

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Thales Cavalcante de Queiroz

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE
CONGESTIONAMENTO E ATRASOS EM PÁTIO
DE AERONAVES DE AEROPORTOS REGIONAIS**

**Trabalho de Graduação
2018**

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Thales Cavalcante de Queiroz

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE
CONGESTIONAMENTO E ATRASOS EM PÁTIO
DE AERONAVES DE AEROPORTOS REGIONAIS**

Orientadora

Prof^ª. Dr^ª Giovanna Miceli Ronzani Borille

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

QUEIROZ, Thales Cavalcante de
Metodologia de Análise de Congestionamento e Atrasos em Pátio de Aeronaves de Aeroportos Regionais / Thales Cavalcante de Queiroz.
São José dos Campos, 2018.
59f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018. Orientadora: Prof^a. Dr^a Giovanna Miceli Ronzani Borille.

I. Aeroportos Regionais. 2. Pátio de Aeronaves. 3. Planejamento. 4. Capacidade. 5. Teoria de Filas.
I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

QUEIROZ, T. C. **Metodologia de Análise de Congestionamento e Atrasos em Pátio de Aeronaves de Aeroportos Regionais**. 2018. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

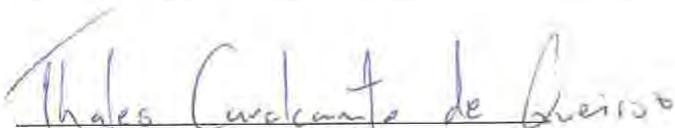
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Thales Cavalcante de Queiroz

TÍTULO DO TRABALHO: Metodologia de Análise de Congestionamento e Atrasos em Pátio de Aeronaves de Aeroportos Regionais.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2018

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.



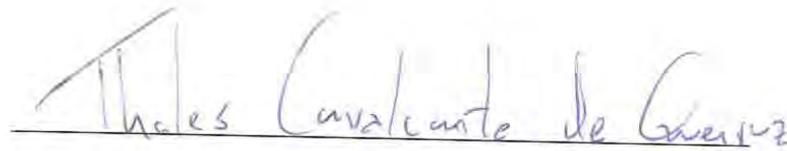
Thales Cavalcante de Queiroz

Rua H8-B, 235, Campus do CTA

12228-461, São José dos Campos - SP - Brasil

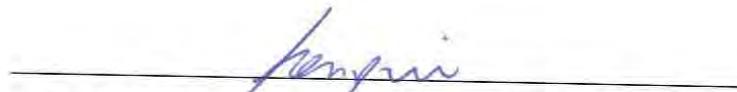
Metodologia de Análise de Congestionamento e Atrasos em Pátio de Aeronaves de Aeroportos Regionais

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Thales Cavalcante de Queiroz

Autor



Prof.ª. Dr.ª Giovanna Miceli Ronzani Borille (ITA)

Orientadora



Prof. Dr Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha irmã e aos que, de alguma forma, me orientaram e ajudaram a desenvolver este trabalho acadêmico.

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço aos meus pais, pois, sem o suporte deles, estar no ITA não seria possível. Agradeço também pela preocupação que eles tiveram durante todo o ano de 2018 quanto ao andamento do meu Trabalho de Graduação.

Agradeço aos meus amigos André Carvalho e Luan Torres por ficarem discutindo aspectos do trabalho comigo, ajudando-me a refletir sobre o tema, e por compartilharem madrugadas de produção textual.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a. Dr^a Giovanna M. Ronzani Borille, pelo apoio, tanto em questões de fornecimento de conhecimento e orientação, quanto na compreensão da minha condição de aluno/trabalhador.

Finalmente, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Evandro pelo conhecimento repassado sobre a temática do Trabalho de Graduação e pelas contribuições e sugestões a respeito deste trabalho.

"O começo é a parte mais difícil do trabalho".

(Platão)

Resumo

Este trabalho de graduação tem como objetivo analisar a capacidade de operação de pátio de estacionamento de aeronaves para aeroportos regionais e, para tanto, é estimada a movimentação máxima de aeronaves suportada no pátio dentro de limites de atrasos considerados aceitáveis pela literatura. No caso da obra em questão, é realizada uma análise por meio de método estocástico utilizando Teoria das Filas. O estudo consiste na análise de modelos genéricos de aeroportos com perfil regional (operações de embarque e desembarque em posições remotas, número reduzido de posições de estacionamento, entre outras características) sem considerar uma geometria para o pátio específica. Nesta análise, é avaliada a capacidade de operação em pátio ao se variar parâmetros básicos de operação: tempo de turnaround (tempo de atendimento de aeronaves em calço), número de posições de parada, taxa de utilização da capacidade do pátio. Vale a ressalva de que, para esse estudo, o pátio de estacionamento de aeronaves é considerado como um elemento isolado do sistema e sendo este o elemento limitante da capacidade do lado ar. A partir dos resultados de capacidade encontrados, foram elaboradas tabelas correlacionando os parâmetros adotados à capacidade obtida. Estas tabelas servem como um material de consulta acessível para administradores aeroportuários de aeródromos regionais que tenham interesse em: (i) avaliar, a partir da configuração atual do aeroporto, qual a máxima movimentação de aeronaves que o pátio suporta dentro de níveis de atrasos aceitáveis ou (ii) planejar a expansão de suas operações e ponderar o momento de intervenção na infraestrutura do pátio de estacionamento de aeronaves. Como contribuição acadêmica, este trabalho apresenta metodologia para avaliação do tempo de operação de pátios de aeronaves em aeroportos regionais utilizando Teoria das Filas, com definição de níveis de serviço para os atrasos na operação de pátio como um todo.

Abstract

This undergraduate work has the objective of analyzing the capacity of apron operation for regional airports and, for this, it is estimated the maximum movement of aircraft supported in the stands within limits of delays considered acceptable in the literature. In the case of the work in question, a stochastic method is analyzed using Queueing Theory. The study consists of the analysis of generic models of airports with regional profile (operations of embarkation and disembarkation in remote positions, reduced number of parking positions, among other characteristics) without considering a specific geometry for the apron. In this analysis, the capacity of apron operation is evaluated by varying basic operating parameters: turnaround time (aircraft service time in wedge), number of stopping positions, capacity utilization rate of the apron. It is worth noting that, for this study, the aircraft parking apron is considered as an isolated element of the system and this being the limiting element of the air side capacity. From the capacity results found, tables were elaborated correlating the parameters adopted to the capacity obtained. These tables serve as an accessible reference material for airport managers of regional airfields who wish: (i) to evaluate, from the current airport configuration, the maximum aircraft movement that the apron supports within acceptable levels of delays or (ii) plan to expand its operations and consider the moment of intervention in the infrastructure of the aircraft parking apron. As an academic contribution, this paper presents a methodology for evaluating aircraft operating time at regional airports using Queue Theory, with definition of service levels for delays in the operation of the apron as a whole.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Atrasos para decolagem em função do volume de tráfego, (Horonjeff et al, 2010).....	25
FIGURA 2.2 – Diferentes tipos de sistemas de filas (Arenales et al., 2007).....	31
FIGURA 2.3 – Diagrama de transição de taxa para um processo de nascimento e morte (Gross et al., 2008).....	35
FIGURA 4.1 – Relação entre a taxa de chegada e a taxa de utilização do sistema com uma TA de 15 min	49

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Classificação de aeroportos quanto à movimentação de passageiros anual (EU, 2005).....	21
TABELA 2.2 – Classificação da densidade de tráfego do aeódromo (Anexo 14 - ICAO, 2016)	21
TABELA 2.3 – Comparativo das classificações de aeroportos regionais.....	22
TABELA 2.4 – Elementos de um sistema de filas (Camelo et al., 2010 adaptado)	32
TABELA 3.1 – Tempos de serviço completo de Turnaround apresentados nos Manuais das Aeronaves (Airbus, Boeing, Embraer)	40
TABELA 3.2 – Número de posições de estacionamento em aeroportos regionais (fonte: Infraero (2018), Google Earth).....	42
TABELA 3.3 – Classificação dos tempos médios de atrasos (Horonjeff et al., 2010 adaptado)	42
TABELA 4.1 – Capacidade Teórica do Pátio de Aeronaves	45
TABELA 4.2 – Atrasos na operação em pátio de estacionamento de aeronaves.....	48
TABELA 4.3 – Taxa de Utilização do Sistema para Atrasos de 4 minutos.....	50
TABELA 4.4 – Taxa de chegada em pátio de estacionamento de aeronaves	53
TABELA 4.5 – Taxa de Chegada para Atrasos de 4 minutos.....	54

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABETAR	Associação Brasileira de Empresas de Transporte Aéreo Regional
ADRM	Airport Development Reference Manual
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
Embraer	Empresa Brasileira de Aeronáutica
EU	European Union
FAA	Federal Aviation Administration
FIFO	First in, First out
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Infraero	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
LIFO	Last in, First out
PRI	Priority servisse
SIRO	Service in randon order
TG	Trabalho de Graduação
TMA	Terminal Manoeuvring Area

Lista de Símbolos

λ	taxa média de chegada
W_q	tempo médio de permanência na fila
μ	taxa média de atendimento ou ritmo médio de atendimento de cada servidor;
c	capacidade de atendimento ou quantidade de servidores (atendentes);
TA	tempo médio de atendimento ou de serviço
ρ	taxa de utilização de sistema
p_n	probabilidade de se estar no estado n

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação.....	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Estrutura do Trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Aeroportos Regionais.....	19
2.1.1	Aviação Regional no Brasil	19
2.1.2	Aviação Regional no Mundo	20
2.1.3	Definição de Aviação Regional Adotada.....	22
2.2	Capacidade, Nível de Serviço e Atrasos.....	23
2.3	Estudos sobre Capacidade de Pátio de Aeronaves.....	26
2.3.1	Modelos de Capacidade	27
2.3.2	Trabalhos Relacionados	29
2.4	Teoria das Filas	30
2.4.1	Definição e Classificação de um Sistema de Filas.....	31
2.4.2	Características dos Processos de Filas	32
2.4.3	Taxas Médias de Filas.....	34
2.4.4	Medidas de Desempenho	34
2.4.5	Processo de Nascimento e Morte.....	35
2.4.6	Análise em Equilíbrio	36
2.4.7	Modelo de Fila M/M/c	36
2.4.8	Justificativas da Aplicação de Teoria de Filas	37
3	METODOLOGIA	39

3.1	Hipóteses Simplificadoras	39
3.2	Taxa de Atendimento (tempo de turnaround)	40
3.3	Número de Servidores (Posições de Estacionamento)	40
3.4	Nível de Serviço	42
3.5	Estratégia de Análise	43
4	RESULTADOS	44
4.1	Limites de Utilização do Sistema	44
4.1.1	Taxa de Utilização para Atrasos de 4 minutos.....	49
4.2	Taxa de Chegada de Aeronaves	50
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	55
6	REFERÊNCIAS	56

1 Introdução

Desde a última década, o Brasil vem sofrendo transformações na gestão do seu mercado de transporte de aviação comercial. De 2011 a 2018, 10 aeroportos brasileiros deixaram de ser administrados pela Infraero (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária) e passaram à administração do setor privado por meio de concessões, processo no qual é cedido, pelo Estado, a administração dos aeroportos durante período determinado.

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2018a), as concessões de aeroportos têm como objetivo atrair investimentos para ampliar, aperfeiçoar a infraestrutura aeroportuária brasileira e, conseqüentemente, promover melhorias no atendimento aos usuários do transporte aéreo no Brasil. Essa mudança surge num cenário de crescimento do setor aéreo. Segundo a ANAC (2011b), a média mundial de crescimento no movimento de passageiros foi de 40%, de 2003 a 2010, tendo ocorrido um aumento de 118% no Brasil no mesmo período.

O processo de concessões, portanto, tem como um dos principais objetivos permitir que o crescimento da demanda do mercado da aviação civil seja acompanhado de investimentos na infraestrutura aeroportuária, permitindo a prestação de serviços de qualidade aos seus usuários.

1.1 Motivação

Em algumas concessões, para garantir que sejam feitas melhorias na infraestrutura que permitam esta qualidade no serviço, são programados gatilhos de investimentos, com base na projeção de demanda e na avaliação da capacidade dos elementos do complexo aeroportuário, segundo os estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental apresentados para as concessões. Tendo em foco o lado ar do complexo aeroportuário (pista de pouso e decolagem, pista de táxi, pátio de estacionamento de aeronaves, entre outros), são encontradas, na literatura nacional e internacional, diversas metodologias para avaliação da capacidade de seus elementos. Nos estudos de concessão, é comumente utilizada metodologia de avaliação da capacidade do pátio de aeronaves que considera a capacidade dinâmica das posições de estacionamento, ou seja, o tempo que é gasto para atender a uma categoria de aeronave, o mix de aeronaves e o número de posições de estacionamento disponíveis, mas irreleva a taxa de

saturação do sistema. Contudo, um alto índice de saturação do sistema de pátio de aeronaves pode levar a atrasos em operações em solo e até ao congestionamento de aeronaves.

Na 4ª rodada de concessões de aeroportos brasileiros, estão incluídos 6 aeroportos com movimentação anual inferior a 1 milhão de passageiros, considerados como aeroportos regionais pela ANAC (2018c), sendo eles Rondonópolis, Sinop, Alta Floresta, Campina Grande, Juazeiro do Norte e Macaé. Para esse tipo de aeroporto, o impacto da saturação do sistema de pátio de aeronaves pode ser mais relevante, uma vez que os atrasos podem ser determinantes de escolha entre o modal aéreo e outro modal, dado que as distâncias a serem vencidas são menores e, conseqüentemente, os tempos de viagem são mais próximos.

Como contribuição para o setor aéreo, este trabalho apresenta valores de referência para a movimentação de aeronaves em pátio de estacionamento correlacionados com os atrasos na operação, de acordo com teoria das filas, dada a infraestrutura do pátio e o tempo médio no atendimento das aeronaves em calço. A intenção é que os valores de referência de movimentação de aeronaves no pátio possam ser utilizados pelos administradores aeroportuários de aeroportos regionais na fase de planejamento do pátio de aeronaves para reduzir custos com o correto dimensionamento da infraestrutura, conforme o padrão desejado.

Como contribuição acadêmica, está apresentada metodologia para avaliação do tempo de operação de pátios de aeronaves em aeroportos regionais utilizando Teoria das Filas, com definição de níveis de serviço para os atrasos na operação de pátio como um todo.

1.2 Objetivos

Este presente estudo tem como objetivo desenvolver uma metodologia de análise específica para a capacidade de pátio de aeronaves de forma a permita que administradores de aeroportos regionais possuam uma maneira prática de planejar investimentos na sua infraestrutura, seja visando avaliar a capacidade atual do pátio, seja na definição de período para investimento para atendimento de nova demanda em seu aeroporto.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 4 (quatro) capítulos, como apresentado a seguir:

- **Revisão Bibliográfica:** capítulo dedicado para a revisão de literatura está subdividido em 4 (quatro) principais tópicos, sendo: (i) definição de aeroporto regional para o presente trabalho, (ii) apresentação dos conceitos de capacidade, nível de serviço e atrasos, (iii) levantamento de literatura existente no que diz respeito aos problemas ligados ao pátio de estacionamento de aeronaves, com abordagem em teoria das filas, e (iv) introdução aos conceitos de teoria das filas, de maneira a fundamentar uma metodologia própria para análise de congestionamento e atraso em pátio de aeronaves de aeroportos regionais;
- **Metodologia:** neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento da metodologia para avaliação do pátio de aeronaves, com definição das hipóteses para aproximação do modelo a realidade, adoção de valores de tempo de turnaround e de posições de estacionamento, definição de nível de serviço para o problema de atrasos em pátio e apresentação da estratégia de análise;
- **Resultados:** capítulo voltado para a aplicação da estratégia de análise, a partir dos intervalos de nível de serviço apresentados e tempo de turnaround definidos.
- **Conclusões e Recomendações:** apresentação das conclusões do estudo e das limitações do modelo desenvolvido, com indicação de possibilidades de aplicação deste modelo.

2 Revisão Bibliográfica

Os itens a seguir apresentam as definições de conceitos fundamentais utilizados no presente estudo, fruto de pesquisa na literatura existente, abordando pontos como: (i) definições sobre aeroportos regionais, (ii) capacidade, nível de serviço e atrasos, (iii) estudos sobre capacidade em pátio, (iv) operações nas posições de pátio, (v) teoria das filas, além de indicar trabalhos correlacionados a teoria das filas em aeroportos, identificando metodologias de análise de componentes de aeroporto e servindo como base para a formulação da metodologia própria do estudo.

2.1 Aeroportos Regionais

Com o propósito de compreender como a definição de aeroporto regional é apresentada na literatura, fez-se um levantamento das diferentes abordagens em relação às classificações de aeroportos regionais, tanto na literatura nacional quanto internacional, sendo apresentado este levantamento nos itens 2.1.1 e 2.1.1 a seguir.

2.1.1 Aviação Regional no Brasil

Na literatura brasileira, são apresentadas diversas classificações para aeroportos regionais, como em relação ao porte das aeronaves utilizadas para a atividade de transporte aéreo, à localização dos aeródromos e à movimentação de passageiros anual, dentre outras.

Segundo Feitosa (2000), aeroportos regionais brasileiros são aqueles que se localizam fora das regiões metropolitanas das capitais e atendem, primariamente, os municípios do interior dos estados.

Bettini (2007) apresenta aviação regional como a atividade da aviação explorada de maneira regular que utiliza aeronaves com capacidade menor que 100 passageiros e entre cidades com densidade de tráfego (número de passageiros por unidade relevante de tempo) reduzida.

De acordo com Bechara (2009), o termo “regional” significa algo que diz respeito a ou é próprio de uma região.

Para a Associação Brasileira de Empresas de Transporte Aéreo Regional – ABETAR (2009) apud Ribeiro (2011), uma empresa “regional” é aquela que opera ligações de curta/média distância, utilizando aeronaves de até 86 assentos.

De acordo a Lei 13.097 de 2015, aeroportos regionais são aeroportos de pequeno e médio porte, com movimentação anual (passageiros embarcados e desembarcados) inferior a 600.000 passageiros, com exceção da Amazônia Legal, cujo limite são 800.000 passageiros por ano. A Lei 13.097 também define rotas regionais, como sendo os voos que tenham como origem ou destino aeroporto regional.

2.1.2 Aviação Regional no Mundo

Na literatura internacional, as classificações para aeroportos regionais são apresentadas com maior enfoque na movimentação de passageiros anual, se comparadas com a literatura brasileira.

Segundo Postorino (2010), os aeroportos podem ser classificados sobre diversos aspectos, como quanto ao número esperado de passageiros e de movimentações de aeronaves, quanto à função operacional realizada no setor aéreo e quanto aos tipos de rotas que são oferecidas. Quanto à movimentação de passageiros, o autor supracitado classifica aeroportos em duas classes: (i) primários, cuja movimentação é superior a cinco milhões por ano, e (ii) regionais, cuja movimentação é inferior a cinco milhões por ano.

A Federal Aviation Administration – FAA (2018), órgão americano responsável pelo setor aéreo, caracteriza os aeroportos com base na movimentação de passageiros e denomina aeroporto regional aquele que não ultrapassa 0,05% da movimentação total de um país.

Já a European Union – EU (2005) apresenta uma divisão diferente, categorizando os aeroportos em 4 tipo, como apresentado na TABELA 2.1 a seguir.

Classificação	Movimentação de passageiros anual
Aeroportos Comunitários	Superior a 10 milhões
Aeroportos Nacionais	Entre 5 e 10 milhões
Aeroportos Regionais Grandes	Entre 1 e 5 milhões
Aeroportos Regionais Pequenos	Inferior a 1 milhão

TABELA 2.1 – Classificação de aeroportos quanto à movimentação de passageiros anual (EU, 2005)

A International Air Transport Association – IATA (2014) apud Cavaleiro (2017) não classifica aeroporto regional, contudo, caracteriza-o como terminais de aeroportos menores cuja movimentação não supera um milhão de passageiros por ano.

Além disso, de acordo com o Anexo 14 da International Civil Aviation Organization – ICAO (2016), um aeroporto pode ser classificado de acordo com a densidade de tráfego do aeródromo, sendo categorizados as densidades como indicado na TABELA 2.2 a seguir.

Classificação	Densidade de Tráfego do Aeródromo
Baixa	Quando o número de movimentos na hora-pico média ⁽¹⁾ não for maior que 15 por pista de pouso e decolagem ou, normalmente, menor que 20 no total de movimentos do aeródromo.
Média	Quando o número de movimentos na hora-pico média estiver entre 16 e 25 por pista de pouso e decolagem ou, normalmente, entre 20 a 35 no total de movimentos do aeródromo.
Alta	Quando o número de movimentos na hora-pico média for 26 ou mais por pista de pouso e decolagem ou, normalmente, maior que 35 no total de movimentos do aeródromo.

(1) O número de movimentos na hora-pico média é a média aritmética, ao longo de um ano, do número de movimentos na hora-pico de cada dia.

TABELA 2.2 – Classificação da densidade de tráfego do aeródromo (Anexo 14 - ICAO, 2016)

2.1.3 Definição de Aviação Regional Adotada

Os conceitos apresentados para classificação de aeroportos regionais na literatura brasileira e internacional estão resumidos na TABELA 2.3.

	Autor	Conceito
Literatura brasileira	Bettini (2007)	Aeronaves com capacidade de até 100 passageiros; Densidade reduzida de tráfego
	Feitosa (2000)	Aeroportos localizados fora das regiões metropolitanas das capitais e que atendem, primariamente, os municípios do interior dos estados.
	Lei 13.097 de 2015	Movimenta até 600.000 passageiros anualmente
Literatura internacional	Postorino (2010)	Movimenta até 1 milhão de passageiros anualmente
	FAA (2016)	0,05% da movimentação de um país
	EU (2014)	Movimenta até 5 milhões de passageiros anualmente
	IATA (2014) apud Cavaleiro (2017)	Movimenta até 1 milhão de passageiros anualmente

TABELA 2.3 – Comparativo das classificações de aeroportos regionais

Portanto, com as diversas possibilidades de obter uma definição para a aviação e aeroporto regional identificadas, o conceito adotado neste presente trabalho se limita a considerar os aeroportos conforme definido pela Lei 13.097 de 2015, com a adição da consideração de densidade de tráfego reduzida apresentada por Bettini (2007). Para maior definição do que seria uma densidade de tráfego reduzida, é considerada a classificação de densidade baixa apresentada no Anexo 14 da ICAO (2016).

2.2 Capacidade, Nível de Serviço e Atrasos

Segundo Slack et al. (2007), capacidade de operação é definida como o máximo nível de atividade de valor adicionado em determinado período de tempo que o processo pode realizar sob condições normais de operação. Segundo Balter (2012), no caso de aeroportos, a capacidade pode ser atribuída às operações ocorridas no terminal de passageiros, nas pistas, no pátio, no processamento de bagagem, dentre outros.

Slack et al. (2007) apresenta também o conceito de gargalo de produção que corresponde, dentre etapas de produção, àquela etapa que apresenta a menor capacidade do sistema.

A avaliação da capacidade de um sistema está diretamente relacionada com o nível de serviço que se propõe oferecer ao usuário. Contudo, há diversas definições de nível de serviço na literatura. Segundo a ANAC (2018, d), o conceito de medida de “nível de serviço”, como é aplicado modernamente nos aeroportos, baseia-se em estudos fundamentais conduzidos nas décadas de 1960 a 1980, Highway Capacity Manual (1965) e Highway Capacity Manual (1985), para avaliar as autoestradas americanas. A ANAC (2018, d) ainda afirma que uma pesquisa conduzida pela IATA (1981), com o enfoque nos picos de tráfego, levou a necessidade de definir padrões para avaliar os níveis de serviço e a capacidade de um aeroporto, uma vez que se observou que cada componente de um determinado terminal aeroportuário tem suas próprias características de operação e demandas tornando difícil definir nível de serviço de uma única maneira.

De acordo com Rolim (2016), o manual para desenvolvimento de aeroportos (Airport Development Reference Manual - ADRM da IATA (2014) apresenta que o nível de serviço pode ser considerado como uma faixa de valores que traduzem a habilidade de atender a demanda e combina valores quantitativos e qualitativos de conforto e conveniência. A abordagem qualitativa, segundo a autora supracita, depende da observação dos passageiros e da percepção que eles têm acerca dos serviços e instalações do aeroporto, sendo categorizada como nível de serviço percebido. Já a abordagem quantitativa representa medidas quantitativas de tempo de espera, tempo de processamento e espaço físico disponível. Um exemplo desta abordagem seria a capacidade do check-in quanto a disponibilidade de espaço para as filas de atendimento, dado o nível de serviço proposto para a operação, o respectivo tempo do passageiro em fila e o tempo de atendimento de check-in.

De Neufville e Odoni (2003) relacionam o nível de serviço com a quantidade de espaço disponível para a atividade e ainda indicam que melhor será o nível de serviço oferecido e percebido quando os passageiros tiverem mais espaço disponível.

No lado ar, um parâmetro de nível de serviço adotado é o atraso sofrido pelas aeronaves que buscam decolar ou aguardam uma posição de estacionamento no pátio de aeronaves, após o pouso, afirma Medau (2011). Segundo Horonjeff et al. (2010), uma definição para capacidade do lado ar é o número máximo de aeronaves que podem operar no aeroporto em um dado período, sem que o atraso imposto às aeronaves exceda um valor máximo estipulado. Porém, o aumento da demanda de um aeroporto, sem o aumento da capacidade, pode levar a atrasos cada vez maiores, degradando a qualidade do serviço de transporte aéreo prestado.

A partir da percepção da necessidade de se melhorar os serviços no que tange a diminuição dos atrasos, estudos sobre essa temática começaram a se desenvolver, cada vez mais, no meio acadêmico. Com o enfoque no aumento da capacidade e redução dos atrasos em aeroportos, Horonjeff et al. (2010) apresenta pontos tipicamente analisados em estudos de capacidade e atrasos, como listados a seguir:

- O efeito de soluções alternativas para localizações e geometrias das saídas da pista de pouso e decolagem na capacidade do sistema de pista de pouso e decolagem;
- O impacto das restrições de operação no aeródromo devido a procedimentos de redução de ruído, capacidade de pista de pouso limitada, ou inadequações nos instrumentos de navegação nos índices de processamento de aeronaves;
- As consequências da introdução de novas aeronaves no mix de aeronaves em um aeroporto, e uma análise de mecanismos alternativos para a manutenção do mix;
- A investigação de configurações alternativas de uso da pista de pouso e decolagem na capacidade de processar aeronaves;
- A geração de alternativas para novas pistas de pouso e decolagem ou construção de pistas de táxi para facilitar o processamento das aeronaves;
- Os ganhos que podem ser gerados na capacidade do sistema ou na redução de atrasos pelo desvio de aeronaves de aviação geral para liberar as instalações nas grandes áreas de tráfego aéreo de conexão.

Por meio de uma modelagem matemática, Horonjeff et al. (2010) indica um modelo analítico de análise de capacidade e atrasos para o lado ar, que formula uma base para aplicação

em modelos de simulação computacional. O autor supracitado ressalta como os modelos matemáticos de operações aeroportuárias servem como ferramentas na compreensão de importantes parâmetros e de sua influenciam na operação dos sistemas do aeroporto.

Horonjeff et al. (2010) compara duas definições de capacidade sendo a prática e a teórica. A capacidade prática foi apresentada anteriormente, que é definida como o número de operações de aeronaves e um atraso tolerável relacionada. A capacidade teórica é definida como o número máximo de operações que um componente aeroportuário pode acomodar em um dado período. Esta última é a definição comumente utilizada nos estudos de viabilidade técnica das concessões de aeroportos brasileiros. As definições sobre capacidade prática e teórica estão apresentadas na FIGURA 2.1, junto com sua relação com a demanda.



FIGURA 2.1 – Atrasos para decolagem em função do volume de tráfego, (Horonjeff et al, 2010).

Contudo, a capacidade teórica não mensura, explicitamente, a magnitude de congestionamentos e atrasos e, portanto, não considera a formação de filas no sistema de pátio de aeronaves. Horonjeff et al. (2010) reforça que o grau de atraso é fortemente influenciado pelo comportamento da demanda. Tomando como exemplo o pátio de estacionamento de aeronaves, tem-se que, em um período curto de intensa demanda de posições, pode ocorrer

elevados atrasos na operação, mas que poderiam ser reduzidos, caso a demanda fosse diluída para outros períodos do dia.

De Neufville e Odoni (2003) também apresenta este conceito de nível de serviço envolvendo noções de atrasos, sendo necessário melhorá-lo a partir da avaliação de custos de construção e de operação, para que sirva como um parâmetro para tomada de decisões dos operadores aeroportuários.

Segundo De Neufville e Odoni (2003), há muitas medidas de performance e de nível de serviço que são interessantes para sistemas de filas de aeroportos. Os autores apresentam a intensidade de utilização de uma instalação ou serviço, o número de usuários na fila e o tempo de espera estimado, a variabilidade do tempo de fila e a confiabilidade e a previsibilidade do sistema como umas das principais medidas de performance e de nível de serviço.

De Neufville e Odoni (2003) ainda destacam que um sistema de filas não pode estar operando, por muito tempo, com uma taxa de demanda que exceda, na média, a taxa de serviço, uma vez que isto acarreta em atrasos inaceitáveis. Contudo, os autores supracitados ainda indicam que atrasos e congestionamentos podem também ser presenciados durante períodos em que a taxa de demanda é inferior à taxa de serviço, sendo denominados de atrasos estocásticos.

O foco deste estudo é abordar capacidade do pátio de aeronaves no contexto de capacidade prática. Para isso, é utilizado a abordagem de nível de serviço oferecido, considerando os atrasos estocásticos do sistema de pátio de estacionamento de aeronaves e adotando a avaliação de limites de atrasos indicados por Horonjeff et al. (2010) na FIGURA 2.1.

2.3 Estudos sobre Capacidade de Pátio de Aeronaves

São diversos os trabalhos que retratam especificamente a análise de pátios de aeronaves. Como etapa de apresentação dos estudos relacionados à esta temática, primeiro está indicado quais os modelos de capacidade apresentados na literatura, como indicado no item 2.3.1. Posteriormente, estão apresentados os estudos relacionados a esta temática, categorizados a partir dos modelos de capacidade indicados no item 2.3.1.

2.3.1 Modelos de Capacidade

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

Na literatura, são encontradas algumas definições que envolvem o termo modelo:

“Modelo consiste numa série de hipóteses sobre o comportamento de um sistema visando reproduzir idealizadamente a realidade, dando importância às interações entre os fatores envolvidos e às suas relações de dependência causal” (De Neufville e Stafford, 1971 apud Barragán, 2009).

Feitosa (2000) destaca que, nesta definição apresentada por De Neufville (1971), está incorporada o fato de que um modelo sempre está amarrado a hipóteses, uma vez que o sistema nunca é perfeitamente conhecido. Modelar a realidade está em assumir certos comportamentos ideais nos processos existentes. Por fim, Feitosa (2000) ressalta que a definição dessas hipóteses é uma tarefa muito importante, uma vez que terão grande influência na qualidade dos resultados provenientes do modelo.

Martinelli (1980) apud Ribeiro (2003) apresentam 3 abordagens possíveis para a estimativa do número de posições de estacionamento nos pátios de aeronaves comerciais: (i) abordagens determinísticas ou empíricas, (ii) abordagens analíticas e (iii) simulação computacional.

A partir destas abordagens, Santana (2002) e Barragán (2009) apresentam 3 (três) tipos de modelos de análise de aeroportos:

- **Modelo Empírico:** Modelos baseados em pesquisas de tráfego, a partir das quais são construídos gráficos, ábacos e tabelas em que podem ser extraídas diretamente as estimativas de capacidade para certo intervalo de tempo. Um

exemplo deste modelo é o Manual de Capacidade de Aeroportos da FAA (1969) apud Barragán (2009).

- **Modelo Analítico:** Os modelos derivados da teoria de filas podendo ser utilizados para estimar tamanho de filas e atrasos médios de aeronaves em sistemas simples (Peres, 1992).
- **Modelo de Simulação:** Modelos de simulação são aqueles que utilizam representações matemáticas e lógicas do mundo real, convertem parâmetros e dados de entrada em saídas que caracterizam o sistema em questão. Em síntese buscam retratar o comportamento real do sistema prevendo-se consequências e resultados (Almeida, 1998).

Do ponto de vista da representação no tempo, um modelo pode ser discreto ou contínuo. Modelo discreto é aquele onde suas variáveis mudam de valor em posições discretas ou contáveis do tempo. Modelo contínuo é aquele onde suas variáveis mudam de valor continuamente no tempo. Podem ser ainda classificados em estáticos e dinâmicos: modelos estáticos representam o sistema num particular instante definido e fixo do tempo. Já modelos dinâmicos são capazes de mostrar as modificações e evoluções do sistema ao longo de um período de tempo (Medau, 2011).

Segundo Medau (2011), outra característica que permitem a classificação de modelos está nos valores que suas variáveis podem assumir. Segundo o autor supracitado, um modelo pode ser classificado quanto às suas variáveis de duas maneiras:

- **Determinístico:** um modelo determinístico é aquele que não contém variáveis aleatórias e suas variáveis assumem sempre o mesmo valor quando diversas iterações são feitas.
- **Estocástico:** os modelos estocásticos possuem variáveis aleatórias e seus valores podem-se modificar em diferentes iterações, geralmente associados a distribuições de probabilidade.

Para o presente trabalho, é utilizado um modelo analítico estocástico, com representação contínua do tempo.

2.3.2 Trabalhos Relacionados

Durante as últimas décadas, diversos trabalhos foram realizados para analisar a capacidade de aeroportos. Ribeiro (2003) apresenta, em seu levantamento literário, autores que contemplam a análise da capacidade de pátio de aeronaves com os mais diversos modelos, destacando Martinelli (1980) apud Ribeiro (2003), Lopes (1990) apud Ribeiro (2003) e Rodrigues (1994) apud Ribeiro (2003).

Por outro lado, Medau (2011), devido ao enfoque de seu estudo na capacidade do Aeroporto de Congonhas por meio de simulação, destaca autores que optaram por utilizar modelos de simulação, como Santana (2002), Ribeiro (2003), Moser (2007) e Bastos et al. (2008) apud Medau (2011).

Martinelli (1980) apud Ribeiro (2003) desenvolveu uma metodologia para validação dos modelos de estimativa de número de posições utilizando modelos determinísticos apresentados pela FAA e pelo Horonjeff et al. (1975) apud Ribeiro (2003) e de teoria de filas.

Lopes (1990) apud Ribeiro (2003) aborda a problema do planejamento para designação de posições de estacionamento às aeronaves utilizando a técnica de programação linear em inteiros, ou seja, tendo as variáveis do problema sendo números inteiros.

Rodrigues (1994) apud Ribeiro (2003) desenvolveu um modelo no software Turbo Pascal para estudar a ocupação do pátio de estacionamento de aeronaves. O autor comparou o número de aeronaves processadas em posições de contato, dotadas de pontes de embarque, com aquelas processadas pelas posições remotas. Por meio da análise de sensibilidade do modelo a alterações nos parâmetros, foram elaborados cenários que possibilitariam os atendimentos de mais aeronaves nas posições de contato.

Santana (2002) utilizou o software SIMMOD para desenvolver um modelo de operação do Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos, com maior destaque para a operação de solo (pátios de estacionamento, pistas de táxi e de pouso e decolagem). Como o modelo desenvolvido, o autor simulou os ganhos de capacidade com a ampliação de algumas infraestruturas do aeroporto, determinando a capacidade do aeroporto com essas intervenções.

Ribeiro (2003) desenvolveu um modelo no software ARENA para estudar a utilização do pátio do Aeroporto de Congonhas e o tempo de turnaround das aeronaves que lá operam. O estudo visa a determinar a capacidade total do pátio, bem como oferecer subsídios para o balanceamento da oferta de serviços prestados às aeronaves estacionadas.

Moser (2007) desenvolveu um modelo do Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos utilizando o software Visual SIMMOD para estudar os possíveis benefícios de obras de expansão no pátio de estacionamento e a construção de algumas pistas de táxi adicionais. Para isso, criou cenários de simulação capazes de determinar a capacidade prática horária de pousos e decolagens e os tempos de atraso médios para cada uma das configurações.

Bastos et al. (2008) apud Medau (2011) desenvolveram um modelo utilizando o software ARENA para simular a ocupação das posições de estacionamento do Aeroporto de Congonhas pelas aeronaves, em vista de uma nova regulamentação criada pela ANAC. Os cenários simulados levaram em conta variações na separação entre as aeronaves em aproximação e o tempo de permanência no estacionamento, com o objetivo de determinar a capacidade real do pátio em cada situação.

2.4 Teoria das Filas

Como apresentado na introdução, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para a avaliação do tempo de operação de pátios de aeronaves em aeroportos regionais utilizando Teoria das Filas.

Segundo Arenales et al. (2007), a teoria de filas, ou teoria de congestão, é o estudo das relações entre a demanda em sistema e os atrasos sofridos pelos usuários deste sistema. Segundo os autores supracitados, a teoria de filas auxilia no projeto e na operação dos sistemas para encontrar um balanceamento adequado entre os custos de oferecer serviços no sistema e os custos dos atrasos sofridos pelos usuários do sistema.

Gross et al. (2008) descrevem um sistema de filas como sendo usuários chegando para um serviço, esperando pelo serviço, caso não sejam atendidos imediatamente e caso haja espera para o serviço, e deixando o sistema após serem atendidos.

Para maior elucidação do tema, uma introdução à teoria de filas está apresentada nos itens a seguir.

2.4.1 Definição e Classificação de um Sistema de Filas

Arenales et al. (2007) apresentam alguns tipos diferentes de sistemas de fila, apresentadas na FIGURA 2.2:

- (i) Fila única e um servidor.
- (ii) Fila única e múltiplos servidores em paralelo.
- (iii) Múltiplas filas e múltiplos servidores em paralelo.
- (iv) Fila única e múltiplos servidores em série.

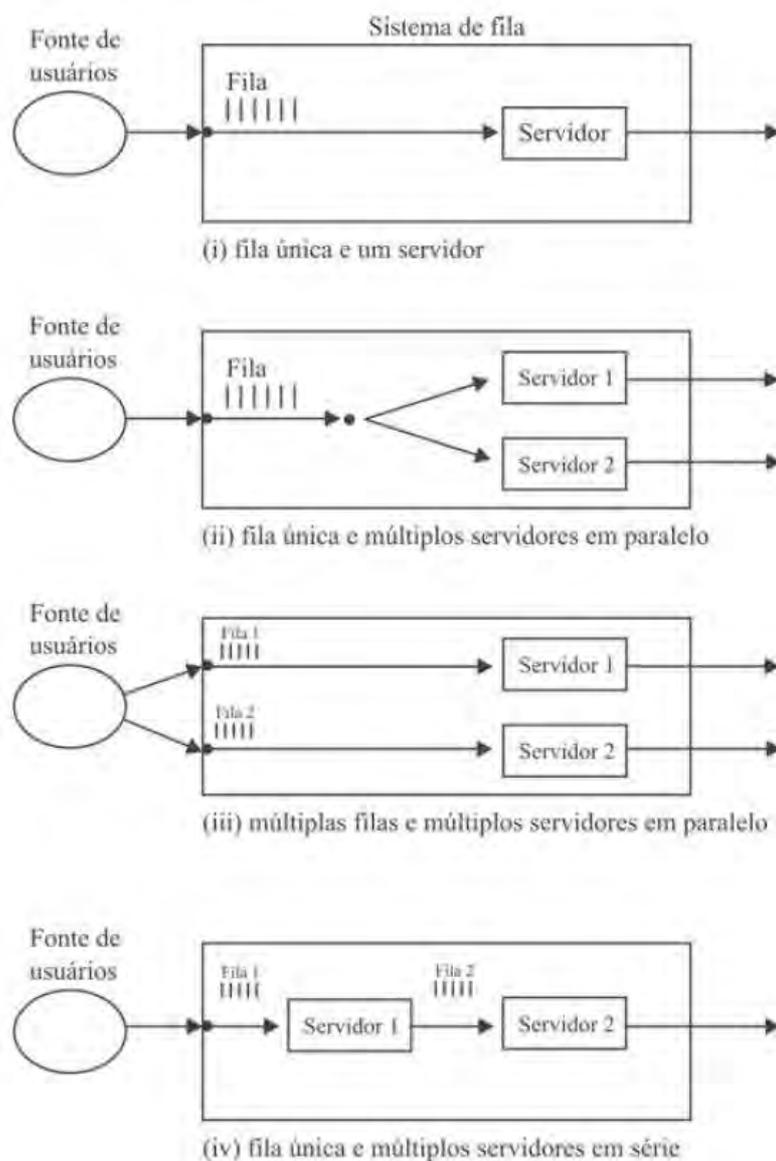


FIGURA 2.2 – Diferentes tipos de sistemas de filas (Arenales et al., 2007)

Dentre estes modelos, uma diferença que pode ser identificada a quantidade de estágios no sistema. Os tipos (i), (ii) e (iii) apresentam apenas um estágio de processamento, ou seja, o usuário passa por apenas um dispositivo de serviço antes de sair do sistema. Um exemplo de tipo de sistema (iii) é o subsistema de verificação de passagem para embarque de aeronaves com filas de passageiros distintas para clientes de primeira classe e classe econômica de companhias aérea em aeroportos, indica Arenales et al. (2007).

O tipo de sistema (iv), diferente dos outros tipos, apresenta múltiplos estágios de processamento. Um exemplo de sistema com múltiplos estágios em série é o subsistema do terminal de passageiros – TPS quanto ao fluxo de embarque do passageiro. O passageiro passa por diversos dispositivos de serviço, como atendimento de check-in, despache de bagagem, verificação de segurança por raio-x e verificação da passagem para embarque da aeronave antes de poder deixar o sistema e acessar a aeronave.

De acordo com Camelo et al. (2010), os principais elementos de um sistema de filas são: (i) cliente ou usuário, (ii) fila e (iii) canal de atendimento, descritos na TABELA 2.4.

Elemento	Descrição
Cliente ou usuário	É a unidade que requer atendimento, podendo ser máquina, pessoas, entre outros.
Fila	Representa os clientes que esperam para serem atendidos. Normalmente não incluem os clientes sendo atendidos.
Canal de atendimento	Processo ou sistema que realiza o atendimento do cliente. Pode ser um canal múltiplo ou único.

TABELA 2.4 – Elementos de um sistema de filas (Camelo et al., 2010 adaptado)

2.4.2 Características dos Processos de Filas

Segundo Gross et al. (2008), há 6 (seis) características básicas que compõem o processo de filas: (i) processo de chegada de usuários, (ii) padrões de serviços prestados, (iii) disciplina da fila, (iv) capacidade do sistema, (v) número de canais de atendimento e (vi) estágios do serviço. As descrições dessas características estão apresentadas a seguir:

Processo de Chegada de Usuários: de acordo com Arenales et al. (2007), o processo de chegada de um usuário no sistema é descrito pelo intervalo de tempo entre chegadas sucessivas de usuários. Gross et al. (2008) afirmam que, em situações comuns de filas, o processo de chegada é estocástico, sendo necessário conhecer a distribuição de probabilidade que descreve esse intervalo de tempo entre chegadas sucessivas. Segundo Camelo et al. (2010), a medição pode ser feita pelo número médio de chegadas por dada unidade de tempo (λ – taxa média de chegada).

Padrões de Serviços Prestados: segundo Gross et al. (2008), o padrão de serviço depende de como o atendimento é realizado, por exemplo, se é feito individualmente ou em grupo. Um mesmo servidor pode atender mais de um cliente ao mesmo tempo (processamento em computadores) ou apenas um (caixa de supermercado). Segundo Camelo et al. (2010), o padrão pode ser descrito pela taxa de serviço (μ – número de clientes em atendidos em um dado intervalo de tempo) ou pelo tempo de serviço (TA – tempo necessário para atender o cliente).

Disciplina da Fila: refere-se à maneira que o usuário é selecionado para o serviço quando um fila está formada. Segundo Gross et al. (2008), a disciplina mais comum se dá pela ordem de chegada, na qual o primeiro que chega é o primeiro a ser servido (First in, First out - FIFO). O autor também apresenta outras alternativas, como o último a chegar é o primeiro a ser atendido (Last in, First out - LIFO), a partir do atendimento com prioridade para certas classes de clientes, independente da hora de chegada no sistema (Priority service – PRI), e pela seleção de atendimento de forma aleatória, independente da ordem de chegada na fila (Service in random order – SIRO). De acordo com De Neufville e Odoni (2003), a maioria das filas em operações aeroportuárias configuram FIFO.

Capacidade do Sistema: de acordo com Gross et al. (2008), capacidade do sistema é a limitação física do local onde há a prestação de serviço. Para Camelo et al. (2010), capacidade do sistema é o número máximo de usuários, tanto aqueles sendo atendidos quanto aqueles nas filas, permitidos no estabelecimento de prestação de serviços ao mesmo tempo, podendo ser finito ou infinito.

Número de Canais de Atendimento: segundo Camelo et al. (2010), refere-se ao número de servidores em paralelo que prestam serviços simultâneos aos clientes.

Estágios do Serviço: como apresentado no item 2.4.1, um sistema pode ter mais de um estágio de serviço, ou seja, o usuário deve passar por mais de um dispositivo de serviço para sair do sistema.

2.4.3 Taxas Médias de Filas

Segundo Lima et al. (2016), um sistema estável de filas, no qual os clientes chegam e aguardam o atendimento dos servidores, apresenta as seguintes taxas médias características:

λ – taxa média de chegada;

μ – taxa média de atendimento ou ritmo médio de atendimento de cada servidor.

A taxa média de atendimento pode ser apresentada de outra maneira:

TA – tempo médio de atendimento ou de serviço ($1/\mu$).

2.4.4 Medidas de Desempenho

De acordo com De Neufville e Odoni (2003), há muitas medidas que descrevem a performance de um sistema de filas e o nível de serviço resultante. Para o presente estudo, as medidas que interessam são: (i) a taxa de utilização do sistema e (ii) o tempo de espera em fila.

Segundo De Neufville e Odoni (2003), a taxa de utilização de sistema é bem possível a medida mais fundamental de nível de serviço. Esta medida é denotada como ρ e, para um sistema de filas com c servidores em paralelo, com taxa de chegada λ e taxa de serviço μ , é dada pela Equação 2.1:

$$\rho = \frac{\lambda}{c \mu} \quad (2.1)$$

Intuitivamente, ρ indica a “intensidade” de utilização do sistema de filas. ρ é frequentemente referido simplesmente como a razão entre demanda e capacidade. Um sistema de filas com ρ maior do que 1 é chamado de “saturado”, por razões óbvias. Valores de ρ próximos mas inferiores a 1 são desejáveis se um dos objetivos é fazer máximo uso da capacidade produtiva de uma instalação ou de um recurso. Entretanto, isso pode também

implicar numa importante ineficiência, tal como um tempo de espera logo para acesso a uma instalação ou recurso (De Neufville e Odoni, 2003).

2.4.5 Processo de Nascimento e Morte

Modelos de nascimento e morte podem ser vistos como modelos de filas que consideram que usuários chegam (nascem) e são servidos (partem ou morrem) no sistema. Supõe-se que os intervalos de tempo entre as chegadas X e os tempos S são exponencialmente distribuídos, isto é, o número de usuários que chegam e o número de usuários que são servidos ao longo do tempo têm distribuição de Poisson (Arenales et al., 2007).

Muitos modelos de filas elementares assumem que as entradas (chegadas de clientes) e saídas (clientes deixando o sistema depois de atendidos) de um sistema de filas ocorrem de acordo com um processo de nascimento e morte, afirma Santos (1984).

Segundo Gross et al. (2008), um processo de nascimento e morte é um tipo específico de cadeia de Markov, em que, dado a condição presente do processo, o futuro é independente do passado, ou seja, o processo não possui memória.

O estado de transição ocorre como uma unidade de salto para cima ou para baixo do estado atual. Mais especificamente, quando o sistema está no estado $n \geq 0$, o tempo até a próxima chegada (ou nascimento) é uma variável aleatória exponencial com taxa λ_n . Na chegada, o sistema se desloca do estado n para o estado $n + 1$. Quando o sistema está no estado $n \geq 1$, o tempo até a próxima partida (ou morte) é uma variável aleatória exponencial com taxa μ_n . Na partida, o sistema se desloca do estado n para o estado $n - 1$. Isso é uma cadeia de Markov de tempo contínuo, e seu diagrama de transição de taxa está apreseto na FIGURA 2.3 (Gross et al., 2008).

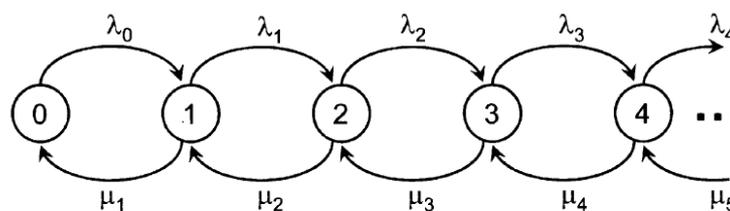


FIGURA 2.3 – Diagrama de transição de taxa para um processo de nascimento e morte (Gross et al., 2008)

2.4.6 Análise em Equilíbrio

A análise de muitos sistemas de filas baseia-se principalmente no comportamento do sistema em estado de equilíbrio, atingido após um tempo de operação suficientemente grande do sistema (Arenales et al., 2007). O estado de equilíbrio ou regime permanente, segundo Arenales et al. (2007), baseia-se no comportamento padrão do sistema em um longo período de tempo. Para isso, o sistema deve atingir um estado estacionário, em que parâmetros como taxa média de chegada de usuários ou tempo médio de serviço dos usuários não variam ao longo do horizonte de análise (processo de chegada e serviço estacionários).

2.4.7 Modelo de Fila M/M/c

O sistema de fila M/M/c representa um modelo de fila de nascimento e morte com c servidores e processos de chegada e serviço com distribuições exponenciais, assumindo a disciplina de atendimento da fila como FIFO.

A distribuição de equilíbrio deste modelo de nascimento e morte é dada pela Equação 2.2, segundo Gross et al. (2008).

$$p_n = \begin{cases} \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} p_0 & (0 \leq n \leq c), \\ \frac{\lambda^n}{c^{n-c} c! \mu^n} p_0 & (n \geq c). \end{cases} \quad (2.2)$$

Em que:

p_n é a probabilidade de se estar no estado n do sistema;

λ é a taxa de chegada de usuários;

μ é a taxa de atendimento dos usuários;

c é o número de dispositivos de atendimento.

Com a probabilidade do estado inicial definido pela Equação 2.3 a seguir:

$$p_0 = \left(\frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c}{c!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{c-1} \frac{\lambda^n}{n!\mu^n} \right)^{-1} \quad \left(\frac{\lambda}{c \cdot \mu} = \rho < 1 \right) \quad (2.3)$$

O tempo de espera em fila (W_q) é definido pela Equação 2.4, de acordo com Gross et al. (2008).

$$W_q = \left(\frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c}{c!(c\mu)(1-\rho)^2} \right) p_0 \quad (2.4)$$

2.4.8 Justificativas da Aplicação de Teoria de Filas

Santos (1984) apresenta 3 (três) argumentos comuns na literatura que colocariam algumas inconveniências na aplicação de Teoria de Filas em estudos de esperas de aeronaves em aeroportos. Dentre estes argumentos, 2 (dois) são aplicáveis à análise de filas de aeronaves em solo. Estes argumentos estão apresentados a seguir:

O primeiro questionamento apresentado está sobre a taxa de chegada de aeronaves. Segundo o autor supracitado, um argumento bastante citado na tentativa de desqualificar a aplicação de teoria de filas seria de que as taxas de chegadas de aeronaves variam constantemente em curtos espaços de tempo, sendo necessário analisar, permanentemente, o regime transitório de filas. Contudo, Santos (1984) destaca que, por mais que um aeroporto possa apresentar certa ociosidade operacional em grande parte do seu dia, os momentos onde há congestionamento são os horários de pico.

Um segundo argumento levantado, segundo Santos (1984), é quanto a pré determinação dos horários de chegada e saída da grande maioria das aeronaves em aeroportos com aviação comercial. Não sendo, no caso em questão, as chegadas nas filas (de aterrissagem e de decolagem) aleatórias, mas sim os atrasos. Como contra-argumento, Santos (1984) afirma, “embora seja correto que estas aeronaves tenham um horário pré-determinado, Martinelli (1980) apud Santos (1984) obteve as frequências relativas acumuladas nos desvios de horários

nas chegadas, com uma média próxima de zero e desvio padrão de aproximadamente 15 minutos”. Sendo justificado esse fato, pelo autor, em razão de que, embora muitas aeronaves cheguem atrasadas, algumas também chegam adiantadas, validando a utilização de modelos de chegadas aleatórias.

Outro ponto que pode ser apresentado a favor da defesa da aleatoriedade das chegadas de aeronaves, mais especificamente em aeroportos regionais, está na característica de chegada de aeronaves de aeroportos variados, sem gerar um fluxo contínuo de aeronaves vindas de um único aeroporto. Este tipo de fluxo contínuo de aeronaves de um aeroporto a outro pode resultar em filas aéreas, reduzindo a aleatoriedade de chegadas.

3 Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho, é adotada o modelo de fila M/M/c para a análise de congestionamento e atrasos em pátio de aeronaves. Como apresentado no item 2.4.8, adotar a taxa de chegada de aeronaves no sistema aeroportuária como sendo exponencial é uma premissa válida, conforme exigido pelo modelo M/M/c. Contudo, ainda é necessária adoção de algumas hipóteses para a aplicação deste modelo de Teoria das Filas para os estudos de operações em pátio de aeronaves. Estas hipóteses estão apresentadas no item 3.1.

3.1 Hipóteses Simplificadoras

Com o intuito de aproximar o modelo adotado à realidade, é necessário restringir a aplicação do modelo às condições que

- 1ª hipótese: o modelo aborda um sistema de fila única, sendo necessário que haja apenas um limitante nas operações no lado ar, no caso em questão, o pátio de aeronaves. Portanto, as operações de pouso e decolagem devem ocorrer de forma a não causar interferências entre si. Reforçando a adoção desta hipótese, Martinelli (1980) apud Ribeiro (2003), apresenta, em seu estudo sobre pátio utilizando teoria das filas, que só se pode considerar que as chegadas obedecem a uma distribuição de Poisson caso a operação do aeroporto não esteja próxima à capacidade máxima das pistas. Caso a capacidade esteja próxima do máximo, segundo o autor supracitado, as chegadas ao pátio passariam a obedecer à cadência permitida pelas aeronaves, reduzindo consideravelmente a aleatoriedade de saída dos subsistemas de pistas e, conseqüentemente, das entradas do subsistema de pátio. Martinelli (1980) apud Ribeiro (2003) ainda ressalta que somente se a taxa de chegadas estivesse entre “duas aeronaves por hora e 70% da capacidade máxima da pista” uma distribuição de Poisson poderia ser considerada.
- 2ª hipótese: a taxa de atendimento das aeronaves não deve variar muito, sendo apresentado, nos Resultados, a sensibilidade da variação desta taxa para a adoção do modelo.

3.2 Taxa de Atendimento (tempo de turnaround)

Boeing, Airbus e Empresa Brasileira de Aeronáutica - Embraer indicam, nos manuais de suas respectivas aeronaves, o tempo de execução estimado para cada atividade em posição de estacionamento de aeronaves. A TABELA 3.1 apresenta o compilado dos tempos de serviço completo para algumas aeronaves comuns na aviação brasileira.

Aeronave	Tempo de Turnaround (min)
A318	35,0
A319	37,0
A320	44,2
A321	52,0
B737	32,0
B738	38,0
E190	17,8
E195	19,0

TABELA 3.1 – Tempos de serviço completo de Turnaround apresentados nos Manuais das Aeronaves (Airbus, Boeing, Embraer)

Estas empresas ressaltam que esses valores são apenas estimativas, podendo variar de acordo com as práticas específicas de companhias aéreas e circunstâncias operacionais. Visto que os tempos estimados por essas empresas estão entre 17,8 min e 52 min, foram adotados, para o presente estudo, uma série de tempos entre 15 e 50 min, espaçados de 5 minutos. A partir dessa variabilidade, há uma maior chance de serem analisados valores coerentes com os tempos apresentados na prática.

3.3 Número de Servidores (Posições de Estacionamento)

Para a definição do número de posições de estacionamento a serem consideradas no estudo, foi analisada a movimentação de passageiros em 2017 de aeroportos administrados pela

Infraero (2018). Foram identificados 34 aeroportos que são caracterizados como aeroportos regionais, como definido pela Lei 13.097 de 2015, ou seja, apresentam movimentação de passageiros anual inferior a 600.000. Dentre esses aeroportos, estão apresentados na TABELA 3.2 aqueles em que há movimentação regular de aeronaves e que foi possível identificar o número de posições de estacionamento de aeronaves. Os valores de posição de estacionamento, apresentados TABELA 3.2, foram obtidos por meio da análise da sinalização horizontal do pátio indicada nas imagens do Google Earth.

Aeroporto	Movimentação de Passageiros Annual (2017)	Posições de Estacionamento
Aeroporto de Belo Horizonte	234.675	10
Aeroporto Internacional de Boa Vista	283.699	5
Aeroporto de Carajás	128.495	3
Aeroporto Internacional de Corumbá	30.815	3
Aeroporto Internacional de Cruzeiro do Sul	95.270	3
Aeroporto de Altamira	111.068	3
Aeroporto de Ilhéus	596.351	3
Aeroporto de Imperatriz	300.023	3
Aeroporto de Juazeiro do Norte	542.400	3
Aeroporto de Marabá	280.174	4
Aeroporto de Montes Claros	280.022	3
Aeroporto Internacional de Macapá	576.257	8
Aeroporto Internacional de Petrolina	485.495	5
Aeroporto de Rio Branco	345.079	5
Aeroporto Internacional de Santarém	452.966	8

Aeroporto	Movimentação de Passageiros Annual (2017)	Posições de Estacionamento
Aeroporto de Tefé	44.101	3
Aeroporto Internacional de Tabatinga	69.696	3
Aeroporto de Paulo Afonso	12.012	3

(1) Segundo a Infraero, o Aeroporto de Belo Horizonte teve movimentação de passageiros, em 2002, de 3.073.976. Após a transferência dos voos de longa distância, em 2005, para o Aeroporto Internacional de Confins, o Aeroporto de Belo Horizonte passou a atender principalmente a demanda regional de voos. Contudo, sua infraestrutura permanece a de um aeroporto de grande porte. Devido a isso, este aeroporto foi desconsiderado para a definição de posições de estacionamento para a análise.

TABELA 3.2 – Número de posições de estacionamento em aeroportos regionais (fonte: Infraero (2018), Google Earth)

Diante da variância apresentada, adotou-se, para a análise do pátio, configurações de 1 a 8 posições de estacionamento.

3.4 Nível de Serviço

Como apresentado no item 2.2, Horonjeff et al. (2010) apresenta que o valor máximo de atraso aceitável no lado ar é 4 minutos e que, a partir de 9 minutos, o sistema entra em estado de congestionamento. A partir dessa indicação, definiu-se a classificação dos atrasos apresentada na TABELA 3.3.

Classificação	Média de Atrasos (min)
Aceitável	< 4
Ruim	4 - 9
Muito ruim	> 9

TABELA 3.3 – Classificação dos tempos médios de atrasos (Horonjeff et al., 2010 adaptado)

3.5 Estratégia de Análise

Pelo modelo de filas $M/M/c$, são necessários 3 (três) variáveis para definição do sistema de variáveis. Ou seja, ao se adotar valores, por exemplo, para a taxa de chegada (λ), para a taxa de atendimento (μ) e para o número de servidores (c), tem-se o tempo médio em fila (W_q) e a taxa de utilização (ρ) definidos.

Com o intuito de avaliar a relação entre a movimentação de aeronaves no pátio, ou seja, a taxa de chegada, com os valores de atrasos em níveis aceitáveis, como definido no item 3.3, foram variados a taxa de atendimento, de acordo com o assumido no item 3.2, o número de posições de parada, que representa o número de servidores do sistema, e a taxa de utilização do sistema. Os resultados encontrados estão apresentados no item 4 a seguir.

4 Resultados

Diante do tempo de operação do sistema e da infraestrutura disponível, pode-se analisar os resultados sobre dois focos importantes: (i) identificar quais os limites de saturação do sistema em que os atrasos médios permaneçam dentro de valores aceitáveis e (ii) identificar qual a taxa de chegada máxima que pode ser atingida no pátio mantendo os atrasos médios dentro de valores aceitáveis.

Estas análises estão apresentadas nos itens 4.1 e 4.1.1 a seguir.

4.1 Limites de Utilização do Sistema

Para avaliar os limites de utilização de um sistema, é necessário identificar qual a capacidade máxima teórica do sistema. A capacidade teórica pode ser obtida a partir da Equação 2.1 de taxa de utilização apresentada novamente a seguir, ao se considerar o sistema com uso total, ou seja, $\rho = 1$.

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (2.1)$$

A TABELA 4.1 apresenta as capacidades teóricas de acordo com o número de posições de estacionamento e com o tempo de atendimento na posição.

Capacidade Teórica (aeronaves/h)								
Número de posições (c)	Tempo de Atendimento (1/μ) (min)							
	15	20	25	30	35	40	45	50
1 posição	4,0	3,0	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2
2 posições	8,0	6,0	4,8	4,0	3,4	3,0	2,7	2,4
3 posições	12,0	9,0	7,2	6,0	5,1	4,5	4,0	3,6
4 posições	16,0	12,0	9,6	8,0	6,9	6,0	5,3	4,8
5 posições	20,0	15,0	12,0	10,0	8,6	7,5	6,7	6,0

Capacidade Teórica (aeronaves/h)								
Número de posições (c)	Tempo de Atendimento (1/μ) (min)							
	15	20	25	30	35	40	45	50
6 posições	24,0	18,0	14,4	12,0	10,3	9,0	8,0	7,2
7 posições	28,0	21,0	16,8	14,0	12,0	10,5	9,3	8,4
8 posições	32,0	24,0	19,2	16,0	13,7	12,0	10,7	9,6

TABELA 4.1 – Capacidade Teórica do Pátio de Aeronaves

A partir do modelo de filas M/M/c apresentado no item 2.4.7, calculou-se o tempo de espera em fila, considerado com atrasos pelo presente estudo. A TABELA 4.2 indica os valores desses atrasos, com a classificação de nível de serviço apresentada no item 3.4.

Atraso Médio (min)										Acréscimo no atraso (min)
Número de posições (c)	Taxa de utilização (ρ)	Tempo de Atendimento (min)								
		15	20	25	30	35	40	45	50	Em 5 min
1 posição	20%	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25	12,50	1,25
	30%	6,43	8,57	10,71	12,86	15,00	17,14	19,29	21,43	2,14
	40%	10,00	13,33	16,67	20,00	23,33	26,67	30,00	33,33	3,33
	50%	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	5,00
	60%	22,50	30,00	37,50	45,00	52,50	60,00	67,50	75,00	7,50
	70%	35,00	46,67	58,33	70,00	81,67	93,33	105,00	116,67	11,67
	80%	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	20,00
	90%	135,00	180,00	225,00	270,00	315,00	360,00	405,00	450,00	45,00

		Atraso Médio (min)								Acréscimo no atraso (min)
Número de posições (c)	Taxa de utilização (ρ)	Tempo de Atendimento (min)								Em 5 min
		15	20	25	30	35	40	45	50	
2 posições	20%	0,63	0,83	1,04	1,25	1,46	1,67	1,88	2,08	0,21
	30%	1,48	1,98	2,47	2,97	3,46	3,96	4,45	4,95	0,49
	40%	2,86	3,81	4,76	5,71	6,67	7,62	8,57	9,52	0,95
	50%	5,00	6,67	8,33	10,00	11,67	13,33	15,00	16,67	1,67
	60%	8,44	11,25	14,06	16,88	19,69	22,50	25,31	28,13	2,81
	70%	14,41	19,22	24,02	28,82	33,63	38,43	43,24	48,04	4,80
	80%	26,67	35,56	44,44	53,33	62,22	71,11	80,00	88,89	8,89
	90%	63,95	85,26	106,58	127,89	149,21	170,53	191,84	213,16	21,32
3 posições	20%	0,15	0,21	0,26	0,31	0,36	0,41	0,46	0,51	0,05
	30%	0,50	0,67	0,83	1,00	1,17	1,33	1,50	1,67	0,17
	40%	1,18	1,57	1,96	2,35	2,75	3,14	3,53	3,92	0,39
	50%	2,37	3,16	3,95	4,74	5,53	6,32	7,11	7,89	0,79
	60%	4,43	5,91	7,39	8,87	10,35	11,82	13,30	14,78	1,48
	70%	8,21	10,94	13,68	16,41	19,15	21,88	24,62	27,35	2,74
	80%	16,18	21,57	26,97	32,36	37,75	43,15	48,54	53,93	5,39
	90%	40,85	54,47	68,09	81,71	95,32	108,94	122,56	136,18	13,62
4 posições	20%	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15	0,01
	30%	0,20	0,26	0,33	0,40	0,46	0,53	0,60	0,66	0,07
	40%	0,57	0,76	0,94	1,13	1,32	1,51	1,70	1,89	0,19
	50%	1,30	1,74	2,17	2,61	3,04	3,48	3,91	4,35	0,43
	60%	2,69	3,59	4,49	5,38	6,28	7,18	8,07	8,97	0,90
	70%	5,36	7,14	8,93	10,72	12,50	14,29	16,07	17,86	1,79
	80%	11,18	14,91	18,64	22,37	26,09	29,82	33,55	37,28	3,73
	90%	29,54	39,39	49,23	59,08	68,93	78,78	88,62	98,47	9,85

		Atraso Médio (min)								Acréscimo no atraso (min)
Número de posições (c)	Taxa de utilização (ρ)	Tempo de Atendimento (min)								Em 5 min
		15	20	25	30	35	40	45	50	
5 posições	20%	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,00
	30%	0,09	0,12	0,14	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29	0,03
	40%	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	0,10
	50%	0,78	1,04	1,30	1,56	1,83	2,09	2,35	2,61	0,26
	60%	1,77	2,36	2,95	3,54	4,13	4,72	5,31	5,90	0,59
	70%	3,78	5,04	6,30	7,56	8,82	10,08	11,34	12,59	1,26
	80%	8,31	11,08	13,85	16,62	19,39	22,16	24,94	27,71	2,77
	90%	22,87	30,50	38,12	45,75	53,37	61,00	68,62	76,25	7,62
6 posições	20%	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00
	30%	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12	0,13	0,01
	40%	0,17	0,22	0,28	0,33	0,39	0,44	0,50	0,55	0,06
	50%	0,50	0,66	0,83	0,99	1,16	1,32	1,49	1,65	0,17
	60%	1,23	1,64	2,05	2,46	2,87	3,28	3,69	4,10	0,41
	70%	2,80	3,73	4,67	5,60	6,53	7,47	8,40	9,33	0,93
	80%	6,47	8,63	10,79	12,94	15,10	17,26	19,42	21,57	2,16
	90%	18,50	24,67	30,84	37,01	43,17	49,34	55,51	61,68	6,17

		Atraso Médio (min)								Acréscimo no atraso (min)
Número de posições (c)	Taxa de utilização (ρ)	Tempo de Atendimento (min)								Em 5 min
		15	20	25	30	35	40	45	50	
7 posições	20%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
	30%	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,01
	40%	0,10	0,13	0,16	0,19	0,23	0,26	0,29	0,32	0,03
	50%	0,33	0,44	0,54	0,65	0,76	0,87	0,98	1,09	0,11
	60%	0,88	1,18	1,47	1,77	2,06	2,36	2,65	2,95	0,29
	70%	2,15	2,86	3,58	4,30	5,01	5,73	6,44	7,16	0,72
	80%	5,21	6,94	8,68	10,41	12,15	13,88	15,62	17,35	1,74
	90%	15,43	20,57	25,71	30,86	36,00	41,14	46,28	51,43	5,14
8 posições	20%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30%	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00
	40%	0,06	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,02
	50%	0,22	0,30	0,37	0,44	0,52	0,59	0,66	0,74	0,07
	60%	0,65	0,87	1,09	1,31	1,53	1,74	1,96	2,18	0,22
	70%	1,69	2,26	2,82	3,38	3,95	4,51	5,07	5,64	0,56
	80%	4,29	5,72	7,15	8,58	10,01	11,44	12,87	14,30	1,43
	90%	13,15	17,54	21,92	26,31	30,69	35,08	39,46	43,85	4,38

TABELA 4.2 – Atrasos na operação em pátio de estacionamento de aeronaves

Pela análise da variação dos atrasos médios, é possível identificar que, a cada acréscimo de 5 minutos no tempo de atendimento da posição de estacionamento, há o aumento do atraso em uma taxa constante, apresentando uma relação linear entre o atraso médio e o tempo de atendimento. Como apresentado na TABELA 4.2, quanto mais saturado está o sistema, mais impacto o aumento do tempo de atendimento causa nos atrasos. Além disso, identifica-se que, quanto maior o número de posições de estacionamento, menos sensível o sistema é às variações de tempo de atendimento em calço da aeronave. A FIGURA 4.1 exemplifica a redução do atraso médio a medida em que se aumentam as posições de estacionamento.

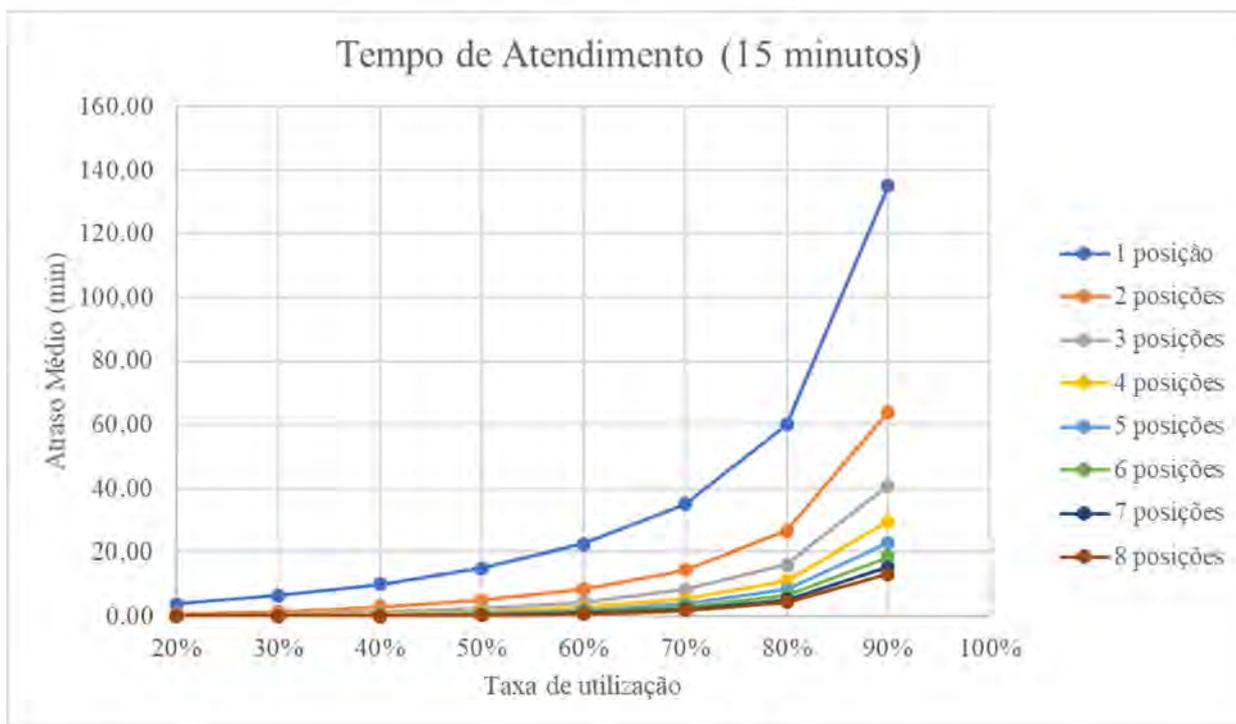


FIGURA 4.1 – Relação entre a taxa de chegada e a taxa de utilização do sistema com uma TA de 15 min

Contudo, é necessário destacar que, quanto mais posições de estacionamento, mais complexo se torna o sistema, fazendo com que este modelo simplificado se distancie da realidade.

4.1.1 Taxa de Utilização para Atrasos de 4 minutos

A TABELA 4.3 apresenta o valor de taxa de utilização que resulta em atrasos médios de 4 minutos, segundo o modelo adotado, de acordo com o número de posições de estacionamento e com o tempo de atendimento na posição.

Taxa de Utilização (ρ)								
Número de posições (c)	Tempo de Atendimento ($1/\mu$) (min)							
	15	20	25	30	35	40	45	50
1 posição	21%	17%	14%	12%	10%	9%	8%	7%
2 posições	46%	41%	37%	34%	32%	30%	29%	27%
3 posições	58%	54%	50%	47%	45%	43%	42%	40%
4 posições	66%	62%	58%	56%	54%	52%	50%	49%
5 posições	71%	67%	64%	62%	60%	58%	56%	55%
6 posições	74%	71%	68%	66%	64%	62%	61%	60%
7 posições	77%	74%	71%	69%	67%	66%	65%	63%
8 posições	79%	76%	74%	72%	70%	69%	67%	66%

TABELA 4.3 – Taxa de Utilização do Sistema para Atrasos de 4 minutos

4.2 Taxa de Chegada de Aeronaves

A partir dos valores de atrasos apresentado no item anterior, foram identificadas as taxas de chegada que podem ser atingidas no pátio mantendo os atrasos médios dentro de valores aceitáveis, estando indicadas na TABELA 4.4.

Taxa de chegada (aeronaves/h)									
Número de posições (c)	Taxa de utilização (ρ)	Tempo de Atendimento (min)							
		15	20	25	30	35	40	45	50
1 posição	20%	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
	30%	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
	40%	1,6	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
	50%	2,0	1,5	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
	60%	2,4	1,8	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
	70%	2,8	2,1	1,7	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8
	80%	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
	90%	3,6	2,7	2,2	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1
2 posições	20%	1,6	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
	30%	2,4	1,8	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
	40%	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
	50%	4,0	3,0	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2
	60%	4,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4
	70%	5,6	4,2	3,4	2,8	2,4	2,1	1,9	1,7
	80%	6,4	4,8	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9
	90%	7,2	5,4	4,3	3,6	3,1	2,7	2,4	2,2
3 posições	20%	2,4	1,8	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
	30%	3,6	2,7	2,2	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1
	40%	4,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4
	50%	6,0	4,5	3,6	3,0	2,6	2,3	2,0	1,8
	60%	7,2	5,4	4,3	3,6	3,1	2,7	2,4	2,2
	70%	8,4	6,3	5,0	4,2	3,6	3,2	2,8	2,5
	80%	9,6	7,2	5,8	4,8	4,1	3,6	3,2	2,9
	90%	10,8	8,1	6,5	5,4	4,6	4,1	3,6	3,2

Taxa de chegada (aeronaves/h)									
Número de posições (c)	Taxa de utilização (ρ)	Tempo de Atendimento (min)							
		15	20	25	30	35	40	45	50
4 posições	20%	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
	30%	4,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4
	40%	6,4	4,8	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9
	50%	8,0	6,0	4,8	4,0	3,4	3,0	2,7	2,4
	60%	9,6	7,2	5,8	4,8	4,1	3,6	3,2	2,9
	70%	11,2	8,4	6,7	5,6	4,8	4,2	3,7	3,4
	80%	12,8	9,6	7,7	6,4	5,5	4,8	4,3	3,8
	90%	14,4	10,8	8,6	7,2	6,2	5,4	4,8	4,3
5 posições	20%	4,0	3,0	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2
	30%	6,0	4,5	3,6	3,0	2,6	2,3	2,0	1,8
	40%	8,0	6,0	4,8	4,0	3,4	3,0	2,7	2,4
	50%	10,0	7,5	6,0	5,0	4,3	3,8	3,3	3,0
	60%	12,0	9,0	7,2	6,0	5,1	4,5	4,0	3,6
	70%	14,0	10,5	8,4	7,0	6,0	5,3	4,7	4,2
	80%	16,0	12,0	9,6	8,0	6,9	6,0	5,3	4,8
	90%	18,0	13,5	10,8	9,0	7,7	6,8	6,0	5,4
6 posições	20%	4,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4
	30%	7,2	5,4	4,3	3,6	3,1	2,7	2,4	2,2
	40%	9,6	7,2	5,8	4,8	4,1	3,6	3,2	2,9
	50%	12,0	9,0	7,2	6,0	5,1	4,5	4,0	3,6
	60%	14,4	10,8	8,6	7,2	6,2	5,4	4,8	4,3
	70%	16,8	12,6	10,1	8,4	7,2	6,3	5,6	5,0
	80%	19,2	14,4	11,5	9,6	8,2	7,2	6,4	5,8
	90%	21,6	16,2	13,0	10,8	9,3	8,1	7,2	6,5

Taxa de chegada (aeronaves/h)									
Número de posições (c)	Taxa de utilização (ρ)	Tempo de Atendimento (min)							
		15	20	25	30	35	40	45	50
7 posições	20%	5,6	4,2	3,4	2,8	2,4	2,1	1,9	1,7
	30%	8,4	6,3	5,0	4,2	3,6	3,2	2,8	2,5
	40%	11,2	8,4	6,7	5,6	4,8	4,2	3,7	3,4
	50%	14,0	10,5	8,4	7,0	6,0	5,3	4,7	4,2
	60%	16,8	12,6	10,1	8,4	7,2	6,3	5,6	5,0
	70%	19,6	14,7	11,8	9,8	8,4	7,4	6,5	5,9
	80%	22,4	16,8	13,4	11,2	9,6	8,4	7,5	6,7
	90%	25,2	18,9	15,1	12,6	10,8	9,5	8,4	7,6
8 posições	20%	6,4	4,8	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9
	30%	9,6	7,2	5,8	4,8	4,1	3,6	3,2	2,9
	40%	12,8	9,6	7,7	6,4	5,5	4,8	4,3	3,8
	50%	16,0	12,0	9,6	8,0	6,9	6,0	5,3	4,8
	60%	19,2	14,4	11,5	9,6	8,2	7,2	6,4	5,8
	70%	22,4	16,8	13,4	11,2	9,6	8,4	7,5	6,7
	80%	25,6	19,2	15,4	12,8	11,0	9,6	8,5	7,7
	90%	28,8	21,6	17,3	14,4	12,3	10,8	9,6	8,6

TABELA 4.4 – Taxa de chegada em pátio de estacionamento de aeronaves

A TABELA 4.5 apresenta os valores limites de taxas de chegada das aeronaves no pátio que resultam em atrasos médios de 4 minutos, segundo o modelo adotado.

Taxa de Chegada (λ) para atraso de 4 minutos								
Número de posições (c)	Tempo de Atendimento ($1/\mu$) (min)							
	15	20	25	30	35	40	45	50
1 posição	0,8	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
2 posições	3,7	2,4	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8	0,7
3 posições	7,0	4,8	3,6	2,8	2,3	1,9	1,7	1,4
4 posições	10,5	7,4	5,6	4,5	3,7	3,1	2,7	2,3
5 posições	14,2	10,0	7,7	6,2	5,1	4,3	3,8	3,3
6 posições	17,8	12,8	9,8	7,9	6,6	5,6	4,9	4,3
7 posições	21,6	15,5	12,0	9,7	8,1	6,9	6,0	5,3
8 posições	25,4	18,3	14,2	11,5	9,6	8,2	7,2	6,4

TABELA 4.5 – Taxa de Chegada para Atrasos de 4 minutos

Vale a ressalva de que esta taxa de chegada de aeronaves representa apenas a metade da movimentação da pista de pouso e decolagem, correspondente aos pousos das aeronaves, sendo necessário dobrar o valor da taxa de chegada no pátio para obter a movimentação na pista de pouso e decolagem.

5 Conclusões e Recomendações

Este estudo tratou da modelagem, por meio de Teoria de Filas, de aeroportos regionais.

O modelo de análise elaborado atingiu os objetivos traçados no início do trabalho: elaborar material sobre capacidade de pátio de aeronaves que permita a administradores de aeroportos regionais avaliar e planejar, de maneira prática, seus pátios.

Diante das tabelas desenvolvidas, administradores de aeroportos podem fazer a avaliação quanto a capacidade instalada ou quanto a capacidade necessária.

A partir da TABELA 4.5, o administrador aeroportuário de um aeroporto regional pode avaliar quanto de saturação da capacidade do pátio pode ser explorada de forma a manter os atrasos dentro de valores aceitáveis. Além disso, o administrador pode planejar quais intervenções precisam ser realizadas para o aeroporto atingir a capacidade necessária para atender à demanda de taxa de chegada futura de forma a estar dentro de atrasos aceitáveis. Contudo, é importante ressaltar que o modelo adotado para o estudo é uma simplificação da realidade, apresentando limitações à sua aplicação e podendo estar distante da realidade.

Recomenda-se, para estudos futuros, a modelagem por meio de outros modelos da teoria das filas, abordando as chegadas de aeronaves sob outras distribuições probabilísticas e considerando taxas de atendimento diferentes para cada posição de estacionamento. Além disso, recomenda-se a utilização de modelos de simulação para ponderação do impacto da geometria do pátio e do sistema de pistas de táxi e pouso e decolagem na formação das filas do pátio.

6 Referências

ALMEIDA, P. M. S., **Utilização de Simulação na Análise de Componentes de Terminais de Passageiros de Aeroportos Brasileiros**. 66f. 1998. Dissertação (Mestre em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ANAC (Brasil) a. **Concessões**. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/concessoes>>. Acessado em: 04 de novembro de 2018.

ANAC (Brasil) b. **Dúvidas sobre as concessões?**. 30 de setembro de 2011. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/noticias/2011/duvidas-sobre-as-concessoes>>. Acessado em: 03 de novembro de 2018.

ANAC (Brasil) c. **Justificativa AP blocos - 28.05 - sem conclição**. 30 de maio de 2018. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/participacao-social/audiencias-e-consultas-publicas/audiencias/2018/aud-11/justificativa-ap-blocos-28-05-sem-concliacao.pdf>>. Acessado em: 03 de novembro de 2018.

ANAC (Brasil) d. **Relatório 6: Critérios de qualidade de serviço para elaboração do Plano de Exploração Aeroportuária e Metodologia de Execução do Aeroporto Internacional de São Gonçalo do Amarante**. Brasília: ANAC, 11 de março de 2016. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/concessoes/arquivos/relatorio-6-indice-de-qualidade-de-servicos.pdf>>. Acessado em: 03 de novembro de 2018.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BALTER, T. S. **Análise Comparativa dos Aeroportos Brasileiros de Grande Porte a Nível Internacional**. 2012. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BASTOS, A. D. et al. Análise de Capacidade de Operação dos Boxes do Aeroporto de São Paulo – Congonhas por Meio de Simulação Computacional. In: **Anais do VII SITRAER - Simpósio de Transporte Aéreo**, Rio de Janeiro, v 1, p.193-208, 2008 apud MEDAU, J. C. **Análise de Capacidade do Lado Aéreo de Aeroportos baseada em Simulação Computacional: aplicação ao Aeroporto de São Paulo – Congonhas**. 2011. 123f. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

BARRAGÁN DE LOS RIOS, G. A. **Uma Anpakuse da Capacidade das Pistas dos Aeroportos da CTR São Paulo através de Simulação**. 2009. 130f. Tese (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

BECHARA, E. **Minidicionário da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro, Editora Nova Fronteira, 2009.

BETTINI, H. F. A. J. Um Retrato da Aviação Regional no Brasil. **Documento de Trabalho N.018 – Acervo Científico do Núcleo de Estudos em Competição e Regulação do Transporte Aéreo** (NECTAR). São José dos Campos, SP. Disponível em <eee.nectar.ta.br> 2007.

BRASIL. Lei nº 13.097, de 19 de janeiro de 2015. Reduz a zero as alíquotas da Contribuição para o PIS/PASEP, da COFINS, da Contribuição para o PIS/Pasep-Importação e da Cofins-Importação incidentes sobre a receita de vendas e na importação de partes utilizadas em aerogeradores;[...] e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. 20 de janeiro de 2015. Capítulo VIII. Seção I. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13097.htm>. Acessado em: 01 de novembro de 2018.

CAMELO et al. Teoria das filas e da simulação aplicada ao embarque de minério de ferro e manganês no terminal marítimo de ponta da madeira. **XXX Encontro Nacional De Engenharia De Produção**, São Carlos, 2010.

CAVALEIRO, O. G. **Nível de Serviço Percebido para Sala de Embarque de Aeroportos Regionais**. 2017. 119f. Dissertação (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Tudo sobre os Controles de Aproximação (APP – Approach Control) brasileiros**. DECEA, 01 de agosto de 2017 Disponível em: <<https://www.decea.gov.br/blog/?p=950>>. Acessado em: 10 de novembro de 2018.

European Union. Community guidelines on financing of airports and start-up aid to airlines departing from regional airports. In: **Official Journal of the European Union**. 12 de setembro de 2005. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2005:312:0001:0014:EN:PDF>>. Acessado em: 01 de novembro de 2018.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION . Categories of Airport Activities. 03 de março de 2016. Disponível em: <https://www.faa.gov/airports/planning_capacity/passenger_allcargo_stats/categories/>. Acessado em: 30 de outubro de 2018.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Airpor Capacity Handbook**. 2ª ed., 1969 apud BARRAGÁN DE LOS RIOS, G. A. **Uma Anpakuse da Capacidade das Pistas dos Aeroportos da CTR São Paulo através de Simulação**. 2009. 130f. Tese (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

FEITOSA, M. V. M. **Um Modelo de Simulação para Terminais de Passageiros em Aeroportos Regionais Brasileiros**. 2000. 181f. Dissertação (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

GROSS, D. et al. **Fundamentals of Queueing Theory**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

HORONJEFF, R. et al., **Planning and Design of Airports**. 5th ed. New York: McGraw Hill, 2010. v. 1, p. 689.

INFRAERO. **Estatísticas**. Disponível em: <<http://www4.infraero.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/estatisticas/>>. Acessado em: 20 de novembro de 2018.

INFRAERO. **Histórico: Aeroporto de Belo Horizonte – Pampulha – Carlos Drummond de Andrade**. Disponível em: <<http://www4.infraero.gov.br/aeroportos/aeroporto-de-belo-horizonte-pampulha-carlos-drummond-de-andrade/sobre-o-aeroporto/historico/>>. Acessado em: 20 de novembro de 2018.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORTATION ASSOCIATION – IATA, **Airport development reference manual**. 10th ed. Montreal, 2014 apud CAVALEIRO, O. G. **Nível de Serviço Percebido para Sala de Embarque de Aeroportos Regionais**. 2017. 119f. Dissertação (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – ICAO. **Aerodrome Design and Operations** - Anexo 14. 7th ed. Montreal, 2016.

LIMA, V. C. et al. Aplicação da Teoria das Filas em Serviços Bancários. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v. 16, n. 1, p. 210-241, jan./mar. 2016.

LOPES, D. R. **Contribuição à modelagem do problema do planejamento da operação de pátios de aeronaves em aeroportos**. 1990. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo apud RIBEIRO, F. R. **Modelo de Simulação para Análise Operacional de Pátio de Aeronaves**. 2003. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARTINELLI, J. C N. **Avaliação de metodologias de cálculo do número de posições de estacionamento de aeronaves nos pátios**. 1980. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo apud RIBEIRO, F. R. **Modelo de Simulação para Análise Operacional de Pátio de Aeronaves**. 2003. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEDAU, J. C. **Análise de Capacidade do Lado Aéreo de Aeroportos baseada em Simulação Computacional: aplicação ao Aeroporto de São Paulo – Congonhas**. 2011. 123f. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOSER, R. F. **Simulação e Análise de Configurações Aeroportuárias utilizando Visual SIMMOD: Aplicação ao Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos**. 2007. 138f. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MÜLLER, C.; GOSLING, G. D. A framework for evaluating level of service for airport terminals. **Transportation Planning and Technology**, 1991, v. 16, p. 45-61.

De NEUFVILLE, R.; ODoni, A. R. **Airport Systems: Planning, Design, and Management**. 2nd ed. New York: McGraw Hill, 2003. 810 p.

De NEUFVILLE, R.; STAFFORD, J. H. **System Analysis for Engineers and Managers**, New York: McGraw, 1971 apud BARRAGÁN DE LOS RIOS, G. A. **Uma Análise da Capacidade das Pistas dos Aeroportos da CTR São Paulo através de Simulação**. 2009. 130f. Tese (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

PERES, A. E. **Modelos para Avaliação de Capacidade de Pistas com Operação semi-independentes: Aplicação ao aeroporto de São Paulo/Guarulhos**. 1992. 109f. Dissertação (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

POSTORINO, M.N. **Development of Regional Airports – Theoretical Analyses and Case Studies**. Southampton, Boston: WITPress, 2010.

RIBEIRO, F. R. **Modelo de Simulação para Análise Operacional de Pátio de Aeronaves**. 2003. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RIBEIRO, S. C. **Análise do Desenvolvimento do Transporte Aéreo Regional no Brasil**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RODRIGUES, A. L. **Uma contribuição ao estudo da infra-estrutura aeronáutica: proposta de um modelo de simulação para a ocupação do pátio de estacionamento de aeronaves**. 1994. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro apud RIBEIRO, F. R. **Modelo de Simulação para Análise Operacional de Pátio de Aeronaves**. 2003. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROLIM, P. S. W. **Metodologia de Avaliação de Fatores Determinantes no Nível de Serviço Oferecido no Check-in de Voos Internacionais**. 2016. 99f. Dissertação (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SANTANA, E. S. M. **Análise de Novos Cenários Operacionais para o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos**. 2002. 118f. Dissertação (Mestrado em Transporte aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SANTOS, J. P. **Aplicação de Estudo de Filas: Filas de Aeronaves em Aeroportos – Estudo de Caso do Aeroporto de Congonhas**. 1984. 131f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.

SLACK, N. et al. **Administração da produção**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2007.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 20 de novembro de 2018	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-088/2018	4. N° DE PÁGINAS 59
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Metodologia de análise de congestionamento e atrasos em pátio de aeronaves de aeroportos regionais.			
6. AUTOR(ES): Thales Cavalcante de Queiroz			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Aeroportos Regionais. 2. Pátio de Aeronaves. 3. Planejamento. 4. Capacidade. 5. Teoria de Filas.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Capacidade aeroportuária; Teoria de filas; Planejamento; Infraestrutura (transporte); Aeroportos; Transportes.			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Profa. Giovanna Ronzani. Publicado em 2018.			
11. RESUMO: Este trabalho de graduação tem como objetivo analisar a capacidade de operação de pátio de estacionamento de aeronaves para aeroportos regionais e, para tanto, é estimada a movimentação máxima de aeronaves suportada no pátio dentro de limites de atrasos considerados aceitáveis pela literatura. No caso da obra em questão, é realizada uma análise por meio de método estocástico utilizando Teoria das Filas. O estudo consiste na análise de modelos genéricos de aeroportos com perfil regional (operações de embarque e desembarque em posições remotas, número reduzido de posições de estacionamento, entre outras características) sem considerar uma geometria para o pátio específica. Nesta análise, é avaliada a capacidade de operação em pátio ao se variar parâmetros básicos de operação: tempo de turnaround (tempo de atendimento de aeronaves em calço), número de posições de parada, taxa de utilização da capacidade do pátio. Vale a ressalva de que, para esse estudo, o pátio de estacionamento de aeronaves é considerado como um elemento isolado do sistema e sendo este o elemento limitante da capacidade do lado ar. A partir dos resultados de capacidade encontrados, foram elaboradas tabelas correlacionando os parâmetros adotados à capacidade obtida. Estas tabelas servem como um material de consulta acessível para administradores aeroportuários de aeródromos regionais que tenham interesse em: (i) avaliar, a partir da configuração atual do aeroporto, qual a máxima movimentação de aeronaves que o pátio suporta dentro de níveis de atrasos aceitáveis ou (ii) planejar a expansão de suas operações e ponderar o momento de intervenção na infraestrutura do pátio de estacionamento de aeronaves. Como contribuição acadêmica, este trabalho apresenta metodologia para avaliação do tempo de operação de pátios de aeronaves em aeroportos regionais utilizando Teoria das Filas, com definição de níveis de serviço para os atrasos na operação de pátio como um todo.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			