Operações segregadas independentes

Fonte: (ICAO, 2004), adaptado pelo autor.

2.2.2 Pistas paralelas e próximas

Este tópico tem como objetivo apresentar as operações que ocorrem em pistas paralelas e próximas assim como os novos procedimentos para essa configuração de pistas.

2.2.2.1 Operações visuais

Segundo o Anexo 14 da ICAO (ICAO, 2009) quando pistas paralelas pretendem operar visual e simultaneamente a mínima distância entre eixos de pistas é determinada em função do código de referência do aeródromo:

- 210 m para o código de número 3 ou 4;
- 150 m para o código de número 2; e
- 120 m para o código de número 1.

Aproximações visuais em pistas paralelas e próximas operam com uma abordagem diferente para evitar a esteira de turbulência, ao invés de requerer que a esteira de turbulência não alcance a pista paralela, o procedimento se vale do tempo que a esteira de turbulência leva para ser transportada até a pista paralela.

Ou seja, a separação entre aeronaves deve ser menor do que o tempo de deslocamento da esteira de turbulência para a pista adjacente, desta forma as aeronaves operam quase lado-a-lado não sendo afetadas pela turbulência gerada pela outra.

A Figura 11 apresenta aproximações paralelas próximas sob VMC, conforme demonstrado por Janic (2008). Para permitir o procedimento de aproximação com segurança, a esteira de turbulência gerada pela aeronave i não deve alcançar a trajetória da aproximação da aeronave k em um ponto à frente de k. A zona de proteção entre i e k (S_{ik}) representa a distância máxima entre as aeronaves i e k para que a esteira de turbulência de i não afete k.

O cálculo da zona de proteção (S_{ik}) é dado pela equação (1), onde d é a distância entre eixos das pistas, v_w é a velocidade de transporte da esteira de turbulência, que é influenciada pelo vento perpendicular à trajetória, e v_k é a velocidade da aeronave k. A expressão d/v_w fornece o tempo para a esteira de turbulência alcançar a trajetória adjacente, multiplicando pela velocidade da aeronave k (v_k) tem-se a distância longitudinal máxima que k deve manter de i. Do ponto de vista de separação de aeronaves por tempo, tem-se que o tempo entre i e k (t_{ik}) deve obedecer a seguinte inequação: $t_{ik} < d/v_w$.

$$S_{ik} = (d/v_w) \cdot v_k \tag{1}$$

Durante esse procedimento o par de aeronaves j e l, seguintes, devem manter a separação mínima por esteira de turbulência das aeronaves i e k. Após a liberação do procedimento pelo controlador, a responsabilidade por manter a separação adequada é do piloto.

As operações de decolagens simultâneas obedecem a mesma abordagem das aproximações visuais.

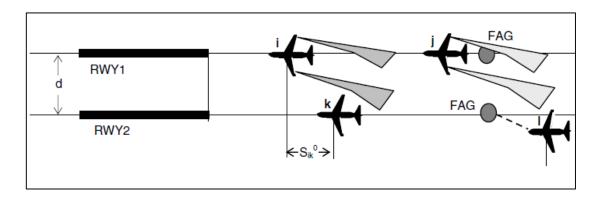


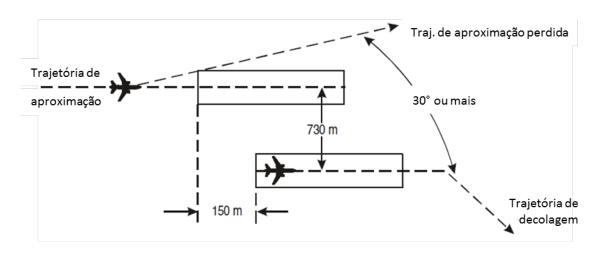
Figura 11 - Aproximações paralelas e próximas em condições VMC

Fonte: (JANIC, 2008), adaptado pelo autor.

2.2.2.2 Operação segregada independente

As operações segregadas independentes requerem um espaçamento entre eixos de pista de 760 m quando as cabeceiras estão alinhadas, conforme o exemplo da Figura 10. No entanto, quando as cabeceiras estão deslocadas uma em relação à outra, o espaçamento requerido entre eixos pode ser maior ou menor obedecendo à seguinte regra: o espaçamento será reduzido de 30 m para cada 150 m que a cabeceira da pista de decolagem for decalada na direção do pouso, ou será acrescido de 30 m para cada 150 m que a cabeceira da pista de decolagem for decalada na direção contrária ao pouso, como é mostrado na Figura 12. Existindo ainda uma distância mínima entre eixos de pistas decaladas, que é de 300 m.

Logo, para a situação de pistas paralelas e próximas é possível operar simultaneamente no modo 4 na configuração de cabeceiras de decolagem decalada a frente da cabeceira de pouso. Esse modo de operação carece dos mesmos requisitos apresentados no modo 4 de operação do SOIR.



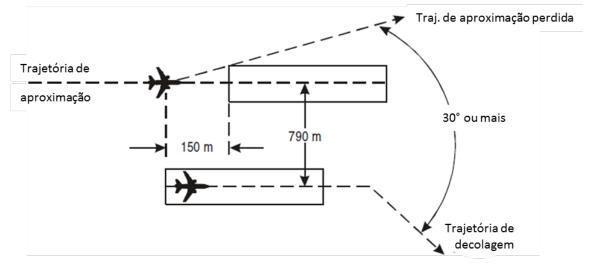


Figura 12 - Operações segregadas independentes com pistas decaladas

Fonte: (ICAO, 2004), adaptado pelo autor.

2.2.2.3 Simultaneous Offset Instrument Approach (SOIA)

O procedimento de aproximações simultâneas deslocadas por instrumentos é conhecido por SOIA, do inglês *Simultaneous Offset Instrument Approach*. Esse tipo de operação tem o potencial de aumentar a capacidade de pista dos aeroportos como, por exemplo, o aeroporto de Guarulhos pode ter sua capacidade elevada em até 18% segundo Fraga (FRAGA, MÜLLER e ALVES, 2011).

O SOIA consiste em uma aproximação ILS/PRM (*Precision Runway Monitor*) para uma pista e um Auxílio Localizador Direcional LDA (*Localizer Direcional Aid*) para a pista adjacente (FAA, 2012).

As características gerais aplicáveis ao procedimento são apresentadas no documento da FAA sobre o SOIA e são de pistas paralelas com distância de, pelo menos, 229 m (750 ft) a 914 m (3000 ft) entre eixos. É requerido um equipamento chamado de PRM, que é um radar de alta resolução com uma taxa de atualização de pelo menos 2,5 s.

A aproximação de trajetória reta deve ser uma ILS PRM, RNAV (GPS) PRM ou RNAV (RNP) PRM, enquanto a aproximação adjacente deve ser LDA PRM, RNAV (GPS) PRM ou RNAV (RNP) PRM. A trajetória adjacente (*offset*) até o ponto do DA deve formar um ângulo entre 2,5 a 3° com a trajetória reta principal, a DA é a altitude de decisão onde alcança a distância de 3000 ft da trajetória reta, a partir da DA as manobras devem ser realizadas em condições visuais (segmento visual). Após a DA a trajetória apresenta um rumo para a SAP (*Stabilized Approach Point*), que é o ponto onde a aeronave deve estar estabilizada a 500 ft acima da pista de pouso e, aproximadamente, 8500 ft de distância da cabeceira, conforme é apresentado na Figura 13.

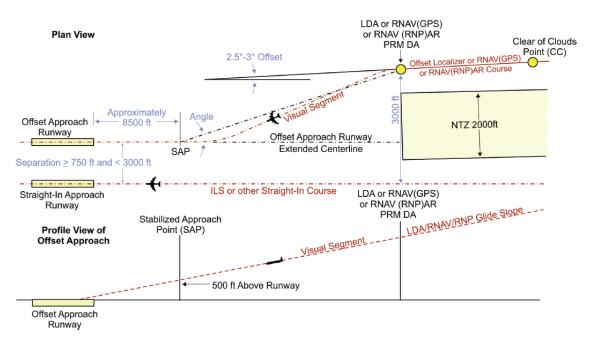


Figura 13 - Geometria do procedimento SOIA

Fonte: (FAA, 2012)

No caso de cabeceiras decaladas a geometria deve ser adaptada conforme representada na Figura 14. Onde a trajetória adjacente (*offset*) a trajetória reta principal deve ser realizada para a cabeceira mais afastada.

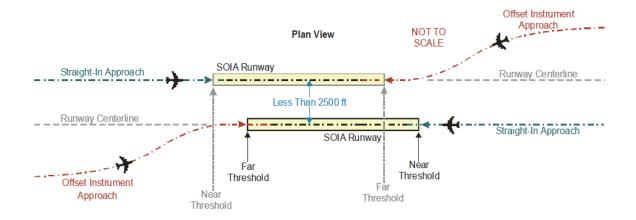


Figura 14 - Exemplo de geometria SOIA com cabeceira decalada

Fonte: (FAA, 2012)

2.2.2.4 Staggered Approach Procedure (SGAP)

Segundo Janic, o procedimento de aproximação decalada conhecido como SGAP (*Staggered Approach* Procedure) ou HALS (*High Approach Landing System*) é capaz de reduzir a separação longitudinal entre algumas aeronaves e por conseguinte aumentar a capacidade de pista sob IMC (JANIC, 2008). Esse tipo de procedimento foi testado e agora é implementado no aeroporto de Frankfurt (REASON FOUNDATION, 2008).

O SGAP consiste em um perfil de aproximação para uma cabeceira deslocada mantendo a separação vertical, logo o perfil do procedimento SGAP será mais elevado do que o perfil convencional realizado na outra pista, como pode ser observado na Figura 15.

O SGAP é baseado na existência de tecnologias no aeródromo como, por exemplo, o ILS. Nesse caso são necessários 3 ILS, dos quais 2 ILSs servem as cabeceiras normais (sem decalagem) e o outro serve a cabeceira deslocada, esses equipamentos provêm o Glide Slope padrão de 3°. No entanto, certificações, treinamentos de pilotos e de controladores são necessários para segurança do procedimento.

Para realizar o SGAP uma aeronave mais pesada e veloz utiliza a pista de pouso com cabeceira normal e a aeronave mais leve e lenta utiliza a outra pista de pouso que tem a cabeceira decalada. A Figura 15 ilustra o par de aeronaves i e k na aproximação, onde são estabilizadas quando a aeronave i passa pelo FAG (*Final Approach Gate*), esse par de aeronaves é separada verticalmente para aproximação em cabeceiras decaladas.

A esteira de turbulência da aeronave i é transferida para trás e abaixo dessa aeronave, enquanto a aeronave k se mantem em uma trajetória acima, por isso a regra de separação vertical permite que duas aeronaves se aproximem mais do que a regra padrão de separação longitudinal a partir do FAG.

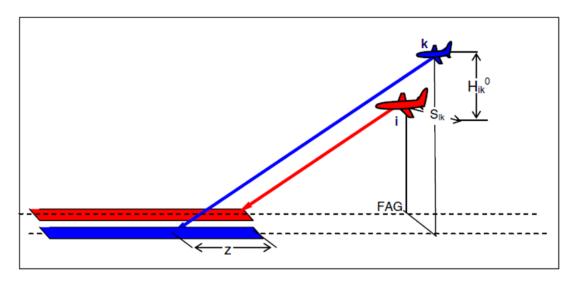


Figura 15 - Aproximação SGAP

Fonte: (JANIC, 2008)

Por exemplo, esse procedimento é praticado no aeroporto de Frankfurt na Alemanha, permitindo uma separação de 2,5 NM ((JANIC, 2008); (FRAPORT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE, 2004)) em IMC CAT I entre as sequências de aeronaves pesada e leve, pesada e média ou média e leve, quando deveriam manter 6, 5 e 5 NM, respectivamente, pelos padrões de separação por esteira de turbulência da ICAO.

2.2.2.5 Steeper Approach Procedure (SEAP)

O procedimento de aproximação acentuado ou SEAP (*Steeper Approach Procedure*) consiste em um perfil de aproximação com um GS (*glide* slope) mais acentuado do que o convencional (3°) enquanto outra aeronave executa um perfil convencional na pista paralela adjacente. Segundo Janic, é um procedimento inovador com possível aplicação futura.

Esse procedimento pode ser executado sob IMC e é utilizado quando há a necessidade de evitar obstáculos em aproximação e quando não for possível deslocar a cabeceira. O procedimento é aplicado em algumas pistas de aeroportos regionais na Europa, principalmente para evitar obstáculos ou reduzir o ruído (JANIC, 2008).

Se aplicado a pistas paralelas e próximas, os equipamentos requeridos são dois ILSs ou GNSS para servir as cabeceiras. Um ILS provê o ângulo de 3° e o outro um mais acentuado de até 7°. A Figura 16 ilustra o procedimento para o par de aeronaves i e k, onde i é uma aeronave pesada e k uma aeronave menor. A aeronave i se aproxima com um ângulo θ_i e a aeronave k se aproxima com um ângulo θ_k , em que $\theta_i < \theta_k$. No FAG as aeronaves devem estar separadas verticalmente, no mínimo, pela separação padrão $H_{ik}{}^0$. No entanto, essa separação vertical não exclui a necessidade de alguma separação longitudinal.

Esse procedimento não é padronizado pela ICAO, como um aproximação convencional. Exige ainda certificação do procedimento para aeronaves, além de análises devido a complexidade do tráfego e consequente aumento da carga de trabalho do controlador. Por isso a aproximação SEAP é um procedimento inovador que merece mais análises, testes e posterior padronização. Outro fator que deve ser observado é o conforto do passageiro durante a aproximação em que a velocidade vertical se mantém em torno de 500-800 ft/min. Um aumento da velocidade vertical durante o SEAP de cerca de 80% pode trazer desconforto ao passageiro.

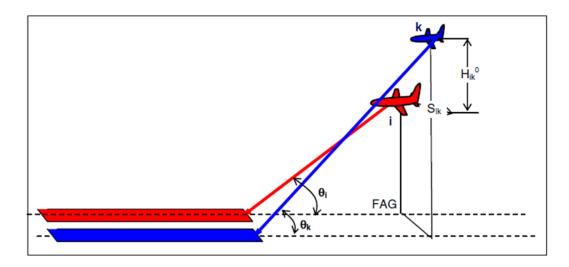


Figura 16 - Aproximação SEAP

Fonte: (JANIC, 2008)

2.3 ESTEIRA DE TURBULÊNCIA

A esteira de turbulência é a turbulência gerada por uma aeronave devido aos vórtices formados nas asas da aeronave. Os efeitos da esteira de turbulência sobre a aeronave seguidora são a perda d econtrole, perda de sustentação ou de velocidade de subida e os esforços da estrutura. A esteira de turbulência se propaga para trás e com sentido de rotação interno, conforme pode ser observado na Figura 17. A interação das duas esteiras de vórtices normalmente provoca o movimento da esteira para baixo, com exceções devido a ventos cruzados muito fortes, atividades térmicas ou outros fenômenos atmosféricos.

Burnham, Hallock e Greene abordaram o problema da esteira de turbulência para pistas paralelas e próximas através da análise de dados coletados em aeroportos, esse estudo apresentou como resultados tempos de transporte da esteira de turbulência ((BURNHAM, HALLOCK e GREENE, 2001) (BURNHAM, HALLOCK e GREENE, 2002)).

O comportamento da esteira de turbulência próximo ao solo depende da distância ao solo com relação a envergadura da aeronave que gera os vórtices. Esse comportamento se classifica em quatro efeitos: fora do efeito de solo (*out of ground effect* – OGE), quando a esteira está a mais de uma envergadura de altura do solo, nesse caso a esteira é transportada lateralmente pelo

vento perpendicular ambiente ou *crosswind* (CW), que é o vento com componente perpendicular a direção de navegação; dentro do efeito de solo (*into ground effect*), quando a esteira está na altura de até meia envergadura acima do solo, situação essa que seu efeito é mínimo e pode aumentar a partir desse ponto; efeito no solo (*in ground effect* – IGE), quando a esteira está em uma altura abaixo de meia envergadura do solo, a interação da esteira com o solo causa um rápido deslocamento lateral, mas também um rápido enfraquecimento; efeito sobre o solo (on ground), quando a aeronave já realizou o pouso e a maior parte do peso é suportado pelos trens de pouso, nesse caso não é esperado que os vórtices sejam problema (BURNHAM, HALLOCK e GREENE, 2002).

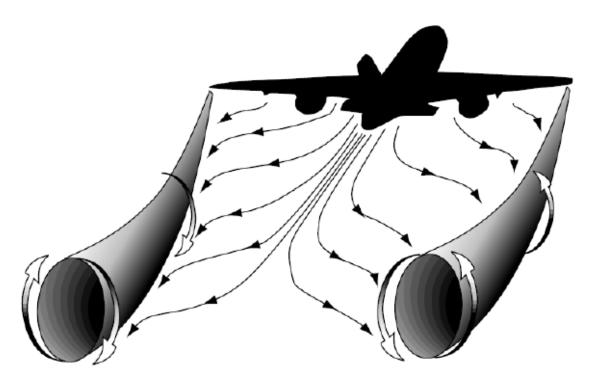


Figura 17 - Propagação da esteira de turbulência

Fonte: (REASON FOUNDATION, 2008)

Em uma aproximação lado-a-lado o fator crítico de segurança da esteira de turbulência é o transporte lateral pois o tempo para o deslocamento até a trajetória do procedimento adjacente pode ser maior do que o tempo necessário para a descendência ou o enfraquecimento da esteira. A Figura 18 apresenta o transporte lateral da esteira de turbulência de uma aeronave

aproximando para pouso sob a influência de um vento perpendicular (CW) (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2004).

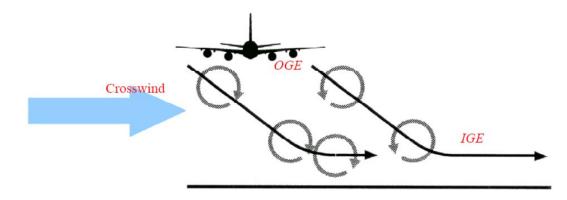


Figura 18 - Transporte lateral da esteira de turbulência

Fonte: (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2004)

Se a separação entre aeronaves é muito curta, então a esteira de turbulência não interfere na trajetória da outra aeronave. No entanto, se a separação é maior entre aeronaves a esteira de turbulência pode afetar a outra aeronave quando o *crosswind* estiver forte o suficiente para ser deslocado até a aproximação da cabeceira adjacente, por isso a segurança para evitar a esteira turbulência depende do vento perpendicular e o espaçamento entre os eixos de pistas como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Máxima separação longitudinal (em segundos) em função do espaçamento entre pistas e o vento perpendicular (crosswind)

Espaçamento entre pistas (ft)	Crosswind (nós)			
	6	10	20	
750 – 1000	28 s	20 s	12 s	
1000 - 1500	43 s	31 s	18 s	
1500 – 2000	73 s	52 s	30 s	
2000 - 2500	102 s	73 s	43 s	

Fonte: (BURNHAM, HALLOCK e GREENE, 2001)

Do resultado de Burnham, Hallock e Greene tem-se a Tabela 6, que apresenta a máxima separação longitudinal em tempo entre aeronaves para uma aproximação lado-a-lado em função do espaçamento entre pistas e o *crosswind*. Por exemplo, para um aeródromo de pistas paralelas

espaçadas de 1230 ft com ventos perpendiculares a pista de até 10 nós, a separação será de no máximo 31 segundos.

2.4 REGRAS ATC

Existem alguns conceitos bastante relevantes de ATM (*Air Traffic Management*) quanto as separações padrões e mínimos de separação que irão influenciar na capacidade de pista.

Segundo o Doc. 4444 da ICAO (ICAO, 2007), a mínima separação horizontal baseada em radar e/ou ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) deve ser de 5 NM.

No entanto, se houver uma determinação da autoridade ATS (Air Traffic Service) a separação horizontal mínima pode ser reduzida até o mínimo de 3 NM ou ainda 2,5 NM contanto que atenda certas exigências para garantir a segurança.

No caso brasileiro a fim de agilizar o fluxo de tráfego na sequência de aproximação para o aeródromo, assim como na saída, o documento CIRTRAF 100-6 (DECEA, 2007) estabelece os procedimentos necessários para redução das separações mínimas para 3 NM de acordo com a ICAO.

Segundo o CIRTRAF, em Área de Controle Terminal (TMA) ou Zona de Controle (CTR) pode ser utilizada uma separação mínima com valor entre 5 NM e 3 NM se atendidas as seguintes condições:

- As aeronaves envolvidas estejam a menos de 40 NM da antena radar;
- As informações de posição da aeronave sejam oriundas de fonte de radar primário;
- As informações radar sejam de uma única antena, não devendo ser utilizadas com sistemas multirradar; e
- Os controladores de tráfego aéreo e os pilotos estejam familiarizados com esse procedimento.

Embora a separação horizontal mínima possa ser reduzida, a separação longitudinal ainda está limitada a separação por esteira de turbulência. A Tabela 7 apresenta essa separação devido a esteira de turbulência, em que as aeronaves são classificadas de acordo com o peso máximo de decolagem. As aeronaves se dividem em três categorias: as pesadas, que incluem todos os tipos de aeronaves com peso máximo de decolagem maior ou igual a 136 toneladas; as médias, que incluem aeronaves com peso máximo de decolagem entre 7 e 136 toneladas; e por fim os leves, que incluem aeronaves com peso máximo de decolagem menor ou igual a 7 toneladas.

Dada a classificação das aeronaves, os mínimos de separação devido a esteira de turbulência são determinados em função da aeronave líder (que segue à frente) e a seguidora (que segue atrás).

Tabela 7 - Mínimo de separação por esteira de turbulência em NM

		Aeronave seguidora			
		Pesada	Média	Leve	
Aeronave líder	Pesada	4 NM	5 NM	6 NM	
	Média	3 NM	3 NM	5 NM	
	Leve	3 NM	3 NM	3 NM	

Fonte: (ICAO, 2007)

Ainda conforme o Doc. 4444 existem restrições de tempos mínimos, que obedecem as regras:

- Aeronave média pousando atrás de uma aeronave pesada: separação de 2 minutos;
- Aeronave leve pousando atrás de uma aeronave pesado ou média: separação de 3 minutos;
- Aeronave leve ou média decolando atrás de uma aeronave pesada ou uma aeronave leve decolando atrás de uma aeronave média quando estiverem usando: a) a mesma pista; b) pistas paralelas separadas por menos de 760 m; c) pistas que se cruzam, se a rota de voo projetada da segunda aeronave cruzar a rota de voo projetada da primeira aeronave na mesma altitude ou a menos de 300 m abaixo; ou d) pistas paralelas separadas por 760

m ou mais, se a rota de voo projetada da segunda aeronave cruzar a rota de voo projetada da primeira aeronave na mesma altitude ou a menos de 300 m abaixo. Nesses casos a separação será de 2 minutos.

Por fim existe ainda a separação vertical padrão para níveis abaixo do FL 290 que é de 1000 ft, essa separação é importante na aproximação para o caso de procedimentos que são baseados na separação vertical para evitar a esteira de turbulência.

3 METODOLOGIA

Para determinar qual o melhor modelo aplicável ao estudo procurou-se responder as perguntas propostas no item 2.1.2, que trata dos métodos para modelagem da capacidade de pista.

• Qual a limitação de tempo e dinheiro?

Disponibilidade de meses, e limitação de dinheiro não relevante.

• Qual o propósito da análise de capacidade?

Analisar a diferença de capacidade para mudanças em procedimentos de voo, restrições no espaço aéreo da terminal, múltiplos procedimentos de aproximação, mudanças em separações, novos procedimentos de espaço aéreo e comparar de melhorias de procedimentos.

• Quais dados estão disponíveis?

Regras de uso e atribuições das pistas, configuração da pista, localização das saídas de pistas, dependência entre pistas, planos de voo, mix da frota, separações e distância de captura.

• Quais fatores/efeitos precisa obter/observar?

Impacto da geometria do aeroporto e de procedimentos diversos de aproximação no uso das pistas.

Qual o grau de interesse dos stakeholders do aeroporto terão nos resultados do estudo?
 Não avaliado.

Analisando as resposta com auxílio do quadro do Anexo A, o nível de modelagem sugerido seria o nível 5, que é o nível de modelo de simulação de atraso. Dentre os quais a ferramenta disponível TAAM atende aos requisitos de modelar as pistas e suas características, layout do aeroporto, saídas de pistas, dependência entre pistas, mix de operações, mix de frota,

desempenho de aeronaves, velocidades de aproximação, separações entre aeronaves nos procedimentos de aproximação e saída, etc.

Utilizando o simulador TAAM, a metodologia empregada para análise da capacidade será aquela apresentada por Subramaniam (2002), que será apresentada no próximo item, onde serão obtidas as capacidade de saturação pelo acréscimo de operações até o nível em que ocorre o aumento de atrasos sem o aumento da quantidade de movimentos no intervalo de uma hora.

Os acréscimos de aeronaves são realizados de forma a manter, o máximo possível, o mix da frota por categoria conforme os planos de voo base.

A versão do TAAM utilizada na simulação foi a V2013.3.0 Release 23, atualizada em 01 de outubro de 2013.

3.1 MÉTODO DE CAPACIDADE COM SIMULAÇÃO

Segundo Subramanian (2002), para determinar a capacidade através de simulação é necessário obter uma curva de atraso, como mostra a Figura 19, onde para um atraso x a capacidade foi de λ_{Px} , que não é necessariamente o máximo rendimento da capacidade da configuração de pista.

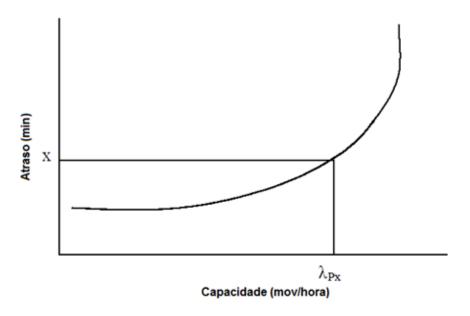


Figura 19 - Capacidade x Atraso

Fonte: (SUBRAMANIAN, 2002)

Para um nível de atraso maior a capacidade também será maior, no entanto, o aeroporto poderá aumentar essa capacidade somente até um nível máximo. Para cada movimento acima deste nível máximo, dentro do mesmo intervalo, o atraso será maior sem que ocorra acréscimo da capacidade do aeroporto. Esta situação, que para cada movimento adicional existe o aumento somente do atraso e não mais há a melhora da capacidade, é chamada de máximo rendimento da capacidade ou capacidade de saturação λ_s , conforme mostra a Figura 20.

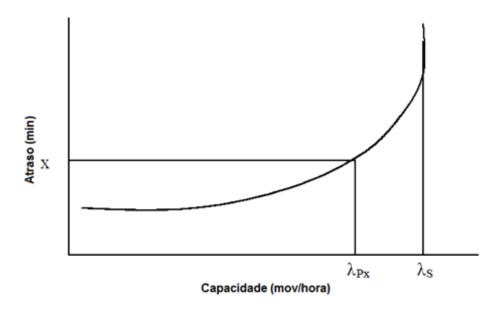


Figura 20 - Capacidade de saturação x Atraso

Fonte: (SUBRAMANIAN, 2002)

A capacidade de saturação é usada em três diferentes tipos de medidas de capacidade segundo cada tipo de restrições e limitações no aeródromo. Cada uma das restrições é apresentada a seguir, e representadas na Figura 21:

• Capacidade totalmente restrita (λ_{SI}) – leva em conta todas as restrições existentes no ambiente aeroportuário. É composta pela configuração completa do aeródromo (pátio, *taxiway*, pista, etc) mantendo suas restrições assim como fatores de procedimentos e tecnológicos do espaço aéreo (equipamentos e/ou auxílios existentes, tipo de operação, restrições de segurança, etc).

- Capacidade semi restrita (λ_{S2}) é assumido que há melhorias tecnológicas e de procedimentos. Essas alterações ajudam na precisão dos equipamentos que auxiliam a separação padrão, aumentando assim a capacidade da pista. No entanto, ainda é considerada a configuração aeroportuária e suas restrições.
- Capacidade irrestrita (λ_{SU}) é assumido que não há restrições, com exceção das exigências de segurança padrão, incluindo normas de separação, a fim de permitir a separação por esteira de turbulência e as regras de ocupação da pista. Esse conceito de capacidade irrestrita representa a capacidade máxima possível de uma configuração de pista. Os principais pressupostos para determinar a medida de capacidade são: existência de saídas rápidas de pista suficientes para permitir a redução do tempo de ocupação da pista, ausência de restrições de *taxiway* e pátio, e implementação de procedimentos para suportar alta intensidade de operações na pista.

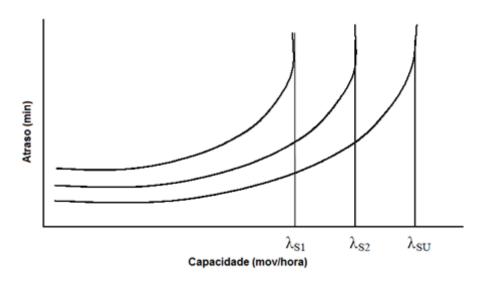


Figura 21 – Capacidade dos tipos de saturação x Atraso Fonte: (SUBRAMANIAN, 2002)

3.2 TAAM

O TAAM (*Total Airspace and Airport Modeller*) é uma ferramenta de simulação computacional em tempo acelerado ou ainda um modelador de simulação de atraso. Essa ferramenta pode ser

usada para compreender muitos tipos de problemas do aeroporto e do espaço aéreo, assim como simular impactos do presente e do futuro.

O software pode processar o movimento de aeronaves e de centenas de voos, incluindo a circulação aérea em rota, nas áreas terminais e em terra nos aeroportos. Ao serem inseridos os dados de interesse do usuário, tais como as configurações dos aeroportos, os horários de voos e outros, o TAAM fornece relatórios e a visualização da simulação do tráfego aéreo.

É capaz de simular detalhadamente diversos procedimentos e etapas aeroportuárias como, pátio, pista de táxi, pistas de pouso e decolagem, áreas de degelo, baías de espera, SID, STAR, diferentes condições meteorológicas, etc. Sendo que o nível de detalhamento depende do objetivo do estudo a ser realizado.

O TAAM é um simulador em tempo acelerado *gate-to-gate* de aeroportos, ou seja, é uma ferramenta que é capaz de modelar o espaço aéreo e os aeroportos nele contidos e executar todos os processos envolvidos com aeronaves desde o portão de embarque até outro portão de embarque (*gate-to-gate*), que ocorrem numa situação real, no entanto em um tempo muito reduzido.

O TAAM é usado principalmente para auxiliar na pesquisa do espaço aéreo e dos aeroportos utilizados pelo sistema de tráfego aéreo. Assim, algumas das utilidades do TAAM são:

- Ajudar na concepção do projeto de aeroportos;
- Calcular capacidade aeroportuária (pista, gate, taxiway, pátio, etc);
- Avaliar o impacto da implementação de novas regras de ATC (*Air Traffic Control*);
- Determinar a melhor forma de aperfeiçoar os recursos de áreas terminal, pátios,
 taxiways, gates, pistas, áreas de degelo, posições de estacionamento, hangares e
 maximizar suas capacidades;
- Determinar a melhor forma de planejar os horários dos voos, a fim de minimizar atrasos;

- Aperfeiçoar a utilização do espaço aéreo (rotas, área terminal, SID, STAR) visando atingir a capacidade máxima;
- Analisar conflitos aéreos;
- Planejar a carga de trabalho das pessoas que monitoram o espaço aéreo;
- Determinar os efeitos causados por diferentes condições climáticas;
- Analisar as consequências da utilização de diferentes táticas de atraso no controle e gerenciamento de fluxo; e
- Quantificar o gasto de combustível.

O software é usado no DECEA, no Brasil, e tem sido usado largamente pelo mundo por diversas autoridades da aviação civil, por exemplo, é utilizado pela FAA para análises do espaço aéreo desde 1998 (BOESEL, GLADSTONE, *et al.*, 2001).

A ferramenta é considerada uma das mais avançadas de simulação aérea atualmente disponível. Foi desenvolvido pelo *The Preston Group* em cooperação com a Autoridade de Aviação Civil Australiana (Subramanian, 2002). Após seu desenvolvimento passou a pertencer à empresa Jeppesen, parte do grupo Boeing, que é uma empresa responsável por desenvolver produtos inovadores de informativos, serviços e software para o setor de transporte aéreo e, recentemente, para os setores náutico e terrestre (JEPPESEN).

O TAAM inclui em seu banco de dados, que auxiliam a simulação, características e desempenho de vários tipos de aeronaves existentes no mercado, essas informações são adquiridas através do BADA (*Base of Aircraft Data*), que é elaborado pelo *EUROCONTROL*.

3.3 PARÂMETROS

Os principais parâmetros analisados para verificação da capacidade foram os movimentos e os atrasos. Quando o atraso aumenta com a saturação de aeronaves sem que represente um

aumento na quantidade de operações de aeronaves por hora, esse movimento representa a capacidade máxima horária.

Os movimentos são obtidos por tipo de operação (pouso e decolagem), com a frequência de minuto a minuto e abrangendo uma hora de simulação. Esse tipo de dado permite obter o mix de operação, além de viabilizar uma análise de envelope de capacidade devido ao fato de que a saturação de aeronaves irá acomodar, por exemplo, mais ou menos decolagens de acordo com a quantidade de pousos efetuados, mantendo-se a saturação.

As capacidades obtidas são: a capacidade totalmente restrita (λ_{SI}), que mantém as restrições físicas e de espaço aéreo; a capacidade semi restrita (λ_{S2}), que possui melhorias tecnológicas as quais influenciam no espaço aéreo, mas mantém as restrições físicas; e a capacidade irrestrita (λ_{SU}), que assume não haver restrições físicas e de espaço aéreo, com exceção das exigências necessárias para segurança.

Dados esses parâmetros é possível avaliar algumas relações notáveis, que, de modo geral, representam a eficiência do projeto, sensibilidade a melhorias tecnológicas e de procedimentos e utilização do potencial de capacidade. As relações são baseadas na capacidades de saturação (SUBRAMANIAN, 2002) como seguem:

- $\lambda_{SI}/\lambda_{SU}$ indica a utilização do sistema de pistas com todas as restrições em relação ao seu potencial máximo.
- λ_{SI} / λ_{S2} indica a utilização do sistema de pistas com restrições de espaço aéreo em relação ao seu potencial com melhorias tecnológicas e de procedimentos. Ou seja, a sensibilidade dessas melhorias na capacidade é dado por $[(\lambda_{S2} \lambda_{S1}) / \lambda_{S1}]$.
- $\lambda_{S2}/\lambda_{SU}$ indica a utilização do sistema de pistas com restrições da configuração física do aeroporto em relação ao seu potencial máximo.

4 AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS

O Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos representou 9,11% dos movimentos da rede Infraero em 2012, antes do processo de concessão do aeroporto, ocupando o primeiro lugar dos aeroportos de maior movimento do Brasil (INFRAERO, 2013). Atualmente o aeroporto continua sendo o mais movimentado do país, mas não consta nos relatórios da Infraero.

Sua configuração de pistas é composta por um par de pistas paralelas e próximas. Essas características o tornam adequado para ser utilizado como um estudo de caso na avaliação das alternativas de aumento de capacidade de pistas paralelas e próximas.

O aeroporto foi inaugurado no dia 20 de janeiro de 1985, sua criação é justificada devido as restrições do Aeroporto de Congonhas, por isso desde a década de 50 já se discutia o investimento em uma nova infraestrutura aeroportuária para a capital paulista. Além da limitação de Congonhas, nas décadas seguintes as políticas de industrialização do País apontavam a necessidade do desenvolvimento aeroportuário. Considere-se ainda o surgimento de aeronaves de grande porte que requeriam pistas maiores que as existentes.

Desde sua criação o plano diretor previa a ampliação da infraestrutura com a implementação de pelo menos um par de pistas paralelas próximas, além de uma terceira pista localizada ao norte do aeródromo a, aproximadamente, 1375 m da pista mais próxima.

Em 2011, o PND (Programa Nacional de Desestatização) deixou sob a responsabilidade da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) a execução do processo de concessão de três aeroportos dentre os quais estava o Aeroporto de Guarulhos. Tal medida visava a possibilidade de crescimento dos aeroportos através da maior agilidade para investimentos, atraindo mais *expertise* e recursos privados para o setor.

A configuração do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos apresentada na carta ADC (*Aerodrome Chart*) encontra-se no Anexo C. De acordo com a carta ADC – SBGR (AISWEB) o aeródromo possui duas pistas paralelas, que são a 09R/27L com 3 000 m de comprimento e a outra 09L/27R com 3 700 m de comprimento e possui declinação magnética de 21° W (em 2014).

A distância entre eixos de pista é de 375 m, caracterizando-a como pistas paralelas e próximas. As cabeceiras 09R e 09L estão decaladas, ou seja, as cabeceiras paralelas não se encontram alinhadas, mas deslocadas. A cabeceira 09R está 580 m mais distante que a cabeceira 09L, conforme ilustra a Figura 22.



Figura 22 - Imagem de satélite de SBGR

Fonte: (GOOGLE EARTH, 2012) (ALMEIDA, 2012)

As características de vento no aeródromo são apresentadas na Figura 23, onde o gráfico apresenta a frequência, em porcentagem, da velocidade do vento e sua direção com base os anos de 2011 a 2013, segundo o ICEA (Instituto de Controle do Espaço Aéreo). Observa-se no

anemograma que a predominância dos ventos é na direção de 60° a 80° (em relação ao norte verdadeiro) e velocidade entre 1 a 5 nós.

A pista 09R/27L é utilizada apenas para pouso, enquanto a 09L/27R é utilizada apenas para decolagem. Sendo a frequência de uso das cabeceiras cerca de 80% nas cabeceiras 09 e 20% nas cabeceiras 27 entre 2011 e 2013, conforme o banco de dados SETA Millennium (CGNA). As condições meteorológicas predominantes em Guarulhos são de 70% VMC e 30% IMC, segundo o SGTC (Sistema de Gerenciamento de Torre de Controle) do Aeroporto de Guarulhos, com base em dados de janeiro de 2012 e dezembro de 2013.

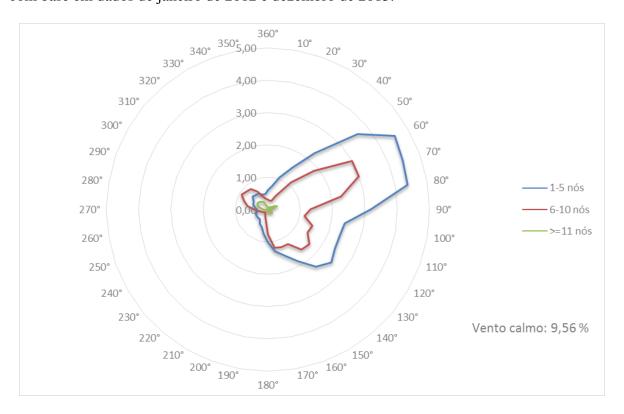


Figura 23 - Anemograma de frequência do Aeroporto de Guarulhos

Fonte: (ICEA) adaptado pelo autor.

Os procedimentos de chegada e saída (STAR e SID) para as cabeceiras 09R e 09L são apresentados nas Figura 24 e Figura 25, respectivamente. As figuras mostram o esboço dos procedimentos com base nas cartas obtidas na AISWEB sobre a imagem satélite do local. Os *waypoints* de entrada das STAR são nomeados na Figura 24, assim como os *waypoints* de saída das SID são nomeados na Figura 25.



Figura 24 - Procedimentos STAR para a cabeceira 09R de SBGR

Fonte: Autor

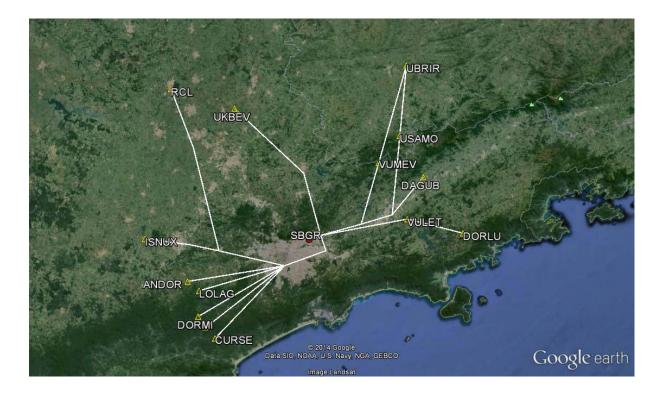


Figura 25 - Procedimentos SID para a cabeceira 09L de SBGR

Fonte: Autor

A operação realizada na atual configuração ocorre de forma segregada de acordo com as seguintes regras: a) a decolagem em uma pista enquanto ocorre aproximação para pista adjacente é liberada apenas se o avião na aproximação não alcançou a distância mínima de 4 NM até a cabeceira de pouso, caso contrário a decolagem não é autorizada até que a aeronave que estava na aproximação realize o toque na pista e o controle da aeronave; b) a operação padrão entre pousos consecutivos obedece a separação de 5 NM; e c) decolagens consecutivas a separação é de 2 minutos. Devendo ser considerada ainda a esteira de turbulência nas operações de pouso e decolagem, preponderando a separação mais restrita.

A capacidade de pista do Aeroporto de Guarulhos divulgada pelo CGNA é de 47 movimentos por hora (CGNA). Essa capacidade é calculada com base no método analítico do DECEA (DECEA, 2009).

O histograma apresentado na Figura 26 indica o movimento real do dia 1 ao dia 25 de junho de 2013, que são os dados mais atuais em relação ao início da coleta de dados do estudo. Através desse gráfico verifica-se que a maior frequência de tráfego no aeroporto de Guarulhos está entre 730 e 790. Dada essa amostra de tráfego do mês de junho obtém-se a média de 742,32 movimentos, com um desvio padrão de 39,02 e o intervalo de confiança de 90% entre 727,32 e 757,32. Por isso o dia típico representativo escolhido para o estudo será o dia 19 de junho de 2013 com 754 movimentos.

O mix de aeronaves foi baseado na classificação das aeronaves conforme a categoria da esteira de turbulência de acordo com a ICAO (ICAO, 2007). A Tabela 8 apresenta a quantidade total e a categoria de cada aeronave que operou nesse aeroporto no dia 19 de junho de 2013. Verificase que as frotas predominantes são A320 e B738. A distribuição das 754 aeronaves diárias foi de 7 aeronaves leves, 616 médias e 131 pesadas.

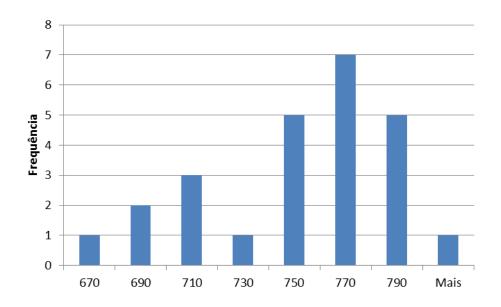


Figura 26 - Histograma de movimentos do mês de jun/2013

Fonte: Autor

Tabela 8 - Frequência de aeronaves

AERONAVE	CATEGORIA	TOTAL	AERONAVE	CATEGORIA	TOTAL
A318	Média	19	B763	Pesada	27
A319	Média	15	B764	Pesada	7
A320	Média	180	B772	Pesada	24
A321	Média	38	B777	Pesada	1
A330	Pesada	2	B77L	Pesada	5
A332	Pesada	25	B77W	Pesada	24
A343	Pesada	8	C208	Leve	2
A346	Pesada	2	E110	Leve	5
AT72	Média	24	E120	Média	2
B722	Média	15	E145	Média	1
B733	Média	2	E190	Média	57
B737	Média	53	E195	Média	1
B738	Média	196	F100	Média	11
B744	Pesada	4	GLF3	Média	2
B762	Pesada	2	Total Geral		754

A distribuição de aeronaves no decorrer de um dia é apresentada na Figura 27, ou seja, o mix de aeronaves por categoria por hora. É importante ressaltar que a indicação horária é referente

a hora UTC (*Coordenated Universal Time*), ou seja, a conversão em horário local (São Paulo) se dá pela subtração de 3 horas.

Observa-se que o horário de maior movimento de aeronaves pesadas ocorrem de 0h às 2h e de 8h às 9h, que são os períodos mais intensos de tráfego internacional. As aeronaves leves encontram-se distribuídas durante o dia, representando quase 1% dos movimentos diários. Por outro lado as aeronaves médias predominam no decorrer de todo o dia.

Nota-se ainda que os picos de movimento diários ocorrem em dois momentos, às 12h e às 22h. Durante esses picos a ocorrência de aeronaves leves é nula e a porcentagem de aeronaves médias e pesadas são 85% e 15%, respectivamente.

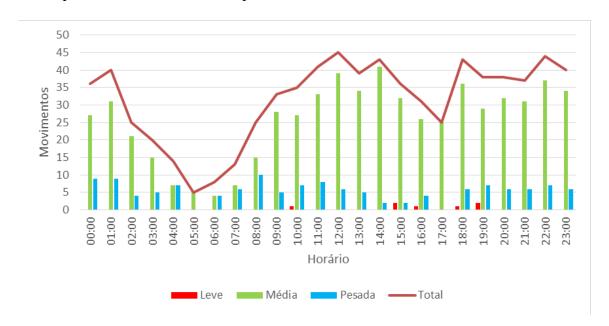


Figura 27 - Mix horário de aeronaves

A distribuição horária de operações no decorrer de um dia é apresentada na Figura 28, ou seja, o mix de operações de pouso (ARR) e decolagem (DEP) por hora. Observa-se que na maior parte do dia as operações de pouso representam entre 45% e 55% dos movimentos horários, e os horários picos de 12h e 22h apresentam 56% e 52% de pousos em relação ao movimento do pico, respectivamente.

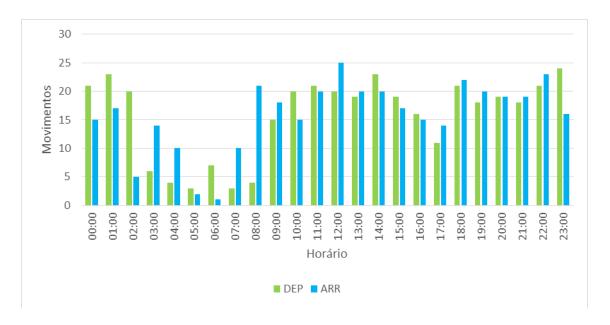


Figura 28 - Mix horário de operações

No horário das 8h percebe-se um pico de pousos, representando cerca de 84% das operações. Esse valor se deve as chegadas dos voos internacionais e alguns do nordeste que se valem do período noturno para o deslocamento.

A fim de avaliar a capacidade no período pico selecionou-se o período de três horas com a maior média de movimento da base de dados, com objetivos de capturar a influência dos movimentos no entorno de uma hora pico.

A média de movimento do mês em períodos de três horas é apresentado na Figura 29. No gráfico é possível verificar duas regiões de pico, que são de 12h às 15h e de 20h às 23h, e uma região de vale entre 5h e 8h. No entanto, o período de 20h às 23h, em destaque na Figura 29, representa o maior pico de movimento, que por essa razão é selecionado para análise de capacidade do estudo.

Os planos de voo do dia 19 de junho de 2013 realizados entre 20h e 23h (horário UTC), e utilizados na simulação, são apresentados no Apêndice B.

Conforme a Figura 27 o período de 20h às 23h apresenta um total de 119 movimentos, dos quais 100 são de aeronaves de categoria média e 19 são de categoria pesada, mantendo-se a proporção de 84% de categoria média e 16% de categoria pesada.

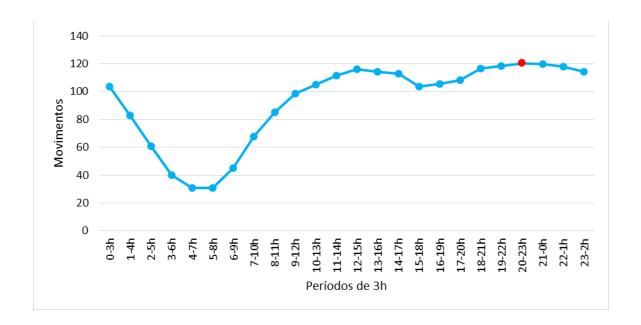


Figura 29 - Média de movimentos no período de 3h no mês de jun/2013

Para esse mesmo período a porcentagem média de pousos em relação ao total de operações foi de, aproximadamente, 50%, como pode ser observado na Figura 28.

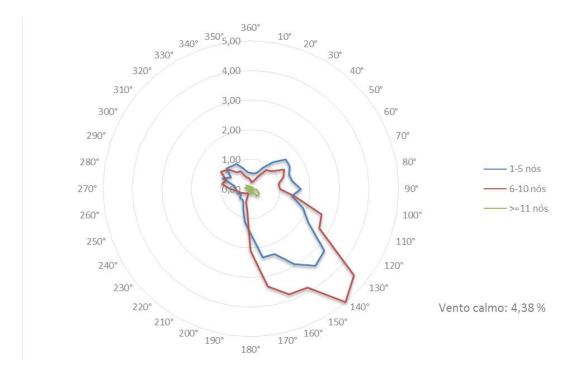


Figura 30 - Anemograma de frequência do Aeroporto de Guarulhos no período de pico Fonte: (ICEA) adaptado pelo autor.

O anemograma de frequência de Guarulhos para o período de pico é representado na Figura 30, o qual foi obtido com base o horário de 20h às 23h (UTC) entre os anos de 2011 a 2013. Esse

gráfico expõe que a predominância do vento é na direção de 130° a 140° com intensidade de 6 a 11 nós. Isto manteve a operação nas cabeceiras 09L/09R.

4.1 BASE DE DADOS

O critério de escolha do dia base para o estudo foi o de verificar um dia típico atualizado e representativo, que caracteriza, de maneira geral, o perfil de operações e aeronaves do aeroporto em questão.

A fim de avaliar a capacidade da hora pico escolheu-se ainda um período de três horas tipicamente crítico de acordo com os dias da base de dados. Desse modo obteve-se um período crítico de um dia representativo com suas respectivas características de movimento tais como o perfil da frota e de operações.

A base de dados foi composta com dados do mês mais recente (junho de 2013), que estava disponível, obtidos no SGTC (Sistema de Gerenciamento de Torre de Controle). O SGTC é um sistema desenvolvido para auxiliar controladores de tráfego aéreo nas suas tarefas nos órgãos ATS, através de recursos de automação, reduzindo ou eliminando certas atividades manuais repetitivas e possibilitando o intercâmbio de dados entre os mesmos (DECEA, 2004).

Os movimentos do aeroporto de Guarulhos obtidos do SGTC são do mês de junho entre os dias 01 e 26, isso porque o mês junho era o mês corrente e não havia sido encerrado no momento da coleta de dados.

A base de dados fornece os movimentos que foram efetuados no aeródromo de Guarulhos contendo as seguintes informações: data, hora da operação, matrícula, origem, destino e tipo de aeronave. No caso como se trata das operações em Guarulhos a origem ou destino sempre será SBGR.

A principal limitação da base de dados é o curto período de abrangência dos movimentos do aeroporto, restringindo, consequentemente, a análise para escolha do dia e hora representativos.

Os horários de início de cada condição meteorológicas do aeródromo (IMC e/ou VMC) também foram obtidos através do SGTC do aeroporto de Guarulhos, no entanto, com base em um série de 2012 a 2013.

A porcentagem de utilização de pista foi obtida através do banco de dados SETA Millennium, suportado pelo DECEA. Esse banco mantém dados estatísticos atualizados sobre aeródromos do Brasil.

Além dos dados de movimentos, alguns dados meteorológicos foram obtidos a fim de caracterizar com mais precisão o aeródromo e apontar detalhes importantes para diferentes operações propostas neste estudo.

Os dados de condições meteorológicas do aeródromo foram obtidas através do SGTC, com referência o período entre janeiro de 2011 e dezembro de 2013. Os dados apresentam o horário de início das condições VMC e IMC.

Outros dados meteorológicos foram fornecidos pelo ICEA através do Banco de Dados Climatológicos e suportado por esse mesmo instituto. Os dados referentes ao Aeroporto de Guarulhos foram coletados pela Estação Meteorológicas de Superfície, localizada na latitude 23° 26' S, longitude 46° 28' W e altitude de 751 m, entre o período de janeiro de 2011 e dezembro de 2013.

Os dados de vento coletado possuem a limitação de precisão nos interstícios devido ao próprio instrumento de medição que apresenta valores inteiros, por exemplo, as divisões são de ventos entre 1 e 5 nós e entre 6 e 10 nós, ou seja, não existe a opção de 5,5 nós medindo assim 5 nós ou 6 nós. No entanto, esse tipo de limitação não prejudica as análises, que visam apenas obter a visão global do comportamento dos ventos no aeródromo.

4.2 CENÁRIOS

Com base nas operações em pistas paralelas e próximas, são propostos cenários para implantação dessas operações no aeroporto de Guarulhos a fim de ampliar a capacidade de

pista. Por isso este tópico visa apresentar cada cenário em detalhes, abordando a teoria e os cálculos necessários para aplicação dos procedimentos.

Algumas considerações iniciais são importantes para possibilitar as operações, tais como:

- Não existência de obstáculos que interfiram os procedimentos;
- Infraestrutura mínima necessária existente para realização dos procedimentos, como acessos as cabeceiras e comprimento de pista extra;
- Aumento de demanda com o mesmo perfil da frota, ou seja, mantendo o mix de aeronaves;
- Desempenho das aeronaves com capacidade de realizar os procedimentos propostos;
- Utilização somente das cabeceiras 09L e 09R, eventualmente 10L; e
- Estratégia otimizada de decolagem e sequenciamento.

No caso de uma implantação real as considerações realizadas neste estudo devem ser avaliadas para garantir a segurança e a eficiência dos procedimentos.

Resumidamente, os cenários apresentam a operação: atual (segregada); visual; segregada independente; com procedimento SOIA; com procedimento SGAP; com procedimento SEAP; e com procedimentos combinados entre SGAP e SEAP.

Em cada cenário são avaliados três situações a fim de obter os parâmetros λ_{S1} (saturação restrita), λ_{S2} (saturação semi-restrita) e λ_{SU} (saturação irrestrita). A Tabela 9 apresenta as restrições aplicadas em cada parâmetro.

O primeiro parâmetro é obtido mantendo-se as restrições físicas do aeródromo, tecnológicas e de procedimentos, adotando separações vigentes para operações que não foram alteradas, por exemplo.

O segundo parâmetro é menos restrito onde considera-se implementações tecnológicas e de procedimento que possibilitam, por exemplo, a redução da separação horizontal para 3 NM ou a separação por esteira de turbulência, o que for mais restritivo.

Por fim o terceiro parâmetro é o menos restritivo onde não existem limitações físicas, tecnológicas e de procedimentos, por isso é considerado que a configuração do aeródromo possui infraestrutura suficiente para não restringir o aumento da capacidade operacional de pista.

Tabela 9 - Diferenças em cada parâmetro de saturação

Restrições	λs1	λ_{S2}	λsu
Físicas (taxiway, saídas rápidas, gate, etc)	Sim	Sim	Não
Separação radar	5 NM	3 NM	3 NM
Distância de captura	4 NM	2,5 NM	2,5 NM

Para cada saturação existe ainda o fator distância de captura, que define um ponto de referência no alinhamento da cabeceira na distância determinada. Tal parâmetro indica que a partir daquela distância da cabeceira alguma ação está impedida de ocorrer, por exemplo, se a distância de captura para autorizar decolagens antes dos pousos é de 4 NM, significa que se uma aeronave em aproximação encontra-se a menos de 4 NM da cabeceira nenhuma aeronave será autorizada a decolar até que a aeronave realize o pouso.

No caso da capacidade de saturação 1 (λ_{S1}) a distância de captura é de 4 NM, para a capacidade de saturação 2 e 3 (λ_{S2} e λ_{SU}) a distância de captura é de 2,5 NM. O valor de 2,5 é necessário para que as decolagem sejam efetuadas já que a separação mínima na aproximação é de 3 NM, e também é uma distância suficiente para que a decolagem tenha sido realizada até o toque da aeronave que pousa.

A distância de captura de 4 NM pode ser considerada conservadora para outros aeroportos internacionais com diferentes *modus operandi* (modos de operação). Assumindo que a aeronave na aproximação final (depois do marcador externo) está a uma velocidade de 160 nós, o tempo mínimo disponível para a decolagem será de 1 minuto e 36 segundos, considerando aeronaves

mais pesadas. Como o tempo médio de ocupação de pista na decolagem é de 50 segundos, a distância de captura pode ser reduzida sem afetar a operação.

4.2.1 Cenário 1

O primeiro cenário é a base para os demais. Ele representa a dinâmica atual do aeródromo de Guarulhos na hora pico de um dia típico. Aqui não há nenhuma modificação operacional em relação ao procedimento real. As operações estão em conformidade com os procedimentos em vigor no dia 15 de dezembro de 2013.

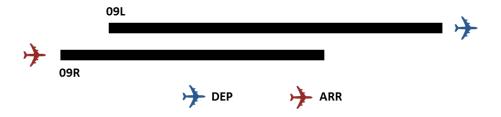


Figura 31 - Esquema de operação do cenário 1

A Figura 31 apresenta o esquema do modo de operação, o qual segue as seguintes regras:

- Operação segregada com pouso somente na pista 09R e decolagem somente na pista 09L, conforme a Figura 31;
- Separação de 2 minutos entre decolagens;
- Aeronave pode alinhar na 09L enquanto ocorre o pouso na 09R;
- Aeronaves podem cruzar a pista se uma aeronave que se aproxima não alcançou a distância de captura de cruzamento de 2 NM;
- DEP na 09L após ARR na 09R efetuado após o controle da aeronave que pousa, ou seja, no início da frenagem; e
- DEP na 09L antes ARR na 09R autorizado somente se a aeronave que pousa não alcançou a distância de captura da cabeceira 09L.

4.2.2 Cenário 2

Este cenário representa a operação VMC, visual. De maneira geral a operação visual proporciona a maior capacidade de pista possível.

O Aeroporto de Guarulhos não opera de forma diferenciada para condições visuais, o que ocasiona uma perda de eficiência da capacidade de pista nessas condições.

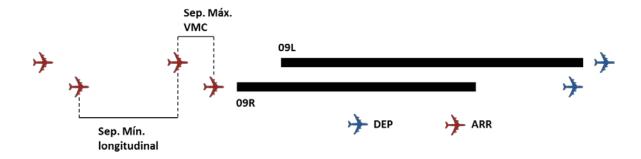


Figura 32 - Esquema de operação do cenário 2

O modo de operação visual no SBGR é apresentado de forma esquemática na Figura 32 e segue as seguintes regras:

- Operação não segregada;
- Separação de 2 minutos entre decolagens;
- Aeronave só pode alinhar e aguardar na cabeceira se não ocorre aproximação para essa mesma cabeceira;
- Aeronaves podem cruzar a pista se uma aeronave que se aproxima não alcançou a distância de captura de cruzamento de 2 NM;
- Aproximações simultâneas para 09L e 09R com separação máxima de 31 s, conforme o
 estudo de Burnham, Hallock e Greene (2001), para pistas paralelas espaçadas de 1230
 ft (375 m) e vento cruzado de 10 nós, conforme a predominância de ventos da hora pico;
- Decolagens simultâneas seguindo a mesma separação máxima das aproximações;
- DEP na 09L ou 09R após ARR na 09R ou 09L— efetuado após o controle da aeronave que pousa ou após livrar a pista (caso de uso da mesma pista);

- DEP na 09L ou 09R antes ARR na 09R ou 09L autorizado somente se a aeronave que pousa não alcançou a distância de captura da cabeceira;
- Sempre que possível realizar aproximações simultâneas; e
- Aeronaves militares e aviação geral utilizam a pista 09R devido à proximidade com o pátio destinado a essas categorias.

De acordo com a Equação (1) a separação máxima é de $S_{ik}=31.v_k$, sabendo que o tempo de deslocamento da esteira de turbulência é de 31 s. Ou seja, quando a aeronave seguidora é uma leve ($v\approx 110$ nós), média ($v\approx 140$ nós) ou pesada ($v\approx 160$ nós) (ICAO, 2006) as respectivas separações máximas são 1,0 NM, 1,2 NM e 1,4 NM.

4.2.3 Cenário 3

Este cenário representa a operação segregada IMC simultânea, conforme o modo 4 de operação do SOIR (ICAO, 2004). Embora o espaçamento entre pista de Guarulhos seja de 375 m não permitindo a operação simultânea, a alternativa é de deslocar a cabeceira até que o espaçamento existente permita a operação segregada independente.

Para Guarulhos seria necessário então uma decalagem de 1925 m, contando que a cada 150 m de deslocamento, no sentido de reduzir a exigência de separação lateral, é reduzido em 30 m a necessidade de espaçamento entre eixos de pista. Como as pistas já se encontram decaladas de 580 m resta 1345 m para completar os 1925 m de decalagem.

A Figura 33 apresenta esquematicamente, de forma generalizada, as soluções de decalagem de cabeceiras, em que os parâmetros x, y e z podem ser alterados. Se há o deslocamento da cabeceira de decolagem o valor de x é diferente de zero, se deseja compensar a redução do comprimento de pista varia-se y e por fim define-se o valor de z para deslocamento físico da cabeceira de pouso.

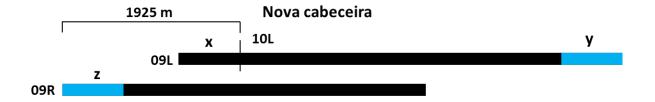


Figura 33 - Soluções para decalagem de cabeceiras

Fonte: (ALMEIDA, 2012), adaptado pelo autor.

A solução utilizada no cenário foi a de y = z = 0 e x = 1345 m. O deslocamento de x define uma nova cabeceira, a qual é denominada cabeceira 10L.

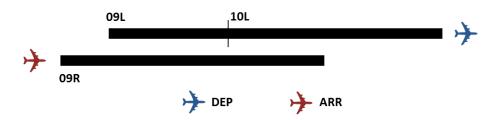


Figura 34 - Esquema de operação do cenário 3

A operação deste cenário é apresentado na Figura 34, o qual adota as seguintes regras:

- Operação segregada com pouso somente na pista 09R e decolagem somente na pista 09L e 10L;
- Separação de 2 minutos entre decolagens;
- Aeronave pode alinhar na 09L enquanto ocorre a decolagem na 10L ou o pouso na 09R;
- Aeronaves podem cruzar a pista se uma aeronave que se aproxima não alcançou a distância de captura de cruzamento de 2 NM;
- DEP na 09L após ARR na 09R efetuado após o controle da aeronave que pousa, ou seja, no início da frenagem;
- DEP na 09L antes ARR na 09R autorizado somente se a aeronave que pousa não alcançou a distância de captura da cabeceira 09L;
- DEP na 10L durante pouso 09R independente; e
- Aeronaves leves e médias decolam da 10L e pesadas decolam da 09L.

4.2.4 Cenário 4

Este cenário apresenta o procedimento SOIA para aproximações e também para alguns casos o modo 4 do SOIR, ou seja, a operação no quarto cenário contemplou as duas soluções.

Este cenário apresenta ainda a cabeceira 10L deslocada como no cenário 3 para realização do procedimento de operação segregada independente. Por exemplo, enquanto uma aeronave se aproxima para a cabeceira 09R e outra aeronave se aproxima na trajetória adjacente (SOIA), sem que esta última tenha alcançado a distância de captura, pode ocorrer uma decolagem da cabeceira 10L.

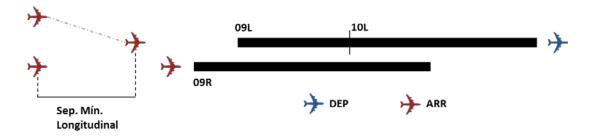


Figura 35 - Esquema de operação do cenário 4

A trajetória adjacente do procedimento SOIA realiza a aproximação para a pista 09L enquanto a trajetória reta do SOIA realiza a aproximação para a pista 09R, conforme apresentado na Figura 35. A operação está de acordo com as seguintes regras:

- Pousos nas pistas 09R e 09L, e decolagens nas pistas 09L e 10L;
- Separação de 2 minutos entre decolagens;
- Aeronaves podem cruzar a pista se uma aeronave que se aproxima n\u00e3o alcan\u00e7ou a
 dist\u00e1ncia de captura de cruzamento de 2 NM;
- DEP na 09L após ARR na 09R efetuado após o controle da aeronave que pousa, ou seja, no início da frenagem;
- DEP na 09L antes ARR na 09R autorizado somente se a aeronave que pousa não alcançou a distância de captura da cabeceira 09L;
- DEP na 10L durante pouso 09R independente;

- Aproximações simultâneas para as cabeceiras 09L e 09R pelo método SOIA; e
- Aeronaves leves e médias podem decolar da 10L e leves, médias e pesadas podem decolar da 09L.

Esse tipo de operação é um pouco mais flexível por permitir aproximações simultâneas e operações segregadas independentes em determinados momentos, no entanto essa quantidade maior de soluções com procedimentos distintos pode ocasionar o aumento de carga de trabalho do controlador.

4.2.5 Cenário 5

Este cenário apresenta o primeiro procedimento inovador, o SGAP ou HALS, como apresentado na Figura 36. O objetivo deste procedimento é reduzir a separação horizontal para certas sequências de aeronaves cuja esteira de turbulência exige separação maior do que 3 NM.

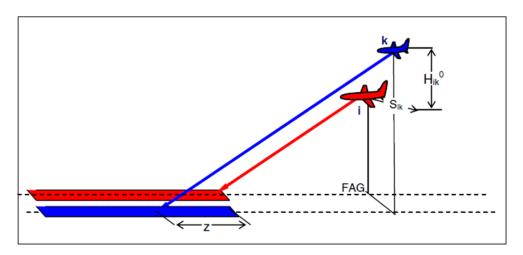


Figura 36 – Esquema da aproximação SGAP

Fonte: (JANIC, 2008). Obs: Repetição da Figura 15.

As sequências beneficiadas nesse procedimento seriam a P-L (Pesada-Leve), P-M (Pesada-Média) e M-L (Média-Leve), que apresentam separações mínimas por esteira de turbulência de 6, 5 e 5 NM. A sequência P-P não seria beneficiada, embora tenha a exigência de separação de 4 NM, a fim de garantir a segurança do procedimento baseado no desempenho da aeronave

(JANIC, 2008). Ou seja, não é recomendado que a aeronave pesada execute o perfil decalado de aproximação.

Considerando-se a primeira situação de saturação em que é adotando 5 NM de separação padrão, outras duas sequências ainda podem ser beneficiadas: as M-M e L-L. No entanto, quando há melhorias na operação que possibilitem a separação padrão de 3 NM, o procedimento SGAP torna-se ideal para o caso em que o movimento de aeronaves pesadas e/ou leves são significativos, ou seja, é mais eficiente (possibilita maiores aumentos percentuais de capacidade) quanto maior for a quantidade dessas aeronaves.

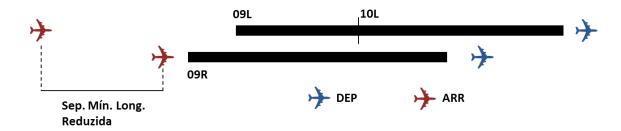


Figura 37 - Esquema de operação do cenário 5

Esse cenário apresenta a cabeceira 10L deslocada, assim como no cenário 3 e 4, para realização do procedimento decalado do SGAP, como mostra a Figura 37. O *modus operandi* nesse cenário adota as seguintes regras:

- Pousos e decolagens nas pistas 09R e 09L;
- Aproximações para as cabeceiras 10L e 09R pelo método SGAP;
- Procedimento de aproximação com perfil decalado para a pista 10L;
- Separação mínima reduzida (Figura 38) entre aeronaves realizando o procedimento SGAP, ou seja, aeronave líder realizando o perfil de aproximação para a 09R e aeronave seguidora realizando o perfil de aproximação para a 10L;
- Separação mínima padrão entre intervalos de operações SGAP, ou seja, aeronave líder realizando o perfil de aproximação para a 09L ou 10L e aeronave seguidora realizando o perfil de aproximação para a 09R;

- Separação mínima padrão quando as aeronaves não realizam o procedimento SGAP;
- Aeronaves podem cruzar a pista se uma aeronave que se aproxima não alcançou a distância de captura de cruzamento de 2 NM;
- DEP na 09L após ARR na 09R ou DEP na 09R após ARR na 09L efetuado após o controle da aeronave que pousa, ou seja, no início da frenagem;
- DEP na 09L antes ARR na 09R ou DEP na 09R após ARR na 09L autorizado somente se a aeronave que pousa não alcançou a distância de captura da cabeceira 09L/09R; e
- Aeronaves militares e aviação geral utilizam a pista 09R devido à proximidade com o pátio destinado a essas categorias.

A Figura 38 é apresentada a fim de auxiliar o cálculo da separação mínima possível entre aeronaves realizando o procedimento SGAP. A imagem apresenta a vista superior e de perfil dos procedimentos SGAP com aeronaves aproximando. O perfil do procedimento das aeronaves i e k possuem o ângulo de descida θ (*glide slope*) e decalagem de z. As aeronaves i e k devem ter separação vertical S_v e separação horizontal S_h .

A velocidade vertical de i (V_{vi}) deve ser maior ou igual a velocidade vertical de k (V_{vk}) para garantir que durante a descida das aeronaves a separação vertical (S_v) aumente ou permaneça constante a separação vertical mínima de 1000 ft. Como o *glide slope* é igual (θ) para os dois perfis, então a restrição será atendida se a velocidade de i (V_i) for maior ou igual a velocidade de k (V_k) , ou seja, $V_i \geq V_k$.

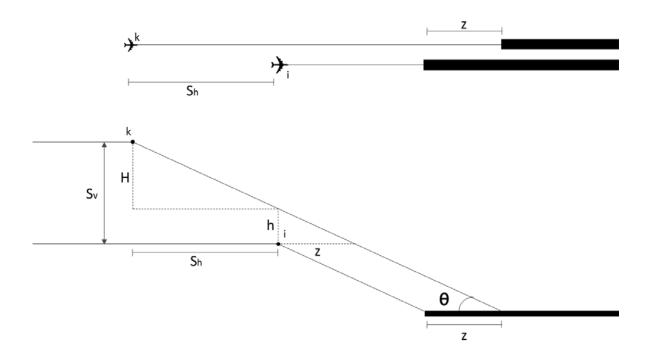


Figura 38 - Vista superior e de perfil do procedimento SGAP (sem escala)

Fonte: Autor.

Sabendo que a separação vertical irá aumentar ou permanecer igual, a situação crítica em que a separação vertical será menor é no início do seguimento de descida para a aproximação final, conforme apresentado na Figura 38.

A fim de obter uma relação entre a separação vertical, a separação horizontal e a decalagem, as equações (2), (3) e (4) são apresentadas, resultando na equação (5). Essa relação é usada para determinar a separação horizontal necessária dada a decalagem ou determinar a decalagem dada a separação horizontal que se pretende empregar.

$$S_h = \frac{H}{\tan \theta} \tag{2}$$

$$H = S_v - h \tag{3}$$

$$h = z \cdot \tan \theta$$
 (4)

$$\therefore S_h = \frac{S_v - z \cdot \tan \theta}{\tan \theta} = \frac{S_v}{\tan \theta} - z$$
 (5)

Adotando-se $\theta=3^\circ$ e $S_v=1000$ ft obtêm-se, da equação (5), a relação $S_h=5819,7-z$, em metros. Para o caso de Guarulhos o objetivo será determinar a separação horizontal para a

decalagem existente de 580 m, que pela relação de S_h e z tem-se S_h = 5239,7 m (\approx 2,8 NM). Da equação (4) obtêm-se ainda a diferença de altura (h) entre as trajetórias de descida de 30 m (\approx 100 ft). Com vistas esses resultados o valor adotado para a separação horizontal mínima no procedimento SGAP será de 3 NM.

4.2.6 Cenário 6

Este cenário apresenta o segundo procedimento inovador, o SEAP, conforme mostra a Figura 39. O objetivo deste procedimento também é reduzir a separação horizontal para certas sequências de aeronaves inclusive sequências cuja esteira de turbulência exige separação igual a 3 NM.

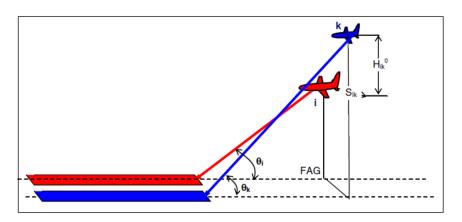


Figura 39 - Esquema da aproximação SEAP

Fonte: (JANIC, 2008). Obs.: Repetição da Figura 16.

A fim de garantir a segurança do procedimento baseado no desempenho da aeronave, não é recomendado que uma aeronave pesada execute o perfil mais inclinado de aproximação. Por isso a situação mais provável é de que somente a aeronave leve execute o procedimento devido às condições de velocidade e conforto do passageiro. Em um caso menos provável, mas possível, seria capaz de incluir as aeronaves médias no perfil mais inclinado. Nesse cenário é adotado este último caso devido a ausência de aeronaves leves na simulação das 3h de pico, por isso também o *glide slope* desejável do perfil mais inclinado deverá ser o menor possível a fim de evitar o desconforto do passageiro e velocidades verticais elevadas.

Nesse cenário considera-se que as cabeceiras 09L e 09R não estão decaladas a fim de simular o procedimento SEAP sem modificações.

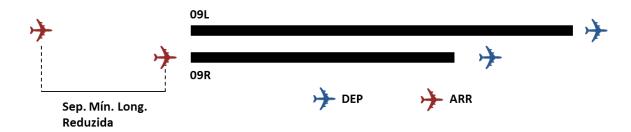


Figura 40 - Esquema de operação do cenário 6

O esquema de operação deste cenário é apresentado na Figura 40. O *modus operandi* adota as seguintes regras:

- Pousos e decolagens nas pistas 09R e 09L;
- Aproximações para as cabeceiras 09L e 09R pelo método SEAP;
- Procedimento de aproximação com perfil mais inclinado para a pista 09L;
- Separação mínima reduzida (Figura 41) entre aeronaves realizando o procedimento
 SEAP, ou seja, aeronave líder realizando o perfil de aproximação para a 09R e aeronave
 seguidora realizando o perfil de aproximação para a 09L;
- Separação mínima padrão entre intervalos de operações SEAP, ou seja, aeronave líder realizando o perfil de aproximação para a 09L e aeronave seguidora realizando o perfil de aproximação para a 09R;
- Separação mínima padrão quando as aeronaves não realizam o procedimento SEAP;
- Aeronaves podem cruzar a pista se uma aeronave que se aproxima não alcançou a distância de captura de cruzamento de 2 NM;
- DEP na 09L após ARR na 09R ou DEP na 09R após ARR na 09L efetuado após o controle da aeronave que pousa, ou seja, no início da frenagem;
- DEP na 09L antes ARR na 09R ou DEP na 09R após ARR na 09L autorizado somente se a aeronave que pousa não alcançou a distância de captura da cabeceira 09L/09R; e

 Aeronaves militares e aviação geral utilizam a pista 09R devido à proximidade com o pátio destinado a essas categorias.

A Figura 41 apresenta a vista superior e de perfil dos procedimentos SEAP com aeronaves aproximando, com o objetivo de auxiliar o cálculo da separação mínima horizontal. O perfil do procedimento das aeronaves i e k possuem o ângulo de descida θ_i e θ_k , onde θ_i < θ_k . As aeronaves i e k devem ter, inicialmente, separação vertical S_v e separação horizontal S_h . A distância entre o FAG e a cabeceira de pista é dado por d.

A velocidade da aeronave no perfil mais baixo deve ser maior ou igual do que a velocidade da aeronave no perfil mais alto $(V_i \ge V_k)$ para que a separação horizontal aumente após o FAG.

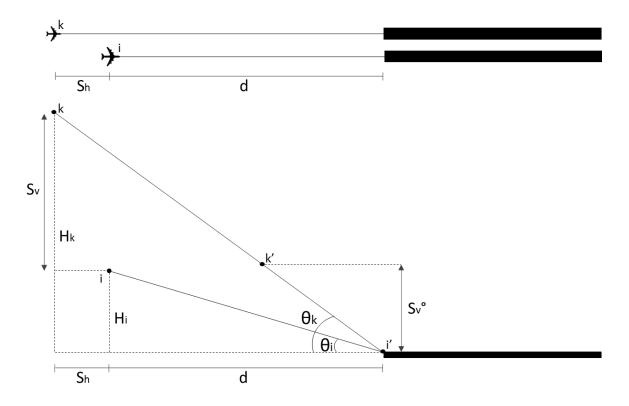


Figura 41 - Vista superior e de perfil do procedimento SEAP (sem escala)

Fonte: Autor.

Em virtude dos ângulos e velocidades diferentes para os dois perfis de aproximação, a velocidade vertical da aeronave seguidora poderá ser maior do que a líder, logo a separação vertical poderá reduzir durante a execução do procedimento SEAP. Com base nesse fato é

inferido que a situação crítica ocorre quando a aeronave i realiza o toque na pista (posição indicada por i') estando a aeronave k com a menor separação vertical (posição indicada por k'). As equações de (6) a (14) são apresentadas a fim de obter uma relação entre os parâmetros do procedimento SEAP, que são a separação vertical, a separação horizontal, os ângulos de aproximação, a distância do FAG à cabeceira e as velocidades das aeronaves.

$$V_{vi} = V_i \cdot \tan \theta_i \qquad (6)$$

$$V_{vk} = V_k \cdot \tan \theta_k \qquad (7)$$

$$V_{rel} = V_{vk} - V_{vi} = V_k \cdot \tan \theta_k - V_i \cdot \tan \theta_i \qquad (8)$$

$$t = \frac{d}{V_i} \qquad (9)$$

$$D_v = V_{rel} \cdot t = (V_k \cdot \tan \theta_k - V_i \cdot \tan \theta_i) \cdot t \qquad (10)$$

As equações (6) e (7) representam as velocidades verticais das aeronaves, e a equação (8), por sua vez, a velocidade vertical relativa entre as aeronaves. Essa velocidade relativa e o tempo que a aeronave i leva para alcançar a cabeceira determinará o deslocamento vertical relativo (D_v) da aeronave k em relação a i, conforme mostra a equação (10).

$$S_{v} = D_{v} + S_{v}^{0}$$

$$S_{v} = H_{k} - H_{i}$$

$$H_{i} = d \cdot \tan \theta_{i}$$

$$H_{k} = (d + S_{h}) \cdot \tan \theta_{k}$$

$$(14)$$

A separação vertical no início do procedimento (S_v) deve ser igual a separação mínima vertical padrão (S_v^0) mais o deslocamento vertical relativo da aeronave k, conforme a equação (11). E pode ser representada ainda pela diferença entre as alturas iniciais das aeronaves, conforme mostra a equação (12). Por sua vez as alturas das aeronaves são representadas pelas equações (13) e (14).

$$S_h = \frac{S_v^0}{\tan \theta_k} + d. \left(\frac{V_k}{V_i} - 1\right) \tag{15}$$

Realizando a álgebra necessária obtêm-se a relação apresentada na equação (15). Essa relação é usada para determinar a separação horizontal necessária dado o ângulo do perfil mais elevado, a distância entre o FAG e a cabeceira da pista e as velocidades das aeronaves.

A relação dada pela equação (15) é válida se a velocidade vertical relativa é maior do que zero $(V_{rel}>0)$, ou seja, se separação vertical reduz durante o procedimento, caso contrário a separação horizontal não será necessária $(S_h=0)$. Ou ainda, se $V_{rel}>0$, mas o resultado da separação horizontal for negativo, significa que não existe a necessidade dessa separação. Para o caso de Guarulhos considera-se d=12 NM, $\theta_i=3^\circ$, $\theta_k=5^\circ$ e velocidades de 110, 140 e 160 nós das aeronaves leves (L), médias (M) e pesadas (P), respectivamente (ICAO, 2006). Por fim, aplicando a equação (15) as sequências P-L, M-L, L-L, P-M e M-M tem-se as respectivas separações: zero, zero, 1,9 NM, 0,4 NM e 1,9 NM.

4.2.7 Cenário 7

Este cenário propõe um terceiro procedimento inovador, que é um arranjo entre os dois procedimentos anteriores, SGAP e SEAP. O objetivo deste procedimento também é reduzir a separação horizontal para certas sequências de aeronaves, porém com parâmetros mais flexíveis devido a possibilidade de decalagem e perfil mais inclinado concomitantemente.

Não é recomendado que uma aeronave pesada execute o perfil mais inclinado de aproximação, sendo mais provável que somente a aeronave leve execute o procedimento devido as condições de velocidade e conforto do passageiro. No entanto, em um caso menos provável, mas possível, seria capaz de incluir as aeronaves médias no perfil mais inclinado. Nesse cenário é adotado este último caso devido a ausência de aeronaves leves na simulação das 3h de pico, por isso também o *glide slope* desejável do perfil mais inclinado deverá ser o menor possível a fim de evitar o desconforto do passageiro e velocidades verticais elevadas.

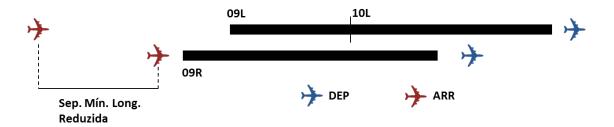


Figura - 42 Esquema de operação do cenário 7

Essa proposta apresenta a cabeceira 10L deslocada, assim como no cenário 5, para realização do procedimento decalado, conforme a . O *modus operandi* nesse cenário adota as seguintes regras:

- Pousos e decolagens nas pistas 09R e 09L;
- Aproximações para as cabeceiras 10L e 09R pelo método proposto;
- Procedimento de aproximação com perfil mais inclinado para a pista 10L;
- Separação mínima reduzida (Figura 43) entre aeronaves realizando o procedimento proposto, ou seja, aeronave líder realizando o perfil de aproximação para a 09R e aeronave seguidora realizando o perfil de aproximação para a 10L;
- Separação mínima padrão entre intervalos do procedimento proposto, ou seja, aeronave líder realizando o perfil de aproximação para a 10L e aeronave seguidora realizando o perfil de aproximação para a 09R;
- Separação mínima padrão quando as aeronaves não realizam o procedimento proposto;
- Aeronaves podem cruzar a pista se uma aeronave que se aproxima n\u00e3o alcan\u00e7ou a
 dist\u00e1ncia de captura de cruzamento de 2 NM;
- DEP na 09L após ARR na 09R ou vice-versa efetuado após o controle da aeronave que pousa, ou seja, no início da frenagem;
- DEP na 09L antes ARR na 09R ou vice-versa autorizado somente se a aeronave que pousa não alcançou a distância de captura da cabeceira 09L; e

 Aeronaves militares e aviação geral utilizam a pista 09R devido à proximidade com o pátio destinado a essas categorias.

A Figura 43 apresenta a vista superior e de perfil do mix dos procedimentos SGAP e SEAP com aeronaves aproximando, com o objetivo de auxiliar o cálculo da separação mínima horizontal.

O perfil do procedimento das aeronaves i e k possuem os ângulos de descida θ_i e θ_k , respectivamente, onde $\theta_i < \theta_k$. As aeronaves i e k devem ter, inicialmente, separação vertical S_v e separação horizontal S_h . A distância entre o FAG e a cabeceira de pista é dado por d, e a decalagem entre cabeceiras e dado por z.

A velocidade da aeronave no perfil mais baixo deve ser maior ou igual do que a velocidade da aeronave no perfil mais alto $(V_i \ge V_k)$ para que a separação horizontal aumente após o FAG.

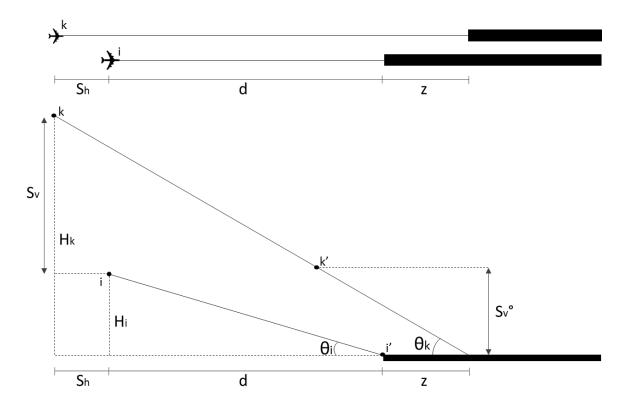


Figura 43 - Vista superior e de perfil do mix dos procedimentos SGAP e SEAP (sem escala)

Fonte: Autor.

Como no procedimento SEAP, em virtude dos ângulos e velocidades diferentes para os dois perfis de aproximação, a velocidade vertical da aeronave seguidora poderá ser maior do que a líder, a situação crítica ocorre quando a aeronave i realiza o toque na pista (posição indicada por i') estando a aeronave k com a menor separação vertical (posição indicada por k').

As equações de (6) a (13) são válidas para esse mesmo cenário. Onde as equações (6) e (7) representam as velocidades verticais das aeronaves, a equação (8) a velocidade vertical relativa entre as aeronaves, a equação (9) o tempo para a aeronave i alcançar a cabeceira, e a equação (10) o deslocamento vertical relativo (D_v) da aeronave k em relação a i.

As equações (11) e (12) representam a separação vertical em função do deslocamento vertical e a separação vertical padrão ou em função das alturas das aeronaves, respectivamente. Por sua vez as alturas das aeronaves são representadas pelas equações (13) e (16).

$$H_k = (z + d + S_h). \tan \theta_k \tag{16}$$

Realizando a álgebra necessária obtêm-se a relação apresentada na equação (17). Essa relação é usada para determinar a separação horizontal necessária dado o ângulo do perfil mais elevado, a distância entre o FAG e a cabeceira da pista, as velocidades das aeronaves e a decalagem entre cabeceiras.

$$S_h = \frac{S_v^0}{\tan \theta_k} + d. \left(\frac{V_k}{V_i} - 1\right) - z \tag{17}$$

A relação dada pela equação (17) é válida se a velocidade vertical relativa é maior do que zero $(V_{rel}>0)$, ou seja, se separação vertical reduz durante o procedimento, caso contrário considerase a $V_{rel}=0$. Ou ainda, se $V_{rel}>0$, mas o resultado da separação horizontal for negativo, significa que não existe a necessidade dessa separação.

É interessante notar que a equação (17) é mais geral e engloba o caso do procedimento SGAP, SEAP e o mix SGAP e SEAP. Conhecendo-se as equações (5) e (15) das separações horizontais do SGAP e SEAP, respectivamente, conclui-se que a equação (17) é composta por três partes,

uma constante, um termo referente ao SEAP e outro ao SGAP, assim como apresentado na equação (18).

$$S_h = \underbrace{\frac{S_v^0}{\tan \theta_k}}_{cte} + \underbrace{d.\left(\frac{V_k}{V_i} - 1\right)}_{SEAP} - \underbrace{z}_{SGAP}$$
 (18)

Para o caso de Guarulhos considera-se d=12 NM, $\theta_i=3^\circ$, $\theta_k=5^\circ$, z=1500 m e velocidades de 110, 140 e 160 nós das aeronaves leves (L), médias (M) e pesadas (P), respectivamente (ICAO, 2006).

Por fim, aplicando a equação (17) as sequências P-L, M-L, L-L, P-M e M-M tem-se as respectivas separações: zero, zero, 1,1 NM, zero e 1,1 NM.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 DISCUSSÃO

A Tabela 10 apresenta uma descrição objetiva dos respectivos cenários a fim de facilitar a consulta de cada cenário. Vale ratificar que os três tipos de saturação restrita, semi-restrita e irrestrita (λ_{SI} , λ_{S2} e λ_{SU}) são obtidos em todos os cenários.

Tabela 10 - Resumo dos cenários

	Ref	Descrição			
Cenário 1	Atual	Operação segregada e dependente			
Cenário 2	PROVED PR	Operação visual com aproximação e decolagem simultânea			
Cenário 3	The design and particular special spec	Operação segregada independente			
Cenário 4	200 fileson 100 f	Operação SOIA e operação segregada independente quando possível			
Cenário 5		Aproximações utilizando o procedimento SGAP			
Cenário 6		Aproximações utilizando o procedimento SEAP			
Cenário 7	k j_1 S_{ik}	Aproximações utilizando o procedimento mix do SGAP e SEAP			

A fim de avaliar os resultados, em um primeiro momento, de forma mais geral é apresentada a Tabela 11, que expõe os resultados de capacidade máxima obtidos em cada cenário por tipo de saturação, além de suas relações notáveis em porcentagem.

Inicialmente analisando o cenário 1 verifica-se que a capacidade é mais sensível a melhorias tecnológicas, possibilitando um aumento de 17%. Essa melhoria tecnológica permite a redução

da separação horizontal entre dois pousos consecutivos e a redução da distância de captura, logo melhorias nesse sentido terão impacto direto no aumento da capacidade.

Tabela 11 - Resultados dos cenários

Ref.	Cenário	λ_{SI}	λ_{S2}	λ_{SU}	$\lambda_{SI}/\lambda_{SU}$	$\lambda_{S1}/\lambda_{S2}$	$\lambda_{S2}/\lambda_{SU}$
Atual	Cenário 1	58	68	69	84,1%	85,3%	98,6%
THO THE	Cenário 2	77	91	100	77,0%	84,6%	91,0%
Training to the second	Cenário 3	60	71	73	82,2%	84,5%	97,3%
100 Brown 100 Br	Cenário 4	58	71	77	75,3%	81,7%	92,2%
	Cenário 5	54	68	70	77,1%	79,4%	97,1%
	Cenário 6	57	74	84	67,9%	77,0%	88,1%
k S_{ik}	Cenário 7	57	68	69	82,6%	83,8%	98,6%

Nota-se que o cenário 2 apresenta a maior capacidade para a saturação mais restrita (λ_{SI}), com 77 movimentos, ou seja, um aumento de 33% em relação ao cenário atual. No entanto, o cenário 2 ocorre em condições meteorológicas visuais (VMC), restringindo para condições meteorológicas instrumento (IMC) tem-se que a maior capacidade para a primeira saturação é de 60 movimentos no cenário 3 (SOIR), representando um aumento de 3%.

Para a segunda saturação, a maior capacidade encontrada também foi para a operação em VMC do cenário 2. A capacidade obtida de 91 movimentos representa um aumento de 18% em relação a primeira saturação desse mesmo cenário, e ainda uma capacidade 34% maior se comparado ao cenário atual, na saturação semi restrita.

Em condições IMC, a maior capacidade é dada no cenário 6 (SEAP), o qual apresentou 74 movimentos, significando um aumento de 9% em relação ao cenário atual, na saturação semi restrita.

A saturação irrestrita teve maior eficiência no cenário VMC com 100 movimentos, sendo então 30% maior do que a primeira saturação desse mesmo cenário e 45% maior do que o cenário atual nas condições de saturação irrestrita.

Considerando condições IMC, a maior capacidade é dada no cenário 6 (SEAP), o qual apresentou 84 movimentos, que representa um aumento de 22% em relação ao cenário atual, na saturação irrestrita.

É possível observar que em alguns cenários a capacidade foi reduzida em relação ao cenário atual, isso ocorreu, basicamente, por causa da redução da quantidade de decolagens, que ficaram restritas devido a limitação da distância de captura. Essa observação responde algumas questões do trabalho de Almeida (2012), que apresentava algumas limitações de aumento de capacidade mesmo com redução de separação entre aeronaves no seguimento final de aproximação.

Analisando a relação $\lambda_{SI}/\lambda_{SU}$ nota-se que o cenário 1 é o mais eficiente dos cenários, isso significa que para esse modo de operação a capacidade restrita está mais próxima ao seu máximo de capacidade irrestrita e ainda as restrições físicas e tecnológicas não prejudicam tanto quanto nos demais cenários.

Por outro lado o menos eficiente é o cenário 6, que pode ser visto como o cenário com o maior potencial de aumento de capacidade, visto que esse é mais sensível a melhorias tecnológicas e físicas.

Da mesma forma acontece com as relações $\lambda_{SI}/\lambda_{S2}$ e $\lambda_{S2}/\lambda_{SU}$ em que o cenário 1 é o mais eficiente e o cenário 6 o menos eficiente em relação ao potencial da capacidade, significando a sensibilidade maior ou menor em relação as melhorias tecnológicas e físicas separadamente.

A segunda etapa é analisar os gráficos de envelope para cada cenário, que são representados da Figura 44 a Figura 50, esses gráficos permitem uma apreciação mais detalhada de cada modo de operação proposto no trabalho.

Vale ressaltar que o estudo privilegiou o aumento da eficiência dos pousos, enquanto as decolagens mantiveram sempre a mesma regra de decolagens, cuja separação era dada por 2 minutos. Isso acarretou em alguns cenários o aumento da capacidade somente por meio do aumento de pousos e não de decolagens.

O λ_{SI} apresenta restrições físicas e tecnológicas, essa por sua vez implica em um distância de captura de 4 NM, enquanto que o λ_{S2} e o λ_{SU} apresenta melhorias tecnológicas, que permite a redução da distância de captura até 2,5 NM.

No entanto em determinados cenários essa distância de captura quando muito reduzida prejudica o ganho de capacidade ou ainda o mix de operação com a redução da quantidade de decolagens devido, por exemplo, as restrições físicas (caso do λ_{S2}) e o modo de operação. Para evitar um resultado equivocado, em que uma saturação menos restrita apresentasse valor menor do que a saturação mais restrita, utilizou-se uma variação de 4 a 2,5 NM de distância de captura. Os gráficos de envelope foram elaborados com os dados de movimento dentro de intervalos de uma hora obtidos em cada simulação e para cada saturação. Para evitar a visualização de muitos pontos no gráfico foram selecionados os principais pontos de inflexão que caracterizavam as curvas de saturação.

O envelope de capacidade é plotado em um plano cartesiano onde o eixo x representa a quantidade de decolagens e o eixo y a quantidade de pousos. A curva de capacidade indica a máxima quantidade de movimentos que podem ser alocados com um determinado mix de operação, portanto qualquer coordenada (decolagem, pouso) dentro desse envelope pode ocorrer.

Alguns pontos notáveis desses gráficos são apresentados em caixas que indicam as coordenadas, que no caso representam a quantidade de decolagens e pousos, nessa ordem. Outra característica importante é que as curvas de saturação menos restritas envolvem aquelas de saturação mais restrita para um mesmo cenário.

5.1.1 Cenário 1 - Base

Conforme mostra a Figura 44, a saturação restrita para o cenário atual apresenta capacidade máxima de 58 movimentos com mix de operação de 50%, exatamente. A capacidade máxima de pousos é de 29 movimentos e de decolagens é de 30 movimentos.

No caso das saturações semi restrita e irrestrita a capacidade máxima foi de 68 e 69, respectivamente, mas a proporção de pousos e decolagens não se mantiveram equilibradas, cerca de 36% foram decolagem e 64% pousos.

O máximo de pousos alcançados foi de 44, que representa um aumento de 52% na quantidade de pousos em relação a primeira saturação.

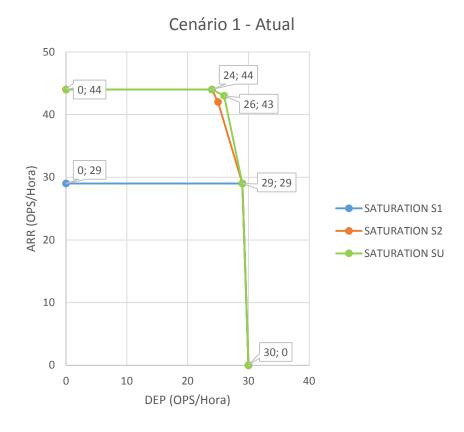


Figura 44 - Envelope de capacidade do cenário 1

5.1.2 Cenário 2 - Visual

O cenário 2, que propõe a operação simultânea em condições VMC, foi o que apresentou melhores resultados de capacidade. Na situação restrita foi possível processar 77 movimentos, sendo, aproximadamente, 50% de pousos. A quantidade máxima atingida de pousos foi de 56 e de decolagens foi de 60, separadamente, como mostra a Figura 45.

Para as demais saturações a diferença foi na capacidade máxima que atingiu 91 movimentos para o caso semi restrito, e 100 movimentos para o caso irrestrito. Em ambos os casos a proporção de pousos e decolagens ficou em torno de 45-48% de decolagens e 52-55% de pousos.

Antes de aplicar esse cenário é importante também analisar se os procedimentos de SID não causam conflitos devido ao cruzamento de trajetórias.

A principal restrição física observada nesse cenário é a falta de acessos as cabeceiras das pistas 09L e 09R. Caso ocorram melhorias nesse campo, supondo que já existem melhorias tecnológicas, o incremento de capacidade é de 10% em relação a saturação semi restrita.

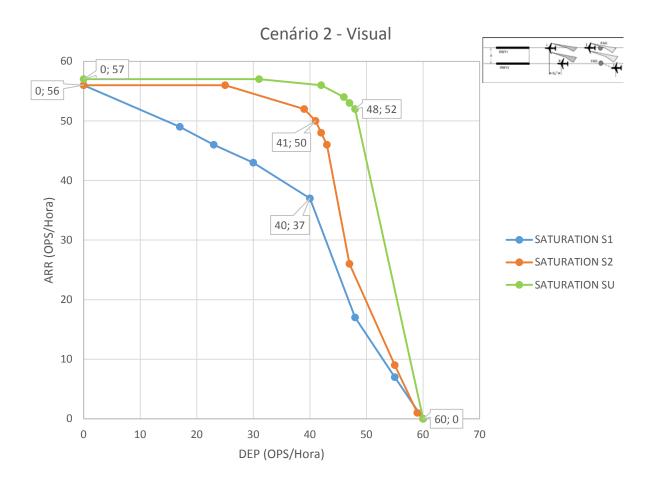


Figura 45 - Envelope de capacidade do cenário 2

5.1.3 Cenário 3 - SOIR

O cenário com decolagens a partir da intersecção da pista fornece uma capacidade de 60 movimentos para a saturação mais restrita, distribuídos igualmente entre pousos e decolagens, conforme mostra a Figura 46. De forma que não ultrapassam os 30 movimentos para pouso nem decolagem.

Nas saturações menos restritas o movimento de pousos aumenta 43%, enquanto que a quantidade de decolagens se mantém limitada a 30 operações. Nesse caso a porcentagem de pousos fica em 60%, aproximadamente.

A capacidade deverá ser maior quanto maior for a proporção de aeronaves médias para decolar, pois essa categoria de aeronave decola da intersecção, possibilitando a operação segregada simultânea como prevê o SOIR.

Esse modo de operação pode gerar uma carga de trabalho maior para o controle de solo devido aos conflitos na taxiway onde as aeronaves decolam da intersecção.

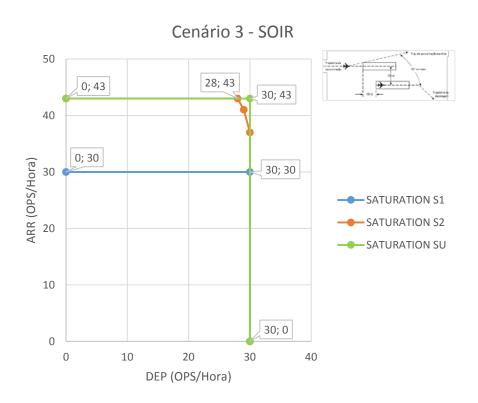


Figura 46 - Envelope de capacidade do cenário 3

5.1.4 Cenário 4 - SOIA

O modo de operação SOIA possibilita o aumento da quantidade de pousos, mas não favorece as operações de decolagem. Como pode ser visto na Figura 47 a operação de decolagem é reduzida se comparada aos demais cenários sem decolagem simultânea, restringindo em até 50%.

A capacidade de saturação restrita é de 58 movimentos, dos quais 74% são pousos e 26% são decolagens. Nas saturações subsequentes essa porcentagem não reduz significativamente, mantendo uma porcentagem de no mínimo 70% de pousos. No entanto, analisando apenas os

pousos nota-se que é possível atingir um número de 57 operações por hora, que significa um aumento de quase 100% de pousos em relação ao cenário atual.

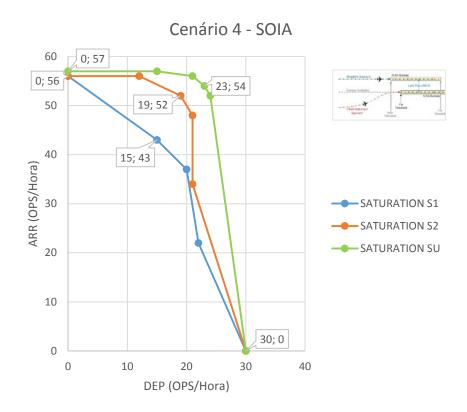


Figura 47 - Envelope de capacidade do cenário 4

5.1.5 Cenário 5 - SGAP

Não muito diferente dos cenários anteriores, o SGAP proporciona um aumento das operações de pouso, mas não das decolagens, como fica evidente na Figura 48. Para a saturação restrita ainda ocorre um prejuízo de capacidade com uma redução de 7% em relação ao cenário base, por outro lado ocorreu um aumento de 24% nas operações de pouso, isso significa 18 decolagens e 36 pousos.

Após melhorias tecnológicas e físicas observa-se que a capacidade tem um salto de 30%, com porcentagens de tipos de operação não muito diferentes da primeira saturação, apresentando 64% de pousos e 36% de decolagens. No entanto, nesse caso é possível alcançar 47 operações de pousos por hora.

O maior ganho com esse cenário se dá quando o mix de aeronaves é composto por muitas sequencias de aeronaves pesadas e médias (P-M) e/ou pesadas e leves (P-L) e/ou médias e leves (M-L), devido a redução da separação horizontal.

Para o caso atual do Aeroporto de Guarulhos melhorias tecnológicas que proporcionassem a redução da separação por esteira de turbulência já levaria ao mesmo ganho operacional.

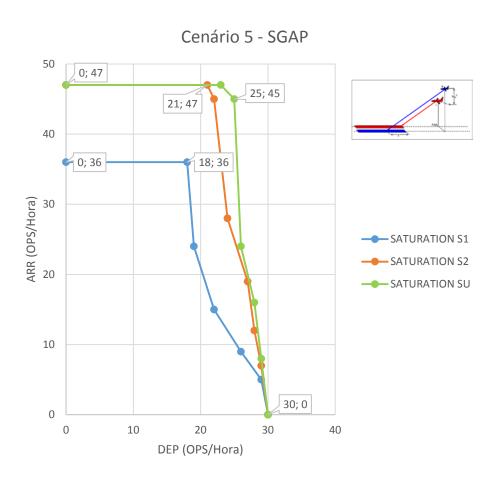


Figura 48 - Envelope de capacidade do cenário 5

5.1.6 Cenário 6 - SEAP

O cenário SEAP também apresenta um desequilíbrio quanto ao mix de operação, como pode ser visto na Figura 49. Embora, na saturação restrita, o ganho de pousos seja considerável chegando a 46 operações, para o caso de operação individual, ou ainda de até 39 operações quando alcança a capacidade de 57 movimentos entre pousos e decolagens.

Nas saturações menos restritas a capacidade aumenta em 30% e 47%, para a semi restrita e irrestrita, respectivamente. A proporção de pousos e decolagens não varia, mantendo a quantidade de pousos superior em relação as decolagens. Mas devido as reduções de separações horizontais é possível alcançar até 56 operações de pouso, ou seja, equivalente a capacidade máxima de pousos em VMC do cenário 2.

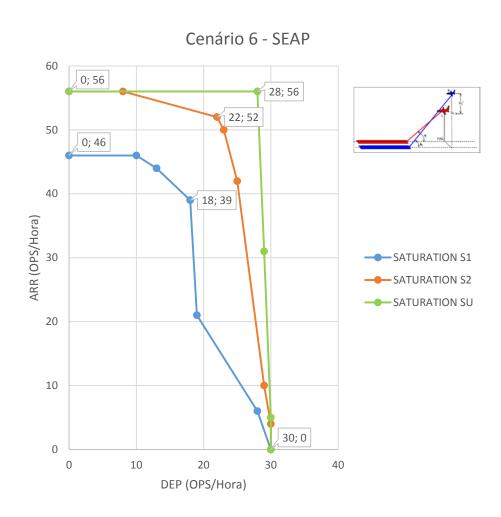


Figura 49 - Envelope de capacidade do cenário 6

5.1.7 Cenário 7 - SGAP e SEAP

Por fim o cenário 7, que é a combinação das soluções SGAP e SEAP, apresenta o mesmo tipo de comportamento do cenário 5 e 6, ou seja, aumento da quantidade de pousos e redução da quantidade decolagens, como mostra a Figura 50.

A capacidade da saturação restrita é limitada em 57 movimentos, sendo 39% decolagens e 61% pousos. Podendo atingir 44 pousos e 30 decolagens, separadamente.

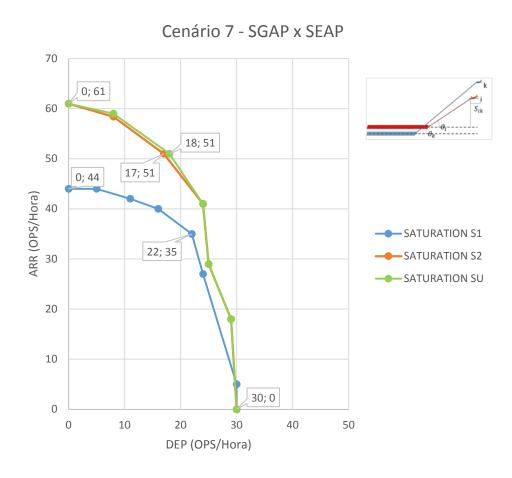


Figura 50 - Envelope de capacidade do cenário 7

No caso das capacidades das saturações semi restritas e irrestritas a quantidade de movimentos chega a 69, porém com uma proporção muito inferior de decolagens, chegando a representar 26% dos movimentos.

Nesse cenário vale destacar o aumento expressivo de pousos, superando 60 operações, 39% maior em relação a saturação restrita. Isso é explicado pela redução da separação horizontal, chegando a zero e 1,1 NM em muitas sequencias de aeronaves que aproximam nas pistas paralelas. No entanto, a quantidade de decolagens é reduzida mais do que no cenário 6 por causa da decalagem da pista, que impede a decolagem enquanto a aeronave que pousa na pista adjacente ainda não realizou o toque e o controle.

Embora, separadamente, o SEAP aumente a capacidade de pista, o cenário que combina o SEAP e SGAP não apresenta um aumento absoluto de capacidade considerável, porque mesmo ocorrendo as reduções nas separações horizontais a decalagem de pista prejudica a operação de decolagem.

5.2 VALIDAÇÃO

A fim de validar o modelo simulou-se o cenário base (cenário 1), sem saturação, no período de 24h do dia 19 de junho de 2013. Com os resultados dessa simulação comparou-se com os dados reais de movimento do Aeroporto de Guarulhos.

As comparações entre os movimentos reais e simulados de pouso, decolagens e total são apresentadas entre a Figura 51 e a Figura 53. Verifica-se que, de maneira geral, os movimentos foram idênticos em quantidade, outros momentos apresentaram um variação de no máximo 2 movimentos de pouso ou 4 de decolagem.

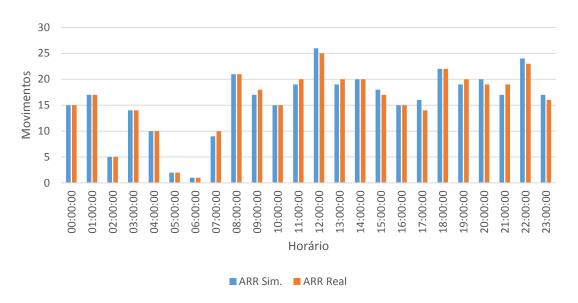


Figura 51 - Comparação entre movimentos de pousos

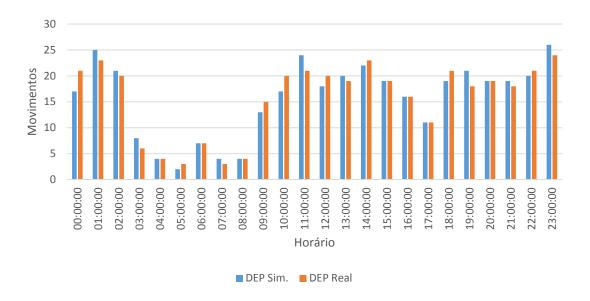


Figura 52 - Comparação entre movimentos de decolagem

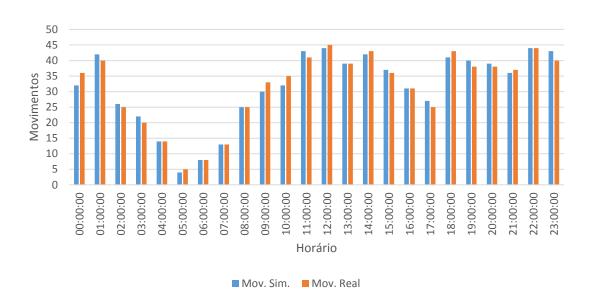


Figura 53 - Comparação entre movimentos totais

Essas comparações corroboram para a validação do método de simulação adotado, mostrando que o resultado encontrado está compatível com a realidade para o cenário atual.

6 CONCLUSÃO

As pistas paralelas de pouso e decolagem representam, de forma significativa, o tipo de configuração adotada nos aeroportos internacionais de maior movimento no mundo, chegando a 83% das pistas presentes nos cinco aeroportos mais movimentados do mundo em 2012.

Embora, desses 83%, 48% sejam pistas paralelas e próximas, as operações em pistas paralelas se tornam cada vez mais restritivas quanto menos espaçadas estiverem os eixos de pistas paralelas. Essas limitações são ocasionadas pela esteira de turbulência e restrições meteorológicas.

Nesse contexto o trabalho visa analisar a capacidade de pistas paralelas e próximas através do estudo de alternativas para operações de pouso e decolagem nessa configuração de pista a fim de possibilitar o uso mais eficiente do sistema de pistas.

Os cenários propostos no estudo foram sete, os quais abordaram o modo de operação atual, a operação simultânea em condições VMC, o modo de operação segregado previsto no SOIR, aproximações com procedimento SOIA, além de procedimentos inovadores como o SGAP, SEAP e sua combinação.

De acordo com os resultados, verifica-se que a capacidade do cenário atual é sensível a melhorias tecnológicas, possibilitando um aumento de 17%. Isso significa 68 movimentos em uma hora, conforme é apresentado na Tabela 12.

Dentre todos os cenários propostos o que representou maior aumento de capacidade foi a operação VMC, o qual apresentou 33% mais movimentos em relação ao cenário atual, sem considerar melhorias tecnológicas e físicas. Ou ainda 45% maior do que a capacidade sem restrições físicas e tecnológicas.

Em condições meteorológicas instrumento (IMC), tem-se que a maior capacidade para a primeira saturação é de 60 movimentos no cenário 3 (SOIR), representando um aumento de

3%. Ou na saturação semi restrita, em que a maior capacidade é dada no cenário 6 (SEAP), apresentando 74 movimentos, que significa um aumento de 9% em relação ao cenário atual, na saturação semi restrita.

Tabela 12 - Resumo dos resultados

Ref.	Cenário	λ_{SI}	λ_{S2}	λ_{SU}
Atual	Cenário 1	58	68	69
Berri Berri Berri	Cenário 2	77	91	100
Polarine and Polar	Cenário 3	60	71	73
Stration appears Source Control Contr	Cenário 4	58	71	77
	Cenário 5	54	68	70
	Cenário 6	57	74	84
s_{ik}	Cenário 7	57	68	69

Por fim para a saturação irrestrita, a maior capacidade é dada no cenário 6 (SEAP), o qual apresentou 84 movimentos, que representa um aumento de 22% em relação ao cenário atual. Com exceção do cenário 2 (VMC), as capacidades aumentaram devido apenas ao aumento da quantidade de operações de pouso, enquanto as operações de decolagens reduzem. Isso ocorre, principalmente, devido as propostas visarem apenas as aproximações e não as decolagens, por isso as partidas continuaram com a separação de dois minutos.

O cenário SGAP não forneceu ganhos consideráveis, isso porque esse cenário beneficia o aeródromo que possui o mix de aeronaves composto por muitas sequencias de aeronaves

pesadas e médias (P-M) e/ou pesadas e leves (P-L) e/ou médias e leves (M-L), devido a redução da separação horizontal.

No cenário 7 o aumento de capacidade em relação ao cenário base foi nulo, no entanto, o aumento de pousos foi considerável, chegando a 51 operações, que representa 74% dos movimentos. Se comparado a quantidade de pousos máximo atingido no cenário atual e no cenário 7 observa-se um aumento de 39% de operações. Esse aumento na quantidade de pousos é explicado pela redução da separação horizontal.

Embora o SEAP aumente a capacidade de pista, o cenário que combina o SEAP e SGAP não apresenta um aumento absoluto de capacidade considerável, porque mesmo ocorrendo as reduções nas separações horizontais a decalagem de pista prejudica a operação de decolagem. O fato de reduzir ou limitar a quantidade de decolagens em alguns cenários ressalta a importância de se investir em procedimentos ou soluções que visam incrementar não só as operações de pouso, mas também as decolagens.

Esse estudo permitiu concluir que a redução da distância de captura impacta, significativamente, no aumento da capacidade de pista. Essa observação representa um ganho em relação ao estudo de Almeida (2012), respondendo algumas questões do trabalho em que apresentava limitações de aumento de capacidade mesmo com redução de separação entre aeronaves no seguimento final de aproximação.

No caso de uma implantação real as premissas adotadas para a construção dos cenários deverão ser levadas em consideração para uma análise da segurança e a eficiência dos procedimentos. Ou seja, deve ser considerado(a): a topografia e obstáculos do terreno entorno do aeródromo; a viabilidade para a construção de infraestrutura mínima necessária a realização dos procedimentos; o risco de aumento de demanda com perfil de frota diferente do atual; o desempenho das aeronaves e capacidade de executar os procedimentos com conforto para os

passageiros; a possível utilização das cabeceiras 27L/27R; a estratégia de não otimizada de decolagem e sequenciamento.

Alguns dos pontos que devem ser observados são: a existência de obstáculos que venham a interferir nas possíveis rampas de aproximação; a infraestrutura mínima para realização do procedimento; o mix de aeronaves; o desempenho das aeronaves; a situação de inversão de cabeceira; e a carga de trabalho do controlador.

Conclui-se que as propostas de procedimento IMC apresentaram, no geral, aumento das operações de pouso, mas reduziram as operações de decolagem. Com exceção do procedimento em condições VMC, que proporcionou o aumento significativo de ambas as operações. Sendo assim procedimentos que proporcionam algum benefício a operações em pistas paralelas e próximas.

O estudo pode ser complementado com pesquisas em diversas áreas como, por exemplo:

- Segurança de procedimentos;
- Carga de trabalho para o ATC;
- Avaliação econômica;
- Procedimentos de decolagem; e
- Esteira de turbulência.

A principal carência do trabalho está na análise de segurança dos procedimentos, já que esse é o ponto mais relevante em tráfego aéreo, como preconiza a ICAO. O procedimento não basta aumentar a eficiência do fluxo, mas em primeiro lugar deve manter a segurança da operação, por isso estudos devem analisar o risco de cada tipo de procedimento paralelo a fim de homologar ou não a operação.

Outra necessidade e objeto de estudo é a carga de trabalho do controlador. Cada modo de operação irá exigir um grau de atenção maior ou menor do controle, essa complexidade ATC

deve ser avaliada a fim de verificar a necessidade de alguma ferramenta de auxílio a decisão ou ainda a exequibilidade sob o ponto de vista do serviço de controle.

Sob a ótica econômica deve-se entender os benefícios, custos e riscos de cada solução, não somente dos novos procedimentos, a fim de verificar a viabilidade financeira e econômica de diferentes soluções para o aumento da capacidade de pistas paralelas e próximas onde existam limitações físicas para ampliação do aeródromo.

Destacando-se a limitação do trabalho sobre não visar operações de decolagem, surge uma proposta que complementa o estudo de aumento de capacidade de pistas paralelas e próximas, que seria exatamente o aumento de decolagens nessa mesma configuração de pistas. Essa pesquisa poderia concluir qual o potencial de novos procedimentos para o incremento da capacidade de pistas.

Possibilitando a continuidade de estudos na área de forma mais abrangente, propõe-se ainda estudos de esteira de turbulência. Tal assunto possui uma vasta literatura e interesse na comunidade de pesquisa. Monitoramento e análises da esteira de turbulência podem ajudar a entender seu comportamento e características, que por sua vez influenciam na separação entre aeronaves.

REFERÊNCIAS

ACI [1], AIRPORTS COUNCIL INTERNACIONAL. Worldwide Airport Traffic Summary. **ACI**. Disponivel em: http://www.aci.aero/Data-Centre/Monthly-Traffic-Data/Worldwide-Airport-Traffic-Summary. Acesso em: 07 maio 2014.

ACI [2], AIRPORTS COUNCIL INTERNACIONAL. ACI Media Releases. **ACI**. Disponivel em: http://www.aci.aero/News/Releases/Most-Recent>. Acesso em: 07 maio 2014.

ACI, AIRPORTS COUNCIL INTERNACIONAL. **2012 World Airport Traffic Report**. ACI. Montreal. 2013.

AISWEB. Cartas Aeronáuticas. **AIS, Serviço de Informação Aeronáutica**. Disponivel em: http://www.aisweb.aer.mil.br/?i=cartas&filtro=1&nova=1. Acesso em: 13 dezembro 2013.

ALMEIDA, R. D. A. **Análise de alternativas para aumento da capacidade operacional do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 2012.

ANAC, AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil - RBAC nº 154. [S.l.]: [s.n.], 2009.

airport.com/Airport/ATL/ATL_FactSheet.aspx>. Acesso em: 20 Maio 2014.

BOESEL, J. et al. **TAAM Best Practices Guidelines**. [S.l.]. 2001.

BURNHAM, D. C.; HALLOCK, J. N.; GREENE, G. C. Increasing Airport Capacity with Modified IFR Approach Procedure for Close-Spaced Parallel Runways. **Air Traffic Ouarterly**, v. 9(1), p. 45-58, 2001.

BURNHAM, D. C.; HALLOCK, J. N.; GREENE, G. C. Wake Turbulence Limits on Paires Approaches to Parallel Runways. **Journal of Aircraft**, v. 39, No. 4, p. 630-637, 2002.

CGNA, CENTRO DE GERENCIAMENTO DA NAVEGAÇÃO AÉREA. Aeroportos.

Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Disponivel em:

http://www.cgna.gov.br/?page_id=8. Acesso em: 11 junho 2014.

CGNA, CENTRO DE GERENCIAMENTO DE NAVEGAÇÃO AÉREA. **SETA Millennium**.

DECEA, DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Tráfego Aéreo - Sistema de Gerenciamento de Torres de Controle de Aeródromo**. [S.l.]: Comando da Aeronáutica - DECEA, 2004.

DECEA, DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Tráfego Aéreo - Separação Radar Mínima de 3NM Entre Aeronaves - CITRAF 100-6**. [S.l.]: Comando da Aeronáutica, 2007.

DECEA, DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **MCA 100-14 Capacidade do sistema de pistas**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

DECEA, DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. AIS - Serviço de Informação Aeronáutica, 2012. Disponivel em:

http://servicos.decea.gov.br/arquivos/ais/cartas/emendas/20120823/sbgr_adc_adc_20100603.pdf?CFID=14880b2a-ce90-4fb4-adfc-89c66b63255a&CFTOKEN=0>. Acesso em: 22 Junho 2012.

DECEA, DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. ICA 100-37 Serviços de Tráfego Aéreo. [S.l.]. 2013.

FAA, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Advisory Circulars 150/5060-5 Airport Capacity and Delay.** [S.l.]: [s.n.], 1983.

FAA, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **8260.49A CHG1 - Simultaneous Offset Instrument Approach (SOIA)**. [S.l.]: [s.n.], 2012.

FRAGA, R.; MÜLLER, C.; ALVES, C. J. P. Evaluation of a PRM/SOIA Approach Procedure at São Paulo Internacional Airport. **Aerlines**, n. 51, 2011.

FRAPORT AIRPORT SERVICES WORLDWIDE. Frankfurt Airport Capacity

Enhancement Program The Role of Wake Vortex Reducing Measures. [S.l.]: [s.n.]. 2004.

GOOGLE EARTH, 2012. Disponivel em: <Google Earth>. Acesso em: 23 outubro 2012.

GOOGLE EARTH, 2013. Disponivel em: <Google Earth>. Acesso em: 07 maio 2014.

HORONJEFF, R.; MCKELVEY, F.; SPROULE, W. **Planning and Design of Airports**. 5th. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2010.

ICAO, INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR) - doc 9643**. First. ed. [S.l.]: [s.n.], 2004.

ICAO, INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Doc 8168 - Aircraft Operations**. 5th. ed. [S.l.]: [s.n.], v. I - Flight Procedures, 2006.

ICAO, INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Doc 4444 - Air Traffic Management**. 15th. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007.

ICAO, INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Annex 14 -

Aerodromes. 5th. ed. [S.l.]: [s.n.], v. I - Aerodrome Design and Operations, 2009.

ICEA, INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. Sistema de geração e disponibilização de informações climatológicas. **Banco de dados climatológicos**. Disponivel em: http://clima.icea.gov.br/clima/RelVelDirVento_MesesSeguidos.php>. Acesso em: 25 Abril 2014.

INFRAERO. Anuário Estatístico 2012. [S.l.]. 2013.

JANIC, M. Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures. **Transportation Research Part C**, 16, 2008. 704-730.

JEPPESEN. Who we are. Disponivel em: http://ww1.jeppesen.com/company/about/who-we-are.jsp. Acesso em: 14 Outubro 2012.

NASA, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Air Traffic and Operacional Data on Selected U.S. Airports With Parallel Runways. [S.l.]. 1998.

NASA, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Airport Design. **NASA Virtual Skies**. Disponivel em:

http://virtualskies.arc.nasa.gov/airport design/5.html>. Acesso em: 21 Maio 2014.

OGATA, P. H. Avaliação do perigo de colisão entre aeronaves em operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas, São Paulo, Dissertação de mestrado, 2003.

PEGDEN, C. D.; SANDOWSKI, R. P.; SHANNON, R. E. Introduction to Simulation Using SIMAN. 2nd. ed. [S.l.]: McGraw-Hil, Inc., 1995.

REASON FOUNDATION. **Increasing Airport Capacity Without Increasing Airport Size**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

SUBRAMANIAN, P. A Simulation Study to Investigate Runway Capacity Using TAAM. Daytona Beach: Embry-Riddle Aeronautical University, 2002.

TRB, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **ACRP**, **Report 79 - Evaluating Airfield Capacity**. Washington, D.C. 2012.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Summary Results from Long-Term Wake Turbulence Measurements at San Francisco International Airport. [S.l.]: [s.n.], 2004.

WALD, A.; FAY, C.; GLEICH, R. **Introduction to Aviation Management**. [S.l.]: LIT Verlag Münster, 2010.

APÊNDICE A - RANKING DOS AEROPORTOS COM MAIOR NÚMERO DE MOVIMENTOS DE AERONAVES NO MUNDO EM 2012 E SUAS CONFIGURAÇÕES DE PISTAS

Aeroporto	Código ICAO	Movimentos	Variação (%)	Qtd pistas	//Próx.	//Inter.	//Dist.	Outras
Atlanta/Hartsfield-Jackson Internacional Airport	KATL	930 310	7,0	5	2			1
Chicago O'Hare Internacional Airport	KORD	878 108	-0,1	8	•		3	2
Los Angeles Internacional Airport	KLAX	698 619	9,0-	4	2			·
Dallas-Fort Worth Internacional Airport	KDFW	650 124	5,0	7	2	1	2*	•
Denver Internacional Airport	KDEN	612 567	-2,6	9	•	1	1	2
Beijing Capital Internacional Airport	ZBAA	557 160	4,5	3			1	1
Charlotte Dougla Internacional Airport	KCLT	552 093	2,3	4	,		*	1
Las Vegas McCarren Internacional Airport	KLAS	527 739	-0,7	4	2			,
Houston Internacional Airport	KIAH	502 677	-2,8	5	П		1	1
Paris/Charles De Gaulle Internacional Airport	LFPG	497 763	-3,2	4	2		•	•

Fonte: ACI [3] (2013) adaptado pelo autor

Obs: Contagem realizada em pares de pistas paralelas próximas "//Próx." (< 760 m), paralelas intermediárias "//Inter." (760 m – 1310 m) e paralelas distantes "//Dist." (≥ 1310 m).

Variação é apresentada em relação ao ano anterior.

^{*}sendo 1 par e mais uma única pista (17L/35R distante do par 17C/35C e 17R/35L).

^{**}Nesse caso são 3 pistas paralelas.

APÊNDICE B - PLANOS DE VOO BASE

VOO	TIPO	ORIGEM	DESTINO	ETD	ETA	NÍVEL
GLO1858	B738	SBGR	SBPA	19,20:00	19,21:15	360
ONE6260	A319	SBGR	SBFL	19,20:02	19,20:50	320
GLO2075	B737	SBGO	SBGR	19,18:46	19,20:03	350
AZU5022	E190	SBGR	SBBR	19,20:05	19,21:20	330
TAM3612	A320	SBGR	SBPS	19,20:08	19,21:40	340
ONE6315	A320	SBSV	SBGR	19,18:10	19,20:09	350
GLO1829	B737	SBFZ	SBGR	19,16:58	19,20:09	360
GLO1895	B738	SBCG	SBGR	19,18:45	19,20:10	370
TAM3507	A321	SBGR	SBPA	19,20:11	19,21:24	380
DLH505	A343	SBGR	EDDM	19,20:14	20,08:21	410
KLM791	B77W	EHAM	SBGR	19,08:51	19,20:16	400
GLO1345	B737	SBUL	SBGR	19,19:27	19,20:18	270
AZU5008	E190	SBGR	SBPA	19,20:18	19,21:31	340
TIB5321	E190	SBCT	SBGR	19,19:40	19,20:20	350
TAM8072	A320	SBGR	SCEL	19,20:21	19,23:43	380
ONE6188	A319	SBGR	SBBR	19,20:23	19,21:38	330
GLO2056	B737	SBGR	SBCY	19,20:24	19,22:17	340
TAM3547	A320	SBGL	SBGR	19,19:49	19,20:25	300
TAM3516	A320	SBGR	SBRF	19,20:27	19,23:12	370
GLO7601	B738	SLVR	SBGR	19,17:50	19,20:28	370
IBE6821	A343	LEMD	SBGR	19,10:14	19,20:29	400
TAM3337	A320	SBGR	SBCT	19,20:30	19,21:06	320
AFR456	B772	LFPG	SBGR	19,09:35	19,20:32	400
ONE9179	F100	SBCH	SBGR	19,19:21	19,20:33	290
GLO1746	B738	SBGR	SBGL	19,20:34	19,21:10	300
AZU5015	E190	SBPA	SBGR	19,19:19	19,20:34	370
GLO1711	B738	SBRJ	SBGR	19,19:58	19,20:36	300
ARE3506	B763	SBGR	SKBO	19,20:36	20,01:52	380
GLO1242	B738	SBGR	SBNT	19,20:40	19,23:48	370
GLO7453	B738	SAEZ	SBGR	19,18:21	19,20:43	350
TAM3588	A320	SBGR	SBGO	19,20:44	19,21:54	360
TIB5323	AT72	SBIP	SBGR	19,19:14	19,20:45	240
TAM8027	B77W	SCEL	SBGR	19,17:33	19,20:47	390
GLO2085	B738	SBRF	SBGR	19,17:56	19,20:49	360
GLO2094	B738	SBGR	SBCG	19,20:51	19,22:08	360
TAM8005	A320	SABE	SBGR	19,18:35	19,20:51	370
GLO1842	B737	SBGR	SBMO	19,20:54	19,23:34	370
TAM3326	A320	SBGR	SBCF	19,20:57	19,21:43	270
SAA223	A332	SBGR	FAOR	19,21:00	20,05:58	410

voo	TIPO	ORIGEM	DESTINO	ETD	ETA	NÍVEL
TAM3639	A319	SBCY	SBGR	19,19:01	19,21:01	370
WHT4381	B77L	SBGR	FGBT	19,21:02	20,04:58	370
GLO1784	B737	SBGR	SBGO	19,21:05	19,22:17	340
ONE6386	F100	SBGR	SBCY	19,21:07	19,23:03	300
GLO1269	B738	SBFL	SBGR	19,20:20	19,21:09	370
QTR921	B77L	SBGR	SAEZ	19,21:11	19,23:17	340
GLO7683	B738	SABE	SBGR	19,18:51	19,21:13	370
TAM3662	A320	SBGR	SBSV	19,21:14	19,23:13	390
GLO1734	B737	SBGR	SBNF	19,21:16	19,22:02	280
TAM3321	A320	SBSL	SBGR	19,18:15	19,21:18	390
LAN753	A320	SBGR	SCEL	19,21:19	20,00:41	380
TAM3113	A320	SBGR	SBFL	19,21:21	19,22:09	280
ONE6310	A320	SBGR	SBSV	19,21:23	19,23:22	390
GLO2066	B737	SBGR	SBVT	19,21:26	19,22:35	370
TAM3742	A320	SBGR	SBFZ	19,21:28	20,00:32	370
TAM3555	A319	SBBE	SBGR	19,18:18	19,21:28	390
TAM3510	A320	SBGR	SBGL	19,21:31	19,22:07	280
GLO1875	B738	SBCY	SBGR	19,19:29	19,21:31	370
TAM3397	A320	SBRP	SBGR	19,20:58	19,21:33	240
THY15	B77W	SBGR	SAEZ	19,21:36	19,23:45	380
TIB5617	E190	SBRJ	SBGR	19,20:59	19,21:36	280
TAM3493	A319	SBSR	SBGR	19,20:52	19,21:38	220
GLO7684	B738	SBGR	SABE	19,21:39	19,23:58	360
TIB5477	E190	SBCF	SBGR	19,20:54	19,21:41	280
ONE6152	A319	SBGR	SBGL	19,21:42	19,22:18	290
PTB2265	AT72	SBRP	SBGR	19,20:51	19,21:43	190
TIB5248	AT72	SBGR	SBAU	19,21:44	19,22:52	180
TAM3879	A321	SBFZ	SBGR	19,18:39	19,21:46	380
TAM3155	A321	SBSV	SBGR	19,19:46	19,21:46	360
GLO1774	B738	SBVT	SBGR	19,20:40	19,21:48	360
TAM3357	A320	SBJP	SBGR	19,18:58	19,21:52	380
SWR93	A343	SBGR	LSZH	19,21:55	20,09:44	410
ONE6325	A319	SBRF	SBGR	19,19:09	19,21:55	380
TIB5247	AT72	SBBH	SBGR	19,20:46	19,21:58	240
TAM3593	A320	SBCG	SBGR	19,20:35	19,21:59	370
TAM3311	A321	SBNT	SBGR	19,18:58	19,21:59	380
GLO1750	B738	SBGR	SBGL	19,22:01	19,22:37	300
AUT2244	E190	SABE	SBGR	19,19:45	19,22:01	370
GLO2089	B738	SBBR	SBGR	19,20:47	19,22:02	360

VOO	TIPO	ORIGEM	DESTINO	ETD	ETA	NÍVEL
GLO1289	B738	SBRF	SBGR	19,19:11	19,22:04	360
GLO1288	B738	SBGR	SBRF	19,22:04	20,00:57	370
GLO2058	B738	SBGL	SBGR	19,21:29	19,22:06	300
GLO2014	B737RJ	SBGR	SBRJ	19,22:07	19,22:45	360
AZU6921	E190	SBGR	SBCT	19,22:08	19,22:43	390
GLO2095	B738	SBNT	SBGR	19,19:02	19,22:08	360
ARE3505	B763	SKBO	SBGR	19,16:45	19,22:09	370
DLH507	B744	SBGR	EDDF	19,22:11	20,09:31	390
TAM8095	B77W	KMIA	SBGR	19,14:28	19,22:17	390
TAM3386	A320	SBGR	SBBE	19,22:18	20,01:26	380
GLO1860	B738	SBGR	SBPA	19,22:20	19,23:35	360
TAM8008	A320	SBGR	SABE	19,22:21	20,00:35	380
TIB5470	E190	SBGR	SBCY	19,22:23	20,00:14	380
GLO1713	B738	SBRJ	SBGR	19,21:46	19,22:24	300
GLO1931	B738	SBCT	SBGR	19,21:44	19,22:24	310
TAM3580	A319	SBGR	SBBR	19,22:25	19,23:40	360
AZU5023	E190	SBBR	SBGR	19,21:11	19,22:25	350
GLO1169	B738	SBSV	SBGR	19,20:24	19,22:27	360
GLO9274	B738	SBGR	SBCF	19,22:28	19,23:16	310
TIB5642	AT72	SBGR	SBBH	19,22:29	19,23:39	250
GLO2017	B738	SBCF	SBGR	19,21:39	19,22:29	340
TAM8041	A320	SUMU	SBGR	19,20:26	19,22:32	370
GLO1861	B738	SBPA	SBGR	19,21:16	19,22:32	350
TAM8067	A330	SPIM	SBGR	19,18:14	19,22:34	390
TAM3587	A320	SBBR	SBGR	19,21:22	19,22:34	320
TIB5616	E190	SBGR	SBRJ	19,22:36	19,23:13	320
TAM3637	A321	SBMO	SBGR	19,20:02	19,22:37	380
GLO2012	B737RJ	SBGR	SBRJ	19,22:38	19,23:16	360
PTB2224	AT72	SBGR	SBQV	19,22:40	20,01:07	250
IBE6820	A343	SBGR	LEMD	19,22:43	20,08:56	390
TAM3336	A320	SBCT	SBGR	19,22:06	19,22:45	330
ONE6128	F100	SBGR	SBPA	19,22:46	20,00:04	300
FAB2005	E120	SBSP	SBGR	19,22:31	19,22:47	50
KLM792	B77W	SBGR	EHAM	19,22:48	20,10:11	390
TAM3375	A320	SBVT	SBGR	19,21:45	19,22:49	380
TAP086	A343	SBGR	LPPT	19,22:51	20,08:32	390
GLO1787	B737	SBGO	SBGR	19,21:35	19,22:53	370
TIB5476	E190	SBGR	SBCF	19,22:54	19,23:40	310
UAL860	B772	SBGL	SBGR	19,22:19	19,22:55	300

VOO	TIPO	ORIGEM	DESTINO	ETD	ETA	NÍVEL
GLO1828	B738	SBGR	SBFZ	19,22:57	20,02:07	370
GLO9228	B738	SBGL	SBGR	19,22:21	19,22:58	300

ANEXO A - MATRIZ PARA ESCOLHA DO NÍVEL DE MODELAGEM

low much time/budget is there?		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Leve
	Hours/<\$5k					
	Days/<\$25k	-	-	-	_	
	Weeks/<\$50k Months/\$100k+	-	-	-	-	-
/hat is the number of the samesity analysis?	MOTUTS/3 TOOK+					
hat is the purpose of the capacity analysis?						
Airfield changes:	To analyze a capacity change	_	_	_	_	_
Air field Changes:	New runway	•	•	-	•	
	New taxiway/apron/gates					
	Runway crossings and incursions Navigational aid critical areas					
	Effects of airport traffic control towers					
Airspace changes:	Changes in flight procedures			-	-	
An space changes	Noise abatement procedures			_		
	In-trail terminal airspace restrictions					
	Multiple approach procedures					
	Changes in ATC rules and separations					
	ATC workload and human factors					
	NextGen benefits of reduced aircraft separations			_	_	
	and new airspace procedures					
Aircraft changes:	Aircraft fleet mix and stage length changes					
	To estimate aircraft delay					
	To estimate ASV/hourly capacity					
	To compare with hourly demand					
	To benchmark with other airports					
	To evaluate flight schedules					
	To compare alternative airfield facility or procedural					
	improvements			_	_	
	To provide data for follow-on environmental studies					
	To provide proof-of-concept testing					
	To provide information to educate elected officials,					
	the general public, or other stakeholders	_	_			
Vhat data are avaliable?						
Airfield data:	Runway use/assignments					
rii nela autu.	Runway layout					
	Runway exit locations	_	-			
	Runway dependencies		_			
	AROT					
	DROT					
	Airfield layout in AutoCAD					
Aircraft data:	Percent arrivals					
	Mix index					
	Flight schedule					
	Fleet mix					
	Final approach speeds					
Airspace data:	Departure-departure separations					
	Departure-departure separations					
	Departure flight tracks					
	Capture distance					
	Arrival-departure separations					
	Arrival-arrival separations					
	Arrival-arrival separations					
	Arrival flight tracks					
/hat factors do you need to capture?						
	Geometry					
	Effect of runway exit taxiway location					
	, 100 to					
	Supporting taxiways					
	Departure queue sequencing					
	Runway crossings					
	Parallel taxiway					
	·					
	Aircraft performance					
	Effect of runway occupancy time					
	Runway use					
	Runway-specific fleet mix (due to noise or length)					
	Multiple approach technology					
	Airspace					
	Departure fix restrictions					
	Limited departure headings					
What degree of public scrutiny or challenge						
vill the results of your study receive from	Public scrutiny					
	Public scrutiny Little or no scrutiny or challenge					
vill the results of your study receive from	Public scrutiny		•			

Fonte: (TRB, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2012)

ANEXO B – AEROPORTOS AMERICANOS COM PISTAS PARALELAS

Pistas paralelas distant	es (≥ 4 300 ft	entre eixos)
Aeroporto	Pistas	Espaçamento
Atlanta (ATL)	26L/27R	4 300 ft+
Baltimore (BWI)	15L/15R	4 300 ft+
Charlotte (CLT)	18L/18R	4 300 ft+
Chicago O'Hare (ORD)	4L/4R	4 300 ft+
	9L/9R	4 300 ft+
	14L/14R	4 300 ft+
Cincinnati (CVG)	18L/18R	4 300 ft+
Dallas – Fort Worth (DFW)	18L/17R	5 000 ft+
	17L/17C	5 000 ft+
Denver (DEN)	35L/35R	5 000 ft+
	34/35L	5 000 ft+
	25/26	5 000 ft+
Detroit (DTW)	21L/21R	4 300 ft+
	27L/27R	4 300 ft+
Dulles (IAD)	1L/1R	4 300 ft+
Honolulu (HNL)	8L/8R	4 300 ft+
Houston (IAH)	26/27	4 300 ft+
Indianapolis (IND)	23L/23R	4 300 ft+
Kansas City (MCI)	1L/1R	4 300 ft+
Kennedy (JFK)	31L/31R	4 300 ft+
Los Angeles (LAX)	24L/25R	4 300 ft+
Memphis (MEM)	18L/18R	4 300 ft+
Miami (MIA)	9L/9R	4 300 ft+
Nashville (BNA)	2C/2R	4 300 ft+
Orlando (MCO)	18R/17	4 300 ft+
Pittsburgh (PIT)	28R/28C	4 300 ft+
Salt Lake City (SLC)	16L/16R	4 300 ft+
Tampa (TPA)	18L/18R	4 300 ft+

Pistas paralelas intermediárias (2 500 ≤ dist. er	ntre eixos < 4 300 ft)
Aeroporto	Pistas	Espaçamento
Fort Lauderdale (FLL)	9L/9R	4 000 ft
Detroit (DTW)	21L/21C	3 800 ft
Phoenix (PHX)	26L/26R	3 565 ft
Memphis (MEM)	36L/36R	3 400 ft
Raleigh-Durham (RDU)	5L/5R	3 400 ft
Minneapolis (MSP)	30L/30R	3 380 ft
Salt Lake City (SLC)	16L/17	3 200 ft
Portland (PDX)	10L/10R	3 100 ft
Dallas – Love (DAL)	13L/13R	3 000 ft
Kennedy (JFK)	4L/4R	3 000 ft

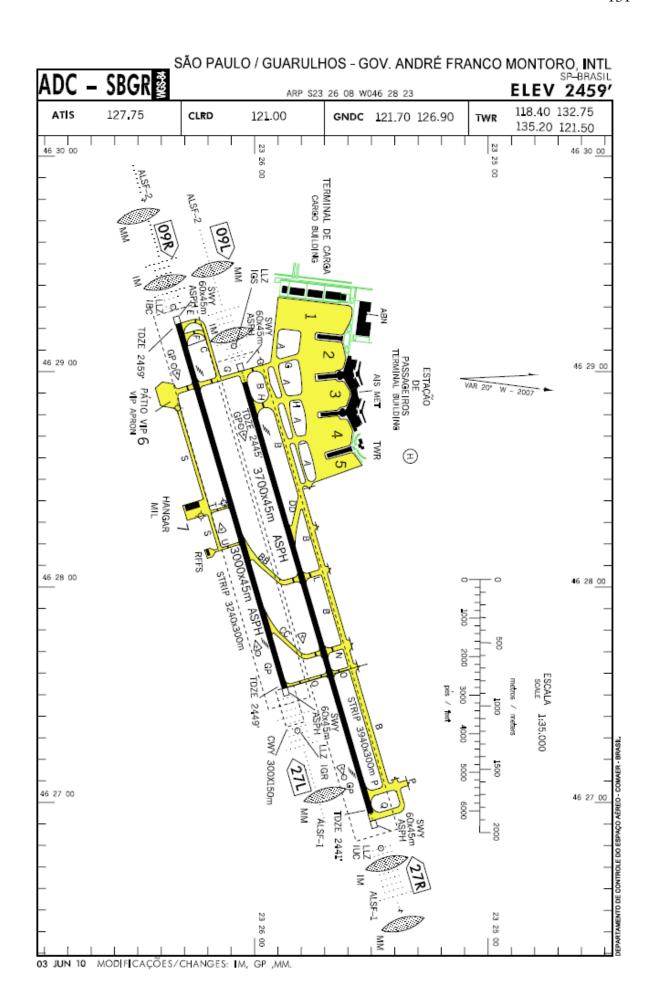
Pistas paralelas próximas	(dist. entre ei	$ixos \le 2500 \text{ ft}$
Aeroporto	Pistas	Espaçamento
Detroit (DTW)	21C/21R	2 000 ft
Orlando (MCO)	18L/18R	1 500 ft
Boston (BOS)	4L/4R	1 500 ft
Philadelphia (PHL)	27L/27R	1 400 ft
St. Louis (STL)	30L/30R	1 300 ft
Dallas – Fort Worth (DFW)	17C/17R	1 200 ft
	18L/18R	1 200 ft
Pittsburgh (PIT)	28C/28L	1 200 ft
Atlanta (ATL)	8L/8R	1 000 ft
	9L/9R	1 000 ft
Houston (IAH)	14L/14R	1 000 ft
Las Vegas (LAS)	25L/25R	1 000 ft
Oakland (OAK)	27L/27R	1 000 ft
Memphis (MEM)	36C/36R	926 ft
Chicago-Midway (MDW)	4L/4R	920 ft

Pistas paralelas próximas	(dist. entre ei	$ixos \le 2 500 \text{ ft}$
Aeroporto	Pistas	Espaçamento
Newark (EWR)	4L/4R	900 ft
San Antonio (SAT)	12L/12R	900 ft
Las Vegas (LAS)	19L/19R	860 ft
Houston – Hobby (HOU)	12L/12R	800 ft
Seattle (SEA)	16L/16R	800 ft
Chicago-Midway (MDW)	13L/13C	775 ft
San Francisco (SFO)	1L/1R	750 ft
	28L/28R	750 ft
Los Angeles (LAX)	25L/25R	700 ft
	24L/24R	700 ft
Ontario (ONT)	8L/8R	700 ft
San Jose (SJC)	12L/12R	700 ft
	12R/11	700 ft
Cleveland (CLE)	5L/5R	450 ft

Fonte: (NASA, 1998)

Obs: Vale ressaltar que esses dados foram obtidos do relatório de 1998, "Air Traffic and Operational Data on Selected U.S. Airports With Parallel Runways", da NASA.

ANEXO C - CARTA ADC - SBGR



ADC - SBGR: INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES/COMPLEMENTARY INFORMATION

	PISTA				DIM	ENSÕES(r	ml				711	PO DE 61	JPERFÍCIE
	RUNWAY					ENSIONS(m				PCN		SURFACE	
RWY	BRG MAG	Tipo Type	RCD	RWY	SWY	CWY	STRIP	RESA		RWY	R	WY	SWY
а	b	с	d	e	f	g	h	i		i		k	
09R	093	PA-2	4		60X45	300X 1 50	3240			PCN			A COM
27L	273	PA_I	4	3000X45	60X45		X 300		85/	F/B/W/T	AS	PH	ASPH ASPH
09L	093	PA-2	4		60X 4 5		3940			PCN			ASPH
27R	273	PA=2	4	3700X 4 5	60X 4 5		300		85/	F/B/W/T	AS	SPH	ASPH
		DIS	TÂNCI	AS DECL/	ARADAS,	AUXÍLIO	S VISUAL	S E COC	DRDEN	ADAS DAS CA	ABECEIRA	\s	
RW	Y TOR	A(m)	ASDA(LDA(m)		IOS / AI		ALTURA GEO	DIDAL(m)	COC	ORDENADAS ORDINATES
098	30	00	3060	3	300	3000	PAP	ALS	CAT2	- 2,34	T	\$23 26	20 W046 29 1
271			3060	30	000	3000	PAPI	ALS	CATI	- 2,35		S23 25	52 W046 27 3
09L	. 37	00	3760	3	700	3610	PAPI (2.97	(+) ALS	CAT2	- 2,34		\$23 26	03 W046 29 0
27F	37	00	3760	3	700	3640	PAPI	ALS	CAT2	- 2,36		\$23 25	30 W046 26 5
	s	ERVIÇO	DE S	SALVAME	NTO E (CONTRA -	- INCÊNI	OO / RE	SCUE A	ND FIRE FIGHTI	NG SERVIC	E: RFFS C	CAT - 9
RWY	09R / 27	'L											
	•-	~ .											
	Sinaliza	ao hoi	izonial	/ Marking	Aids								
	Sinaliza			-							-/	الـــــــــــــــــــــــــــــــــــــ	
			_	==		_		ii .	<u></u>	<u> </u>	<u> </u>		
		lumino	sos /	Lighting A	ds								
	Auxilios	lumino 	sos /	Lighting Al	ds					· =			
	Auxilios	lumino 	ssos /	Lighting Al	ds Profile			<u> </u>	11	•	<u> </u>	<u></u>	
	Auxilios	lumino 	sos /	Lighting Al	ds Profile 2457'	2459		2459		•	<u> </u>	<u></u>	444°
Buov	Aux i lios Perfil o	lumino ngitudir 2450	sos /	Lighting Al	ds Profile 2457'	2459		2459		•		<u></u>	444*
RWY	Auxilios	lumino ngitudir 2450	sos /	Lighting Al	ds Profile 2457'	2459		2459		•	<u> </u>	<u></u>	444°
RWY	Auxilios Perfil lo	lumino ngitudir 2450	osos /	Lighting Al	ds Profile 2457' 290 :	2459		2459		•	<u> </u>	<u></u>	444° -
RWY	Auxilios Perfil lo 09L / 27 Sinalizaçã	lumino lu	pros /	Lighting Al	ds Profile 2457' 290 :	2459		2459		•	<u> </u>	<u></u>	444°
RWY	Auxilios Perfil o	lumino ngirudir 2450 R	esos / Ligarian de la contela	Lighting Alderson Marking	Profile 2457 290 :	2459'	798 m –	2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	444°
RWY	Auxilios Perfil o	lumino ngirudir 2450 R	esos / Ligarian de la contela	Lighting Alderson Marking	Profile 2457 290 :	2459'	798 m –	2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	444° +
RWY	Auxilios Perfil o	lumino ngirudir 2450 R	esos / Ligarian de la contela	Lighting Alderson Marking	Profile 2457 290 :	2459'		2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	444° +
	Auxilios Perfil o	Iumino ngirudir 2450 R io hori:	zontal	Lighting Alderson Marking	Profile 2457' 290 :	2459'	798 m –	2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	<u>¥</u> 0
	Auxilios Perfil o 09L / 27 Sinolização	Iumino ngirudir 2450 R io hori:	zontal	Lighting Alderson Marking	Profile 2457' 290 :	2459'	798 m –	2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	2441°
	Auxilios Perfil long Perfil long 2445	Iumino ngirudir 2450 R io hori:	zontal	Lighting Alderson Marking	Profile 2457' 290 :	2459'	798 m –	2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	<u>÷</u> ∆
	Auxilios Perfil o	Iumino ngirudir 2450 R io hori:	zontal	Lighting Alderson Marking	Profile 2457' 290 :	2459'	798 m –	2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	<u>¥</u> 0
	Auxilios Perfil lo 09L / 27 Sinolização Auxilios i Perfil long 2445	Iumino 1 2450 R io horiz uminos	tontal	Lighting Aldersongitudinal P	Profile 2457' 290 :	24599 m	798 m –	2459		2444 532 m	<u> </u>	<u></u>	<u>¥</u> 0
	Auxilios Perfil o 09L / 27 Sinolizos Auxilios o 2445 WK: 1)	iominos iominos iominos irudino GROOV	contol Los / Lon ED: RV PAPI	/ Marking Aid Shring Aid Marking Aid Shring Aid Sh	ds Profile 2457' 290 : Aids rofile (L; 09L/2 R: 63';	24.59° 24. 27R; TWY RWY 27L	798 m –	2459'	2864 m	2444 532 m	— 730 m	<u></u>	<u>¥</u> 0
	Auxilios Perfil o 09L / 27 Sinolizos Auxilios Perfil one 2445 This is a second of the control of the	inglitudina R io horiz irudina GROOV MEHT:	contol Lone PAPI RWY 0	Julighting Aldersong Itself and Aldersong Itself an	ds	24/59° m 24/27R; TWY RWY 27L	798 m –	2459'	2864 m	2444 532 m	— 730 m	2	<u>¥</u> 0
	Auxilios Perfil o 09L / 27 Sinolizosi Auxilios I Perfil ong 2445 WK: 1) 2) 3) 4)	Iuminos io horiz io horiz iiudino GROOV MEHT: TWY SI	contal / Lone ED: RV: PAPI RWY 0' ERRA,	Julighting Aldersong Itself and Aldersong Itself an	ds Profile 2457' 290 : Aids Cl; 09L/27R: 09L/27R: UNIFO	24/59° m 24/27R; TWY RWY 27L	798 m –	2459'	2864 m	2444 532 m	— 730 m	2	<u>¥</u> 0

Fonte: (DECEA, 2012)

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO CLASSIFICAÇÃO/TIPO DATA REGISTRO N° N° DE PÁGINAS DM 09 de dezembro de 2014 DCTA/ITA/DM-069/2014 132 TÍTULO E SUBTÍTULO: Aumento da capacidade de pistas paralelas e próximas; um estudo de caso do Aeroporto Internacional de Guarulhos AUTOR(ES): Rafael de Araújo almeida 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Capacidade de pista; Pistas paralelas e próximas; Simulação; Transporte aéreo. 9.PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Aeroportos; Pistas (de pouso e decolagem); Infraestrutura (transporte); Controle de tráfego aéreo; Capacidade do sistema de guiamento; Transportes. ^{10.} APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Área de Transporte Aéreo e Aeroportos. Orientador: Prof. Dr. Carlos Müller Defesa em 04/12/2014. Publicada em 2014. 11. RESUMO: O aumento da capacidade pistas dos aeródromos congestionados é uma necessidade que pode ser suprida

usando pistas paralelas de forma mais eficiente. Existem diversas limitações quando se trata do incremento de capacidade de pista paralelas, essas dificuldades agravam-se quando a configuração das pistas são próximas devido a interferência da esteira de turbulência nas operações da pista adjacente. Diante disso, o desafio de superar a restrição dos procedimentos de aproximação devido aos vórtices gerados pelas aeronaves motiva o estudo de alternativas para operações de pouso na configuração de pista paralela e próxima de forma mais eficiente. Com base nesse objetivo são analisadas capacidades de pista sob diversos cenários em simulação computacional, em que o *software* TAAM (*Total Airspace and Airport Modeller*) foi utilizado. Os cenários propostos abrangem operações regulamentadas e outras inovadoras, tais como SGAP (*Staggered Approach Procedure*) e SEAP (*Steeper Approach Procedure*), de forma a permitir aproximações simultâneas ou ainda reduções das separações longitudinais entre aeronaves nas aproximações para pouso. Verificou-se que melhorias tecnológicas no cenário atual poderiam aumentar em 17% a quantidade de movimentos, o procedimento SEAP levaria a um aumento de 22% de operações, além de procedimentos visuais que chegam a incrementar em 39% os movimentos de pouso.

GRAU DE SIGILO:			
(X) OSTENSIVO	() RESERVADO	() CONFIDENCIAL	() SECRETO