

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Francisco Vinícius Oliveira Alves

**Avaliação da Capacidade de Sistemas com
Duas Pistas de Pouso e Decolagem: Proposta
de Extensão do Modelo ACRP 79**

Trabalho de Graduação

2019

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Francisco Vinícius Oliveira Alves

**Avaliação da Capacidade de Sistemas com
Duas Pistas de Pouso e Decolagem: Proposta
de Extensão do Modelo ACRP 79**

Orientador: Professor Doutor Evandro José da Silva

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Alves, Francisco Vinícius Oliveira

Avaliação da Capacidade de Sistemas com Duas Pistas de Pouso e Decolagem: Proposta de Extensão do Modelo ACRP 79 / Francisco Vinícius Oliveira Alves.

São José dos Campos, 2019.

73f

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2019.
Orientador: Professor Doutor Evandro José da Silva

1. Capacidade de Pistas. 2. Planejamento Aeroportuário. 3. Modelo Computacional 4. ACRP 79. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, Francisco Vinícius Oliveira. **Avaliação da Capacidade de Sistemas com Duas Pistas de Pouso e Decolagem: Proposta de Extensão do Modelo ACRP 79**. 2019. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR : Francisco Vinícius Oiveira Alves

TÍTULO DO TRABALHO: Método computacional para determinação da capacidade de pistas duplas

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2019

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

Francisco Vinícius Oliveira Alves

Rua José Cobra, 360, Conjunto Residencial 31 de Março

12237-000, São José dos Campos - SP

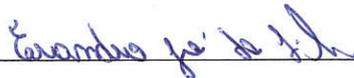
Avaliação da Capacidade de Sistemas com Duas Pistas de Pouso e Decolagem: Proposta de Extensão do Modelo ACRP 79

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Francisco Vinícius Oliveira Alves

Autor



Prof. Dr. Evandro José da Silva (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 28 de novembro de 2019

Dedico este trabalho a meus pais e irmã, à minha mulher e à minha filha, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho acadêmico.

Agradecimentos

Quero agradecer primeiramente a meus pais e irmã, que sempre me incentivaram e apoiaram não importa a estrada que eu escolhesse, nem quão difícil ela fosse. Agradeço a todos meus amigos que estiveram ao meu lado, em especial Gabriel Gama, Filipe Fimas, Daniel Studart, Levi Medeiros e Mateus Sombra, que tornaram a caminhada pelo ITA bem menos difícil.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Evandro, pelo apoio e disponibilidade oferecidos na realização deste trabalho, fornecendo *insights* e *feedbacks* construtivos.

Gostaria de agradecer ainda a todo o time da INFRAWAY Engenharia, pela preocupação, apoio e incentivo nesse ano de 2019.

Por fim, agradeço especialmente à minha mulher, Bruna, que me presenteou com meu maior presente e desafio, minha filha Elisa. Sem seu amor, esforço e dedicação durante meses, não seria possível concluir minha graduação. Agradeço por estar sempre ao meu lado, me apoiando incondicionalmente a realizar meus sonhos. Amo vocês, hoje e sempre.

*“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito.
Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser. Mas Graças a Deus, não
somos o que éramos”.*

(Martin Luther King)

Resumo

O aumento da demanda por voos no Brasil vem exigindo cada vez mais estudos acerca dos sistemas de pista de pouso e decolagem em aeroportos existentes ou planejados. Esses estudos, por sua vez, incluem o planejamento da capacidade aeroportuária, ou seja, a previsão da quantidade de operações que poderão acontecer no aeroporto no período de uma hora. No quesito de planejamento, dados de *input* operacionais devem ser estimados, ao invés de coletados, o que gera preocupação na precisão dos resultados do modelo. O presente Trabalho de Graduação visa discutir metodologias presentes na literatura, bem como propor alterações e melhorias para elas, dando foco aos casos de aeroportos com pistas duplas. Para isso, o método apresentado no ACRP 79 é expandido com Método dos Três Segmentos e a Simulação de Monte Carlo. Com essa expansão do modelo do ACRP 79, os *inputs* variam desde o tempo de ocupação na pista de pouso e decolagem até a sua geometria. A metodologia proposta foi posta em prática em três casos reais: Aeroporto Internacionais de Guarulhos (SBGR), Aeroporto Internacional de São Luís (SBSL) e Aeroporto Internacional de Manaus (SBEG). A capacidade encontrada foi então comparada com a capacidade declarada do aeródromo, disponibilizada pelo CGNA (Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea). Comparando os valores encontrados através da metodologia proposta e a capacidade de cada aeródromo, obteve-se, os seguintes erros relativos: 1,5%, 4% e 3,1% para SBGR, SBSL e SBEG. Com isso, conclui-se que as alterações e melhorias propostas estão condizentes com o observado na prática. Adicionalmente, a extensão proposta para o modelo do ACRP 79 adota *inputs* geométricos ao invés de operacionais, visando-se ganhos na precisão do modelo para o quesito de planejamento.

Abstract

The increasing demand for flights in Brazil has been requiring studies on runway systems at existing or planned airports. These studies include the planning of airport capacity, which means the prediction of the number of operations that are allowed at the airport within one hour. In the planning horizon, operational input data must be estimated, rather than collected, raising concerns on model results accuracy. This undergraduate work aims to discuss runway capacity planning methodologies addressed in the literature, as well as to propose improvements to them, focusing on airports that contain dual runways. For such purpose, the method presented in the ACRP 79 is extended with the *Three Segments Method* and the *Monte Carlo Simulation*. With such an extension of ACRP 79 model, the inputs change from runway occupancy time to runway geometry. The proposed methodology was put under examination in three real cases: International Airport of Guarulhos (SBGR); International Airport of São Luís (SBSL); and International Airport of Manaus (SBEG). The capacity found from the proposed model was then compared to the declared capacity of the aerodrome, made available by the CGNA (*Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea*). By comparing the results of the proposed methodology and the declared capacity of each aerodrome, the following relative errors were found: 1,5%, 4% and 3,1%, for SBGR, SBSL and SBEG, respectively. That being said, it is concluded that the alterations and improvements proposed are befitting with the observed in practice. Additionally, the proposed ACRP79 model extension adopts geometric inputs instead of operational inputs, with expected gains on model accuracy for the planning horizon.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Nível de saturação de aeroportos brasileiros. Fonte: Steer Davies Gleave (2016)	20
Figura 1.2 - Níveis de detalhamento para cada tipo de análise de capacidade da PPD. Fonte: TRB (2012) adaptado pelo autor	22
Figura 2.1 - Estimativas de capacidade aeroportuária para diversas configurações de pistas e mix de aeronaves. Fonte: FAA (1983)	24
Figura 2.2 - Diagrama espaço-tempo para PPD com operações mistas. Fonte Horonjeff (2010)	25
Figura 2.3 - Três segmentos durante o pouso. Fonte: ICAO (2005), adaptado pelo autor.....	26
Figura 2.4 - Relação entre velocidade e raio da saída. Fonte: ICAO (2005).....	27
Figura 2.5 - Relação entre distância e dependência das pistas. Fonte: TRB (2012)	28
Figura 2.6 - Cenários abordados no caso de pistas paralelas. Fonte: TRB (2012).....	29
Figura 2.7 - Cenários abordados no caso de pistas com direções diferentes. Fonte: TRB (2012)	29
Figura 2.8 - Grupos de aeronaves definidos. Fonte: TRB (2012)	30
Figura 2.9 - Distâncias mínimas entre pousos para cada categoria de aeronaves. Fonte: TRB (2012)	30
Figura 2.10 - Tempos mínimos entre decolagens para cada categoria de aeronaves. Fonte: TRB (2012).....	30

Figura 3.1 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria A.....	35
Figura 3.2 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria B.....	36
Figura 3.3 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria C.....	36
Figura 3.4 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria D.....	37
Figura 3.5 - Histograma da distribuição de S_1 para aeronaves categorias A e B.....	37
Figura 3.6 - Histograma da distribuição de S_1 para aeronaves categorias C e D.....	38
Figura 3.7 - Histograma da distribuição de a_{ex} para todas as categorias.....	38
Figura 3.8 - Histograma da distribuição de a_{dec}	41
Figura 3.9 - Fluxograma entre os métodos e os respectivos parâmetros obtidos a partir de cada um deles.....	42
Figura 3.10 - Dados inseridos (destacados em amarelo) na aba dos usuários do ACRP 79, para pistas paralelas. Fonte: TRB (2012) adaptado pelo autor.....	44
Figura 3.11 - Dados inseridos (destacados em amarelo) na aba dos usuários do ACRP 79, para pistas não paralelas. Fonte: TRB (2012) adaptado pelo autor.....	44
Figura 4.1 - Disposição de pistas de saídas relativas ao Aeroporto de Manaus (SBEG).....	46
Figura 4.2 - Disposição de pistas de saídas relativas à pista 09R/27L do Aeroporto de Guarulhos (SBGR).....	46
Figura 4.3 - Disposição de pistas de saídas relativas à pista 09L/27R do Aeroporto de Guarulhos (SBGR).....	47
Figura 4.4 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista de SBEG.....	47

Figura 4.5 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista de SBEG	48
Figura 4.6 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista de SBEG	48
Figura 4.7 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista de SBEG	49
Figura 4.8 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista 09R/27L de SBGR.....	49
Figura 4.9 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista 09R/27L de SBGR.....	50
Figura 4.10 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista 09R/27L de SBGR.....	50
Figura 4.11 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista 09R/27L de SBGR.....	51
Figura 4.12 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista 09L/27R de SBGR.....	51
Figura 4.13 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista 09L/27R de SBGR.....	52
Figura 4.14 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista 09L/27R de SBGR.....	52
Figura 4.15 -Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista 09L/27R de SBGR.....	53
Figura 4.16 - Disposição de pistas de acesso relativas ao Aeroporto de Palmas (SBPJ)	53

Figura 4.17 - Disposição de pistas de acesso relativas ao Aeroporto de Curitiba (SBCT)	54
Figura 4.18 - Disposição de pistas de acesso relativas à pista 09L/27R do Aeroporto de Guarulhos (SBGR)	54
Figura 4.19 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista SBPJ .	55
Figura 4.20 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista SBCT	55
Figura 4.21 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista 09L/27R de SBGR.....	56
Figura 4.22 - Esquematização das distâncias até cada saída de pista e acesso a cabeceira.....	57
Figura 4.23 - Porcentagem de utilização da saída para cada categoria com saída de raio entre 60 e 120 m	58
Figura 4.24 - Porcentagem de utilização da saída para cada categoria com saída de raio 550 m	59
Figura 4.25 – Quadro com estimativa de capacidade para SBGR.....	60
Figura 4.26 - Esquematização das distâncias até cada saída de pista e acesso a cabeceira.....	61
Figura 4.27 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista 06/24 de SBSL	62
Figura 4.28 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista 06/24 de SBSL	63
Figura 4.29 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista 06/24 de SBSL	63

Figura 4.30 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista 06/24 de SBSL	64
Figura 4.31 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista 09/27 de SBSL.....	64
Figura 4.32 – Quadro com estimativa de capacidade para aeródromo em questão.....	65
Figura 4.33 - Esquematização das distâncias até cada saída de pista e acesso a cabeceira.....	65
Figura 4.34 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista SBEG	67
Figura 4.35 – Quadro com estimativa de capacidade para aeródromo em questão.....	67
Figura 5.1 - Capacidade declarada para o Aeroporto de Guarulhos. Fonte: CGNA (2019) adaptado pelo autor.....	69
Figura 5.2 - Capacidade declarada para o Aeroporto de São Luís. Fonte: CGNA (2019) adaptado pelo autor.....	70
Figura 5.3 - Capacidade declarada para o Aeroporto de Manaus. Fonte: CGNA (2019) adaptado pelo autor.....	70

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Categoria das aeronaves de acordo com a velocidade de cruzamento. Fonte: ICAO (2006)	34
Tabela 3.2 - Exemplo de mix de aeronaves	34
Tabela 3.3 - Valores médios de velocidade de rotação por categoria de aeronave.	40
Tabela 3.4 - Probabilidade de ocorrência de cada par de aeronaves em pouso ou decolagem para o mix exemplificado	43
Tabela 4.1 - Mix de aeronaves obtidos para a Hora Pico.	57
Tabela 4.2 - Valores de raio e ângulo de saída para cada pista de saída.	57
Tabela 4.3 - Estimativa do tempo de atraso devido a necessidade de cruzamento de pista	59
Tabela 4.4 - Mix de aeronaves obtidos para a Hora Pico.	61
Tabela 4.5 - Valores de raio e ângulo de saída para cada pista de saída.	61
Tabela 4.6 - Estimativa do tempo de atraso devido a necessidade de cruzamento de pista	62
Tabela 4.7 - Mix de aeronaves obtidos para a Hora Pico.	66
Tabela 4.8 - Valores de raio e ângulo de saída para cada pista de saída.	66
Tabela 5.1 - Resumos dos dados de TOPPs para os três aeroportos avaliados nesta seção	68
Tabela 5.2 - Resumos dos dados de TOPDs para os três aeroportos avaliados nesta seção	69
Tabela 5.3 - Comparação entre os valores de capacidade	71

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACRP	<i>Airport Cooperative Research Program</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
CGNA	Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>
IMC	<i>Instrument Meteorological Conditions</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
MATOP	Média Aritmética entre Tempos de Ocupação de Pouso
MCA	Manual do Comando da Aeronáutica
PPD	Pista de Pouso e Decolagem
RBAC	Regulamento Brasileiro da Aviação Civil
SAC	Secretaria Nacional de Aviação Civil
TG	Trabalho de Graduação
TMDP	Tempo Médio de Decolagem entre Pousos

TMED	Tempo Médio Entre Decolagens
TMEP	Tempo Médio Entre Pousos
TOPD	Tempo de Ocupação de Pista durante Decolagem
TOPP	Tempo de Ocupação da Pista durante Pouso
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TRDP	Tempo Requerido para Decolagem entre Pousos
VFR	<i>Visual Flight Rules</i>
VMC	Visual Meteorological Conditions

Sumário

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos.....	21
1.2 Escopo	21
1.3 Estrutura do documento	22
2 REVISÃO TÉCNICA	23
2.1 Método dos Três Segmentos	26
2.2 Metodologia do ACRP 79.....	28
2.2.1 Análise da Metodologia para Pistas Paralelas Dependentes	31
2.2.2 Análise da Metodologia para Pistas Cruzadas.....	32
3 METODOLOGIA PROPOSTA	34
3.1 Metodologia Proposta para estimativa do tempo de ocupação da PPD no pouso.....	34
3.2 Metodologia Proposta para estimativa do tempo de ocupação da PPD na decolagem	39
3.3 Metodologia Proposta para a extensão do ACRP 79	41
4 APLICAÇÃO	45
4.1 Comparação Entre Tempos de Ocupação da PPD.....	45
4.1.1 Tempos de Ocupação da PPD Durante o Pouso.....	45
4.1.2 Tempos de Ocupação Durante Decolagem	53
4.2 Análise da Capacidade do Aeroporto de Guarulhos (SBGR)	56
4.2.1 Tempo de Ocupação Durante Pouso	59
4.2.2 Tempo de Ocupação Durante Decolagem	60
4.2.3 Capacidade Estimada.....	60
4.3 Análise da Capacidade do Aeroporto de São Luís (SBSL).....	60
4.3.1 Tempo de Ocupação Durante Pouso	62
4.3.2 Tempo de Ocupação Durante Decolagem	64
4.3.3 Capacidade Estimada.....	64
4.4 Análise da Capacidade do Aeroporto de Manaus (SBEG)	65

4.4.1 Tempo de Ocupação Durante Pouso	66
4.4.2 Tempo de Ocupação Durante Decolagem	66
4.4.3 Capacidade Estimada.....	67
5 CONCLUSÃO.....	68
5.1 Limitações e melhorias futuras	71
6 BIBLIOGRAFIA	72

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte aéreo tem ganhado cada vez mais destaque no cenário nacional, com demanda crescente pelo transporte tanto de pessoas como de cargas. Segundo dados fornecidos pela ANAC e disponibilizados no Portal HÓRUS (Horus, 2019), a movimentação de passageiros no Brasil foi de cerca de 155 milhões em 2010 e de 215 milhões em 2018, mostrando um crescimento de cerca de 38%.

Um estudo feito pela McKinsey & Company em 2010 mostra que os aeroportos brasileiros estão cada vez mais saturados com a crescente demanda por voos, conforme ilustrado na Figura 1.1 abaixo, o que resulta em atrasos e perda de eficiência.

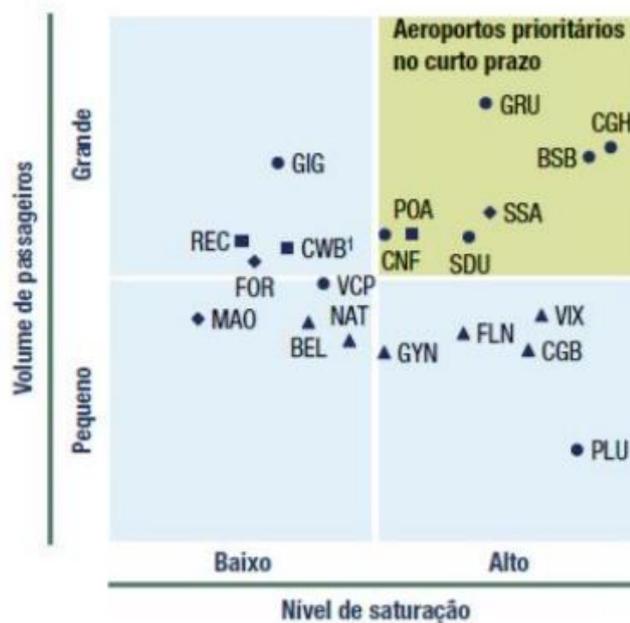


Figura 1.1 - Nível de saturação de aeroportos brasileiros. Fonte: Steer Davies Gleave (2016)

Para análise de nível de saturação deve avaliada a quantidade de voos que podem ser operados num aeródromo, empregando o conceito de capacidade declarada. A capacidade declarada é a capacidade do sistema de pistas de um aeródromo, calculada para um intervalo de sessenta minutos, em função do tempo médio de ocupação de pista, acrescido da separação regulamentar entre aeronaves, prevista em legislações, bem como das normas e procedimentos específicos aplicáveis às operações aéreas da localidade considerada (DECEA, 2015).

A fim de adquirir estrutura para suportar a crescente demanda, o aeródromo pode passar por basicamente duas mudanças: aumentar a capacidade da PPD (Pista de Pouso e Decolagem) existente, colocando-se *taxiways* de saída rápida ou de acesso nas cabeceiras, ou implantar uma nova PPD. No primeiro caso, o aumento da capacidade vem da redução do

tempo de permanência de uma aeronave na pista, já no segundo, vem da possibilidade de operação em mais de uma pista.

No Brasil, a metodologia utilizada no cálculo teórico da capacidade declarada foi desenvolvida pelo CGNA (Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea) e registrada no MCA 100-14/2015 (DECEA, 2015). A metodologia de cálculo preconizada pelo CGNA é uma metodologia analítica para cálculo da capacidade horária do sistema de pistas, que utiliza o tempo médio de ocupação de pista. O método considera a possibilidade de ocorrer uma decolagem entre dois pousos consecutivos, mantendo-se a separação mínima regulamentar (SMR) previstas na ICA 100-12 – Regras do Ar.

Esta metodologia do CGNA aponta a capacidade do sistema como este se apresenta no momento da coleta de dados operacionais. Quaisquer alterações propostas ao sistema não poderão ser avaliadas. No extremo oposto, estão os simuladores especializados, capazes de avaliar mudanças no espaço aéreo, percurso de táxi, regras operacionais, entre outros.

A presente pesquisa busca uma solução intermediária entre a metodologia do CGNA e os simuladores especializados. Para tanto, parte-se da metodologia proposta no *Airport Cooperative Research Program 79* (TRB, 2012).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o aprofundamento e aperfeiçoamento da metodologia de análise de capacidade proposta pelo ACRP 79 (*Airport Cooperative Research Program 79*), através da integração com o método dos três segmentos, descrito no DOC 8168 – *Aircraft Operations*, ICAO, e com estimativas feitas através do método de Monte Carlo.

1.2 Escopo

O presente estudo está voltado ao planejamento aeroportuário, cujo horizonte de análise não permite o levantamento de informações operacionais detalhadas. O escopo desse Trabalho de Graduação restringe-se, portanto, a análise de level 2, conforme apontado na Figura 1.2, onde o trecho destacado representa o nível de detalhamento almejado nesse Trabalho de Graduação.

Level	Description	Examples	Sample Applications	Attributes/Limitations	Data Requirements
1	Table lookup	Chapter 2 of the AC, new lookup table	Statewide system plans, airport master plans where airfield capacity is not an issue, and small airport master plans	Runways only, simplified airfields, small airports, default assumptions only	Minimal, requiring only an overview of airport runway configuration and aircraft fleet mix
2	Charts, nomographs, and spreadsheets	Chapter 3 of the AC, new spreadsheet model	Statewide system plans, airport master plans where airfield capacity is not an issue, and small airport master plans	Runways only, moderate size airports, less complex airfields, some flexibility in inputs	Minor, requiring airport runway configuration, aircraft fleet mix, exit locations, and percentage of arrivals
3	Analytical capacity models	Airfield Capacity Model	Specialized airfield capacity studies, airport master planning studies, regional airport system planning	Runways only, moderate airfield complexity, taxiways and airspace considered implicitly, flexible input assumptions	More demanding, including aircraft fleet mix, aircraft final approach speeds, aircraft separations, and air traffic control (ATC) rules
4	Airfield capacity simulation models	<i>runwaySimulator</i> , Flexible Airport Simulation (FLAPS)	Capacity planning of complex airfields or regional airfield/airspace systems	Runways only, complex airfields and airspace, flexible assumptions	More detailed input data than Level 3 models, including close-in arrival and departure flight track geometries and aircraft fleet mix by runway
5	Aircraft delay simulation models	SIMMOD, ADSIM, TAAM	Detailed planning of complex airfields or regional airfield/airspace systems	Runway, taxiways, aprons, gates, and/or airspace; complex airfields (e.g., runway crossings and airspace fix constraints), flexible input	Greatest level of detail about aircraft flight schedule and airfield and airspace configurations, including taxiing routes and aircraft parking positions

Figura 1.2 - Níveis de detalhamento para cada tipo de análise de capacidade da PPD. Fonte: TRB (2012) adaptado pelo autor

1.3 Estrutura do documento

O capítulo 2 apresenta as principais metodologias e ferramentas de análise de capacidade propostas pela literatura. O capítulo 3 propõe metodologias a serem implementadas com base naquelas levantadas pelo capítulo 2. O capítulo 4 expõe análises e resultados obtidos através da nova abordagem proposta. O capítulo 5 resume o exposto no relatório, fazendo uma análise crítica do procedimento proposto e apontando possíveis melhorias a serem introduzidas.

2 REVISÃO TÉCNICA

Segundo a MCA 100-17/2014 (DECEA,2014), para o cálculo da capacidade, o CGNA parte de tempos de ocupação obtidos empiricamente, ou seja, exige que seja feita uma coleta de dados no aeródromo. Além de envolver custos relacionados à coleta de dados, esse método torna-se particularmente problemático quando pretende-se prever a capacidade de um aeroporto que ainda está em planejamento, seja em fase de implementação de uma nova PPD ou na melhoria de uma pista existente.

Para cumprir essa função, existem no mercado diversos simuladores que são capazes de incorporar até mesmo análises de trajetórias distintas para pouso e decolagem e do percurso da aeronave desde a posição de estacionamento no pátio até a PPD e vice-versa. Dentre esses *softwares*, destacam-se o SIMMOD® (*Airport and Airspace Simulation Model*) e o TAAM® (*Total Airspace and Airport Modeller*). No entanto, o uso de simuladores está atrelado ao alto custo do licenciamento para uso dos *softwares*, o que os torna inviáveis para diversas empresas de planejamento aeroportuário. Além disso, a complexidade em operar e criar modelos em um simulador torna escassa a disponibilidade de profissionais capacitados nessa tarefa. Adicionalmente, modelos de simulação requerem validação, o que exige maior quantidade de dados precisos, dados estes que muitas vezes não estão disponíveis em um ambiente de planejamento.

Outra opção seria a utilização de tabelas como forma de consulta, como o prescrito na AC 150/5060-5 (FAA, 1983). Valores de capacidade e atrasos são registrados em tabelas e ábacos, conforme exemplificado na Figura 2.1. Para tanto, o documento é baseado em simulações, que foram realizadas para diversas categorias de aeroportos, incluindo-se variações no uso da PPD, mix de aeronaves, regras ATC, disposição de pistas, entre outros. Apesar de os ábacos serem de fácil utilização, não são capazes de responder de forma flexível a quaisquer variações operacionais ou geométricas.

NO.	Runway-use Configuration	Mix Index % (C+3D)	Hourly Capacity Ops/Hr		Annual Service Volume Ops/Yr
			VFR	IFR	
1.		0 to 20	98	59	230,000
		21 to 50	74	57	195,000
		51 to 80	63	56	205,000
		81 to 120	55	53	210,000
		121 to 130	51	50	240,000
2.		0 to 20	197	59	355,000
		21 to 50	145	57	275,000
		51 to 80	121	56	260,000
		81 to 120	105	59	285,000
		121 to 180	94	60	340,000
3.		a to 20	197	62	355,000
		21 to 50	149	63	285,000
		51 to 80	126	65	275,000
		81 to 120	111	70	300,000
		121 to 180	103	75	365,000

Figura 2.1 - Estimativas de capacidade aeroportuária para diversas configurações de pistas e mix de aeronaves. Fonte: FAA (1983)

Horonjeff, et. al (2010) também cita abordagens diferentes para o problema do cálculo de capacidade. Um dos modelos trata da utilização de equações matemáticas para encontrar o atraso médio entre pousos e decolagens. No entanto, para a construção das equações, foi suposto que as operações encontram-se num estado estacionário, o que raramente é alcançado na prática. Outro modelo apontado emprega o conceito de espaço tempo, onde cada pouso e decolagem é representado num diagrama espaço-tempo, conforme ilustrado na Figura 2.2, onde **l**, **m** e **n** representam pousos e **p**, **q** e **r**, decolagens. Essa abordagem, no entanto, é particularmente problemática quando o aeródromo possuir mais de uma pista. Além disso, a metodologia restringe-se à consideração de um tempo de ocupação de pista. Dessa forma, os efeitos das taxiways de acesso/egresso não podem ser medidos.

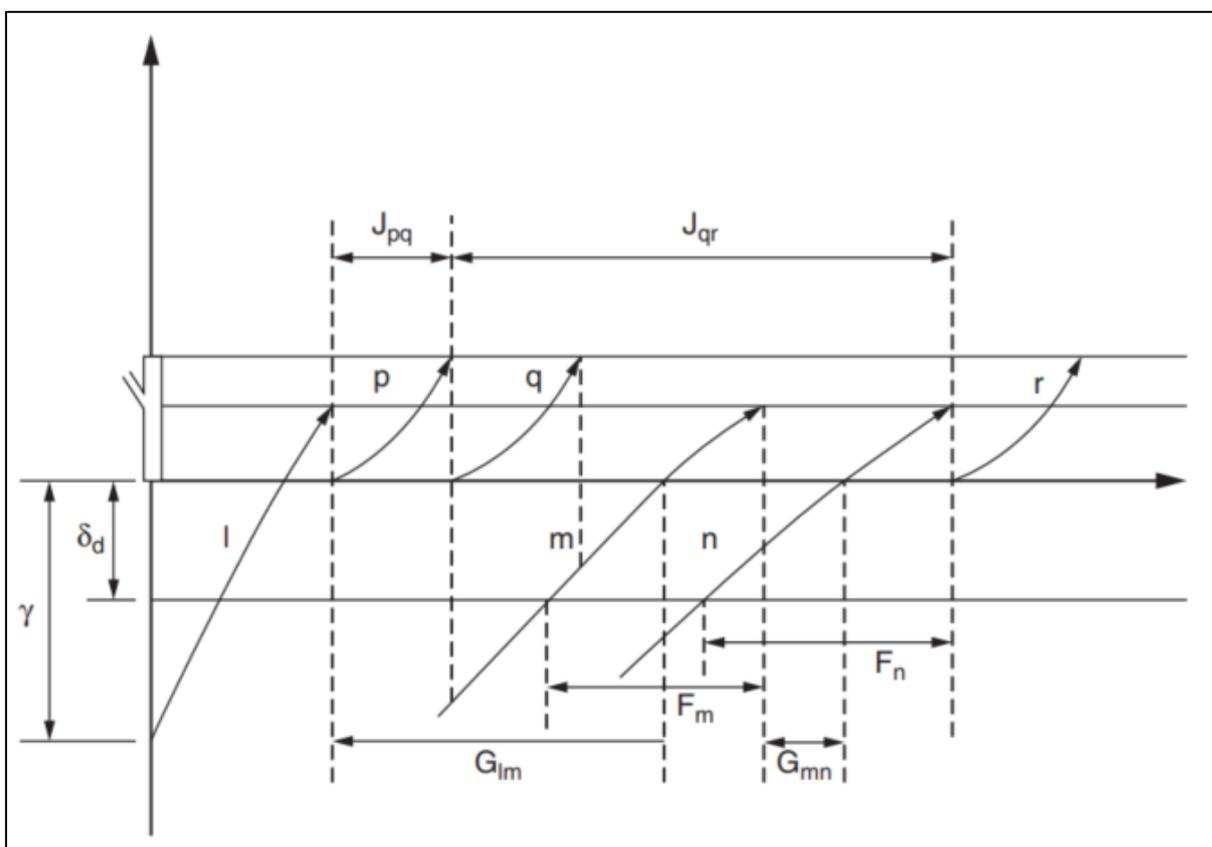


Figura 2.2 - Diagrama espaço-tempo para PPD com operações mistas. Fonte Horonjeff (2010)

Conforme explicitado no item 1.2, o uso de simuladores foge do escopo desse estudo, por exigirem dados de difícil acesso em um ambiente de planejamento. Por outro lado, o cálculo de capacidade com base em consulta a tabelas e ábacos mostra-se bastante inflexível, visto que muitas vezes a situação do aeródromo não equivale a nenhum dos cenários pre-analisados. Portanto, buscou-se a utilização de *softwares* e metodologias capazes de uma solução intermediária entre a rigidez das tabelas e a alta complexidade dos simuladores.

O ACRP 79 (TRB, 2012) disponibiliza uma planilha no *software* EXCEL® que exerce essa função, mas parte de **dados obtidos empiricamente para tempo de ocupação da PPD** para pouso e decolagem. Vale ressaltar também que o ACRP 79 não considera o tempo de posicionamento da aeronave na cabeceira para a decolagem, tempo este que pode ser significativo no cálculo do tempo de ocupação durante decolagem, pois outra aeronave não pode operar na mesma pista que uma já esteja posicionando-se para decolar.

A fim de contornar esse problema, utiliza-se, em associação com o ACRP 79, a metodologia proposta no DOC 9157 – *Aerodrome Design Manual – Part 2 – Taxiways, Aprons and Holding Bays*, ICAO, denominado **método dos três segmentos**. Porém, esse método tem o objetivo de determinar a localização ótima para pistas de táxi saída da PPD, não para determinação de tempo de ocupação de pista. Para que o objetivo desse estudo seja alcançado, portanto, devem ser consideradas as modificações apresentadas no capítulo 3. Os

itens a seguir descrevem as metodologias supracitadas, de acordo com o relatado pela bibliografia.

2.1 Método dos Três Segmentos

O método dos três segmentos (ver ICAO, 2005) consiste em um modelo analítico para determinação da posição de pistas de táxi de saída rápida.

O método está baseado na determinação dos comprimentos S_1 , S_2 e S_3 ilustrados na Figura 2.3, que equivalem aos comprimentos de *flare*, transição e frenagem, respectivamente. No trecho de aproximação, a aeronave ultrapassa a cabeceira sobrevoando a pista. No trecho de transição a aeronave toca o solo, porém ainda não aciona os freios do trem de pouso, a desaceleração vem de fatores aerodinâmicos. No trecho de frenagem, a aeronave aciona os freios do trem de pouso e atinge a velocidade necessária para sair da pista de pouso e decolagem.

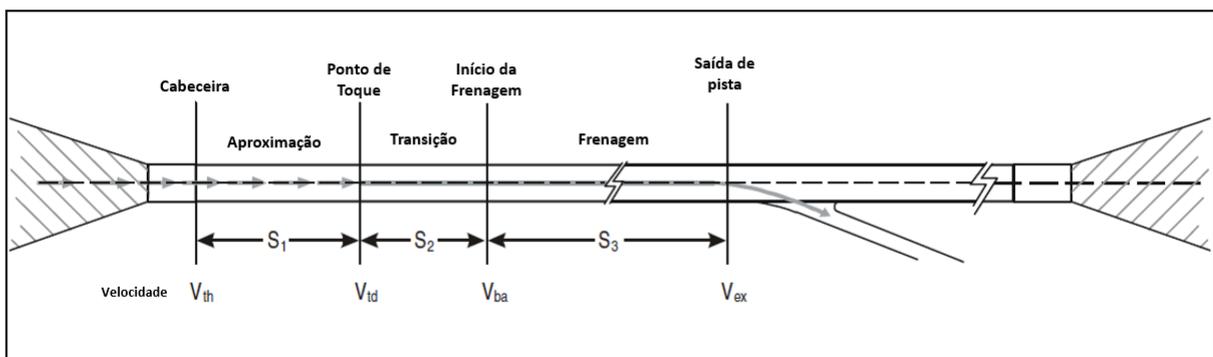


Figura 2.3 - Três segmentos durante o pouso. Fonte: ICAO (2005), adaptado pelo autor

As velocidades no ponto de toque (V_{td}) e a velocidade no início da frenagem (V_{ba}) são funções da velocidade de cruzamento da cabeceira, conforme indicado no DOC 9157 e explicitado nas equações abaixo:

$$V_{td} = V_{th} - 5 \text{ kts} \quad (2.1)$$

$$V_{ba} = V_{th} - 15 \text{ kts} \quad (2.2)$$

A velocidade de saída de pista (V_{ex}) é função do raio da saída de pista, podendo também assumir dois valores distintos. O Doc 9157 relaciona esses valores de acordo com a Figura 2.4 a seguir:

Radii R [m]:	V _{des} [kts]:	V _{op} [kts]:
40	14	13
60	17	16
120	24	22
160	28	24
240	34	27
375	43	30
550	52	33

Figura 2.4 - Relação entre velocidade e raio da saída. Fonte: ICAO (2005)

A velocidade operacional de saída (V_{op}) é dada como sendo a velocidade de design de saída (V_{des}) sob uma aceleração lateral de 0,133 g, onde g é a aceleração da gravidade. Para os cálculos em questão, a V_{ex} assumirá o valor de V_{op} .

O Doc 9157 define valores médios obtidos empiricamente para a distância entre cabeceira e ponto de toque, velocidade de cruzamento da cabeceira e velocidade de ponto de toque. A partir desses valores, é possível utilizar a equação de Torricelli para encontrar o tempo necessário para passar pela cabeceira e tocar a pista (T_{th}), de acordo com a equação abaixo:

$$T_{th} = 2 \times S_1 \times \frac{V_{th} - V_{td}}{V_{th}^2 - V_{td}^2} \quad (2.3)$$

O tempo necessário para percorrer o trecho de transição (T_{ba}) é adotado como 10 segundos (Doc 9157, ICAO, 2005). Utilizando desse tempo, da velocidade no ponto de toque e da velocidade ao final da transição, é possível encontrar o comprimento do trecho de transição (S_2) através da equação de Torricelli.

$$S_2 = T_{ba} \times \frac{T_{td}^2 - T_{ba}^2}{2 * (T_{td} - T_{ba})} \quad (2.4)$$

O Doc 9157 define também um valor médio obtido empiricamente para a desaceleração no trecho de frenagem (a_{ex}). A partir desse valor, pode-se obter o tempo utilizado no trecho de frenagem através da fórmula:

$$T_{ex} = \frac{V_{ab} - V_{ex}}{a_{ex}} \quad (2.5)$$

Tendo então a velocidade ao final da transição, a velocidade de saída e a desaceleração devido a frenagem, pode ser obtido o comprimento do trecho de frenagem (S_3) através da equação de Torricelli:

$$S_3 = \frac{V_{ba}^2 - V_{ex}^2}{2 \times a_{ex}} \quad (2.6)$$

Assim, obtém-se o comprimento percorrido nos três trechos, bem como o tempo necessário para atingir a velocidade de saída.

2.2 Metodologia do ACRP 79

Apesar de também tratar de casos de pistas simples, a metodologia da ACRP 79 descrita no presente relatório será foca em casos de pistas duplas. Isso porque as ferramentas utilizadas para analisar esses casos acabam sendo as mesmas usadas nos casos de pistas única, porém de forma simplificada. Tendo isso em vista, pode-se definir dois tipos de pistas duplas: paralelas e não paralelas.

As pistas paralelas podem ser classificadas da seguinte forma, de acordo com a distância entre os eixos das pistas: próximas, quando a distância é menor que 2.500 pés; intermediária, quando a distância está entre 2.500 e 4.300 pés; e distantes, quando a distância é maior que 4.300 pés (Wald, Fay, & Gleich, 2010).

Com base ainda nessa distância, as pistas podem ter operações dependentes ou independentes. Nas dependentes, as operações não podem ocorrer de forma simultânea entre as pistas, sendo previstas separações mínimas entre as aeronaves nos prolongamentos dos eixos das pistas adjacentes; nas independentes, as operações podem ocorrer de forma simultânea, sem separações mínimas entre as aeronaves nos prolongamentos dos eixos (ANAC). A Figura 2.5 a seguir exibe os intervalos de distância em que uma operação é considerada dependente ou não.

De acordo com o ACRP 79, a capacidade das pistas com operações independentes é dada pela simples soma das capacidades de cada pista. Para pistas com operações dependentes, a metodologia deve prever a influência de uma pista na outra. No ACRP 79, a distância entre os eixos das pistas, em pés, deve ser inserida pelo usuário.

VMC		Parallel Runway Spacing (distance between centerlines)	IMC	
Arrivals	Departures		Arrivals	Departures
DEP	DEP	less than 700 feet	DEP	DEP
DEP	IND	700 - 2499 feet	DEP	DEP
IND	IND	2500 - 3399 feet	DEP	IND
IND	IND	3400 - 4299 feet	IND*	IND
IND	IND	4300 feet or more	IND	IND

*w/radar, DEP w/o radar

Figura 2.5 - Relação entre distância e dependência das pistas. Fonte: TRB (2012)

Segundo a ICA 100-37 (DECEA, 2018), pistas paralelas podem ser usadas para aproximações e decolagens IFR, seguindo as mesmas distâncias estabelecidas pelo ACRP 79.

Porém, na presença de ventos fortes em mais de uma direção, pistas com direções diferentes são mais eficazes que pistas paralelas. Horonjeff et. al. (2010) caracteriza as pistas não paralelas como pistas que possuam intersecção na sua PPD e que não possuam, sendo estas denominadas pistas em V-aberto. Ainda segundo Horonjeff (2010), a capacidade do aeródromo nesse caso depende da localização da intersecção em relação às cabeceiras das pistas, sendo que quanto mais longe a intersecção estiver da cabeceira de pouso, menor será a capacidade do aeródromo.

Para a análise da capacidade nesses dois casos de pistas duplas, o ACRP 79 divide sua abordagem em 16 casos distintos, estando eles representados na Figura 2.6 e na Figura 2.7, onde a seta vermelha indica possibilidade de pouso e a seta verde indica possibilidade de decolagem.

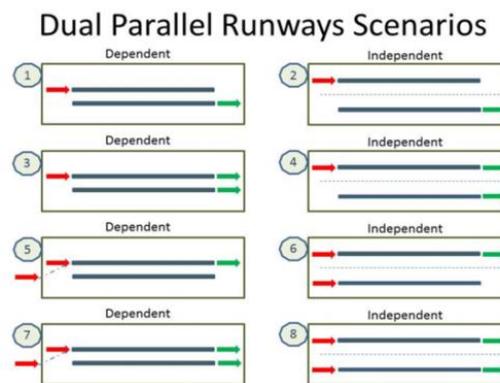


Figura 2.6 - Cenários abordados no caso de pistas paralelas. Fonte: TRB (2012)

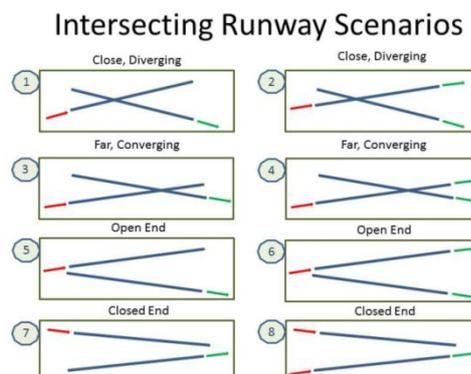


Figura 2.7 - Cenários abordados no caso de pistas com direções diferentes. Fonte: TRB (2012)

Isoladamente, as pistas retratadas nas figuras acima que possuam apenas pouso ou operações mistas serão definidas como PPD 1, enquanto as que possuam apenas decolagem, como PPD 2.

Tanto para pistas paralelas quanto para pistas cruzadas, o ACRP 79 agrupa as aeronaves do mix atuante no aeroporto em um total de 7 grupos, contendo aeronaves das categorias A a D. Esses grupos estão definidos conforme Figura 2.8 abaixo:

Aircraft Classification New Category	Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-757	Heavy
Previous FAA Category	A	B	C	C	C	C	D
Maximum Gross Takeoff Weight (MTOW)	Less than 12,500 lbs (Single Engine)	Less than 12,500 lbs (Twin Engine)	Between 12,500 lbs and 41,000 lbs	Between 41,000 lbs and 255,000 lbs	Between 41,000 lbs and 300,000 lbs	Boeing 757 Series	More than 300,000 lbs

Figura 2.8 - Grupos de aeronaves definidos. Fonte: TRB (2012)

O ACRP 79 fornece ainda valores médios para separações entre pares de aeronaves em processo de pouso (em milhas náuticas) e em processo de decolagem (em segundos). Esses valores estão representados na Figura 2.9 e a na Figura 2.10 abaixo:

Arrival-Arrival Separation Requirements		Distance in Nautical Miles (nm)		
Trailing Aircraft		VMC	IMC	
Small-S --- Heavy	Small-S, Small-T	1,9	3,0	2,5
Small-S --- Small+	Small +	1,9	3,0	2,5
Large --- Heavy	Small +	1,9	3,0	2,5
Small-S --- Small+	Large-TP, Jet	2,7	4,0	
Large --- Heavy	Large-TP, Jet	1,9	3,0	2,5
Small-S --- Small+	Large-757	3,7	5,0	
Large --- Heavy	Large-757	2,7	4,0	
Small-S --- Small-T	Heavy	4,6	6,0	
Small + --- 757	Heavy	3,6	5,0	
Heavy	Heavy	2,7	4,0	

Alternate IMC Minimum
If Observed AROT < 50 Seconds,
2.5 nm can be used in place of 3.0 nm

Figura 2.9 - Distâncias mínimas entre pousos para cada categoria de aeronaves. Fonte: TRB (2012)

Departure - Departure Separation Requirements		Time in Seconds	
Trailing Aircraft	Leading Aircraft	VMC	IMC
Small-S --- Small +	Small-S- Small +	35	60
Large -TP --- Large 757	Small-S- Small +	45	60
Heavy	Small-S- Small +	50	60
Small-S --- Small+	Large TP, Large Jet	80	80
Large --- Heavy	Large TP, Large Jet	60	60
Small-S --- Large Jet	Large 757, Heavy	120	120
Large 757, Heavy	Large 757, Heavy	90	90

Figura 2.10 - Tempos mínimos entre decolagens para cada categoria de aeronaves. Fonte: TRB (2012)

No entanto, o ACRP 79 não estabelece formas de calcular o tempo de ocupação da pista durante o pouso e decolagem, sendo encabido ao usuário definir esses valores. Também cabe ao usuário definir valores de velocidade de aproximação, mix de operações, taxas de aceleração para decolagem e desaceleração para pouso.

2.2.1 Análise da Metodologia para Pistas Paralelas Dependentes

A distância entre pousos para cada par de aeronaves é obtida a partir da soma entre uma separação adicional de segurança, a ser definida pelo usuário, e das distâncias em milhas náuticas recomendadas pelo ACRP 79, conforme Figura 2.9.

O tempo requerido entre pousos, em segundos, é dado pelo valor máximo entre as duas equações abaixo e a equação que utiliza-se do TOPP:

$$3600 \times \frac{S_{\text{pares}}}{v_{\text{seguidora}}} + Z \times \sigma_{pp} \quad \text{para } v_{\text{lider}} \leq v_{\text{seguidora}} \quad (2.7)$$

$$3600 \times \frac{S_{\text{pares}}}{v_{\text{seguidora}}} + Z \times \sigma_{pp} + 3600 \times S_{\text{pares}} \times \left(\frac{1}{v_{\text{seg}}} - \frac{1}{v_{\text{lider}}} \right) \quad \text{para } v_{\text{lider}} > v_{\text{seguidora}} \quad (2.8)$$

$$TOPP + Z \times \sqrt{\sigma_{pp}^2 + \sigma_{TOPD}^2} + \Delta S_{\text{segurança}} \quad (2.9)$$

Onde S_{pares} é a distância entre os pares de aeronaves analisados; $v_{\text{seguidora}}$ é a velocidade de aproximação da aeronave seguidora; Z é uma constante que recebe o valor de 1,645, garantindo uma confiança de 95% nas perturbações realizadas; σ_{pp} e σ_{TOPD} são, respectivamente, o desvio padrão do tempo entre pousos e do tempo de ocupação da pista durante decolagem; $\Delta S_{\text{segurança}}$ é o espaçamento adicional de segurança atribuído pelo usuário.

O tempo médio requerido entre pousos (TMEP) pode então ser obtido através da ponderação entre a probabilidade de ocorrência de cada par e o tempo de separação requerido entre eles.

Para as separações entre decolagens, cuja medida é feita em segundos: considera-se uma separação de segurança atribuída pelo usuário somada à distância recomendada pelo ACRP 79, cujos valores estão representados na Figura 2.10. O tempo médio de separação entre decolagens (TMED) pode ser obtido pela ponderação entre os valores obtidos por essa soma e a probabilidade de ocorrência de cada par de aeronaves.

Em seguida, calcula-se o tempo requerido para decolagem entre pousos (TRDP) através do valor máximo entre a equação abaixo e o TOPD, para cada par de aeronaves:

$$TRDP = \text{Máx} \left\{ 3600 \times \frac{S_{\text{dec.pouso}}}{v_{\text{seguidora}}}; TOPD \right\} \quad (2.10)$$

Onde $S_{\text{dec.pouso}}$ é a distância padrão entre pouso e decolagem definida pelo usuário. O valor do tempo médio requerido para decolagens entre pousos (TMDP) pode ser obtidos através da ponderação de TRDP com as probabilidades de ocorrência de cada par de aeronaves. A quantidade de decolagens entre pousos pode ser encontrada então através de, para par de aeronaves:

$$\text{Decolagens}_{\text{par}} = \text{Máx} \left\{ 0; \left\lceil \frac{TREP - TRDP}{TMED} \right\rceil \right\} \quad (2.11)$$

A quantidade total de decolagens pode ser obtida através da ponderação de Decolagens_{par} pela probabilidade de ocorrência de cada par de aeronaves. A quantidade de pousos, por sua vez, é definida por:

$$Pousos = \frac{3600 - C_d}{TMEP} \quad (2.12)$$

Onde C_d é o tempo de *crossing delay*, ou seja, o atraso gerado devido à necessidade de uma aeronave atravessar a PPD. Por fim, a quantidade de pousos e decolagens é ponderada pela porcentagem de voos com condições meteorológicas visuais (VMC) e por instrumentos (IMC), dados estes que são computados pelo usuário.

2.2.2 Análise da Metodologia para Pistas Cruzadas

O tempo requerido entre pousos e decolagens, bem como os tempos médios requeridos são obtidos utilizando-se das mesmas equações explicitadas no capítulo 2.2.1.

Porém, aqui entra o conceito de tempo de ocupação de pouso encurtado, que nada mais é que o tempo necessário para a aeronave sobrevoar o trecho entre a cabeceira e o ponto de intersecção das pistas durante o pouso. Esse tempo será utilizado no lugar do tempo de ocupação durante o pouso inserido pelo usuário, caso a distância entre o ponto de toque da aeronave durante o pouso seja menor que a distância entre cabeceira e intersecção.

$$TOPP_{enc} = \frac{D_{inter}}{v_{lider}} \quad (2.13)$$

Onde D_{inter} é a distância entre a cabeceira e a intersecção e v_{lider} é a velocidade de aproximação da aeronave líder.

Analogamente, o ACRP 79 estuda um tempo de ocupação de decolagem encurtado, que trata do tempo necessário para a aeronave percorrer o trecho entre cabeceira de decolagem e intersecção, partindo de velocidade inicial igual a zero. Caso o usuário defina que há possibilidade de choque entre aeronaves no ponto de intersecção, esse tempo é definido como constante e de 120 segundos. Porém, caso não haja risco de choque, o parâmetro é regido pela equação abaixo, que utiliza-se das equação de espaço-tempo e Torricelli:

$$TOPD_{enc} = \sqrt{2 \times \frac{D_{inter}}{a_{dec}}} \quad (2.14)$$

Onde a_{dec} é a aceleração durante a decolagem. O $TOPD_{enc}$ é utilizado no lugar do tempo de ocupação da pista durante a decolagem definido pelo usuário, visto que quando a aeronave ultrapassar a intersecção, a segunda pista já está liberada para operações.

Tendo em vista os parâmetros supracitados, calcula-se os TRDP através da equação abaixo, para cada par de aeronaves:

$$TRPD = \max\{TOPP; TOPP_{enc}\} + TOPD_{enc} + (S_{dec.pouso} - D_{inter1}) \times \frac{3600}{v_{seg}} \quad (2.15)$$

Onde D_{inter1} é a distância entre a cabeceira e a intersecção na PPD 1. O valor do tempo médio requerido para decolagens entre pousos na PPD (TMDP) pode ser obtidos através da ponderação de TRDP com as probabilidades de ocorrência de cada par de aeronaves. Como a distância entre cabeceira e intersecção frequentemente difere entre as duas pistas, faz-se uma análise separada entre quantidade de decolagens possível. A quantidade de decolagens entre pousos na PPD 2 pode ser encontrada através de, para cada par de aeronaves:

$$Decolagens_{par2} = \max \left\{ 0; \left\lceil \frac{TREP - TRDP}{TMED} \right\rceil \right\} \quad (2.16)$$

A quantidade total de decolagens na PPD 2 pode ser obtida através da ponderação do valor de $Decolagens_{par2}$ pela probabilidade de ocorrência de cada par de aeronaves. Já a quantidade de decolagens na PPD 1 depende do tempo de liberação da mesma entre as operações no aeródromo:

$$Liberação = \max \left\{ 0; \frac{(TOPP - TOPP_{enc} - TOPD_{enc})}{TMED} \right\} \quad (2.17)$$

Tendo então o valor do tempo de liberação, encontra-se a quantidade de decolagens permitidos na PPD 1, para cada par de aeronaves:

$$Decolagens_1 = \left(\frac{TREP - TRDP}{TMED} \right) - TOPP_{enc1} - Liberação \quad (2.18)$$

Ponderando esses valores pela probabilidade de ocorrência de cada par de aeronaves, encontra-se o valor médio de decolagens na PPD 1. Por fim, a quantidade de pousos e decolagens é ponderada pela porcentagem de voos com condições meteorológicas visuais (VMC) e por instrumentos (IMC), dados estes que são computados pelo usuário.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Para o cálculo da capacidade, as aeronaves de cada caso analisado foram categorizadas de acordo com a velocidade de cruzamento da cabeceira conforme definição do Doc 8168 – *Aircraft Operations*, ICAO (2006). A Tabela 3.1 a seguir resume os valores dispostos no regulamento, que também estão explicitados na MCA 100-14.

Tabela 3.1 - Categoria das aeronaves de acordo com a velocidade de cruzamento. Fonte: ICAO (2006)

Categoria da Aeronave	Velocidade de cruzamento da cabeceira (kt)
A	< 90
B	entre 91/120
C	entre 121/140
D	entre 141/165
E	entre 166/210

As aeronaves do mix foram então agrupadas de acordo com os critérios de velocidade em categorias A, B, C, D e E para depois se determinar o percentual de cada categoria na frota operacional do aeroporto, desconsiderando-se helicópteros. As aeronaves do mix podem ser obtidas através da base de dados de vôos registrados, disponibilizada pelo portal SIROS da ANAC. No entanto, em consulta ao documento AC 150/5300-13A, ressalva-se que a categoria E não está representada por nenhuma aeronave de caráter comercial, portanto, ela será desconsiderada do presente estudo. A Tabela 3.2 abaixo ilustra um exemplo de distribuição de mix para um aeroporto qualquer:

Tabela 3.2 - Exemplo de mix de aeronaves

Categoria de Aeronave	MIX
A	12,0%
B	7,0%
C	75,0%
D	6,0%
E	0,0%

3.1 Metodologia Proposta para estimativa do tempo de ocupação da PPD no pouso

O TOPP (Tempo de Ocupação da Pista para Pouso) pode ser obtido através da aplicação direta de equações sob um cenário determinístico. No entanto, na prática operacional surgem variabilidades que levam a oscilações no tempo de ocupação da PPD.

Objetivando-se uma abordagem mais realista do que a aplicação direta do método dos três segmentos, propõe-se a avaliação conjunta das variáveis aleatórias intervenientes. Tal avaliação é realizada por simulação de Monte Carlo adotando-se distribuição triangular das variáveis aleatórias, seguindo-se a metodologia dos três segmentos. A distribuição triangular foi escolhida pois ela é a mais adequada em cenários cujos extremos das variáveis são conhecidos, bem como seu valor mais provável, apesar da relativa escassez de dados (Bressan, 2002). As variáveis aleatórias escolhidas para o presente estudo foram: i) velocidade de cruzamento da cabeceira (V_{th}); ii) distância entre ponto de toque e cabeceira (S_1); e iii) desaceleração no trecho de frenagem (a_{ex}). Essas variáveis foram escolhidas pois, a partir delas, é possível a obtenção da distribuição do tempo de ocupação da PPD, além de serem variáveis independentes entre si.

A modelagem pela distribuição triangular exige três parâmetros: valor mínimo, valor máximo e valor mais provável.

Para a distribuição dos valores de velocidade de cruzamento da cabeceira foram considerados como valores máximos e mínimos aqueles estipulados para os limites das categorias previstas na MCA 100-14 e ilustrados na Tabela 3.1 para cada categoria de aeronaves, supondo-se a moda como sendo a média desses valores. A Figura 3.1, a Figura 3.2, a Figura 3.3 e a Figura 3.4 abaixo ilustram as distribuições de velocidade para cada categoria de aeronave.

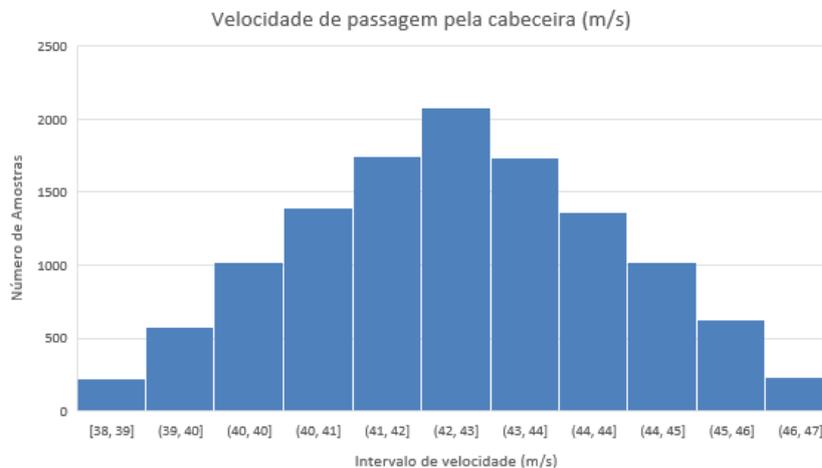


Figura 3.1 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria A

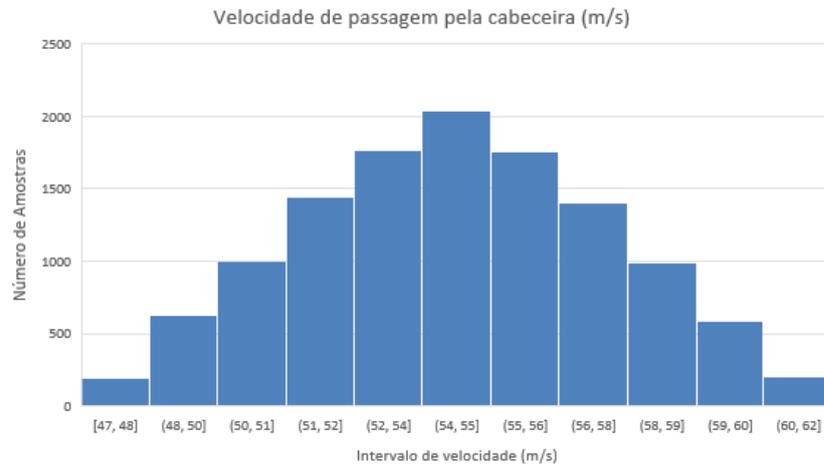


Figura 3.2 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria B

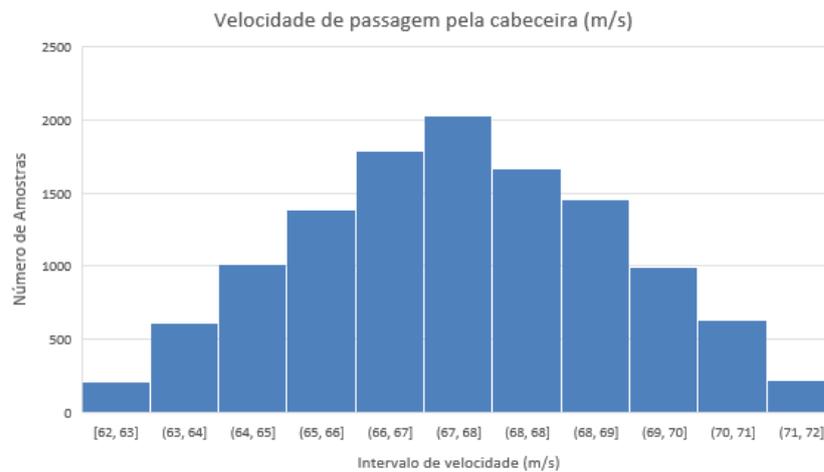


Figura 3.3 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria C

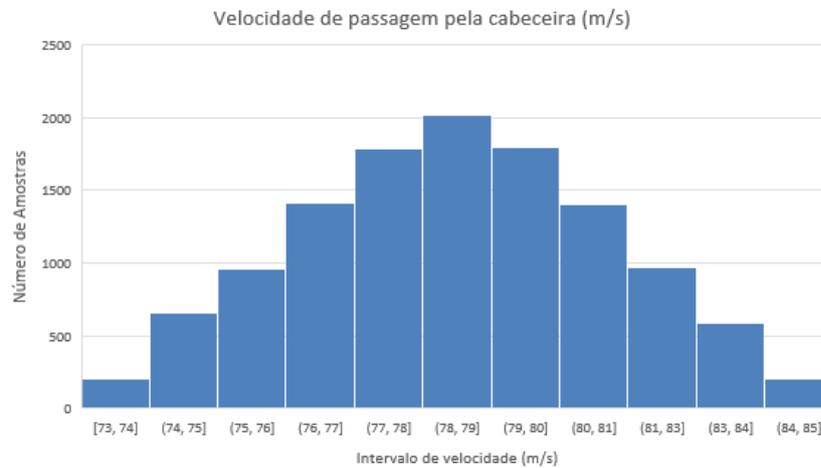


Figura 3.4 - Histograma da distribuição de V_{th} para aeronaves categoria D

O DOC 9157 da ICAO recomenda valores mínimos para distância entre ponto de toque e cabeceira: 250 m para aeronaves código A ou B, com adicional de 30 m para cada 0,25% de declividade longitudinal da pista, e 450 m para aeronaves código C ou D, com adicional de 50 m para cada 0,25% de declividade. Conforme previsto no RBAC 154, Emenda nº 06, a declividade máxima permitida para uma PPD é de 1%, portanto, como valores máximos dessa distância, adota-se 370 m para categorias A e B e 650 para C e D. Para a distribuição triangular da distância do ponto de toque à cabeceira considera-se as modas como a média aritmética dos valores máximos e mínimos, ou seja: de 310 m para categorias A e B e 550 m para C e D. A Figura 3.5 e a Figura 3.6 abaixo ilustram as distribuições de distância entre cabeceira e ponto de toque para as categorias A/B e C/D.

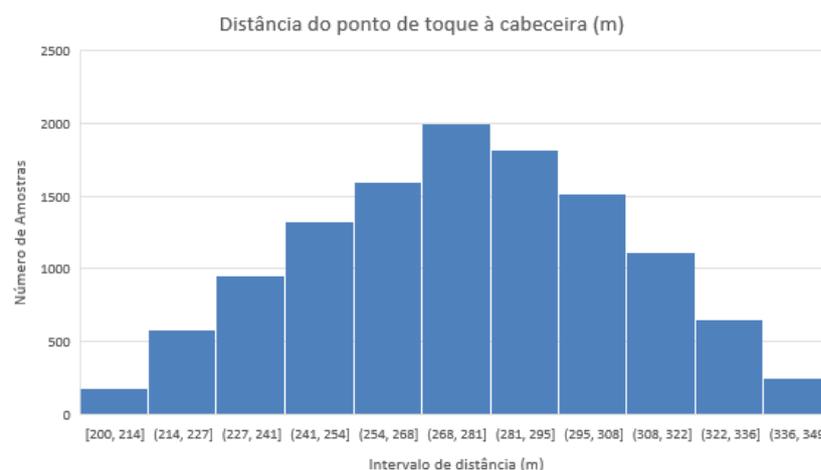


Figura 3.5 - Histograma da distribuição de S_1 para aeronaves categorias A e B

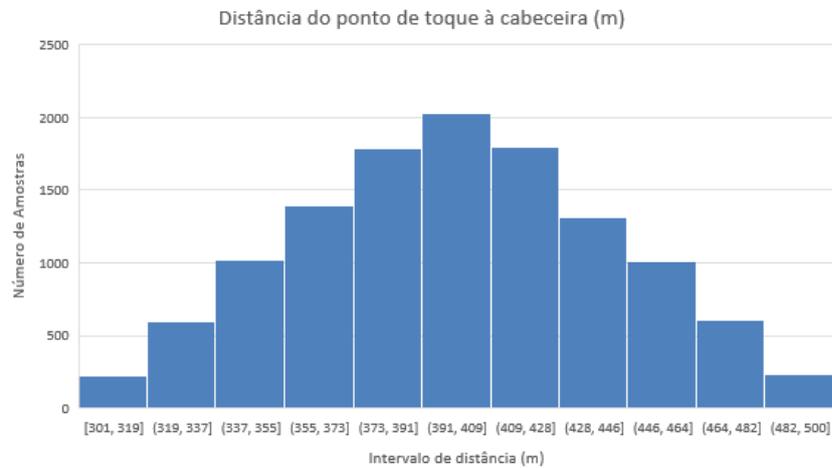


Figura 3.6 - Histograma da distribuição de S_1 para aeronaves categorias C e D

Para a desaceleração no trecho de frenagem, considerou-se valor máximo de $3,10 \text{ m/s}^2$ e mínimo de $1,54 \text{ m/s}^2$ (*Flight Safety Foundation, 2019*), para a moda, considerou-se a média aritmética entre os valores máximo e mínimo, resultando em $2,31 \text{ m/s}^2$. A desaceleração, por sua vez, é utilizada aqui apenas para calcular a distância mínima que a aeronave percorre na frenagem, verificando se é possível que a aeronave acesse determinada pista de saída. Para o cálculo do TOPP, o que foi considerado é que, dada a verificação que a aeronave consegue, sim, alcançar determinada saída, ela irá estender o trecho de frenagem até alcançar a saída, utilizando uma desaceleração menor que a estimada. Essa medida foi adotada baseada em observações de operações de pouso, onde o piloto evita o desgaste da aeronave ao acionar o máximo freio possível, além disso, desacelerar demais o obrigaria a consumir mais combustível para taxiar até a saída. Dosando a frenagem, a aeronave alcança a saída por inércia, ganhando tempo e poupando combustível. A Figura 3.7 ilustra a distribuição de desaceleração utilizada para todas as categorias de aeronave.

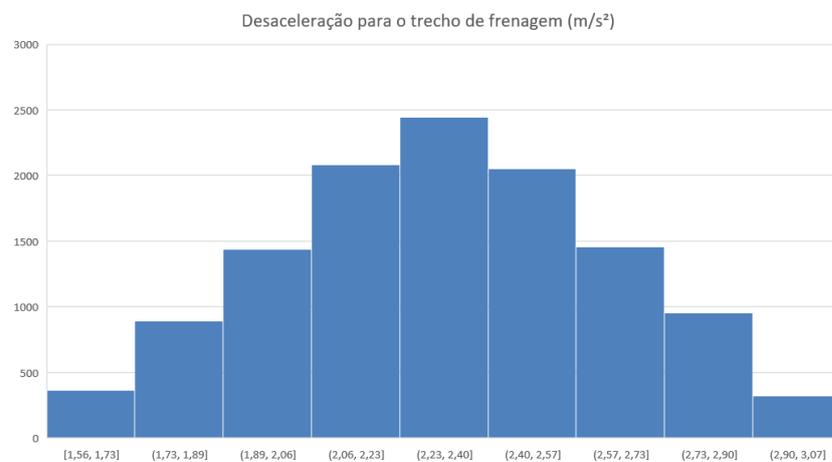


Figura 3.7 - Histograma da distribuição de a_{ex} para todas as categorias

Por fim, considera-se também o tempo necessário para percorrer a pista de saída até atingir a posição de parada. Esse valor pode ser obtido com o auxílio da equação de Torricelli e da equação velocidade-tempo:

$$t_{saida} = \frac{V_{ex} - 15}{V_{ex}^2 - 15^2} \times 2 \times \theta_{saida} \times R_{saida} \quad (3.1)$$

Onde V_{ex} é a velocidade de saída, cujos valores estão representados na Figura 2.4, θ_{saida} é o ângulo de saída da pista e R_{saida} é o raio de saída. O valor 15 é a velocidade de taxiamento dada em nós, segundo Doc 9157 da ICAO.

Utilizando-se dos valores supracitados na metodologia descrita no capítulo 2.1, é possível obter o TOPP.

O modelo também contempla situações onde existam áreas de giro na pista. Nesses casos, supõe-se que a aeronave chega a velocidade nula no ponto de giro e, após o giro, acelera apenas até a velocidade compatível com a saída de pista mais próxima. Naturalmente, os tempos de ocupação de pista são sempre maiores para tais situações.

Foram feitas simulações para cada categoria de aeronave e cada raio de saída de pista propostos no documento Doc 9157, registrados na Figura 2.4. Para cada caso adotou-se um número de duas mil (2.000) iterações, visto que esse é o número mínimo de iterações recomendado para obter um histograma estável através do método de Monte Carlo (VOSE, 2019).

Assim, considerando as categorias de aeronaves e raios da saída de pista presentes no aeródromo, calcula-se o tempo decorrido para a aeronave percorrer os três segmentos até a liberação completa da pista. Obtém-se então uma distribuição de tempos de ocupação para cada saída de pista presente no aeródromo.

Em seguida, também para cada saída de pista, calcula-se a porcentagem de aeronaves de cada categoria que conseguem utilizar cada saída localizada a uma dada distância da cabeceira. Para isso, verifica-se a porcentagem de aeronaves atingem a velocidade de saída antes de alcançar as saídas.

A próxima seção apresenta a metodologia de determinação do tempo de ocupação da pista durante a decolagem (TOPD).

3.2 Metodologia Proposta para estimativa do tempo de ocupação da PPD na decolagem

Para a estimativa do TOPD (Tempo de Ocupação da Pista para Decolagem), utiliza-se de metodologia descrita no Doc 8168 da ICAO, 2006. De acordo com o documento, deve-se estimar: i) o tempo de ingresso na pista; e ii) o tempo de corrida na pista.

Para o tempo de ingresso na pista é necessário medir a distância percorrida para a aeronave alcançar a cabeceira da pista partindo da posição de espera mais próxima. Essa medida pode ser feita por meio da planta do aeródromo ou através do Google Earth®. Supondo-se que todas as aeronaves realizam o procedimento de entrada na pista com

velocidade de 13 kts, que é a velocidade mínima de percurso numa pista de táxi (Doc 9157, ICAO, 2005), calcula-se o tempo de ingresso na pista.

Para o tempo de corrida na pista, supõe-se que as aeronaves aceleram até atingir uma velocidade de rotação respectiva a cada categoria de aeronave. Velocidade de rotação é a velocidade na qual o piloto inicia a rotação da aeronave, retirando o trem de nariz do solo (Jorge, 2018). O ponto em que a aeronave alcança essa velocidade é chamado ponto de rotação.

Os valores de velocidade de rotação (V_{rot}) são distintos para cada categoria de aeronave, e podem ser obtidos com os manuais de cada uma delas. Fazendo-se uma média entre os valores obtidos entre as aeronaves representantes de cada categoria, conforme lista fornecida na AC 150/5300-13^a (FAA, 2014), foram obtidos os valores explicitados na Tabela 3.3 abaixo:

Tabela 3.3 - Valores médios de velocidade de rotação por categoria de aeronave.

Categoria	Velocidade de Rotação (km/h)
A	180,0
B	200,0
C	220,0
D	240,0

Para a aceleração (a_{dec}), foi feita uma distribuição triangular semelhante ao descrito no item 3.1. Para encontrar os valores máximos e mínimos admissíveis, utilizou-se a segunda lei de Newton: a força, comumente denominada empuxo (*thrust*), atuante sobre a aeronave é aquela gerada pelo motor durante a decolagem, tendo módulo igual a massa da aeronaves multiplicada por a_{dec} . O valor do empuxo está explicitado nos manuais de cada aeronave, bem como o tipo de motor que opera na aeronave. Para o presente estudo, utilizou-se como padrão o motor CFM 56-3B1, presente nas aeronaves da Boeing® (Boeing, 2005). A aeronave utilizada como padrão foi a B737-500, por apresentar características intermediárias entre as categorias. Tem-se que a aceleração pode ser encontrada através de:

$$\text{Empuxo} = \text{Peso} * \text{aceleração} \quad (3.2)$$

Portanto, o valor de aceleração mínimo é encontrado considerando que a aeronave decola com peso máximo permitido, enquanto a aceleração máxima é obtida considerando que a aeronave decola com 70% da sua carga paga máxima. Com isso, obte-se máximo de 1,72 m/s² e mínimo de 1,47 m/s², a moda foi considerada como a média entre os valores máximos e mínimos, 1,6 m/s². Assim, foi construída a distribuição triangular representada a Figura 3.8.

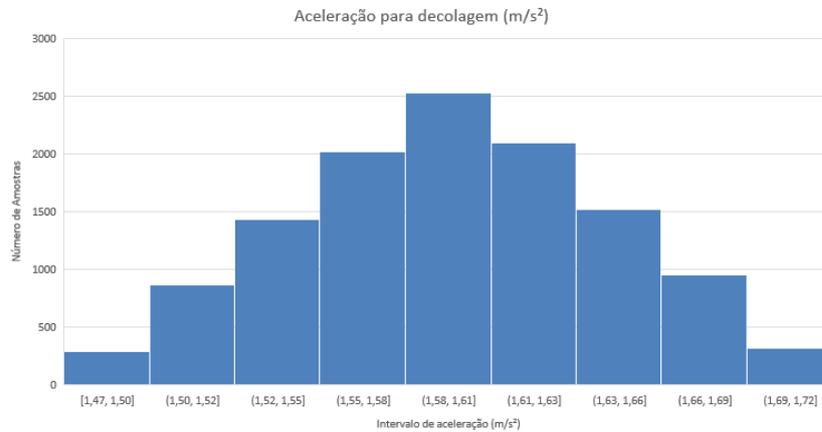


Figura 3.8 - Histograma da distribuição de a_{dec}

Assim, é possível encontrar o tempo necessário para alcançar o ponto de rotação através da equação:

$$T_{pr} = \frac{V_{rot} - 6,7}{a_{dec}} \quad (3.3)$$

Por fim, partindo da velocidade de rotação, da aceleração e da distância entre ponto de rotação e fim da TORA, determina-se o tempo necessário pra que a aeronave ultrapasse a cabeceira (T_{cab}). Isso é possível graças ao auxílio da equação de Torricelli:

$$T_{cab} = \frac{\left(\sqrt{V_{rot}^2 + 2 * a_{dec} * (TORA - S_{pr})} - V_{rot} \right)}{a_{dec}} \quad (3.4)$$

Onde S_{pr} representa a distância entre cabeceira e ponto de rotação, valor este que pode ser obtido também com o auxílio da equação de Torricelli:

$$S_{pr} = \frac{V_{rot}^2}{2 * a_{dec}} \quad (3.5)$$

O TOPD é dado então pela soma entre esses três tempos: tempo de ingresso na pista, tempo até atingir o ponto de rotação e tempo até ultrapassar a cabeceira.

3.3 Metodologia Proposta para a extensão do ACRP 79

A fim de aperfeiçoar o modelo apresentado pelo ACRP 79, foi feita a sua integração com o método descrito nos itens 3.1 e 3.2, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3.9 abaixo.

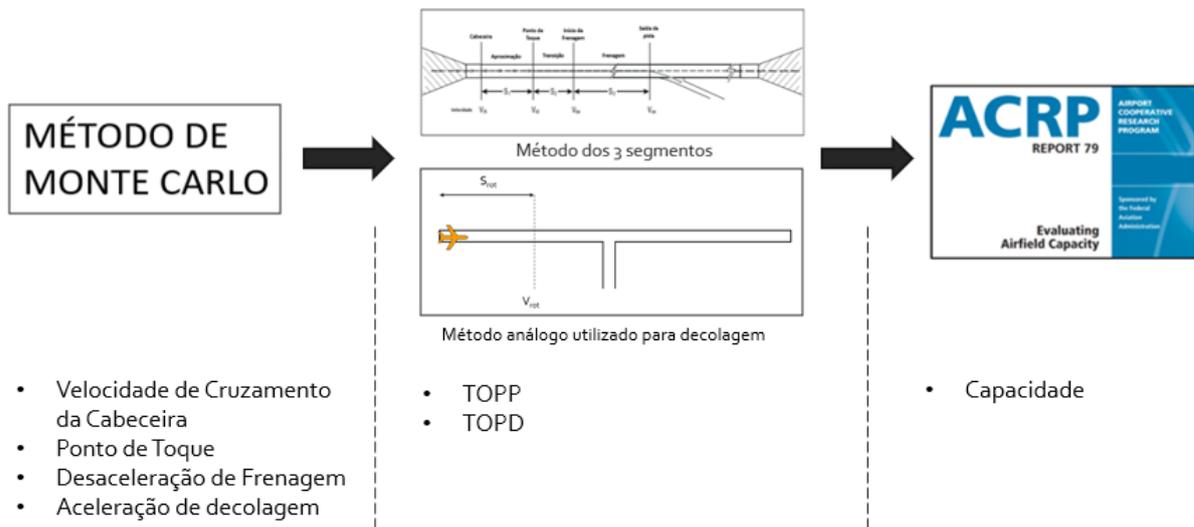


Figura 3.9 - Fluxograma entre os métodos e os respectivos parâmetros obtidos a partir de cada um deles

Como forma de simplificação, no presente estudo os agrupamentos de aeronaves foram realizados de acordo com as 4 primeiras categorias previstas no DOC 8168 e conforme a Tabela 3.1, ao invés das 7 categorias previstas no ACRP 79, conforme Figura 2.8. Assim, todas as aeronaves classe A foram classificadas como Small-S, as classe B como Small-T, as classe C como Large-TP e as classe D como Heavy. Com base na porcentagem de cada categoria operante, faz-se um quadro de probabilidade para chegada de pares aeronaves: a líder, que está mais próxima da pista, e a seguidora, que irá realizar sua operação após a líder. A Tabela 3.4 abaixo ilustra as probabilidades de operação de cada par de categoria para o mix fornecido na Tabela 3.2:

Tabela 3.4 - Probabilidade de ocorrência de cada par de aeronaves em pouso ou decolagem para o mix exemplificado

Líder	Seguidora	Probabilidade de Ocorrência
A	A	1,4%
	B	0,8%
	C	9,0%
	D	0,7%
B	A	0,8%
	B	0,5%
	C	5,3%
	D	0,4%
C	A	9,0%
	B	5,3%
	C	56,3%
	D	4,5%
D	A	0,7%
	C	0,4%
	B	4,5%
	D	0,4%

Foram feitas simulações para cada categoria de aeronave considerada e cada raio de saída de pista propostos no documento DOC 9157, registrados na Figura 2.4. Como são consideradas 4 categorias de aeronaves e 7 raios de saída distintos, considera-se um total de 28 casos. Conforme supracitado adotou-se um número de duas mil (2.000) simulações, onde cada uma delas utiliza-se de estimativas da velocidade de cruzamento da cabeceira, distância entre cabeceira e ponto de toque desaceleração no trecho de frenagem e aceleração de decolagem, dados estes que eram constantes obtidas empiricamente pelo ACRP 79.

Com a metodologia proposta é possível obter uma distribuição dos tempos de ocupação de pouso e decolagem (considerando-se o tempo de alinhamento da aeronave), valores estes que, inicialmente, deveriam ser computados pelo usuário. Escolhe-se, para cada caso, o menor tempo de ocupação maior que 95% dos valores obtidos na distribuição, assim, os valores antes considerados como valores médios obtidos empiricamente passam a ser calculados de modo mais detalhado, obtendo-se uma análise de capacidade mais precisa

Para implantar as variáveis na planilha do ACRP 79, criaram-se novas abas onde são feitos cálculos de TOPP e TOPD, através da metodologia descrita nos itens 3.1 e 3.2. Esses valores são então inseridos na aba de *inputs*, conforme exemplificado na Figura 3.10 e na

Figura 3.11, onde os trechos destacados correspondem a dados oriundos das novas abas. No entanto, os valores de TOPD não estão disponibilizados na aba de *inputs*, sendo necessário inserí-los numa aba oculta onde se realizam cálculos para capacidade de pistas simples.

Runway Scenario Selection	3	← Select a Dual Parallel Runway Scenario in cell C8					
Divergent Departure Routes	Yes	15 deg or more	Runway 1 Operations	Mixed Operations			
Runway Separation Distance	1.250	ft	Runway 2 Operations	Departures Only			
VMC-Departure-Arrival Separation	2.0	nm	Arrival - Arrival Std. Dev.	18.0	sec		
IMC-Departure-Arrival Separation	2.0	nm	Departure ROT Std. Dev.	6.0	sec		
Length of Common Approach	5.0	nm	Z-Value, 95% Confidence	1,645	-----		
Operations Assumption on Touch -N- Go's	0%	T-Factor (Touch-N-Go's)		1,00			
RESET INPUTS							
Aircraft Classification New Category	Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-757	Heavy
Previous FAA Category	A	B	C	C	C	C	D
Maximum Gross Takeoff Weight (MTOW)	Less than 12,500 lbs (Single Engine)	Less than 12,500 lbs (Twin Engine)	Between 12,500 lbs and 41,000 lbs	Between 41,000 lbs and 255,000 lbs	Between 41,000 lbs and 300,000 lbs	Boeing 757 Series	More than 300,000 lbs
Operating Fleet Mix Share Allocations	Enter the actual or expected % share for each aircraft class						
	0.0%	0.0%	0%	81.3%	0.0%	0.0%	18.7%
Arrival Runway Occupancy Time Time in Seconds	Enter the estimated time from touchdown to runway exit						
	95	80	71	71	71	71	78
Average Approach Speeds Velocity in Knots	Enter the average suggested manufacturers final approach speed under normal conditions						
	88	115	137	137	137	137	161
Runway Exit Availability	Excellent (4 or more Exits)		100%	Runway Crossing Delay ?	No		
Full Parallel Taxiway	Full Taxiway		100%	Average Crossing Delay	0		
Airport Traffic Control Tower	Yes		Availability	Crossings during Peak Hour	0		
					Frequency		

Figura 3.10 - Dados inseridos (destacados em amarelo) na aba dos usuários do ACRP 79, para pistas paralelas. Fonte: TRB (2012) adaptado pelo autor

Runway Scenario Selection	4	← Select an Intersecting Runway Scenario in cell C8					
Distance to Intersection (Rnwy 1)	5.000	ft	Runway 1 (Operations)	Mixed Operations			
Distance to Intersection (Rnwy 2)	1.500	ft	Runway 2 (Operations)	Departures Only			
Is Rnwy 1 departure in Rnwy 2 RSA ?	No	Divergent Departure Routes		Yes			
Is Rnwy 1 departure in Rnwy 2 RPZ?	No	Arrivals Deceleration Rate (avg.)		6.2	ft/sec/sec		
Potential In-air conflict at Intersection	No	Departures Acceleration Rate (avg.)		4.0	ft/sec/sec		
VMC-Departure-Arrival Separation	2.0	nm	Arrival - Arrival Std. Dev.	18.0	sec		
IMC-Departure-Arrival Separation	2.0	nm	Departure Release Std. Dev.	6.0	sec		
Length of Common Approach	5.0	nm	Z-Value, 95% Confidence	1,645	-----		
Operations Assumption on Touch -N- Go's	0%	T-Factor (Touch-N-Go's)		1,00			
RESET INPUTS							
Aircraft Classification New Category	Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-757	Heavy
Previous FAA Category	A	B	C	C	C	C	D
Maximum Gross Takeoff Weight (MTOW)	Less than 12,500 lbs (Single Engine)	Less than 12,500 lbs (Twin Engine)	Between 12,500 lbs and 41,000 lbs	Between 41,000 lbs and 255,000 lbs	Between 41,000 lbs and 300,000 lbs	Boeing 757 Series	More than 300,000 lbs
Operating Fleet Mix Share Allocations	Enter the actual or expected % share for each aircraft class						
	0.0%	0.0%	0.0%	81.3%	0.0%	0.0%	18.7%
Arrival Runway Occupancy Time Time in Seconds	Enter the estimated time from touchdown to runway exit						
	95	80	71	71	71	71	78
Average Approach Speeds Velocity in Knots	Enter the average suggested manufacturers final approach speed under normal conditions						
	88	115	137	137	137	137	161

Figura 3.11 - Dados inseridos (destacados em amarelo) na aba dos usuários do ACRP 79, para pistas não paralelas. Fonte: TRB (2012) adaptado pelo autor

4 APLICAÇÃO

A fim de se analisar as variações de tempo de ocupação durante pouso, foram feitas simulações em três aeroportos brasileiros, sendo escolhidos aeródromos que possuem: a) um baixo número de pistas de saída; b) uma quantidade razoável de pistas de saída e; c) uma grande disponibilidade de pistas de saída. Essa comparação tem objetivo de explicitar a importância de se considerarem TOPPs relativos a cada pista, ao contrário da média geral proposta pela ACRP 79. Analogamente, foram considerados também três aeroportos para comparação do tempo de ocupação durante decolagem, sendo considerados aeroportos com longo trecho de alinhamento na PPD, com trecho intermediário e com acesso direto à cabeceira.

Além disso, para se analisar a aplicabilidade da metodologia proposta no capítulo 3, foram feitas simulações para dois aeroportos brasileiros que apresentam pistas duplas. Os aeroportos selecionados foram o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos – Governador André Franco Montoro (SBGR), que possui duas pistas paralelas, e o Aeroporto Internacional de São Luís - Marechal Cunha Machado (SBSL), que possui pistas que se cruzam.

4.1 Comparação Entre Tempos de Ocupação da PPD

4.1.1 Tempos de Ocupação da PPD Durante o Pouso

Para a comparação entre TOPPs, foram considerados os aeroportos de: Manaus, por ter acesso apenas nas cabeceiras e, portanto, baixo número de pistas de saída; Guarulhos, sendo considerado nessa caso operações de pouso na pista de cabeceira 09R/27L, por ter número razoável de saídas de pista e; novamente Guarulhos, nesse caso considerando operações de pouso na pista 09L/27R, pelo alto número de saídas possíveis. Esses aeroportos estão ilustrados na Figura 4.1, na Figura 4.2 e na Figura 4.3, bem como as distâncias relativas a cada saída. As setas em vermelho indicam operações de pouso.



Figura 4.1 - Disposição de pistas de saídas relativas ao Aeroporto de Manaus (SBEG)



Figura 4.2 - Disposição de pistas de saídas relativas à pista 09R/27L do Aeroporto de Guarulhos (SBGR)



Figura 4.3 - Disposição de pistas de saídas relativas à pista 09L/27R do Aeroporto de Guarulhos (SBGR)

Foram obtidas então distribuições para os tempos de TOPPs para os três casos supracitados, cujos histogramas estão ilustrados nos itens 4.1.1.1, 4.1.1.2 e 4.1.1.3 a seguir.

4.1.1.1 Tempos de Ocupação Durante Pouso Referentes ao Aeroporto de Manaus

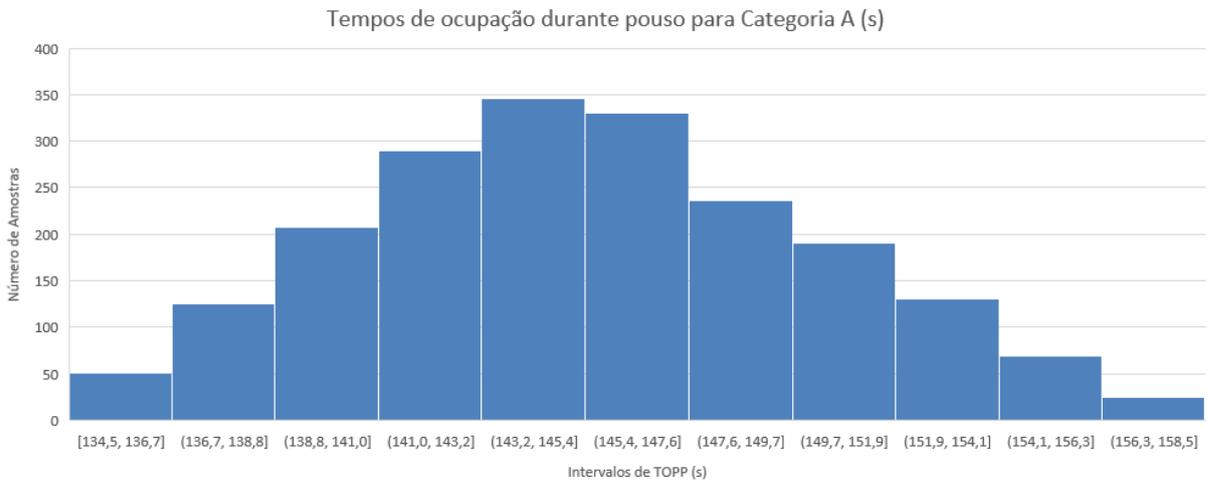


Figura 4.4 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista de SBEG

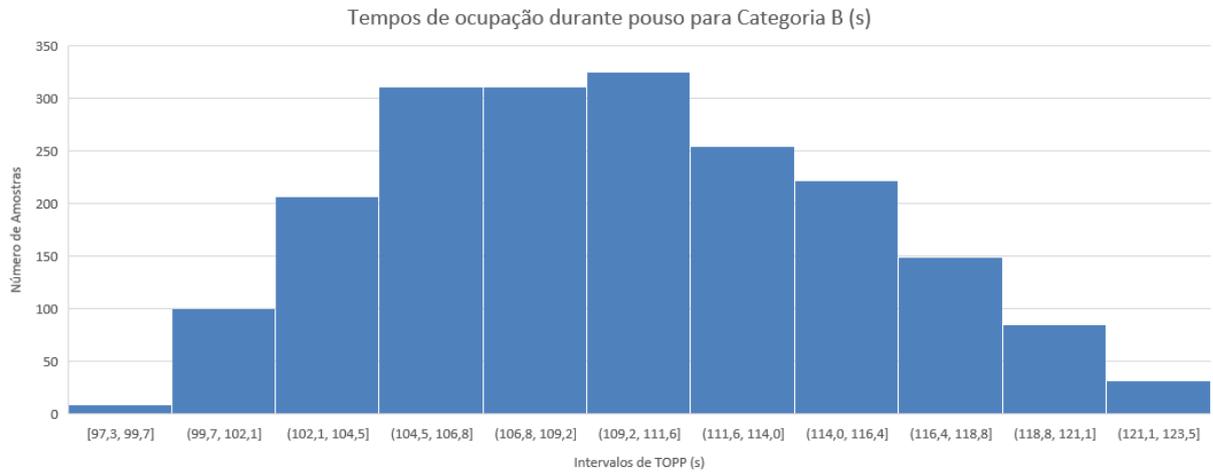


Figura 4.5 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista de SBEG

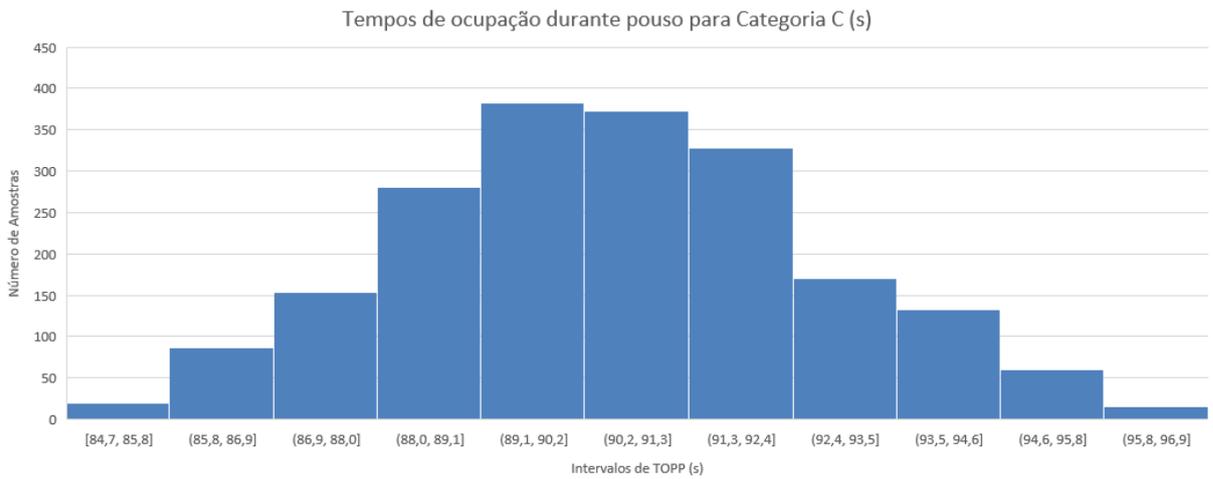


Figura 4.6 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista de SBEG

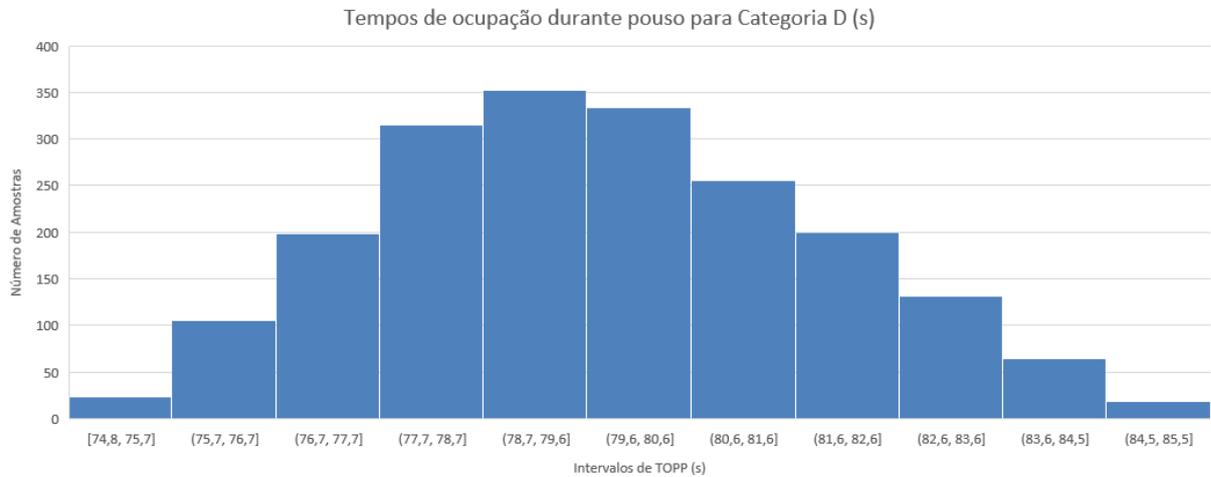


Figura 4.7 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista de SBEG

4.1.1.2 Tempos de Ocupação Durante Pouso Referentes à Pista 09R/27L de Guarulhos

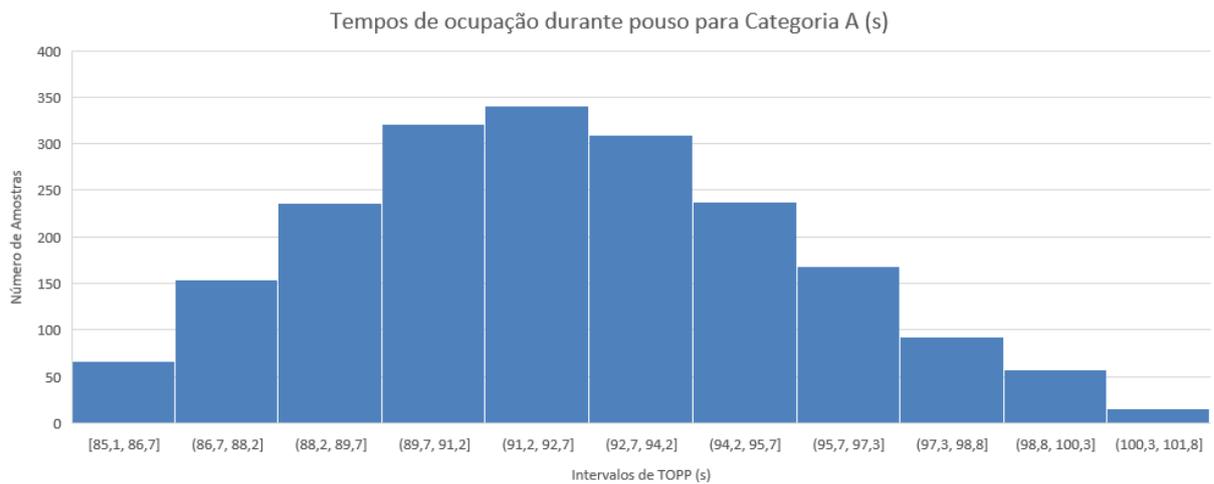


Figura 4.8 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista 09R/27L de SBGR

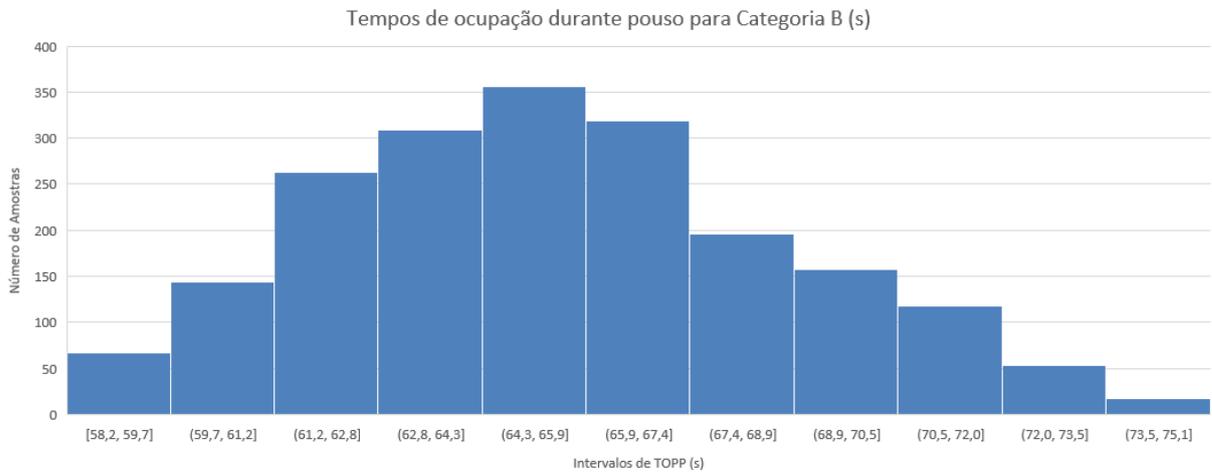


Figura 4.9 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista 09R/27L de SBGR

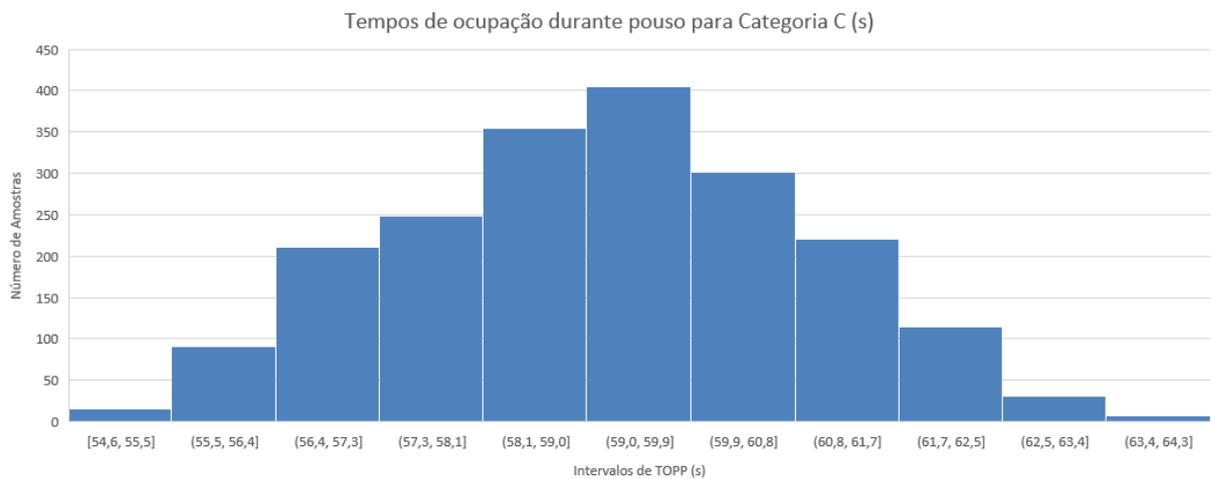


Figura 4.10 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista 09R/27L de SBGR

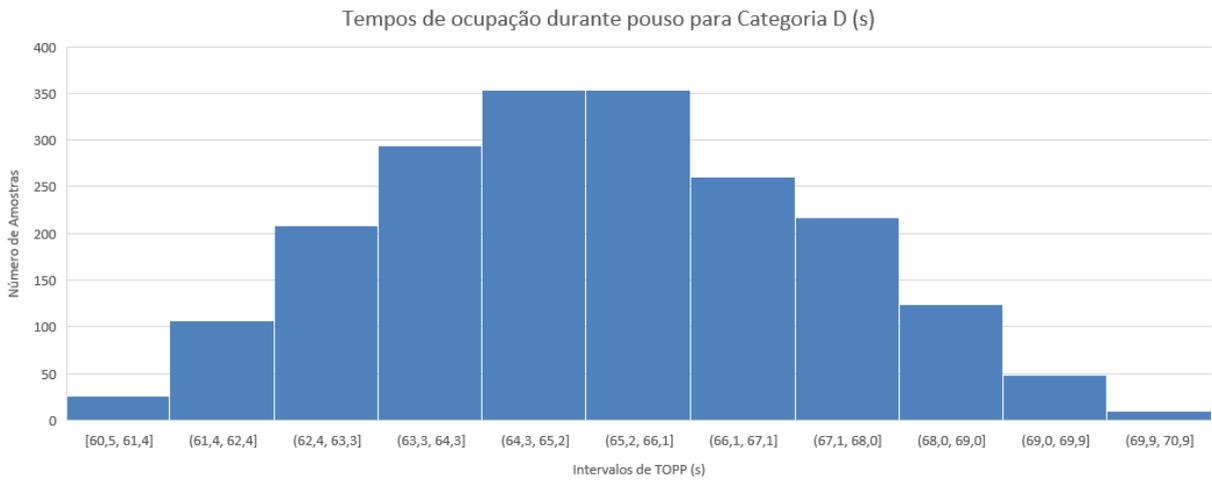


Figura 4.11 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista 09R/27L de SBGR

4.1.1.3 Tempos de Ocupação Durante Pouso Referentes à Pista 09L/27R de Guarulhos

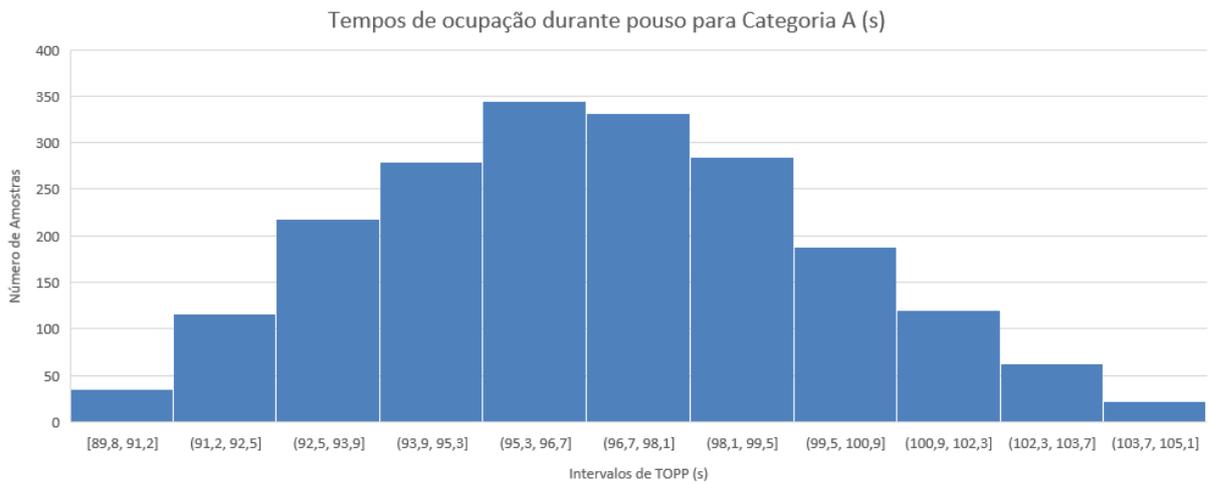


Figura 4.12 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista 09L/27R de SBGR

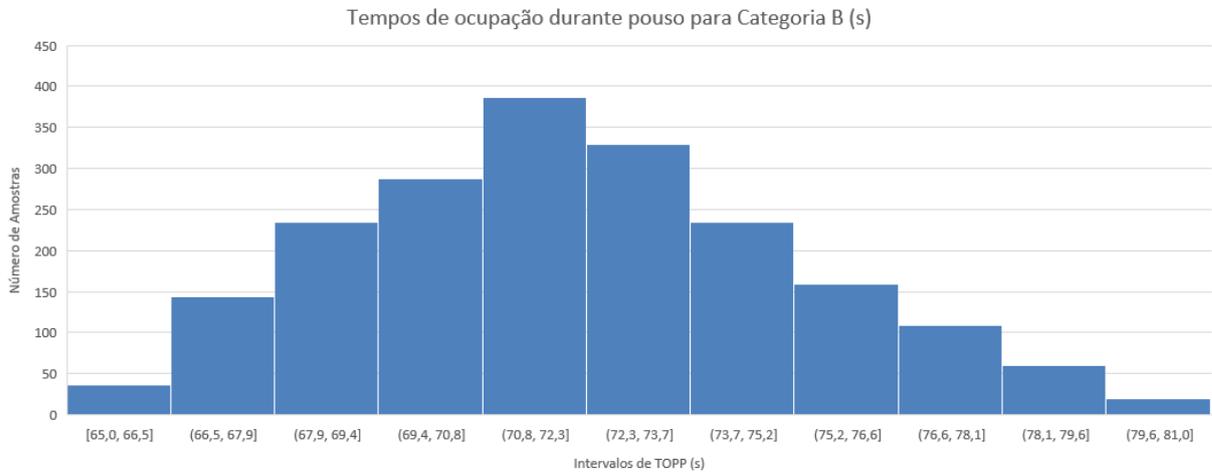


Figura 4.13 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista 09L/27R de SBGR

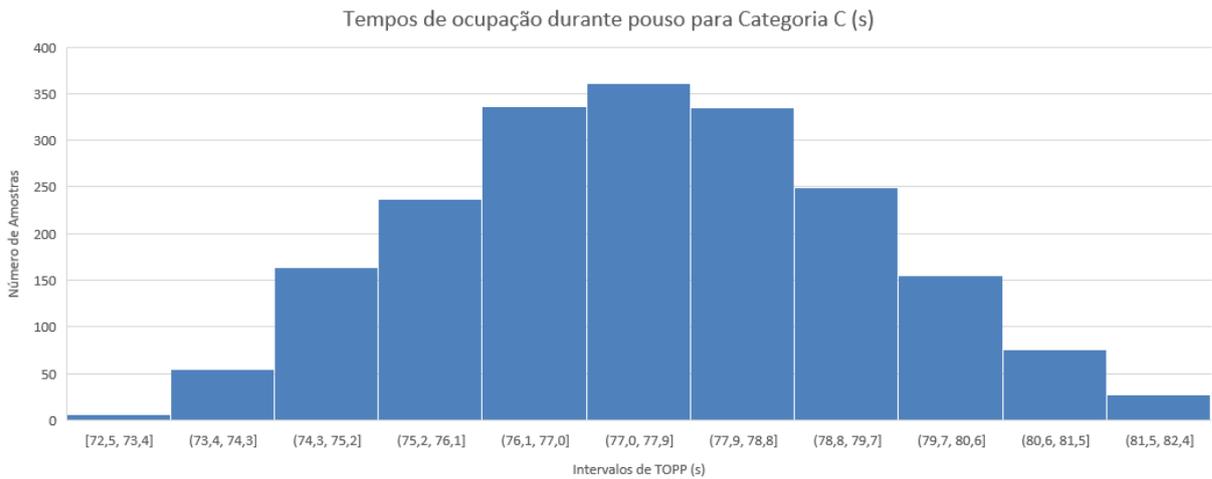


Figura 4.14 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista 09L/27R de SBGR

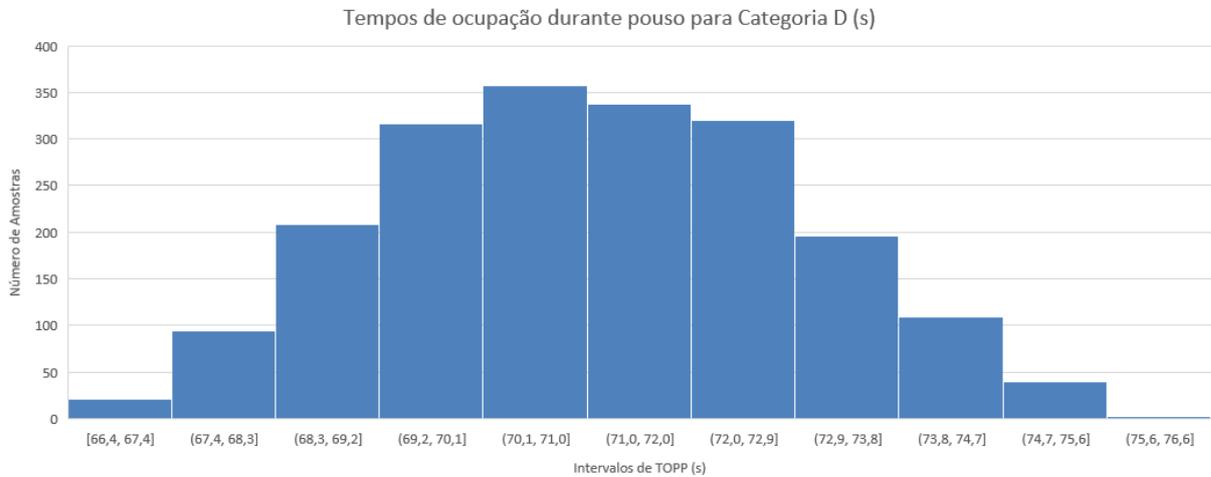


Figura 4.15 -Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista 09L/27R de SBGR

4.1.2 Tempos de Ocupação Durante Decolagem

Para a comparação entre TOPDs, foram considerados os aeroportos de: Palmas, por ter acesso à PPD distante da cabeceira; Curitiba, por ter acesso razoavelmente próximo a cabeceira e; Guarulhos, considerando operações de decolagem partindo da pista de cabeceira 09L/27R, por ter acesso direto à cabeceira. Esses aeroportos estão ilustrados na Figura 4.16, na Figura 4.17 e na Figura 4.18, bem como as distâncias relativas a cada caminho percorrido para acesso. As setas em azul indicam operações de decolagem.



Figura 4.16 - Disposição de pistas de acesso relativas ao Aeroporto de Palmas (SBPJ)



Figura 4.17 - Disposição de pistas de acesso relativas ao Aeroporto de Curitiba (SBCT)



Figura 4.18 - Disposição de pistas de acesso relativas à pista 09L/27R do Aeroporto de Guarulhos (SBGR)

Foram obtidas então distribuições para os tempos de TOPDs para os três casos supracitados, cujos histogramas estão ilustrados nos itens 4.1.2.1, 4.1.2.2 e 4.1.2.3 a seguir.

4.1.2.1 Tempos de Ocupação Durante Decolagem Referentes a Palmas

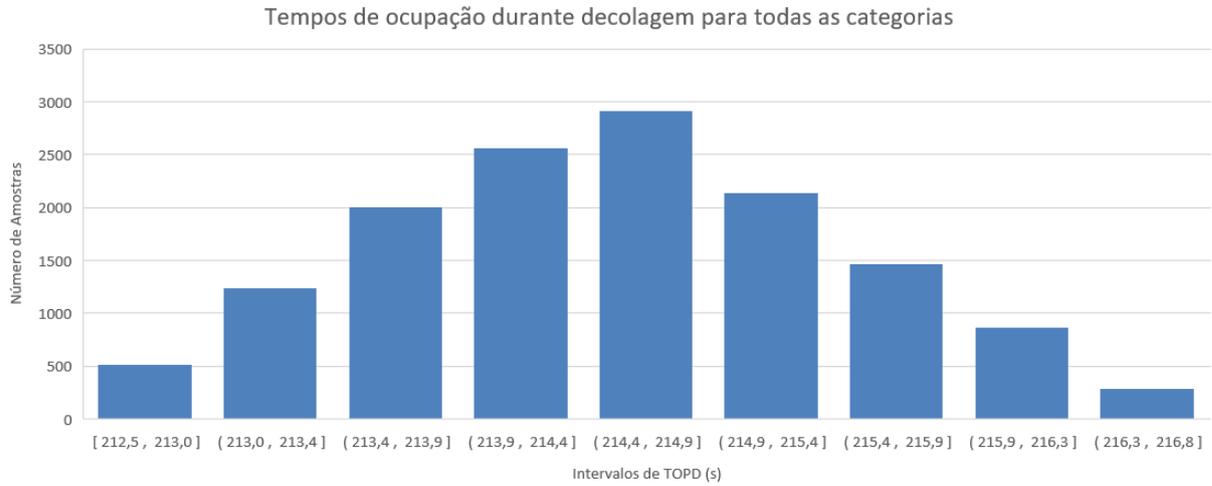


Figura 4.19 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista SBPJ

4.1.2.2 Tempos de Ocupação Durante Decolagem Referentes a Curitiba

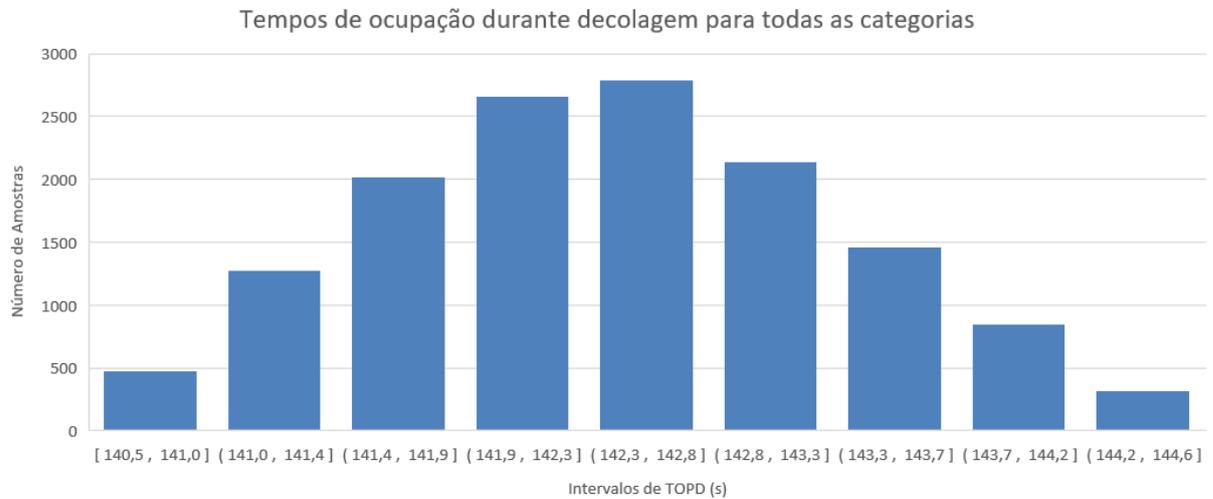


Figura 4.20 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista SBCT

4.1.2.3 Tempos de Ocupação Durante Decolagem Referentes à Pista 09L/27R de Guarulhos

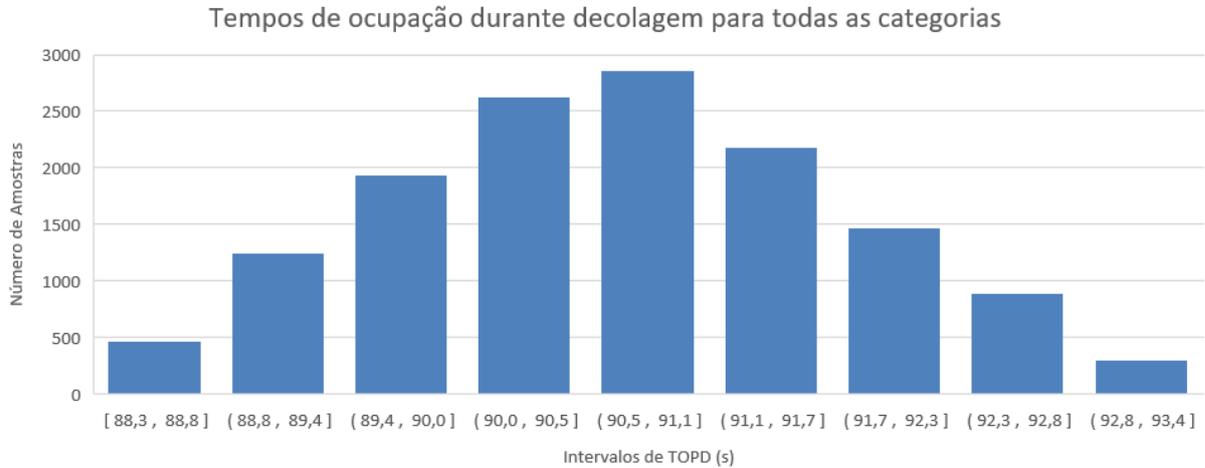


Figura 4.21 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista 09L/27R de SBGR.

4.2 Análise da Capacidade do Aeroporto de Guarulhos (SBGR)

Inicialmente, coletou-se as distâncias entre cabeceira de pouso e as pistas de saída. Esses dados podem ser facilmente coletados com auxílio do Google Earth. No caso do Aeroporto de Guarulhos, as operações de pouso ocorrem exclusivamente na pista 09R/27L, já as de decolagem, na pista 09L/27R, além disso, 70% do tempo o aeroporto opera em VMC, o restante tempo, ele opera em IMC (Almeida, 2014).

A Figura 4.22 esquematiza as opções de saída de uma das pistas do aeroporto em questão, com pouso na cabeceira 09R, bem como o acesso até a cabeceira 09L, para decolagem. A possibilidade de pouso está representada pela seta vermelha, enquanto a possibilidade de decolagem, pela seta azul. Vale lembrar ainda que a nomenclatura das saídas aqui apresentadas são ilustrativas, não condizendo com a denominação de cada pista no aeródromo.



Figura 4.22 - Esquemática das distâncias até cada saída de pista e acesso a cabeceira

Além disso, em dezembro de 2018 o aeródromo passou a realizar operações segregadas simultâneas nas pistas, mantendo uma distância de 4 NM entre uma aeronave que deseje pousar e uma que deseje decolar (Dau, 2018).

O mix de aeronaves atuante no aeroporto foi estimado através da base de dados de vôos registrados, disponibilizada pelo portal SIROS da ANAC. Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Mix de aeronaves obtidos para a Hora Pico.

Categoria de Aeronave	Mix na Hora Pico
A	0,0%
B	0,0%
C	81,3%
D	18,7%

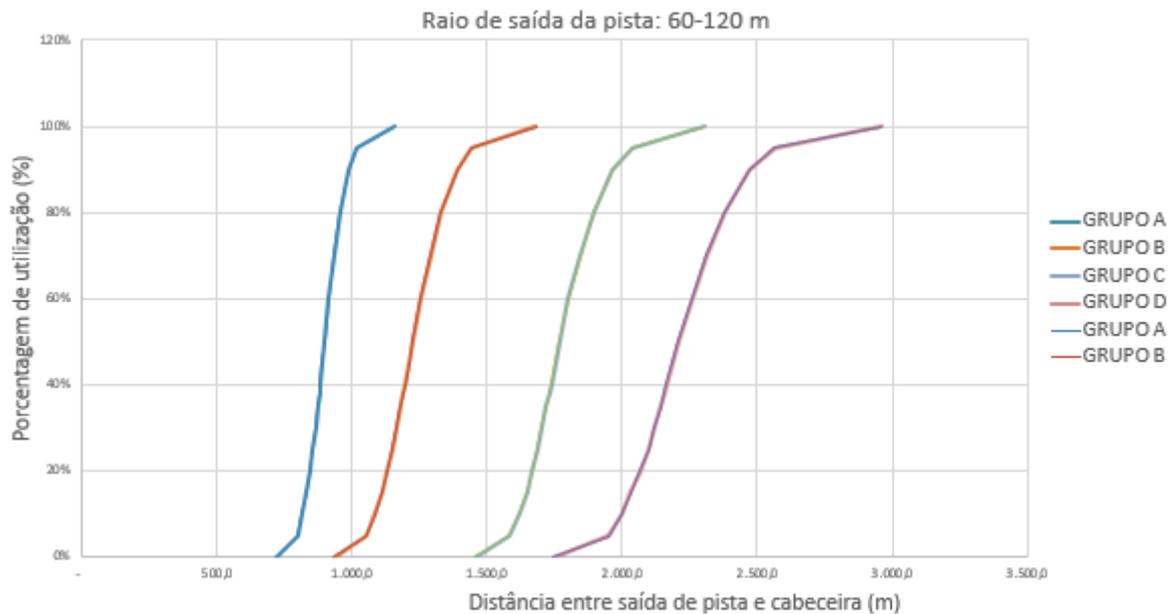
A Tabela 4.2 relaciona cada saída mostrada na Figura 4.22 com seus respectivos raios e ângulos de saída.

Tabela 4.2 - Valores de raio e ângulo de saída para cada pista de saída.

Saída	Raio (m)	Ângulo (rad)
A	550	0,52
B	550	0,52
C	90	1,57

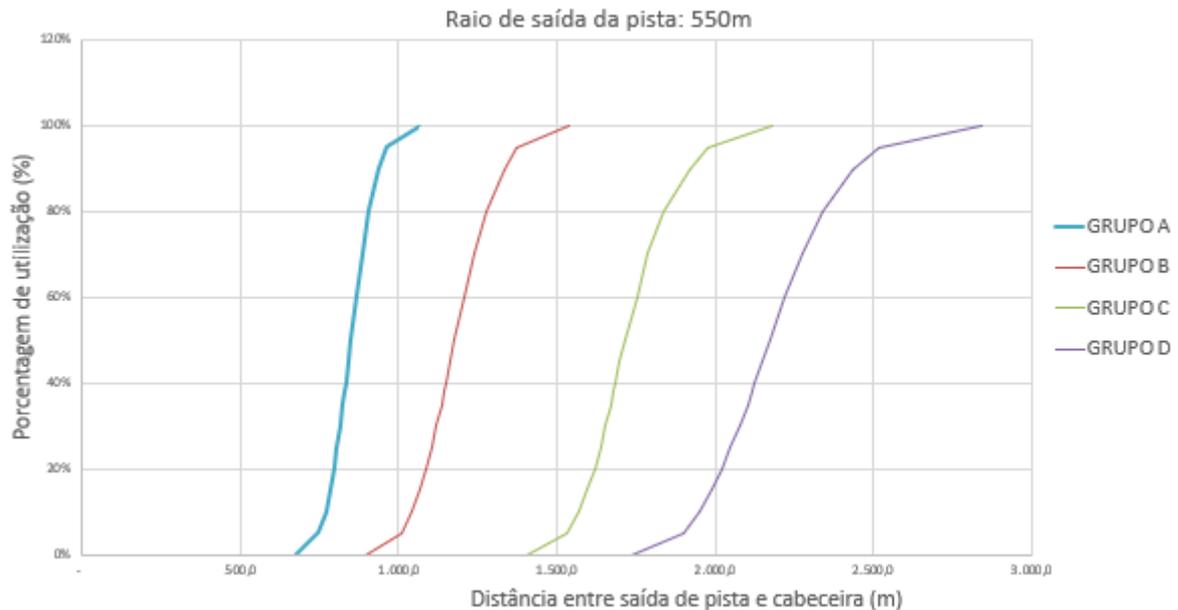
A Figura 4.23 exemplifica a porcentagem de utilização da saída pelas aeronaves de cada categoria no caso de uma saída de raio entre 60 e 120 m, como é o caso da saída C, que possui raio de 90 m. Como exemplo, para aeronaves categoria C, uma saída localizada a 2.500 m da cabeceira, atenderia 100% da aeronaves quem pousa. Por outro lado, para aeronaves categoria D, a mesma saída atenderia cerca de 90% das aeronaves.

Figura 4.23 - Porcentagem de utilização da saída para cada categoria com saída de raio entre 60 e 120 m



Por outro lado, para um raio de 550 m, como é o caso da saída D ilustrada na Figura 4.22, uma saída localizada a 2.500 m da cabeceira atenderia não 90, mas 95% das aeronaves categoria D. A porcentagem de utilização da saída pelas aeronaves de cada categoria no caso de uma saída de raio 550 m está ilustrada na Figura 4.24.

Figura 4.24 - Porcentagem de utilização da saída para cada categoria com saída de raio 550 m



Tendo em vista a metodologia descrita no capítulo 3, foram obtidas distribuições para tempos de ocupação durante pouso e decolagem, além da capacidade estimada para o aeródromo.

Estimou-se ainda um tempo de atraso devido à necessidade de cruzar a pista 09L/27R durante o taxiamento das aeronaves que acabam de pousar na 09R/27L. Para essa estimativa, divide-se a distância entre posições de parada pela velocidade de taxiamento da aeronave, 15 nós. O tempo encontrado é então multiplicado pela quantidade de cruzamentos em uma hora. Conforme será discutido no capítulo 5, a capacidade declarada do aeroporto é 55 movimentos por hora (CGNA, 2019). Considerando que metade dessas operações são de pouso, estima-se que em uma hora haja a necessidade de cerca de 22 cruzamentos. Assim, encontra-se o tempo total em que a pista 09L/27R estará indisponível devido a necessidade de cruzamentos. Os valores supracitados estão disponíveis na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Estimativa do tempo de atraso devido a necessidade de cruzamento de pista

Atraso devido a cruzamentos	Cruzamentos em uma hora	Atraso devido a cruzamentos
31 s	22	682 s

4.2.1 Tempo de Ocupação Durante Pouso

Foram obtidas distribuições de TOPP para cada categoria de aeronave analisada. Essas distribuições estão representadas na Figura 4.8, na Figura 4.9, na Figura 4.10 e na Figura 4.11.

4.2.2 Tempo de Ocupação Durante Decolagem

Foi obtida uma distribuição de TOPD que resume todas as categorias de aeronaves analisadas. Essa distribuição está representada na Figura 4.21.

4.2.3 Capacidade Estimada

Tendo em vista os tempos de ocupação mostrados nos itens 4.2.1 e 4.2.2, obtém-se os resultados mostrados na Figura 4.25.

Runway Allocations	VMC	IMC	Average
Arrivals only capacity (Rnwy 1)	29	25	28
Arrivals capacity (Rnwy 1) (inc. TNGs)	29	25	28
Mixed Departures Capacity (Rnwy 1) (inc. TNGs)	0	0	0
Arrivals only capacity (Rnwy 2)	0	0	0
Arrivals capacity (Rnwy 2) (inc. TNGs)	0	0	0
Mixed Departures Capacity (Rnwy 2) (inc. TNGs)	0	0	0
Departures only capacity (Rnwy 2)	42	42	42
Total Arrivals & Departures Capacity	71	67	69
Arrivals Percentage	41%	37%	40%

Figura 4.25 – Quadro com estimativa de capacidade para SBGR

Observa-se, portanto, que a capacidade possui um valor médio de aproximadamente 69 movimentos por hora.

4.3 Análise da Capacidade do Aeroporto de São Luís (SBSL)

Inicialmente, coletou-se as distância entre cabeceira de pouso e as pistas de saída. Esses dados podem ser facilmente coletados com auxílio do Google Earth. No caso do Aeroporto de São Luís, não foram encontrados dados em documentos públicos que indicassem os tipos de operações realizadas em cada pista, nem dados acerca das condições VMC e IMC do aeródromo. Por isso, no presente estudo considerou-se que a pista 06/24 opera exclusivamente pousos e a pista 09/27 é exclusiva para decolagens. Quanto as condições meteorológicas, considerou-se o valor médio recomendado pela ACRP 79, 90% do tempo em VMC e 10% em IMC.

A Figura 4.26 esquematiza as opções de saída de uma das pistas do aeroporto em questão, com pouso na cabeceira 06, bem como o acesso a cabeceira 09 para a decolagem. A possibilidade de pouso está representada pela seta vermelha, enquanto a possibilidade de decolagem, pela seta azul. Vale lembrar ainda que a nomenclatura das saídas aqui apresentadas são ilustrativas, não condizendo com a denominação de cada pista de táxi no aeródromo. A saída B representa a saída da aeronave depois de realizar a manobra de giro no *turn-pad* ao final da pista.

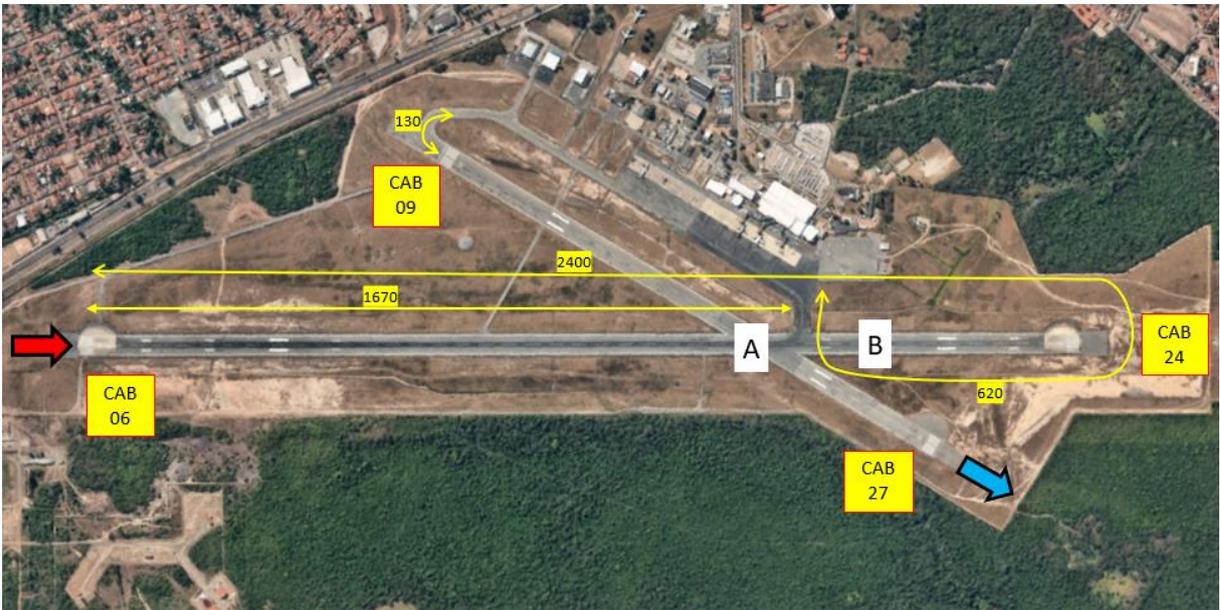


Figura 4.26 - Esquematização das distâncias até cada saída de pista e acesso a cabeceira

O mix de aeronaves atuante no aeroporto foi estimado através da base de dados de vôos registrados, disponibilizada pelo portal SIROS da ANAC. Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Mix de aeronaves obtidos para a Hora Pico.

Categoria de Aeronave	Mix na Hora Pico
A	12,7%
B	7,4%
C	79,9%
D	0,0%

A Tabela 4.5 relaciona cada saída mostrada na Figura 4.22 com seus respectivos raios e ângulos de saída.

Tabela 4.5 - Valores de raio e ângulo de saída para cada pista de saída.

Saída	Raio (m)	Ângulo (rad)
A	60	1,57
B	60	1,57

A Figura 4.23 exemplifica a porcentagem de utilização da saída pelas aeronaves de cada categoria no caso de uma saída de raio entre 60 e 120 m, como é o caso da saída A e B, que possuem raio de 60 m.

Tendo em vista a metodologia descrita no capítulo 3, foram obtidas distribuições para tempos de ocupação durante pouso e decolagem, além da capacidade estimada para o aeródromo.

Estimou-se ainda um tempo de atraso devido a necessidade de cruzar a pista 09L/27R durante o taxiamento das aeronaves que operarem a outra pista. Para essa estimativa, divide-se a distância entre posições de parada pela velocidade de taxiamento da aeronave, 15 nós. O tempo encontrado é então multiplicado pela quantidade de cruzamentos em uma hora. Conforme será discutido no capítulo 5, a capacidade declarada do aeroporto é 55 movimentos por hora (CGNA, 2019). Considerando que metade dessas operações são de pouso, estima-se que em uma hora haja a necessidade de cerca de 22 cruzamentos. Assim, encontra-se o tempo total em que a pista 09L/27R estará indisponível devido a necessidade de cruzamentos. Os valores supracitados estão disponíveis na Tabela 4.3.

Tabela 4.6 - Estimativa do tempo de atraso devido a necessidade de cruzamento de pista

Atraso devido a cruzamentos	Cruzamentos em uma hora	Atraso devido a cruzamentos
31 s	22	682 s

4.3.1 Tempo de Ocupação Durante Pouso

Foram obtidas distribuições de TOPP para cada categoria de aeronave analisada. Essas distribuições estão representadas na Figura 4.27, na Figura 4.28, na Figura 4.29 e na Figura 4.30.

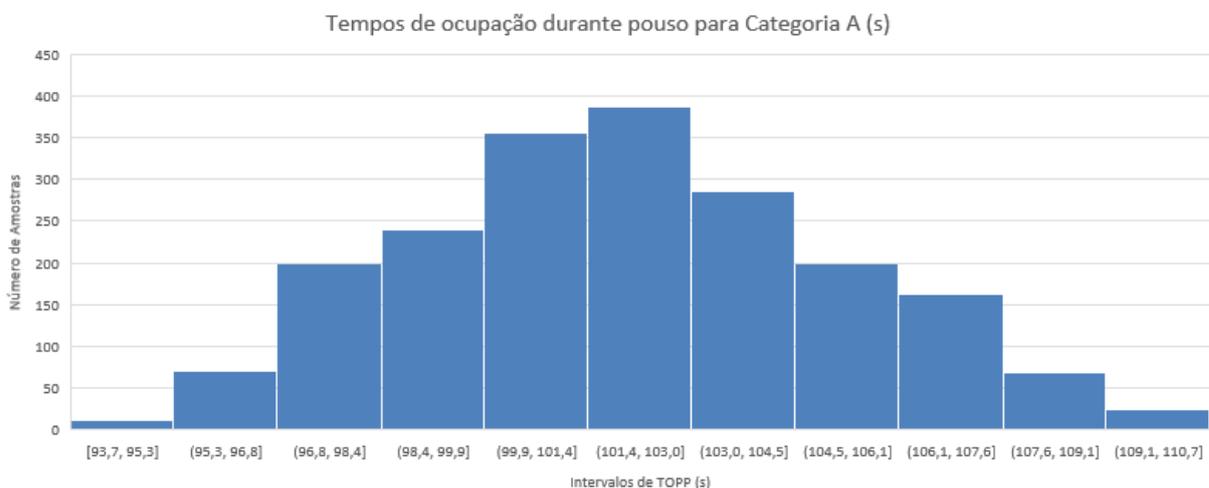


Figura 4.27 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria A na pista 06/24 de SBSL

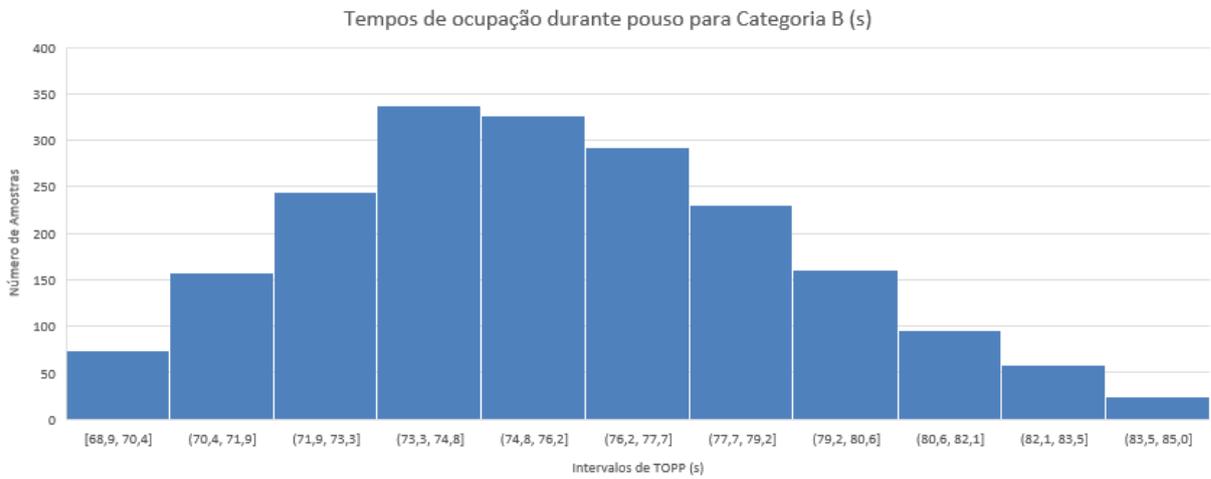


Figura 4.28 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria B na pista 06/24 de SBSL

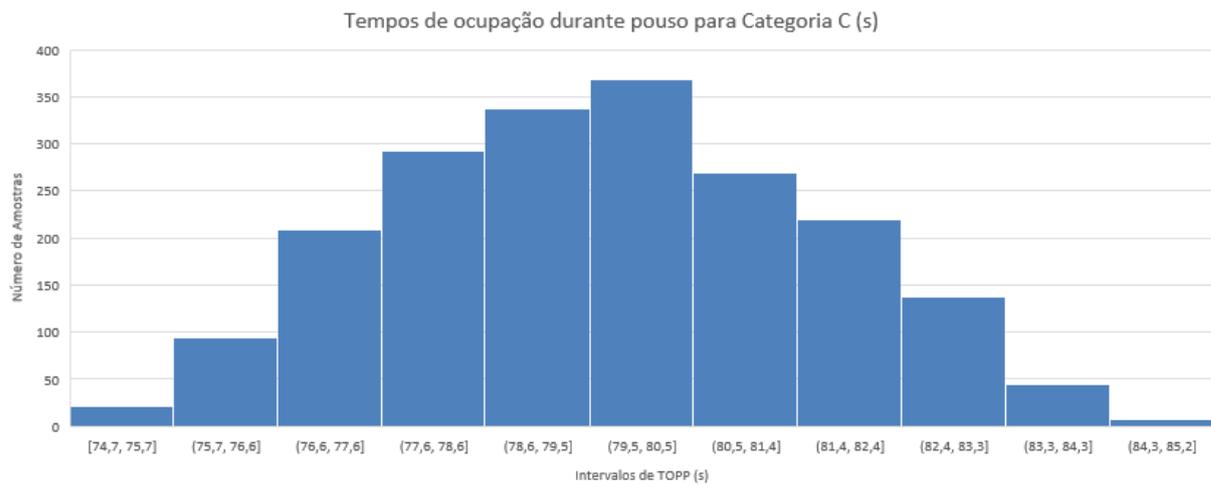


Figura 4.29 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria C na pista 06/24 de SBSL

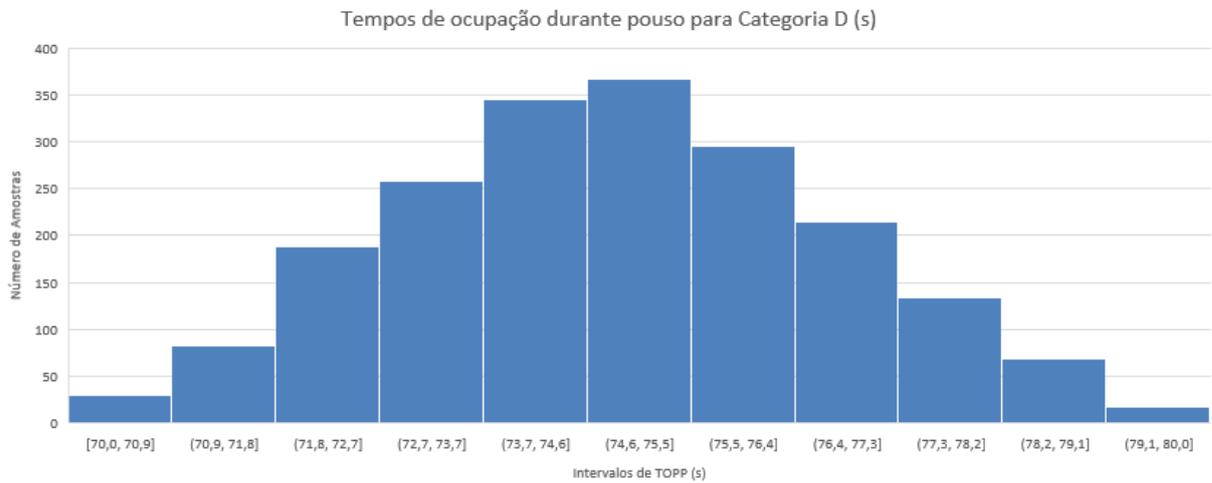


Figura 4.30 - Histograma da distribuição de TOPPs para categoria D na pista 06/24 de SBSL

4.3.2 Tempo de Ocupação Durante Decolagem

Foi obtida uma distribuição de TOPD na pista 09/27 que resume todas as categorias de aeronaves analisadas. Essa distribuição está representada na Figura 4.31.

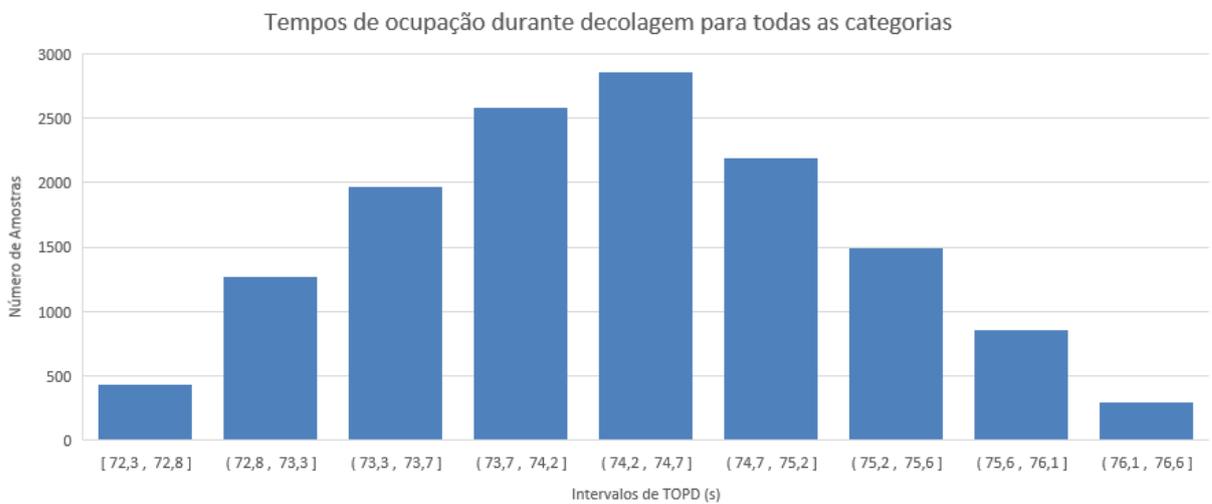


Figura 4.31 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista 09/27 de SBSL

4.3.3 Capacidade Estimada

Tendo em vista os tempos de ocupação mostrados nos itens 4.3.1 e 4.3.2, obtém-se os resultados mostrados na Figura 4.32.

Runway Allocations	VFR	IFR	Average
Arrivals only capacity (Rnwy 1)	14	13	14
Arrivals capacity (Rnwy 1) (inc. TNGs)	14	13	14
Mixed Departures Capacity (Rnwy 1) (inc. TNGs)	0	0	0
Arrivals only capacity (Rnwy 2)	0	0	0
Arrivals capacity (Rnwy 2) (inc. TNGs)	0	0	0
Mixed Departures Capacity (Rnwy 2) (inc. TNGs)	0	0	0
Departures only capacity (Rnwy 2)	10	10	10
Total Arrivals & Departures Capacity	24	23	24
Arrivals Percentage	58%	56%	58%

Figura 4.32 – Quadro com estimativa de capacidade para aeródromo em questão

Observa-se, portanto, que a capacidade possui um valor médio de aproximadamente 24 movimentos por hora.

4.4 Análise da Capacidade do Aeroporto de Manaus (SBEG)

Inicialmente, coletou-se as distância entre cabeceira de pouso e as pistas de saída. Esses dados podem ser facilmente coletados com auxílio do Google Earth. No caso do Aeroporto de Manaus, as operações de pouso e decolagem ocorrem na pista única 11/29. Os valores de porcentagem de tempo sob operações VMC e IMC não foram encontrados em documentos públicos, portanto, adotaram-se os valor médios recomendados pela ACRP 79: 90% do tempo em VMC e 10% em IMC.

A Figura 4.33 esquematiza as opções de saída de uma das pistas do aeroporto em questão, com pouso na cabeceira 11, bem como o acesso a cabeceira 11, para decolagem. A possibilidade de pouso está representada pela seta vermelha, enquanto a possibilidade de decolagem, pela seta azul. Vale lembrar ainda que a nomenclatura das saídas aqui apresentadas são ilustrativas, não condizendo com a denominação de cada pista de táxi no aeródromo.



Figura 4.33 - Esquematização das distâncias até cada saída de pista e acesso a cabeceira

O mix de aeronaves atuante no aeroporto foi estimado através da base de dados de vôos registrados, disponibilizada pelo portal SIROS da ANAC. Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Mix de aeronaves obtidos para a Hora Pico.

Categoria de Aeronave	Mix na Hora Pico
A	0,0%
B	10,6
C	80,6%
D	8,8

A Tabela 4.8 relaciona cada saída mostrada na Figura 4.33 com seus respectivos raios e ângulos de saída.

Tabela 4.8 - Valores de raio e ângulo de saída para cada pista de saída.

Saída	Raio (m)	Ângulo (rad)
A	90	1,57

A Figura 4.23 exemplifica a porcentagem de utilização da saída pelas aeronaves de cada categoria no caso de uma saída de raio entre 60 e 120 m, como é o caso da saída A, que possui raio de 90 m.

Tendo em vista a metodologia descrita no capítulo 3, foram obtidas distribuições para tempos de ocupação durante pouso e decolagem, além da capacidade estimada para o aeródromo.

4.4.1 Tempo de Ocupação Durante Pouso

Foram obtidas distribuições de TOPP para cada categoria de aeronave analisada. Essas distribuições estão representadas na Figura 4.4, na Figura 4.5 na Figura 4.6 e na Figura 4.7.

4.4.2 Tempo de Ocupação Durante Decolagem

Foi obtida uma distribuição de TOPD que resume todas as categorias de aeronaves analisadas. Essa distribuição está representada na Figura 4.34.

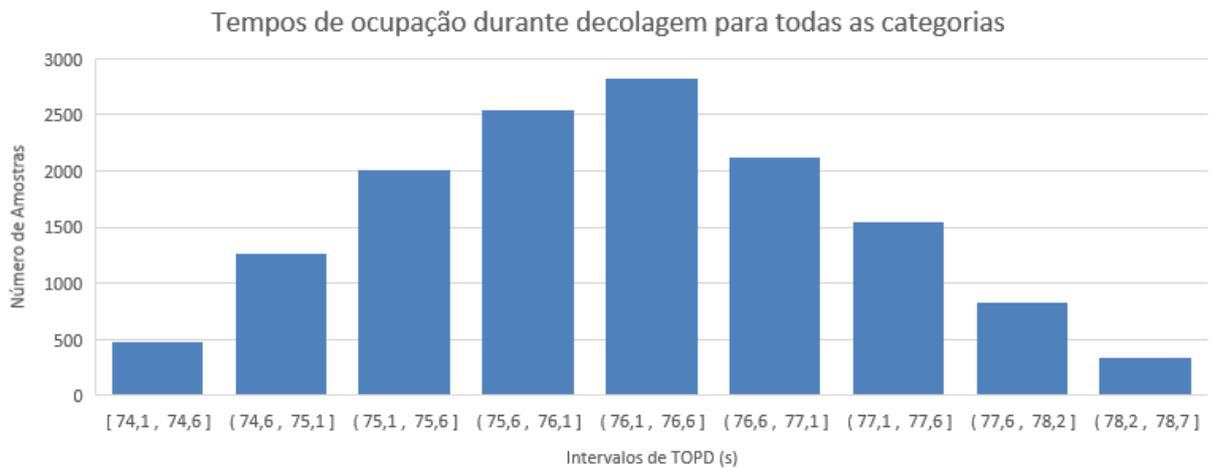


Figura 4.34 - Histograma da distribuição de TOPDs para todas as categorias na pista SBEG

4.4.3 Capacidade Estimada

Tendo em vista os tempos de ocupação mostrados nos itens 4.4.1 e 4.4.2, obtém-se os resultados mostrados na Figura 4.35.

	VMC	IMC	Average
Arrivals Only Capacity	13	11	13
Arrivals Capacity (including TNG's)	13	11	13
Departures Only Capacity	55	54	55
Mixed Ops - Departure Capacity (including TNG's)	19	29	20
Total Mixed Operations Capacity	32	40	33
Arrivals Percentage	40%	28%	39%

Figura 4.35 – Quadro com estimativa de capacidade para aeródromo em questão

Observa-se, portanto, que a capacidade possui um valor médio de aproximadamente 32 movimentos por hora.

5 CONCLUSÃO

Com o crescimento da demanda por voos no Brasil, expansões da pista e criação de novas PPDs ou pistas de taxi são soluções para aeródromos que almejem aumentar sua capacidade. Portanto, meios de fazer uma análise prévia da viabilidade do projeto para a capacidade desejada são cada vez mais relevantes. Embora existam diferentes abordagens acerca do tema na literatura, faz-se necessário o desenvolvimento de metodologias que sejam tanto acessíveis quanto aplicáveis no contexto brasileiro.

A metodologia proposta neste trabalho consiste na extensão do método da ACRP 79 com o método dos três segmentos associado a estimativas de Monte Carlo.

De acordo com os resultados, percebe-se que a quantidade de pistas de saídas na PPD afeta significativamente no tempo de ocupação de aeronaves durante o pouso. A Tabela 5.1 resume os valores máximos e mínimos para cada categoria de aeronaves em cada pista analisada nesta seção.

Tabela 5.1 - Resumos dos dados de TOPPs para os três aeroportos avaliados nesta seção

Aeroporto	TOPP Cat A (s)		TOPP Cat B (s)		TOPP Cat C (s)		TOPP Cat D (s)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
SBEG	134,5	158,5	113,0	137,9	99,4	111,3	89,7	100,3
SBGR-09R/27L	85,1	101,8	58,2	75,1	54,6	64,3	60,5	70,9
SBGR-09L/27R	89,8	105,1	65,0	81,0	72,5	82,4	66,4	76,6

Os tempos de TOPPs para o Aeroporto de Manaus são notadamente superiores, o que é condizendo com o fato de existirem pistas de saída localizadas apenas nas cabeceiras. Quanto as pistas de Guarulhos, observa-se que a pista 09R/27L, que possui menos saídas, na verdade apresenta TOPPs menores. Esse fato é condizente com o esperado, visto que, apesar de ter menos saídas, a pista 09R/27L apresenta duas pistas de saída rápida, possibilitando que as aeronaves saiam da PPD a velocidades maiores.

Os resultados mostram também a importância da distância entre a pista de acesso e a cabeceira de decolagem. Isso evidencia um fator interessante de ser observado, a relevância do tempo de posicionamento da aeronave na decolagem. Ressalta-se ainda que esse tempo não é contabilizado na ACRP 79, que considera o TOPD como sendo apenas o tempo de corrida da aeronave. A Tabela 5.2 resume os valores máximos e mínimo entre tempos de ocupação durante pouso para os três aeroportos estudados nesta seção.

Tabela 5.2 - Resumos dos dados de TOPDs para os três aeroportos avaliados nesta seção

Aeroporto	TOPD (s)	
	Mínimo	Máximo
SBPJ	212,5	216,8
SBCT	140,5	144,6
SBGR-09L/27R	88,3	93,4

Observa-se, conforme o esperado, que o Aeroporto de Palmas possui o maior tempo de decolagem, o que pode ser justificado pelo fato dele possuir a pista de acesso mais distante da cabeceira dentre os três aeródromos analisados. Em sequência, vem o aeroporto de Curitiba e a pista 09L/27R de Guarulhos.

Utilizando-se dos tempos de ocupação obtidos e da metodologia proposta estima-se um valor de capacidade para o Aeroporto Internacional de Guarulhos, para o Aeroporto Internacional de São Luís e para o Aeroporto Internacional de Manaus.

Para validação desses resultados, é feita comparação com as capacidades declaradas pelo CGNA, registradas na Figura 5.1, na Figura 5.3 e na Figura 5.2.

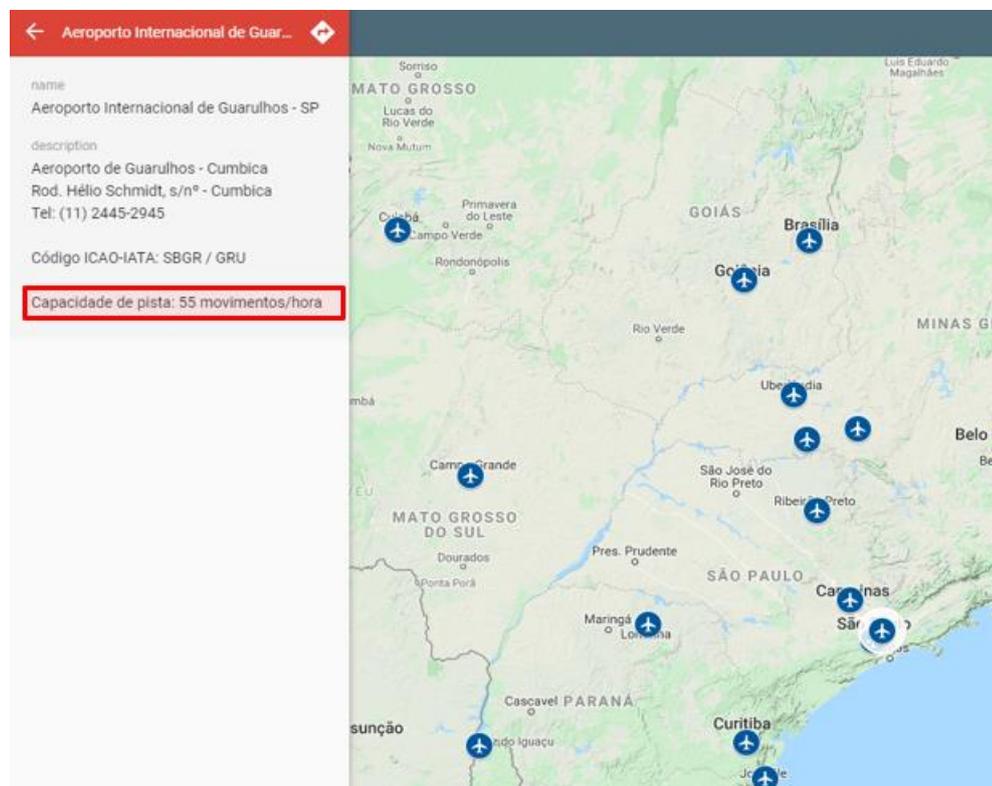


Figura 5.1 - Capacidade declarada para o Aeroporto de Guarulhos. Fonte: CGNA (2019) adaptado pelo autor

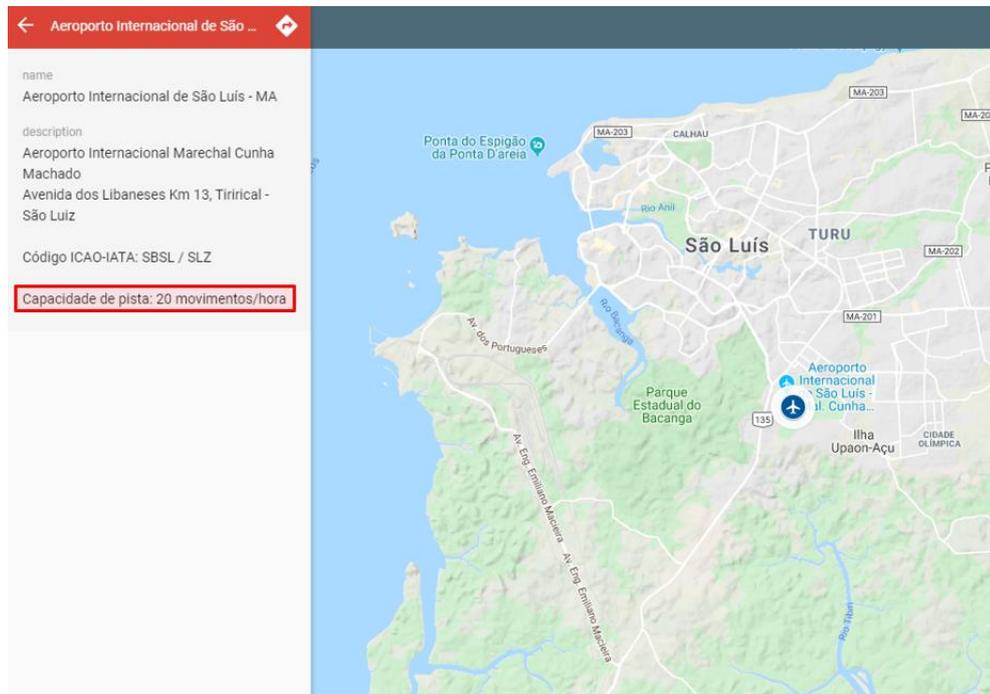


Figura 5.2 - Capacidade declarada para o Aeroporto de São Luís. Fonte: CGNA (2019) adaptado pelo autor

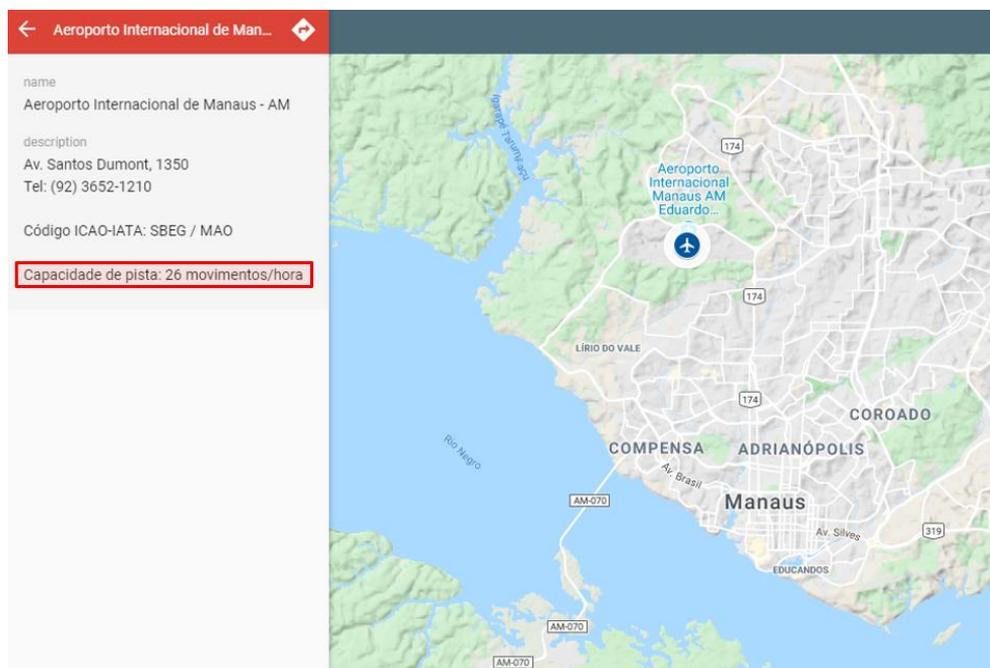


Figura 5.3 - Capacidade declarada para o Aeroporto de Manaus. Fonte: CGNA (2019) adaptado pelo autor

Vale ressaltar que a capacidade prescrita pelo CGNA corresponde a 80% da capacidade real do aeroporto (FAB, 2019). Portanto, o valor de 55 movimentos por hora, por exemplo, corresponde a uma capacidade real de 68 movimentos por hora. A Tabela 5.3 abaixo compara os resultados reais com os obtidos no estudo, bem como o erro entre os valores.

Tabela 5.3 - Comparação entre os valores de capacidade

Aeroporto	Metodologia Proposta	Capacidade Declarada	Capacidade Real	Erro entre os valores propostos e reais
SBGR	69	55	68	~1,5%
SBSL	24	20	25	4%
SBEG	33	26	32	~3,1%

Portanto, conclui-se que o proposto pelo modelo mostra-se coerente com o observado na prática.

5.1 Limitações e melhorias futuras

Apesar dos bons resultados supracitados, ainda há espaço para melhorias no modelo. Uma delas é a estimativa de acelerações distintas para antes e depois da aeronave atingir a velocidade de rotação durante a decolagem. Na ausência de dados mais precisos, o modelo apresentado considera que a aceleração é a mesma durante toda a decolagem. Porém, isso não condiz com o observado na prática, visto que as acelerações enquanto a aeronave está em contato com o solo e quando esta perde o contato são distintas.

Novamente devido a dificuldade em encontrar dados, o modelo utilizou-se de abordagens simplistas para estimativa da aceleração, desconsiderando a resistência impostas pelo ar e pelo asfalto. Como a segunda lei de Newton não é ideal para tratar do efeito que o ar exerce sobre a aeronave, uma análise precisa envolveria o estudo dos efeitos do ar como uma resistência fluidodinâmica.

Outro ponto seria solicitar a utilização das bases de dados SETA Millennium ou TATIC, ambas suportadas pelo DECEA. Desse banco poderiam ser extraídas informações relevantes, como porcentagem de utilização da pista em condições meteorológicas VMC e IMC, porcentagem de utilização das pistas, comprimento médio dos efeitos da esteira de turbulência para cada categoria de aeronaves (o que influenciaria diretamente no TOPP), etc. Além disso, o SETA Millennium disponibiliza informações acerca do tipo de operações que ocorrem em cada PPD num aeródromo com mais de uma pista. Esse dado é crucial na determinação da capacidade.

6 BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, R. **Aumento da capacidade de pistas paralelas e próximas: um estudo de caso do aeroporto internacional de Guarulhos**. Tese de mestrado em Transporte Aéreo e Aeroporto - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 67. 2014.

ALVES, C. J. P. **MÓDULO 2 – AERONAVES E COMPRIMENTO DE PISTAS**, 2018. Disponível em: <<http://www2.ita.br/~claudioj/aeron.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2019.

ANAC. **Siros**. Disponível em:

<[https://sas.anac.gov.br/sas/siros/\(S\(npzuyenwkmrsqmaq15dmwcoz\)\)/view/registro/frmConsultaVoosHistorico](https://sas.anac.gov.br/sas/siros/(S(npzuyenwkmrsqmaq15dmwcoz))/view/registro/frmConsultaVoosHistorico)>. Acesso em: 17 set. 2019.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. RBAC 154 - Emenda 06**, 2019.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em:

<http://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_ing/tr4102.htm>. Acesso em: 12 out. 2019.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em:

<http://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_ing/tr4101.htm>. Acesso em: 12 out. 2019.

BOEING. Boeing Commercial Airplanes. **737 Airplane Characteristics for Airport Planning**, 2005.

BRESSAN, G. Distribuições e Probabilidades. **Modelagem e Simulação de Sistemas Computacionais**, 2002. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2446243/mod_resource/content/1/modsim03-distr.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2019.

DAU, M. **Safety Management Summit - Brazil**. Ações e Desafios na Operação Segregada nas Pistas Aeroporto de Guarulhos. Guarulhos: GRUAirport. 2018.

DECEA. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Tráfego Aéreo. Capacidade do Sistema de Pistas. MCA 100-14**, 2015.

DECEA. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Tráfego Aéreo. Serviços de Tráfego Aéreo. ICA 100-37**, 2018.

DECEA. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Operações Segregadas sob VMC para o Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR). AIC N 45/18**, 2018.

DECEA. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Disponível em:

<<http://portal.cgna.gov.br/>>. Acesso em: 15 Outubro 2019.

FAA. Federal Aviation Administration. **Airport Capacity and Delay. Advisory Circular. AC 150/5060-5**, 1983.

FAA. Federal Aviation Administration. **Advisory Circular. AC 150/5060-13A**, 2014.

FAB. **Blog Oficial da Força Aérea Brasileira**. Disponível em:
<http://www.forcaaereablog.aer.mil.br/index.php?option=com_content&view=article&id=93:centro-de-gerenciamento-da-navegacao-aerea-gerenciando-para-que-todos-possam-voar&catid=2:uncategorised&Itemid=129>. Acesso em: 13 nov. 2019.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION. **Skybrary**. Disponível em:
<https://www.skybrary.aero/index.php/Deceleration_on_the_Runway>. Acesso em: 05 nov. 2019.

HORONJEFF, R. et al. **Planning and Design of Airports**. 5a. ed. United States: McGraw-Hill, v. I, 2010.

IATA. International Air Transport Association. **Airport Development Reference Manual, 11th Edition**, 2019.

ICAO. International Civil Aviation Administration. **Aerodrome Design Manual - Part 2 Taxiways, Aprons and Holding Bays. Doc 9157**, 2005.

ICAO. International Civil Aviation Administration. **Procedures for Air Navigations Services. Doc 8168**, 2006.

ICAO. International Civil Aviation Organization. **Procedures for Air Navigations Services. Doc 8168**, ICAO, 2006.

SAC. **Hórus**. Disponível em:
<<https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Movimentacao/Evolucao>>. Acesso em: 01 out. 2019.

STEER DAVIES GLEAVE. Study on airport ownership and management and the ground handling market in selected non-EU countries, Londres, jun. 2016.

TRB. Transportation Research Board. **Airport Cooperative Research Program. ACRP 79**, 2012.

VOSE. How many Monte Carlo samples are enough? Disponível em:
<<https://www.vosesoftware.com/riskwiki/Howmanyiterationstorun.php>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

WALD, A.; FAY, C.; GLEICH, R. **Introduction to Aviation Management**. 3a. ed. Germany: LIT Verlag Münster, v. III, 2010.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 21 de novembro de 2019	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-125/2019	4. N° DE PÁGINAS 73
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Avaliação da capacidade de sistemas com duas pistas de pouso e decolagem: proposta de extensão do modelo ACRP 79.			
6. AUTOR(ES): Francisco Vinícius Oliveira Alves			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Capacidade de Pistas. 2. Planejamento Aeroportuário. 3. Modelo Computacional 4. ACRP 79.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Capacidade aeroportuária; Planejamento de aeroportos; Pistas (de pouso e decolagem); Simulação computadorizada; Transporte.			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional			
ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Evandro José da Silva. Publicado em 2019			
11. RESUMO: O aumento da demanda por voos no Brasil vem exigindo cada vez mais estudos acerca dos sistemas de pista de pouso e decolagem em aeroportos existentes ou planejados. Esses estudos, por sua vez, incluem o planejamento da capacidade aeroportuária, ou seja, a previsão da quantidade de operações que poderão acontecer no aeroporto no período de uma hora. No quesito de planejamento, dados de <i>input</i> operacionais devem ser estimados, ao invés de coletados, o que gera preocupação na precisão dos resultados do modelo. O presente Trabalho de Graduação visa discutir metodologias presentes na literatura, bem como propor alterações e melhorias para elas, dando foco aos casos de aeroportos com pistas duplas. Para isso, o método apresentado no ACRP 79 é expandido com Método dos Três Segmentos e a Simulação de Monte Carlo. Com essa expansão do modelo do ACRP 79, os <i>inputs</i> variam desde o tempo de ocupação na pista de pouso e decolagem até a sua geometria. A metodologia proposta foi posta em prática em três casos reais: Aeroporto Internacionais de Guarulhos (SBGR), Aeroporto Internacional de São Luís (SBSL) e Aeroporto Internacional de Manaus (SBEG). A capacidade encontrada foi então comparada com a capacidade declarada do aeródromo, disponibilizada pelo CGNA (Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea). Comparando os valores encontrados através da metodologia proposta e a capacidade de cada aeródromo, obteve-se, os seguintes erros relativos: 1,5%, 4% e 3,1% para SBGR, SBSL e SBEG. Com isso, conclui-se que as alterações e melhorias propostas estão condizentes com o observado na prática. Adicionalmente, a extensão proposta para o modelo do ACRP 79 adota <i>inputs</i> geométricos ao invés de operacionais, visando-se ganhos na precisão do modelo para o quesito de planejamento.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			