Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Yan Barboza Bastos

Uma abordagem estocástica para a otimização da programação de voos *offshore*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós–graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Rafael Martinelli Pinto
Coorientadora: Profª. Julia Lima Fleck

Rio de Janeiro
Outubro de 2020

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Yan Barboza Bastos

Uma abordagem estocástica para a otimização da programação de voos *offshore*

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós–graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio.

Prof. Rafael Martinelli Pinto
Orientador
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Profª. Julia Lima Fleck
Coorientadora
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Reinaldo Morabito Neto
UFSCar

Prof. Eduardo Uchoa Barboza
UFF

Rio de Janeiro, 01 de Outubro de 2020

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Yan Barboza Bastos

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Fluminense (Niterói, RJ, Brasil). Trabalhou por 7 anos na área de logística *offshore* da Petrobras, desenvolvendo estudos e implementando projetos de melhoria operacional, principalmente no setor de transporte aéreo *offshore*. Atualmente trabalha com projetos de P&D para a logística *offshore* no Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Ficha Catalográfica

Bastos, Yan Barboza

Uma abordagem estocástica para a otimização da programação de voos *offshore* / Yan Barboza Bastos; orientador: Rafael Martinelli Pinto; coorientadora: Julia Lima Fleck. – 2020.

101 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Transporte Aéreo Offshore. 3. Problema de Roteamento de Helicópteros. 4. Programação Estocástica. 5. Aproximação pela Média Amostral. 6. Simulação de Eventos Discretos. I. Martinelli Pinto, Rafael. II. Fleck, Julia Lima. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Dedico essa dissertação ao meu pai (*in memoriam*).

Agradecimentos

Sou grato a meus pais por terem criado em mim a admiração pela ciência, instigando minha curiosidade e provendo um ambiente livre e criativo durante a minha infância e adolescência. Agradeço à minha esposa pelo companheirismo e carinho, mesmo nos momentos mais difíceis e de ausência, e pelo incentivo para seguir em frente.

Agradeço ao meu orientador, Rafael Martinelli, e à minha coorientadora, Julia Fleck, pela confiança depositada em mim, pela atenção e dedicação inestimáveis e pelo enorme suporte na elaboração dos trabalhos acadêmicos e na dissertação.

Agradeço à Petrobras por proporcionar essa oportunidade de cursar o Mestrado Profissional em Logística da PUC-Rio. Obrigado a todos os meus colegas do trabalho, da Logística do E&P e do CENPES. Agradeço especialmente à Nathalia Hermeto e Thyago Hermeto, assim como toda a equipe do Transporte Aéreo *Offshore* da Petrobras, pelo compartilhamento de tantos conhecimentos sobre transporte aéreo e aviação *offshore* durante os anos que trabalhei na Logística do E&P. Agradeço aos meus colegas do CENPES pela ajuda no trabalho e pelas dicas acadêmicas, e em especial ao Victor Anselmo, por dividir experiências sobre modelagem matemática e simulação que me ajudaram muito na elaboração dessa dissertação de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Resumo

Bastos, Yan Barboza; Martinelli Pinto, Rafael; Fleck, Julia Lima. **Uma abordagem estocástica para a otimização da programação de voos *offshore***. Rio de Janeiro, 2020. 101p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A Petrobras, maior empresa de óleo e gás do Brasil e uma das maiores do mundo, possui mais de 94% da sua produção proveniente de campos *offshore*. Na região Sudeste o transporte dos trabalhadores para as unidades marítimas de exploração e produção é realizado por modal aéreo, através de helicópteros afretados de médio a grande porte.

Para atender ao grande número de voos, a Petrobras possui uma central de planejamento e programação de voos, cujo objetivo é construir escalas de atendimento eficientes, em relação ao uso de recursos e ao nível de serviço. Um dos desafios enfrentados é gerar, manualmente, programações dos voos em situações de ruptura do atendimento, como por exemplo quando ocorre interrupção de pousos e decolagens devido a condições meteorológicas adversas (exigindo que os voos sejam programados para horários posteriores aos previamente planejados).

Nessa dissertação de mestrado, é proposta uma abordagem de programação estocástica para gerar a programação de voos *offshore* ótima do ponto de vista do nível de serviço, reduzindo os atrasos esperados nos voos. Considerando a característica combinatória dos problemas de agendamento, utilizou-se o método de Aproximação pela Média Amostral (SAA) para gerar os cenários do modelo de programação estocástica. Um modelo de Simulação de Eventos Discretos também foi desenvolvido para avaliar o nível de serviço das programações de voos geradas. Os resultados numéricos indicam que a abordagem estocástica pode reduzir atrasos imprevisíveis, que causam grande impacto nos passageiros e na cadeia de suprimentos.

Palavras-chave

Transporte Aéreo Offshore; Problema de Roteamento de Helicópteros; Programação Estocástica; Aproximação pela Média Amostral; Simulação de Eventos Discreto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Abstract

Bastos, Yan Barboza; Martinelli Pinto, Rafael (Advisor); Fleck, Julia Lima (Co-Advisor). **A stochastic approach for offshore flight scheduling optimization**. Rio de Janeiro, 2020. 101p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Petrobras, the largest oil and gas company in Brazil and one of the largest in the world, has more than 94% of its production from offshore fields. In the Southeast region, workers are transported to offshore exploration and production units by air, using medium size to large size chartered helicopters.

To serve the large number of flights, Petrobras has a flight planning and scheduling center, with the objective of building efficient service scales, related to the use of resources and the level of service. One of the challenges faced is to generate, manually, flight schedules in situations of disruption of service, such as when there is an interruption of landings and takeoffs due to adverse weather conditions (requiring that flights be scheduled for times after those previously planned).

In this master's thesis, a stochastic programming approach is proposed to generate the optimal offshore flight schedule from the service level point of view, reducing expected flight delays. Considering the combinatorial characteristic of scheduling problems, the Sample Average Approximation (SAA) method was used to generate the scenarios of the stochastic programming model. A Discrete Event Simulation model was also developed to evaluate the service level of the generated flight schedules. The numerical results indicate that the stochastic approach can reduce unpredictable delays, which have a major impact on passengers and the supply chain.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Keywords

Offshore Air Transport; Helicopter Routing Problem; Stochastic Programming; Sample Average Approximation; Discrete-Event Simulation.

Sumário

1 Introdução **15**
1.1 Motivação 17
1.2 Contextualização 19
1.2.1 Os processos de decisão no transporte aéreo *offshore* da Petrobras 21
1.3 Definição e delimitação do tema 24

2 Revisão Bibliográfica **28**
2.1 O Problema de Roteamento de Helicópteros 32
2.2 O Problema de Recuperação de Aeronaves 33
2.2.1 Diferenças entre o ARP e o OFSP 34
2.3 O Problema de Programação e Reprogramação de Voos *Offshore* – Trabalhos ainda não publicados 35
2.4 Programação Estocástica 36
2.4.1 Construção de cenários e o método de Aproximação pela Média Amostral 38
2.4.2 Valor Estimado da Informação Perfeita e Valor Estocástico da Solução 40

3 Descrição do problema **42**
3.1 Modelo de programação estocástica 45
3.2 Modelo de simulação de eventos discretos 51

4 Resultados Numéricos **55**
4.1 Análises de convergência 56
4.2 Análises de qualidade da solução estocástica 59
4.3 Instância reais analisadas 60

5 Conclusão e trabalhos futuros **65**

A Análises sobre o atraso da programação e o atraso efetivo **73**

B Dados e ajustes de curvas **79**
B.1 Dados de processamento de passageiros 79
B.2 Dados de tempos operacionais dos helicópteros 82
B.2.1 Tempo de abastecimento da aeronave 83
B.2.2 Variação do tempo de voo da aeronave 85
B.3 Dados de intervalo entre decolagens e pousos de aeronaves comerciais 88

C Estrutura de dados e resultados expandidos **90**

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Lista de figuras

Figura 1.1 Mapa dos campos de produção e blocos de exploração das Bacias do Sudeste 15
Figura 1.2 Voos realizados por companhias aéreas e pela Petrobras 16
Figura 1.3 Atrasos na decolagem e cancelamentos de voos regulares 18
Figura 1.4 Processos de decisão dos níveis Estratégico, Tático e Operacional do transporte aéreo *offshore* 21
Figura 1.5 Processos de planejamentos, programação e execução dos voos *offshore* 23
Figura 1.6 Exemplo de uma grade de voos planejados e programados 24

Figura 2.1 Fluxo de correlação temática das pesquisas bibliográficas 29
Figura 2.2 *Strings* de busca das pesquisas (1), (2a) e (2b) 30
Figura 2.3 *Strings* de busca das pesquisas (3a) e (3b) 31
Figura 2.4 *String* de busca da pesquisa (4) 31
Figura 2.5 Exemplo de cenários realizáveis possíveis em uma programação de voos hipotética 39
Figura 2.6 Representação da construção de cenários através de distribuições discretas das variáveis aleatórias 39

Figura 3.1 Ilustrativo de como as janelas de disponibilidade são geradas 50
Figura 3.2 Mapa dos processos da operação do transporte aéreo *offshore* no Aeroporto de Vitória 52
Figura 3.3 Quadro resumo dos dados do modelo de simulação de eventos discretos 53

Figura 4.1 Comparação gráfica dos resultados do EVPI, VSS e simulação do modelo DES para instâncias com janela de interrupção 60

Figura A.1 Variação do custo total de atraso em função do horário programado do voo. 78

Figura B.1 Imagens da tela do SITAER 79
Figura B.2 *Boxplot* dos tempos de processamento de passageiros no terminal (com *outliers*) 80
Figura B.3 *Boxplot* dos tempos de processamento de passageiros no terminal (sem *outliers*) 81
Figura B.4 Ajuste do *Input Analizer* para a antecedência de início de *check-in* 81
Figura B.5 Ajuste do *Input Analizer* para o tempo de *check-in* por passageiros 82
Figura B.6 *Boxplot* de tempos operacionais dos helicópteros 83
Figura B.7 Ajuste do *Input Analizer* para o tempo de *briefing* de porta de cabine 84
Figura B.8 Ajuste do *Input Analizer* para o tempo de inspeção 84

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Figura B.9 Correlação entre o tempo de abastecimento e o tempo de voo 85
Figura B.10 Ajuste do *Input Analizer* para a diferença entre tempo de abastecimento estimado e tempo de abastecimento realizado 86
Figura B.11 Correlação entre tempo de voo calculado e tempo de voo real 87
Figura B.12 Razão de tempos de voo real e calculado versus tempo de voo calculado 87
Figura B.13 Ajuste do *Input Analizer* para a razão entre tempo de voo realizado e tempo de voo calculado 88
Figura B.14 Ajuste do *Input Analizer* para intervalo entre decolagens/pousos de aeronaves comerciais no aeroporto de Vitória 89

Figura C.1 Fluxo de dados dos modelos de otimização e simulação. 90
Figura C.2 *Output* do do otimizador 91

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Lista de tabelas

Tabela 3.1 Número de dias, em 2019, em que ocorreram voos extras 42
Tabela 3.2 Dados utilizados para a validação do modelo de simulação 54

Tabela 4.1 Parâmetros mantidos fixos nas análises 56
Tabela 4.2 Tabelas de voos utilizadas para a análise de convergência 56
Tabela 4.3 Médias e desvios padrão das funções objetivo 57
Tabela 4.4 Desvios padrão dos horários dos voos 58
Tabela 4.5 Análise de qualidade - resultados do EVPI, VSS e simulação do modelo DES 59
Tabela 4.6 Programação de voos de um dia de referência de atendimento a recuperação de voos 61
Tabela 4.7 Programação de voos de um dia de referência de atendimento a recuperação de voos considerando janelas de indisponibilidades 62
Tabela 4.8 Programação de voos de um dia de referência de atendimento a recuperação de voos 64

Tabela A.1 Valores de c_i e λ_i em função de α, β, γ, a_k, e p_k 75

Tabela B.1 Parâmetros calculados para tratamento de *outliers* 82
Tabela B.2 Parâmetros de amostras de tempos operacionais dos helicópteros 83
Tabela B.3 Parâmetros de amostras de tempos operacionais dos helicópteros 85
Tabela B.4 Parâmetros do tratamento de *outliers* da razão entre tempo de voo realizado e tempo de voo calculado 88
Tabela B.5 Parâmetros do tratamento de *outliers* do tempo entre decolagens/pousos 89

Tabela C.1 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_1 e $\lambda_i = 0.6$ 92
Tabela C.2 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_1 e $\lambda_i = 0.7$ 93
Tabela C.3 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_1 e $\lambda_i = 0.8$ 94
Tabela C.4 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_2 e $\lambda_i = 0.6$ 95
Tabela C.5 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_2 e $\lambda_i = 0.7$ 96
Tabela C.6 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_2 e $\lambda_i = 0.8$ 97
Tabela C.7 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_3 e $\lambda_i = 0.6$ 98
Tabela C.8 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_3 e $\lambda_i = 0.7$ 99

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.9 Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_3 e $\lambda_i = 0.8$ 100
Tabela C.10 Resultados detalhados da análise de qualidade 101

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Lista de Abreviaturas

ANAC	–	Agência Nacional da Aviação Civil
ANP	–	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CGNA	–	Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea
DECEA	–	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
FO	–	Função Objetivo
HOTRAN	–	Horário de Transporte
ICA	–	Instrução do Comando da Aeronáutica
O&G	–	Óleo e Gás (ou *Oil and Gas*)
SITAER	–	Sistema Integrado do Transporte Aéreo
UM	–	Unidade Marítima
UMS	–	Unidade de Manutenção e Segurança
ADS-B	–	*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*
AHP	–	*Analytic Hierarchic Process*
ARP	–	*Aircraft Recovery Problem*
CHRP	–	*Capacitated Helicopter Routing Problem*
DES	–	*Discrete-Event Simulation*
EEV	–	*Expectation of the Expected Value*
ERP	–	*Enterprise Resource Planning*
EV	–	*Expected Value*
EVPI	–	*Estimated Value of Perfect Information*
FIFO	–	*First In First Out*
FPSO	–	*Floating Production Storage and Offloading*
HRP	–	*Helicopter Routing Problem*
MILP	–	*Mixed Integer Linear Programming*
OFSP	–	*Offshore Flight Scheduling Problem*
PAX	–	*Passenger*
PDF	–	*Probability Density Function*
PLSV	–	*Pipe Laying Supply Vessel*
RP	–	*Recourse Problem*
SAA	–	*Sample Average Approximation*
SP	–	*Stochastic Programming*
VRP	–	*Vehicle Routing Problem*
VRSP	–	*Vehicle Routing and Scheduling Problem*
VSP	–	*Vehicle Scheduling Problem*
VSS	–	*Value of Stochastic Solution*
WS	–	*Wait-and-See*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

"The important thing is not to stop questioning. Curiosity has its own reason for existence. One cannot help but be in awe when he contemplates the mysteries of eternity, of life, of the marvelous structure of reality. It is enough if one tries merely to comprehend a little of this mystery each day."

Albert Einstein,
LIFE Magazine, 2 de Maio de 1955, p. 64.

1
Introdução

O Brasil, 10º maior produtor de petróleo e gás no mundo (ANP, 2019), possui 94,5% de toda a produção proveniente de campos *offshore* (ANP, 2020a). As Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo são responsáveis por 94,3% da produção de petróleo e gás (ANP, 2020a), o que faz com que os estados litorâneos do Sudeste, principalmente o Rio de Janeiro, concentrem as principais bases de apoio logístico *offshore* para atendimento às unidades marítimas de exploração e produção. O mapa da Figura 1.1 apresenta os principais aeródromos que atendem às demandas de transporte de passageiros para essa região.

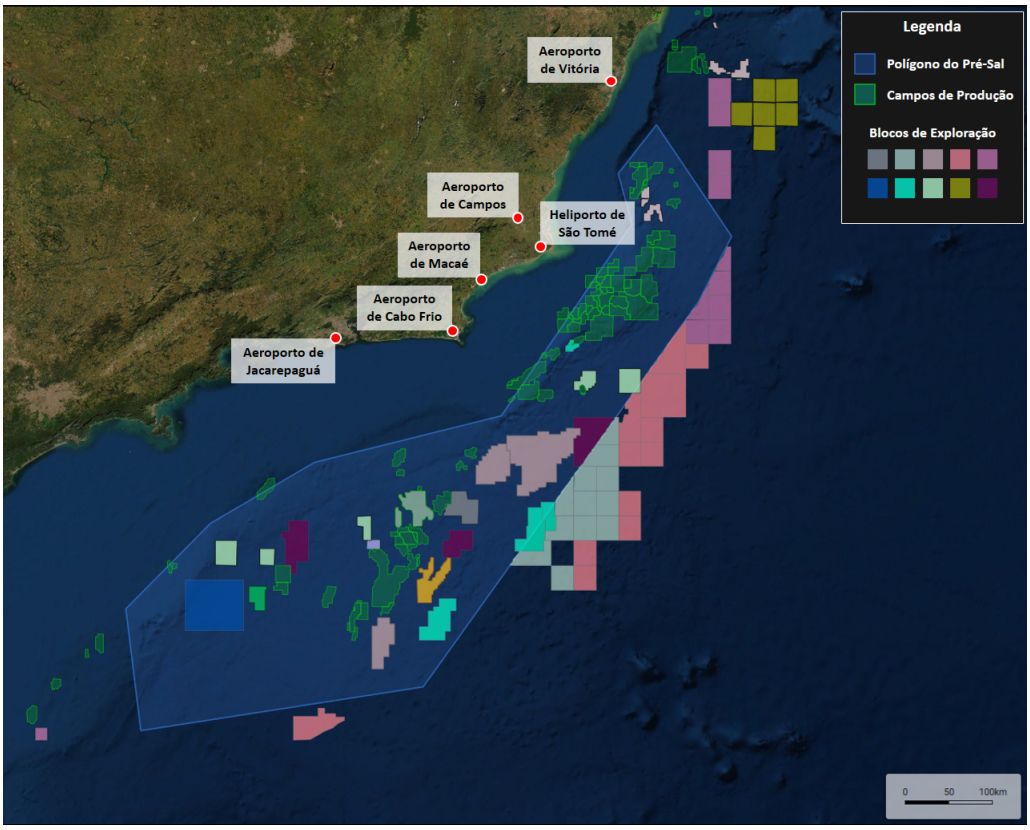


Figura 1.1: Mapa dos campos de produção e blocos de exploração das Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo. Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Norma Regulamentadora 37 impede que o transporte de passageiros seja realizado por modal marítimo para unidades marítimas com distâncias acima de 35 milhas náuticas da costa (Brasil, 2018). Sendo assim, na região Sudeste, a Petrobras – a maior operadora do Brasil, sendo responsável por

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

94,76% de toda a produção de petróleo e gás do país (ANP, 2020a) – realiza o transporte dos trabalhadores para as plataformas, exclusivamente, por modal aéreo, através de helicópteros afretados de médio a grande porte. Devido ao grande número de unidades marítimas, sendo algumas fixas (como plataformas semissubmersíveis e FPSO's - *Floating Production Storage and Offloading*) e algumas móveis (como sondas de perfuração, PLSV's - *Pipe Laying Support Vessel* e UMS's - Unidade Marítima de Serviço), o volume de passageiros transportados é expressivo, e, de acordo com dados da IOGP (*International Association of Oil and Gas Producers*) a Petrobras foi responsável, em 2016, por 22% do transporte aéreo *offshore* do mundo (Hermeto, 2019). Em consonância com esse dado, observa-se que o volume voos para embarque e desembarque de passageiros nas unidades marítimas da Petrobras é equivalente ao de algumas companhias aéreas brasileiras, conforme apresentado na Figura 1.2.

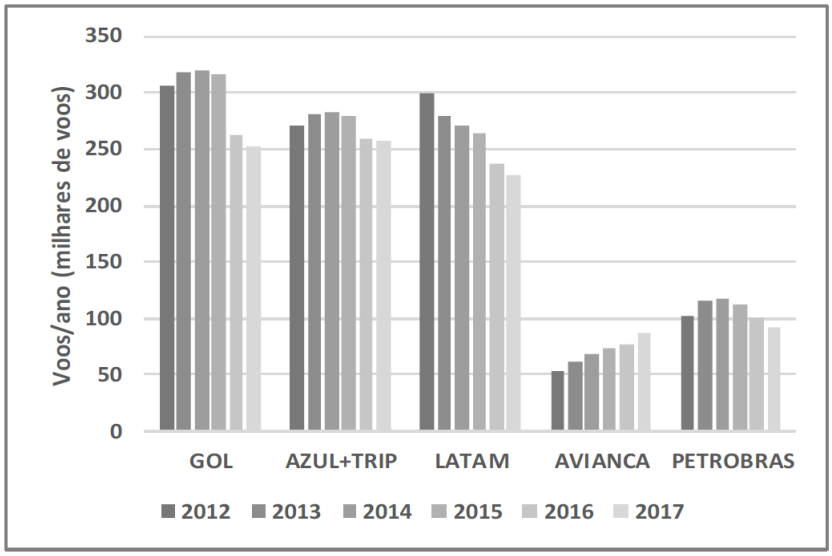


Figura 1.2: Voos realizados por companhias aéreas e pela Petrobras. Fonte: Bastos et al. (2018).

Devido a essa forte representatividade da Petrobras no setor de aviação *offshore* mundial e aviação geral nacional, torna-se essencial o estudo e aprofundamento das questões relativas ao transporte aéreo *offshore* de passageiros. O assunto ainda é pouco explorado na academia, em comparação com a aviação comercial, mas possui grande impacto no negócio da empresa e nos milhares de trabalhadores transportados e envolvidos nesse processo.

Essa dissertação apresenta abordagens quantitativas para a avaliação e otimização do nível de serviço dos voos *offshore*, considerando as incertezas inerentes aos processos logísticos do transporte aéreo. No presente Capítulo, é exposta a motivação do trabalho, em seguida uma contextualização do transporte aéreo *offshore* da Petrobras, situando-o dentro do setor de aviação geral e descrevendo os processos de decisão táticos e operacionais, e, por fim, é de-

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

finido e delimitado o tema da dissertação. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão dos trabalhos acadêmicos relacionados, assim como uma descrição dos métodos utilizados. No Capítulo 3 é descrito em mais detalhes o problema abordado e apresentados os modelos que o representam: um modelo matemático de programação estocástica e um modelo de simulação de eventos discretos. No Capítulo 4 são realizadas análises numéricas com os modelos apresentados, com o objetivo de testar a qualidade e eficiência dos métodos e as possíveis aplicabilidades a casos reais. O Capítulo 5 sumariza o trabalho, evidenciando os potenciais ganhos obtidos com as metodologias desenvolvidas, para a academia e para a indústria de O&G, assim como ressalta as oportunidades de trabalhos futuros.

1.1 Motivação

O nível de serviço na cadeia logística geralmente é representado em função dos desvios da realização em relação ao planejamento. No caso da logística de transportes, frequentemente adotam-se métricas relacionadas aos desvios dos momentos esperados das entregas, partida e/ou chegada de veículos. Um nível de serviço aquém do desejado, com baixa pontualidade e elevadas médias e variâncias dos atrasos, impacta toda a cadeia de suprimentos e exige, muitas vezes, a aquisição de recursos logísticos adicionais para atender às imprevisibilidades.

Apesar da baixa capacidade, comparativamente com outros modais de transporte, a alta velocidade do transporte aéreo o torna ideal para o transporte de pessoas, assim como de cargas de alto valor agregado e alta prioridade (Bowersox et al., 2013). Contudo, Bowersox et al. (2013) classifica esse modal como o que possui a menor confiabilidade, sendo essa definida como a "variação potencial da programação de entrega esperada" (Bowersox et al., 2013, p. 211). A alta sensibilidade às condições climáticas, limitações de frota (devido ao alto custo das aeronaves) e de infraestrutura aeroportuária (considerando que a maioria dos aeródromos possui apenas uma pista de pouso e decolagem[1]), torna o transporte aéreo suscetível a quedas abruptas no nível de serviço, devido a atrasos em efeito cascata e cancelamentos de voos. De acordo com os número apresentados na Figura 1.3, em janeiro de 2020, 11,8% dos voos comercias regulares realizados no Brasil sofreram atraso superior a 15 minutos e 1,4% dos voos previstos foram cancelados.

A indústria de O&G (Óleo e Gás) no Brasil está sujeita a uma restrição

[1]De acordo com dados da ANAC (2020c), de um total de 534 aeródromos públicos apenas 19 possuem duas pistas e 3 possuem uma pista e um heliporto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

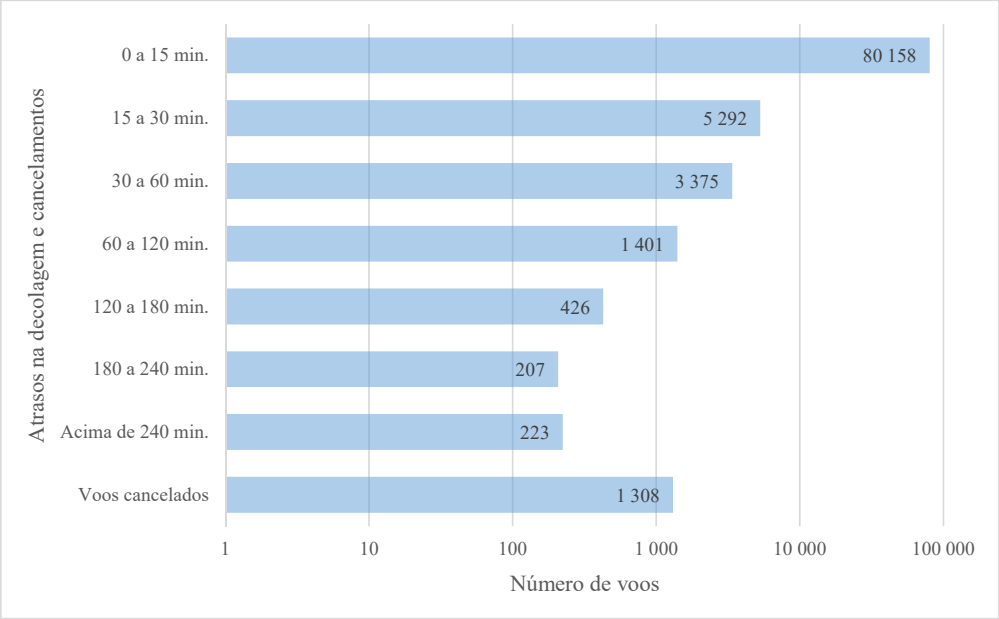


Figura 1.3: Atrasos na decolagem e cancelamentos de voos regulares em janeiro de 2020. Fonte: o autor a partir de dados da ANAC (2020b).

legal que limita a capacidade do transporte aéreo *offshore*: pousos e decolagens nas unidades marítimas só podem ser realizados em período diurno[2], conforme estabelece a Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-4 (DECEA, 2018b). Outra restrição é relacionada à infraestrutura tecnológica. Apesar da implantação do ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*) na Bacia de Campos em 2018 (DECEA, 2018a), as demais bacias ainda não contam com o sistema de geolocalização que auxilia no controle do espaço aéreo. Há também carência de cobertura de monitoramento e previsão meteorológica voltada à aviação (METAR – *METeorological Aerodrome Report* e TAF – *Terminal Aerodrome Forecast*), visto que só três plataformas fixas da Bacia de Campos possuem estações meteorológicas.

Essas restrições amplificam os efeitos das variações do nível de serviço. Situações que gerem aumento da demanda por voos (como exemplo, para atender a passageiros que tiveram voos cancelados em dias anteriores) ou que reduzam a capacidade de transporte (devido à indisponibilidade de aeronaves e fechamentos do aeroporto por condições meteorológicas adversas) podem causar significativos atrasos e cancelamentos dos voos *offshore*. Como uma forma de recuperar o atendimento após uma ruptura no transporte aéreo *offshore*, Möller et al. (2017) propõem a adoção de um fator de majoração no dimensionamento da frota de helicópteros, atrelado à uma meta de nível de serviço. A meta, que foi validada em reuniões com especialistas e suportada pelo método AHP (*Analytic Hierarchic Process*), propõem que a recuperação

[2]Exceto para voos de treinamento noturno ou emergenciais, como, por exemplo, para o transporte de enfermos e feridos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

a um dia completo de ruptura no atendimento deva ser realizada em até 5 dias (para 3 aeródromos considerados no estudo). Isso significa, a *priori*, uma majoração de 20% na frota de aeronaves necessária para atender à demanda regular.

Além dos custos com a frota adicional requerida para atendimento às rupturas, outros prejuízos financeiros são também percebidos pela áreas clientes, as unidades marítimas. Nos casos de cancelamentos de voos (e transferências de passageiros para atendimento em dias seguintes) são gerados custos diretos para as empresas do setor de O&G com o pagamento de diárias de hotéis e horas extras. Além disso, as quedas no nível de serviço também podem impactar as atividades operacionais das unidades marítimas que dependem dos trabalhadores a bordo. Como consequência indireta, possíveis perdas de receitas e incidência de custos imprevistos podem ocorrer para os clientes. Considerando que a produção média no Sudeste é de 46 mil boe/dia[3] por plataforma (ANP, 2020b) e que as taxas diárias de sondas de perfuração são acima de US$ 150 mil (IHS Markit, 2020), observa-se que os possíveis prejuízos decorrentes da interrupção de atividades da unidades marítimas podem ser elevados.

Diante dessas condições é relevante que os processos de tomada de decisão, nos níveis táticos e operacionais, do transporte aéreo *offshore* de pessoas seja auxiliado por sistemas inteligentes, com o objetivo de aumentar o nível de serviço e reduzir custos operacionais. Ferramentas computacionais que gerem programações de voos considerando as incertezas dos processos ligados à aviação podem minimizar a probabilidade de atrasos e cancelamentos, aumentando a confiabilidade do transporte aéreo *offshore*. Além dos potenciais impactos financeiros e de conforto para os passageiros é importante destacar, diante das medidas distanciamento social adotadas a partir da pandemia da COVID-19, que ações que reduzam os potenciais atrasos nos voos possuem um impacto direto no tempo de exposição e concentração dos passageiros no terminal aeroportuário.

1.2 Contextualização

O transporte aéreo no Brasil pode ser dividido entre a aviação regular e a não-regular. Um voo regular é definido como "a ligação aérea entre duas ou mais localidades, caracterizada por um número, através do qual é executado serviço regular de transporte aéreo, de acordo com horário, linha, equipamento e frequência, previstos em HOTRAN[4]" (ANAC, 2020a). Todos os

[3]BOE - Barris de Óleo Equivalente

[4]Horário de Transporte: documento que formaliza as concessões para a exploração de linhas aéreas regulares internacionais e domésticas de passageiros e/ou carga (ANAC, 2020a).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

demais voos que não se enquadram nessas características são considerados não-regulares. Assim como a aviação comercial regular, o transporte aéreo *offshore* para as unidades marítimas da Petrobras possui planejamento de longo prazo e programação dos voos com regras e horários bem definidos (Hermeto e Bastos, 2015). Contudo, a aviação *offshore* é classificada como não-regular (assim como voos de taxi-aéreo, jatos particulares, propaganda aérea, entre outros) e não é, portanto, coberta pelo Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) (Hermeto e Bastos, 2015). O CGNA é uma unidade do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e atua, estrategicamente, na fase de planejamento dos voos regulares e na concessão dos Horários de Transporte (HOTRAN), buscando minimizar impactos decorrentes da flutuação do equilíbrio entre capacidade e demanda, a fim de garantir a segurança das operações, a regularidade e a pontualidade dos voos (DECEA, 2020).

A Petrobras – como principal interessada na continuidade operacional nas unidades marítimas e segurança, regularidade e pontualidade do transporte aéreo *offshore* – afreta os helicópteros que realizam o transporte de passageiros e se incumbe, por setores internos da companhia, do planejamento e programação dos voos. Já as operadoras aéreas afretadas, que executam os voos, atuam na disponibilização e manutenção das aeronaves e provimento e gestão das tripulações e equipes em solo que atuam no processamento de passageiros e bagagens (Petrobras, 2020).

Todo esse cenário enquadra de forma peculiar o transporte aéreo *offshore* da Petrobras. Ao contrário da aviação comercial, na qual as empresas aéreas detêm um grande controle sobre a operação aérea, no caso da Petrobras os papéis são divididos com fretadoras dos helicópteros. Apesar da semelhança com a aviação comercial em relação à regularidade de voos, com rotas e horários fixos e pré-estabelecidos, o transporte aéreo da Petrobras também se distingue na relação com o passageiro. No caso da Petrobras é um funcionário, próprio ou terceirizado, regido por contratos de trabalho e que utiliza o meio de transporte aéreo para o deslocamento para embarque ou desembarque da unidade operacional em que atua. No caso da aviação regular a relação com o passageiro é comercial, e regulada pelas agências governamentais competentes, como ANAC e PROCON. Essas diferenças se desdobram no modelo de atendimento. Enquanto, por exemplo, é comum na aviação regular comercial a prática de *overbooking* o mesmo não ocorre no transporte aéreo *offshore* da Petrobras. Ainda que existam estratégias para otimizar o uso de assentos dos helicópteros, reduzindo custos, as mesmas não estão vinculadas às probabilidades de *no-show*, como no caso do *overbooking*. Uma outra diferença é o modelo de atendimento a rupturas na programação de voos, quando voos são

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

cancelados e necessitam ser atendidos em dias posteriores. No caso do transporte aéreo *offshore* é adotada uma lógica FIFO (*First In First Out*) (Möller et al., 2017), visto que os trabalhadores a bordo das unidades marítimas estão em confinamento, o que gera uma prioridade máxima de atendimento aos passageiros que tiveram seus voos cancelados frente aos que não tiveram. Já na aviação comercial, esse problema possui outras soluções possíveis que não sejam, necessariamente, atender a todos os passageiros com voos cancelados antes de atender aos demais passageiros. Ou seja, o transporte aéreo *offshore* da Petrobras possui especificidades no planejamento que podem, eventualmente, inviabilizar que se adote soluções consolidadas da aviação comercial.

1.2.1
Os processos de decisão no transporte aéreo *offshore* da Petrobras

Os processos de planejamento nas cadeias logísticas são frequentemente classificados de acordo com o horizonte de tempo em que as decisões são tomadas e fazem efeito, sendo geralmente divididos em Estratégicos (horizonte de anos), Táticos (horizonte de meses) e Operacionais (horizonte de dia a horas) (Ballou, 2006). Sena (2011) apresenta uma visão sobre o enquadramento dos processos do transporte aéreo *offshore* nesses três pilares. As definições relacionadas à infraestrutura aeroportuária, assim como o planejamento de perfil da frota de aeronaves, são enquadradas como planejamento de nível Estratégico. Já o dimensionamento da frota e o planejamento da tabela semanal de voos são planejamentos Táticos. Por fim a programação dos voos, assim como a execução dos mesmos são processos de nível Operacional. A Figura 1.4 ilustra como esses processos se enquadram nesses níveis.

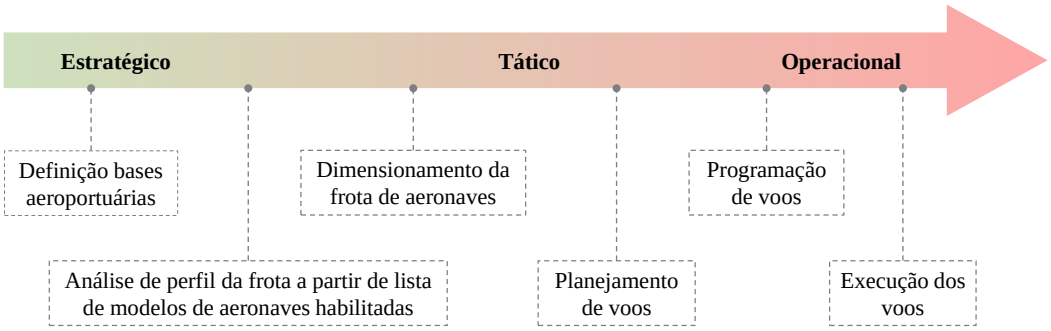


Figura 1.4: Processos de decisão dos níveis Estratégico, Tático e Operacional do transporte aéreo *offshore* da Petrobras. Fonte: o autor, baseado em Sena (2011).

Os processos de decisão do transporte aéreo *offshore* da Petrobras dos níveis Tático-Operacional – planejamento, programação e execução dos voos – são o principal objeto de interesse nessa dissertação. Na fase de planejamento, datas, horários e destinos específicos (unidades marítimas) são definidos para

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

os voos em uma grade de voos semanal, sendo internamente denominados de "voos de tabela". Esses voos possuem, na sua grande maioria, destinos a uma única unidade marítima (ou UM) e são planejados com antecedência, normalmente várias semanas ou meses antes da realização do voo, de maneira semelhante às companhias aéreas comerciais. Essa antecedência é fundamental, pois permite que os clientes (as unidades marítimas) planejem as atividades desempenhadas pelos funcionários embarcados considerando a grade fixa de voos. Também para os trabalhadores é importante as informações sobre os horários planejados dos voos, possibilitando que agendem adequadamente o transporte até o aeródromo do qual partirá seu voo até a UM. Vale ressaltar que muitos trabalhadores embarcados, principalmente de sondas e embarcações especiais, residem no exterior e realizam deslocamento internacional.

Na etapa de programação são realizadas as reservas dos passageiros nos voos de tabela das suas respectivas UM's (através de transações no sistema ERP da companhia), assim como são definidas as aeronaves dos voos e confirmados (ou alterados) os horários de decolagem previamente definidos na grade semanal. Essa etapa é realizada no dia anterior aos voos, e pode sofrer ajustes algumas horas antes do voo. Também na etapa de programação são agendados os "voos extras" e "voos de comitiva". Os voos extras são assim denominados porque não estão contemplados na grade de voos semanal. Esses voos podem ser necessários por vários motivos, como atendimento demandas extraordinárias de passageiros (por exemplo, uma equipe de fora do quadro de funcionários da plataforma que necessita embarcar para realizar uma manutenção em um equipamento específico) ou para atender a passageiros transferidos do dia anterior (por exemplo, devido a rupturas associadas a condições climáticas adversas ou falhas de aeronaves), e, nesse último caso, são também chamados de "voos de transferência". Os voos de comitiva se destinam a grupos de passageiros que, devido às características das atividades que exercerão a bordo da UM, requerem que a aeronave permaneça no *helideck* até a conclusão da atividade na UM (por exemplo, a fiscalização de membros de órgãos reguladores). Apesar de ser considerado na grade de voos que uma aeronave (e geralmente não mais do que uma) ficará à disposição uma manhã ou uma tarde inteira para a realização do voo de comitiva, a rota do voo (que pode se destinar a mais de uma UM) e seu tempo de realização não são conhecidos na etapa de planejamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Planejamento de voos
- Definição da tabela de voos (horários e dias da semana);
- Definição do porte do helicóptero que realizará o voo (médio e grande porte);
- Cálculo do número de assentos disponíveis para o voo.

Programação de voos
- Confirmação ou alteração dos horários de decolagem e as rotas do voo (por exemplo, adicionando uma parada em outra plataforma não prevista no planejamento de voo);
- Definição da aeronave que realizará cada voo;
- Programação dos passageiros nos voos;
- Cálculo do número de assentos disponíveis para o voo, caso tenha sido incluído um passageiro extraordinário ou alterada a rota.

Execução dos voos
- Processamento dos passageiros e bagagens no terminal (*check-in*, *briefing* de segurança, etc.);
- Cálculo do número de assentos disponíveis para o voo após aferição dos pesos (passageiros e bagagens) no *check-in* (caso o peso total exceda a capacidade da aeronave para o voo é necessário reprogramar em outro voo um ou mais passageiros);
- Inspeção das aeronaves entre-voos e reabastecimento;

Premissas no planejamento e programação:
- Tempo entre-voos: 45 min;
- Tempo de separação entre decolagens no aeródromo: 5 min;
- Tempo de separação entre pousos nas unidades marítimas: 15 min;
- Jornada operacional: 11 horas, dependendo do horário do pôr-do-sol;
- Antecedência com a qual o passageiro deve chegar no terminal: 60 min;
- Os voos não podem ser programados em horários anteriores aos planejados e o atraso máximo permitido são 240 minutos.

Figura 1.5: Processos de planejamentos, programação e execução dos voos *offshore* da Petrobras. Fonte: o autor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Finalmente, na fase de execução, é possível que os voos sofram atrasos devido à variabilidade dos tempos dos processos no lado terra do aeródromo (principalmente no terminal de passageiros) e/ou no lado ar do aeródromo (na rampa, pista e *taxiways*). Por vezes essas variações dos tempos podem gerar atrasos em efeito cascata. Uma das formas de atenuar os atrasos consiste em alterar a aeronave que estava previamente programada para o voo, utilizando uma aeronave que estava sem voos alocados (propositalmente reservada para essas situações). A Figura 1.5 resume os processos de planejamento, programação e execução dos voos *offshore*, assim com apresenta algumas premissas que são adotadas nessas etapas de decisão. É importante ressaltar que em todas as etapas (planejamento, programação e execução) a carga paga do voo (peso total dos passageiros e bagagens) e a capacidade de transporte da aeronave

(capacidade máxima de carga paga) são calculados com as novas informações, mais precisas. Isso é necessário porque muitos helicópteros perdem a capacidade de transporte quando é necessário cumprir missões longas, necessitando de maior quantidade de combustível, o que reduz a capacidade máxima de carga paga.

1.3 Definição e delimitação do tema

Em um dia ideal de operação, apenas os voos planejados (ou voos de tabela) são programados, e é trivial encontrar a solução ótima (do ponto de vista do nível de serviço) para a programação. Essa situação é ilustrada na Figura 1.6 (a), onde os voos planejados são prefixados pela letra "P". No entanto, distúrbios diversos tornam necessária a programação de voos não planejados (voos extras e voos de transferência). Para atender a todos os voos (planejados e não planejados) com a frota disponível pode ser necessário programar os voos planejados para horários posteriores aos previstos na tabela de voos, gerando um "atraso da programação".

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

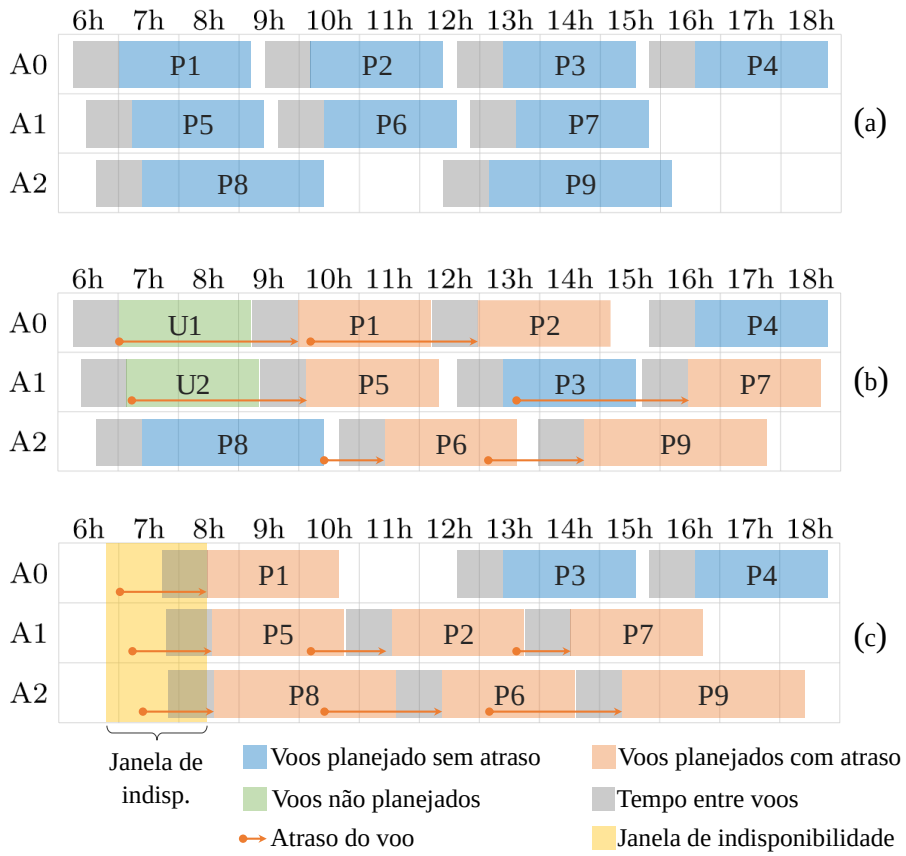


Figura 1.6: Exemplo de uma grade de voos planejados (a); uma grade de voos programados com dois voos adicionais (b); e uma grade de voos programados considerando uma janela de indisponibilidade. Fonte: adaptado de Bastos et al. (2020).

A Figura 1.6 (b) apresenta um cenário em que dois voos não planejados adicionais (prefixados pela letra "U") devem ser programados. Considerando que esses voos são prioritários, uma solução viável atrasaria os voos P1, P2, P5, P6, P7 e P9. A figura 1.6 (c) mostra outra situação operacional que gera desvios da realização frente à programação: períodos de bloqueio da operação. Geralmente, esses períodos de indisponibilidade para voo decorrem de condições climáticas adversas no aeroporto e/ou nas unidades marítimas e resultam em atrasos imprevisíveis. Também pode de ser observado nas situações (b) e (c) que há uma lacuna menor entre os voos. Isso, por sua vez, aumenta o risco de atrasos nos voos afetarem os voos subsequentes da mesma aeronave, visto que os tempos dos processos variam em relação ao previsto. As situações ilustradas na Figura 1.6 representam casos reais enfrentados cotidianamente pelas equipes de programação de voos *offshore*. Por isso, a elaboração de uma programação de voos que reduza os atrasos pode ser extremamente complexa, se realizada manualmente, principalmente quando o número de voos a serem programados é elevado. Fatalmente a solução encontrada será sub-ótima e sem garantias do quão próximo estaria da solução ótima.

O setor responsável pelo transporte aéreo *offshore* na Petrobras possui um sistema integrado (Sistema Integrado do Transporte Aéreo - SITAER) que conecta as informações do planejamento, programação e execução dos voos, assim como algumas ferramentas mais simples de auxílio a decisão também são utilizadas. Contudo há etapas do processo de decisão que podem ser mais automatizadas, como o exemplo citado da programação dos voos, reduzindo assim o esforço humano em tarefas que podem ser realizadas por sistemas inteligentes e gerando melhores soluções, tanto no nível de serviço quanto no custo operacional. Essas potenciais automatizações dos processos tornam-se ainda mais relevantes diante do processo de transformação digital que muitas empresas no mundo estão atravessando, o que levou a Petrobras a criar uma diretoria de Transformação Digital e Inovação.

Nesse contexto é relevante destacar, conforme será apresentado no Capítulo 2, que não há trabalhos acadêmicos publicados, até o presente momento, em que o objetivo principal seja a maximização do nível de serviço do transporte aéreo *offshore* através da otimização da programação dos voos, definindo horários programados de decolagens, alocação e sequenciamento dos voos nas aeronaves. Diante dessa lacuna convencionou-se adotar a nomenclatura OFSP (*Offshore Flight Scheduling Problem* ou Problema de Programação de Voos *Offshore*), sem a pretensão de cunhar um novo termo na literatura, mas como forma de simplificar a referência ao problema ao longo do texto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Também é interessante mencionar os esforços de P&D para a construção de modelos matemáticos e ferramentas computacionais voltadas aos processos do transporte aéreo: a Petrobras, em parceria com o Grupo de Pesquisa Operacional da UFSCar[5], iniciou em 2019 um projeto com o "objetivo de pesquisar e desenvolver modelos matemáticos e algoritmos de Pesquisa Operacional para auxiliar no processo de tomada de decisão em etapas do planejamento do transporte aéreo de passageiros para unidades marítimas *offshore* de extração de petróleo" (ANP, 2020c). Os estudos que geraram a presente dissertação estão em sinergia com esse projeto, visto que se tratam de abordagens estocásticas aplicadas ao processo de programação de voos *offshore*.

Foram desenvolvidos dois modelos, um de simulação de eventos discretos (*Discrete-Event Simulation* – DES) e um de programação estocástica (*Stochatic Programming* – SP) de dois estágios, com o objetivo principal de avaliar as metodologias empregadas no problema analisado. Os modelos também podem ser adotados na operação, desde realizadas adaptações e incorporadas funcionalidades que representem de forma mais detalhada os processos de decisão do transporte aéreo *offshore*. Os modelos se concentram em um único aspecto do processo de programação – o nível de serviço esperado – e para a delimitação do tema ambos se baseiam nas condições operacionais do Aeroporto de Vitória (mas também são testados para casos que representam outras bases de atendimento). Esse aeroporto foi escolhido como a base de desenvolvimento por possuir as seguintes características peculiares:

- Frota homogênea, possibilitando simplificações no modelo de programação estocástica;
- Baixa demanda de voos, viabilizando gerar soluções ótimas para casos reais em tempo computacional aceitável;
- Baixo tempo médio de voo, o que permite uma alta taxa de alocação de voos por helicóptero (até 5 voos por aeronave por dia) o que é interessante para a análise das metodologias;
- Intenso conflito com a aviação comercial regular, gerando incertezas do nível de serviço e torna a aplicação do modelo SP e, principalmente, do modelo DES valiosa.

A representação dos fluxos dos processos no modelo de simulação de eventos discretos é aderente ao observado no Aeroporto de Vitória, assim como as curvas de distribuição de probabilidade adotadas foram geradas a partir de

[5]Universidade Federal de São Carlos - Grupo de Estudos em Pesquisa Operacional - Departamento de Engenharia de Produção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

dados reais. Dessa forma o modelo foi validado, com um indicador de nível de serviço (atraso médio), para um intervalo de confiança de 95%. Já o modelo de programação estocástica possui algumas simplificações. A principal é a desconsideração das decisões relacionadas à rota e à programação dos passageiros. Ou seja, as características dos voos, como tempo previsto e sequencia de UM's a serem visitadas, são dados de entrada e, portanto, imutáveis no modelo de otimização. Apesar de ser imprescindível a consideração de decisões de alocação de passageiros nos voos para uma ferramenta operacional, essa simplificação não demostrou ser limitante para os testes dos métodos empregados (e busca de boas soluções para o nível de serviço). Além disso, 86,3% dos voos, em 2019, tinham como destino uma única UM e 13% duas UM's (ou seja, apenas 0,7% dos voos foram para 3 ou mais unidades marítimas) o que pode indicar que as decisões relacionadas às rotas sejam menos complexas do que as decisões relacionadas ao sequenciamento e alocação dos voos nas aeronaves. Adicionalmente, outros dois artigos, ainda não publicados, também consideram essa simplificação (Vieira et al., 2020; Bastos et al., 2020) e são base das abordagens desenvolvidas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

2
Revisão Bibliográfica

A atenção da Petrobras para o transporte aéreo *offshore* é significativa, o que é evidenciando pelos trabalhos acadêmicos, abordando esse tema, que já foram publicados por colaboradores da companhia. Parte dos trabalhos utilizaram métodos de otimização para a definição de aeródromos e frota, reduzindo custos em nível estratégico (Hermeto et al., 2014), assim como a alocação ótima da frota heterogênea de helicópteros para atendimento à demanda de voos (Mendes et al., 2019) e para o planejamento da grade semanal de voos, definindo dias e horários (Heringer, 2019). Outros artigos utilizaram métodos quantitativos, como simulação de eventos discretos para avaliar a capacidade da infraestrutura aeroportuária e impactos no nível de serviço (Bastos et al., 2018) e simulação *fast-time* para avaliar os ganhos de capacidade do tráfego aéreo com a adoção do ADS-B (Hermeto e Müller, 2014). Há ainda publicações envolvendo colaboradores internos e equipes que atuam com P&D na indústria e academia (de Oliveira et al., 2015; Menezes et al., 2010; Hermeto et al., 2014).

Contudo, há uma lacuna na literatura de "métodos heurísticos ou exatos para a otimização do nível de serviço no transporte aéreo *offshore*". Apesar dos trabalhos recentes, ainda não publicados, de Vieira et al. (2020) e Bastos et al. (2020) que são detalhados na subseção 2.3, pesquisas na base Google Scholar e na base Scopus mostram que esse tema não foi abordado em nenhum artigo publicado. Foram realizadas, portanto, pesquisas mais abrangentes de temas relacionados, tanto em relação à descrição do problema quanto do ponto de vista de metodológico. Os temas pesquisados são apresentados na Figura 2.1, que mostra o sequenciamento realizado das buscas, devido às correlações temáticas, e as posiciona em eixos relacionados à descrição do problema e ao arcabouço metodológico. A Figura 2.1 também relaciona o número de trabalhos acadêmicos que cada busca retornou. Vale ressaltar que outras referências não relacionadas nas buscas (obtidas após a leitura de alguns dos artigos ou provenientes de outras pesquisas não estruturadas no diagrama) também foram utilizadas.

A primeira pesquisa sob o tema (1) "otimização do nível de serviço dos voos *offshore* considerando incertezas" não retornou resultados na base Scopus.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

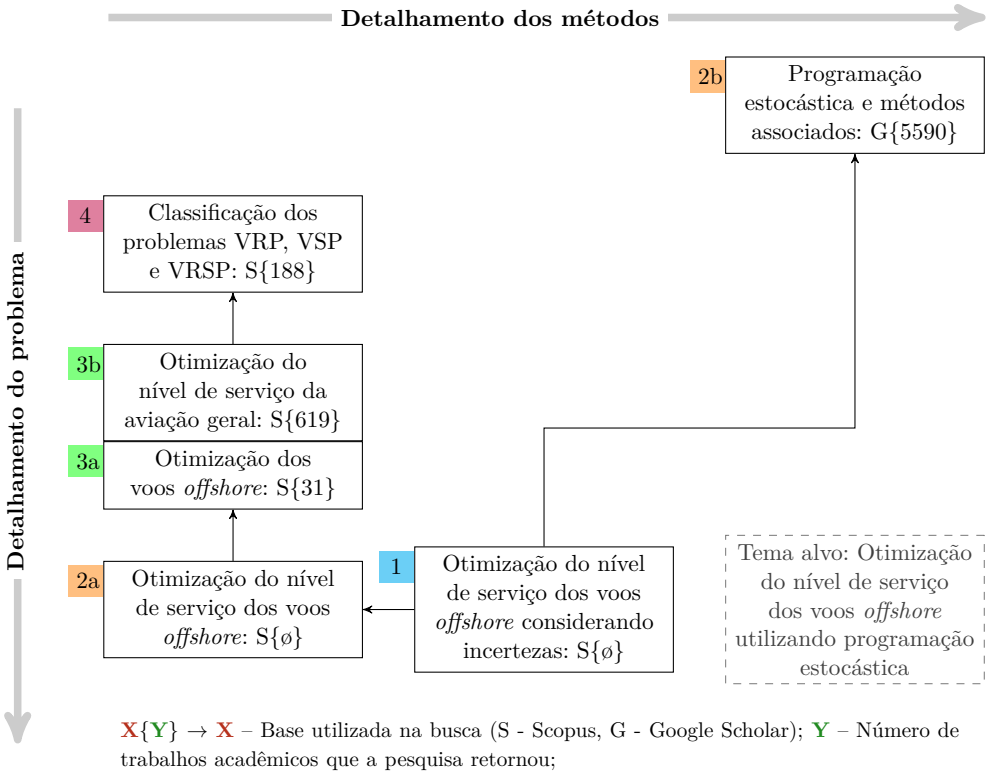


Figura 2.1: Fluxo de correlação temática das pesquisas bibliográficas. Fonte: o autor

Diante dessa lacuna a pesquisa foi segmentada em duas direções: (2a) voltada ampliação da abrangência da pesquisa, omitindo os termos relacionados às incertezas, com o tema "otimização do nível de serviço dos voos *offshore*", que também não retornou resultados; e (2b) focada na parte metodológica, com o tema "programação estocástica", com o objetivo de obter ferramental teórico para a modelagem do problema. É importante ressaltar que a delimitação do tema (2b) à programação estocástica foi proposital, visto que, como primeira abordagem ao problema, seria fundamental utilizar métodos exatos e acurados de otimização. As *strings* de busca das pesquisas (1) a (2b) são apresentadas na Figura 2.2.

Diante da pesquisa frustrada em (2a), ampliou-se a busca com os temas (3a) "otimização dos voos *offshore*" e (3b) "otimização do nível de serviço da aviação geral", cujas *strings* de busca são apresentadas na Figura 2.3. A busca (3a) retornou 31 artigos e, após a leitura dos resumos, identificou-se que 12 deles não eram relacionados ao transporte aéreo *offshore*. Entre os relacionados, 3 estavam ligados ao problema de dimensionamento da frota de helicópteros e escolha de bases de atendimento, restando 16 que tratam do nível tático e operacional. Todos esses artigos tratam de uma mesma categoria de problema: o HRP (*Helicopter Routing Problem* ou Problema de Roteamento de Helicópteros), assim como a variação que considera a capacidade da aeronave, o CHRP (*Capacitated Helicopter Routing Problem* ou Problema de Roteamento

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

1 **Otimização do nível de serviço dos voos offshore considerando incertezas:**

```
BASE SCOPUS: { TITLE-ABS-KEY ( ( ( "air transport*" OR "helicopter" OR "aircraft" )
AND ( offshore OR "oil and gas" ) ) AND ( *heuristic OR grasp OR "genetic algorithm"
OR "local search" OR "tabu search" OR "simulated annealing" OR "optimization model"
OR milp OR "linear programming" OR "stochastic programming" OR "branch and bound"
OR "branch and cut") AND ( robust OR stochast* OR probabili* OR uncertain* ) AND
( "service level" OR "level of service" OR delay* OR punctual* OR "one time" OR
cancell* ) ) AND NOT DOCTYPE ( cr ) } = {ø}
```

2a **Otimização do nível de serviço dos voos offshore:**

```
BASE SCOPUS: { TITLE-ABS-KEY ( ( ( "air transport*" OR "helicopter" OR "aircraft" )
AND ( offshore OR "oil and gas" ) ) AND ( *heuristic OR grasp OR "genetic algorithm"
OR "local search" OR "tabu search" OR "simulated annealing" OR "optimization model"
OR milp OR "linear programming" OR "stochastic programming" OR "branch and bound" OR
"branch and cut") AND ( "service level" OR "level of service" OR delay* OR punctual*
OR "one time" OR cancell* ) ) AND NOT DOCTYPE ( cr ) } = {ø}
```

2b **Programação estocástica e métodos associados:**

```
BASE GOOGLE SCHOLAR: { allintitle: "stochastic programming" } ∪ { allintitle:
"programação estocástica" } = {5590} ∪ {46}
```

Figura 2.2: *Strings* de busca das pesquisas (1), (2a) e (2b). Fonte: o autor.

de Helicópteros Capacitados). O HRP é uma variação, considerando questões específicas do transporte aéreo *offshore*, do VRP (*Vehicle Routing Problem* ou Problema de Roteamento de Veículos) (Abbasi-Pooya e Kashan, 2017). Alguns artigos selecionados sobre o HRP são brevemente revisados na Seção 2.1.

A pesquisa (3b) retornou 619 artigos, que é um número elevado para a leitura detalhada de cada resumo. Foram, portanto, realizadas análises bibliométricas[1] em um arquivo compilado com os títulos, resumos e palavras chaves dos artigos. O principal resultado das análises foi a identificação dos três principais problemas citados da aviação, através da pesquisa das palavras que antecediam a palavra "*problem*". Os três termos mais recorrentes foram "*aircraft sequencing problem*", "*aircraft recovery problem*" e "*ground holding problem*". Através da leitura de alguns resumos verificou-se que de fato esses termos se referem a classes de problemas de pesquisa operacional voltados para a aviação. O "*Aircraft Sequencing Problem*" (ASP) é conectado à capacidade aeroportuária, visto que foca em melhorar o uso da pista do aeroporto através de um sequenciamento ótimo de pousos e decolagens (Furini et al., 2015). Ou seja, o ASP está intimamente ligado aos processos do Controle de Aproximação (*Approach Control* - APP). O "*Ground Holding Problem*" (GHP) trata do problema da espera em solo (*ground holding*) (Kotnyek e Richetta, 2006), necessária para o equilíbrio do tráfego aéreo e por isso está ligado aos processos do Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control* - ATC). Já o "*Aircraft Recovery Problem*" (ARP) trata do problema de programação das aeronaves

[1]Para essas análises foram desenvolvidos algoritmos, implementados na linguagem Julia, que utilizam, principalmente, Expressões Regulares (*Regular Expressions* para as buscas textuais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

após um evento de ruptura do atendimento, definindo os novos horários de decolagem, aeronaves que realizarão os voos e rotas, de forma a recuperar o nível de serviço (Belobaba et al., 2009).

3a **Otimização dos voos offshore:**

```
BASE SCOPUS: { TITLE-ABS-KEY ( ( ( "air transport*" OR "helicopter" OR "aircraft" )
AND ( offshore OR "oil and gas" ) ) AND ( *heuristic OR grasp OR "genetic algorithm"
OR "local search" OR "tabu search" OR "simulated annealing" OR "optimization model"
OR milp OR "linear programming" OR "stochastic programming" OR "branch and bound" OR
"branch and cut") ) AND NOT DOCTYPE ( cr ) } = {31}
```

3b **Otimização do nível de serviço da aviação geral:**

```
BASE SCOPUS: { TITLE-ABS-KEY ( ( "air transport*" OR "helicopter" OR "aircraft" )
AND ( *heuristic OR grasp OR "genetic algorithm" OR "local search" OR "tabu search"
OR "simulated annealing" OR "optimization model" OR milp OR "linear programming" OR
"stochastic programming" OR "branch and bound" OR "branch and cut") AND ( "service
level" OR "level of service" OR delay* OR punctual* OR "one time" OR cancell* ) )
AND NOT DOCTYPE ( cr ) } = {619}
```

Figura 2.3: *Strings* de busca das pesquisas (3a) e (3b). Fonte: o autor.

A partir das pesquisas (3a) e (3b), e considerando que o objetivo principal do OFSP (*Offshore Flight Scheduling Problem*) é reduzir os atrasos dos voos *offshore*, observou-se que os problemas da aviação comercial, particularmente o ARP, se aproximavam muito mais do problema abordado do que o problema da aviação *offshore*, focado no HRP. Contudo, há também distinções entre o OFSP e o ARP, devido aos diferentes modelos operacionais da aviação comercial e *offshore*. Na Seção 2.2 são debatidos em mais detalhes alguns artigos filtrados sobre ARP, assim como são analisadas as diferenças para o problema da aviação *offshore*.

Diante das descrições dos problemas observados em (3a) e (3b), buscou-se clarificar as diferenças entre o HRP, ARP e OFSP através das definições sobre os problemas clássicos de transportes abordados em pesquisa operacional: o VRSP (*Vehicle Routing and Scheduling Problem* ou Problema de Roteamento e Programação de Veículos), VRP e VSP. Realizou-se então a pesquisa (4) "Classificação dos problemas VRP, VSP e VRSP", cuja *string* de busca da pesquisa é apresentada na Figura 2.4.

4 **Classificação dos problemas VRP, VSP e VRSP:**

```
BASE SCOPUS: { TITLE-ABS-KEY ( ( "vehicle rescheduling problem" OR "vehicle
scheduling problem" OR "vehicle routing and scheduling problem" ) AND ( classif*
OR differenc* OR descript* OR categor*) ) AND NOT DOCTYPE ( cr ) } = {188}
```

Figura 2.4: *String* de busca da pesquisa (4). Fonte: o autor.

Apesar da pesquisa (4) ter retornado 188 artigos, um dos mais citados entre esses, com mais de 200 citações registradas no Scopus, tinha esse tema como objetivo principal expresso no título "*Classification in vehicle routing and scheduling*" (Bodin e Golden, 1981), e por isso utilizou-se especificamente

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

essa fonte. Segundo Bodin e Golden (1981), pode-se definir uma rota de um veículo como "uma sequência de pontos de coletas e/ou entregas que o veículo deve percorrer em ordem, começando e terminando em um depósito" (Bodin e Golden, 1981, p. 1, tradução nossa). Já a programação de um veículo "é uma sequencia de um conjunto pontos de coletas e/ou entregas associado com horários de partida e chegada" (Bodin e Golden, 1981, p. 1, tradução nossa). Bodin e Golden (1981) apresentam uma estrutura de classificação taxinômica do VRSP, VSP e VRP, a qual foi utilizada para classificar o OFSP como um *Vehicle Scheduling Problem*, de acordo com as simplificações e delimitações impostas aqui. Segundo Bodin e Golden (1981) "quando os tempos de chegada aos nós e/ou arcos são fixados com antecedência, refere-se ao problema como um problema de programação". Além da estrutura de classificação, os autores também apresentam estratégias de solução dos problemas VRP e uma hierarquia, por nível de complexidade, dos problemas VSP. Um dos problemas citados, e classificado entre os mais complexos, é o "*The Airplane and Air Crew Scheduling Problem*", conforme denominação dos autores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

2.1
O Problema de Roteamento de Helicópteros

Desde antes da década de 1990 o Problema de Roteamento de Helicópteros vem sendo estudado (Galvão e Guimarães, 1990). Galvão e Guimarães (1990) relatam o desenvolvimento de um algoritmo de roteamento interativo para programar as rotas dos voos *offshore* da Petrobras. Apesar dos ganhos estimados na época de até US$ 4.500,00 para 65 programações de voos (sem correção monetária), através da minimização de distâncias percorridas e maximização da ocupação das aeronaves, Galvão e Guimarães (1990) ressaltam a dificuldade encontrada na implantação do sistema desenvolvido. Dois anos depois, Fiala Timlin e Pulleyblank (1992) propuseram heurísticas baseadas em busca gulosa (*greedy search*) para reduzir o tempo de voo diário. Nesse artigo os autores já enquadram o CHRP na classe de problemas de roteamento e programação (*routing and scheduling problems*). Moreno et al. (2006) apresentaram o problema como um modelo de programação inteira mista e aplicaram um algoritmo baseado em geração de colunas. Romero et al. (2007) consideraram um modelo de *Pickup and Delivery Problem* que foi resolvido usando algoritmos genéticos.

Mais recentemente, Menezes et al. (2010) modelaram o problema de agendamento de helicópteros como um MILP (*Mixed Integer Linear Programming* ou Programação Linear Inteira Mista), cuja função objetivo tinha vários termos

ponderados, e testaram um procedimento de geração de colunas com dados reais da Petrobras. Os resultados do algoritmo proposto foram comparados com os planos de voo manuais para demonstrar possíveis economias em custo e tempo. Várias abordagens que consideram a segurança como objetivo também foram propostas. Qian et al. (2011) modelaram o risco do número esperado de fatalidades, apresentando, através de experimentos numéricos, a relação entre segurança e tempo de viagem. Uma heurística de busca tabu foi usada em Qian et al. (2012) para comparar diferentes políticas de roteamento e avaliar o impacto dos riscos de decolagem e aterrissagem. Qian et al. (2015) exploraram a relação entre o roteamento de helicópteros e os problemas de programação de máquinas paralelas e empacotamento no contexto de minimizar os riscos de transporte.

Até o momento, a maioria dos estudos se concentra na redução de custos de transporte (Machado et al., 2019), ou riscos de passageiros e tripulação (Gribkovskaia et al., 2015), ou *makespan* (Abbasi-Pooya e Kashan, 2017). No entanto, não foram encontrados, entre os artigos analisados, abordagens para modelar e otimizar o nível de serviço no transporte aéreo *offshore*. Como será abordado na próxima seção, que trata dos artigos relacionados à aviação geral, otimizar o nível de serviço do transporte aéreo significa reduzir atrasos e cancelamentos de voos, minimizando a espera no aeroporto e reduzindo as transferências de passageiros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

2.2 O Problema de Recuperação de Aeronaves

O Problema de Recuperação de Aeronaves ou ARP (*Aircraft Recovery Problem*) é um dos principais problemas de programação (*Scheduling Problems*) na aviação comercial e que foi abordado pela primeira vez por Teodorović e Guberinić (1984) (Clausen et al., 2010). Com um algoritmo *branch-and-bound*, os autores minimizam os atrasos totais de passageiros após uma interrupção específica do voo: quando uma ou mais aeronaves não estão disponíveis. Argüello et al. (1997) apresentam um modelo de programação linear inteira que minimiza o custo com cancelamento de voos e com a alocação de aeronaves. Com uma meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* ou Procedimento de Busca Gulosa Aleatória e Adaptativa) os autores realizam experimentos numéricos avaliando qualidade dos resultados e a performance do algoritmo. Além da minimização dos atrasos, cancelamentos e custos, assim como aumento de receitas, outros autores minimizam também as trocas de aeronaves (*aircraft swap*) (Clausen et al., 2010).

Ao longo das últimas décadas outros problemas associados ao ARP –

como o *Crew Recovery Problem* e o *Passenger Recovery Problem* – foram sendo incorporados aos modelos propostos, de forma que as abordagens integradas de soluções às rupturas da programação de voos passaram a ser estudadas sob a denominação *Airline Recovery Problem* (Clausen et al., 2010). Clausen et al. (2010) apresentam o estado da arte dos problemas em uma extensa revisão bibliográfica dos problemas associados ao gerenciamento dessas rupturas.

Além das abordagens determinísticas, modelos considerando as incertezas também foram propostos (Arias et al., 2013; Zhu et al., 2015). Arias et al. (2013) apresentam um método combinando otimização e simulação para minimizar os atrasos e cancelamentos de voos. O método desenvolvido utiliza Programação por Restrições (*Contraint Programming*) e a simulação para avaliar a robustez da solução gerada através de um algoritmo interativo que finaliza quando o critério mínimo de robustez é atingido. Resultados numéricos são gerados com uma instância de 51 voos e uma redução de 4,18% no atraso total é obtido na comparação da solução estocástica com a determinística.

Zhu et al. (2015) apresentam um modelo de programação estocástica de dois estágios que minimiza o atraso total considerando incertezas no tempo de retorno de aeronaves após indisponibilidade. Para resolver o modelo estocástico de dois estágios de forma eficiente, os autores desenvolveram o algoritmo que combina a heurística GSA (*Greedy Simulated Annealing* ou Recozimento Simulado Guloso[2]) com uma estratégia de *retiming* simples. Zhu et al. (2015) realizam experimentos práticos com um caso de 23 voos de uma companhia aérea chinesa. Para analisar os ganhos do modelo estocástico os autores calculam o EVPI (*Expected Value of Perfect Information* ou Valor Esperado da Informação Perfeita) e o VSS (*Value of Stochastic Solution* ou Valor da Solução Estocástica). São obtidos os valores de 4.500 para o EVPI e 1.271 para o VSS, que representam, comparativamente com valor obtido da função objetivo do problema RP (*Recourse Problem* ou Problema Recurso), 22,13% e 6,18%.

2.2.1
Diferenças entre o ARP e o OFSP

Apesar das significativas semelhanças entre o problema descrito no Capítulo 1, denominado aqui de OFSP, e o ARP, algumas diferenças também foram identificadas. Uma das mais relevantes diz respeito aos modelos de atendimento possíveis na derivação do ARP voltada para os passageiros, o *Passenger Recovery Problem*. No transporte aéreo *offshore*, de acordo com a lógica FIFO descrita por Möller et al. (2017), passageiros de voos planejados podem ser re-

[2]Tradução nossa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

alocados para voos em horários ou dias posteriores para que as suas vagas nos voos originais se destinem a passageiros transferidos de dias anteriores, considerando a limitação da capacidade de atendimento diária. No caso da aviação comercial a lógica FIFO não é aplicável, ainda que os passageiros que tiveram voos cancelados possuam maior prioridade. Além disso a programação da aeronave comercial segue um roteiro em múltiplos aeroportos, e as soluções para atendimento aos passageiros, que evitem cancelamentos, podem ser através de conexões (Belobaba et al., 2009). No setor *offshore* isso não é viável, visto que as unidades marítimas possuem capacidade limitada e devem receber apenas os passageiros destinados às mesmas.

Outra divergência é em relação à alocação das aeronaves aos voos. No caso do transporte aéreo *offshore* a alocação definitiva é realizada no momento da programação, de acordo com o porte da aeronave definido no planejamento. Os seja, no caso do OFSP não há, no momento da programação do voo, troca das aeronaves (*aircraft swaps*) de um voo, mas sim troca de porte de aeronaves. Quando é necessário alterar o porte da aeronave que irá realizar o voo gera-se, frequentemente, a necessidade de desmembramento (*splitting*) dos passageiros em dois ou mais voos, por restrição da capacidade da aeronave, assim como agrupamento (*merging*) dos passageiros com os de outro voo, para otimização da ocupação dos voos e redução de custos. No entanto, alocar um voo em uma aeronave "A1" ou "A2", que possuam a mesma capacidade, é indiferente. Na aviação comercial a alocação dos voos às aeronaves é realizada com meses de antecedência (Clausen et al., 2010), e a troca de uma aeronave, mesmo de modelos idênticos, poderá impactar as escalas das tripulação assim como os planos de manutenção previstos, muitas vezes em aeroportos específicos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

2.3 O Problema de Programação e Reprogramação de Voos *Offshore* – Trabalhos ainda não publicados

Dois trabalhos, ainda não publicados, abordam especificamente o tema de programação de voos *offshore*. Os artigos, que derivam dos esforços da Petrobras e da UFSCar na modelagem do problema de programação de voos *offshore*, possuem diferenças nas abordagens, mas tem um mesmo foco: a otimização do nível de serviço do transporte aéreo *offshore*. Um modelo é determinístico e considera diversos detalhes operacionais (Vieira et al., 2020) e o outro é estocástico e possui grandes simplificações (Bastos et al., 2020).

O modelo de programação linear inteira misto baseado em eventos de Vieira et al. (2020), juntamente com as heurísticas eficientes para gerar soluções quase-ótimas em tempo computacional aceitável, descrevem o problema de

reprogramação de voos *offshore*, no qual voos transferidos do dia anterior (os "voos de transferência") necessitam ser programados juntamente com os voos de tabela (assim como voos de comitiva), exigindo decisões sobre quais voos terão o horário alterado, sofrendo atrasos, para a absorção desses voos extras na grade de programação. Bastos et al. (2020) descrevem um problema semelhante no seu modelo de programação estocástica de dois estágios, no qual voos *offshore* planejados e não planejados (como os voos transferidos do dia anterior) devem ser programados evitando os denominados "atrasos da programação", que representam a diferença de tempo entre o horário programado e planejado do voo, e "atrasos efetivos", que representam a diferença de tempo entre o horário efetivo da decolagem (em algum dos possíveis cenários realizáveis do SP) e o horário programado do voo.

Ambos autores consideram uma janela de tempo operacional (11 horas para Vieira et al. e 10 horas para Bastos et al.) e que os voos de tabela (ou voos planejados) possuem um atraso máximo tolerável, enquanto que os voos de transferência (ou voos não planejados) são priorizados através de penalidades maiores nas funções objetivo. Contudo o modelo de Vieira et al. permite que os voos sejam cancelados ou "rejeitados" (ou seja, não programados) penalizando com alto custo a função objetivo. Já o modelo de Bastos et al. não retornará soluções viáveis caso o número de voos exceda a capacidade diária da frota. Além disso, o modelo de Vieira et al. possui uma riqueza maior de detalhes operacionais em relação ao de Bastos et al. (2020), como a consideração de um intervalo mínimo requerido entre decolagens no aeroporto (5 minutos), intervalo mínimo entre pousos na UM (15 minutos) e frota heterogênea. Em contrapartida o modelo de Bastos et al. considera a possibilidade de múltiplas janelas de indisponibilidade no aeroporto para realização de voos (devido, por exemplo, a condições meteorológicas adversas) com incertezas associadas, o que também representa uma realidade da operação do transporte aéreo *offshore*, principalmente em períodos de instabilidade meteorológica.

Apesar de ainda não terem sido publicados, um dos artigos já está disponível para consulta no repositório *Optimization Online* e o outro foi aceito para publicação no congresso WODES (*Workshop on Discrete Event Systems*).

2.4 Programação Estocástica

Além da programação estocástica, existem outros métodos para considerar as incertezas em problemas de otimização, como, por exemplo, análise de sensibilidade e otimização robusta. Na análise de sensibilidade são realizadas variações em parâmetros para avaliar o impacto na função objetivo (Hillier e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Lieberman, 2013). Ou seja, é um estudo pós-otimalidade e, portanto, é reativo em relação ao problema analisado e não propositivo (Alem e Morabito, 2015). Outro método é a otimização robusta, na qual adotam-se valores nos parâmetros do modelo que o tornem robusto e imune às incertezas (Alem e Morabito, 2015). Há ainda métodos não exatos como heurísticas e meta-heurísticas, que possuem a flexibilidade de lidar com problemas em diferentes configurações, como a consideração de incertezas, e que são capazes de gerar soluções boas ou quase-ótimas em tempo computacional aceitável. Uma das técnicas exploradas recentemente se baseia numa combinação de heurísticas com simulação, cunhado por alguns autores como *simheuristics* (ou simheuríticas – tradução nossa) (Juan et al., 2014). Contudo os métodos não exatos não são indicados como primeira abordagem para lidar com problemas que ainda não foram explorados na literatura – como o caso aqui abordado – visto que não é possível garantir, através desses métodos, que as soluções geradas sejam realmente boas ou próximas da solução ótima (Hillier e Lieberman, 2013). Por isso é comum que problemas novos na literatura sejam tratados, inicialmente, com uma abordagem exata. Utilizando-se os métodos exatos para avaliar a qualidade das heurísticas é possível validá-las para tratar de forma eficiente casos práticos de grande porte.

A programação estocástica é um dos métodos de otimização mais utilizados para lidar com as incertezas (Alem e Morabito, 2015). Assim como num problema modelado por programação linear, é necessário conhecer as variáveis de decisão do processo analisado, mas, no caso da programação estocástica, também é necessário saber o momento em que essas decisões se concretizam. Há decisões que precisam ser tomadas antes que se tenha conhecimento sobre informações futuras, e por isso são chamadas de "aqui e agora" (*here-and-now*). Outras decisões podem ser tomadas após as realizações futuras, com base nas novas informações que não eram disponíveis anteriormente. Essas decisões são chamadas de "espere e veja" (*wait-and-see*) ou também decisões recurso (*recourse decisions*), visto que podem corrigir, em parte, as decisões *here-and-now*. Num modelo de programação estocástica as variáveis que representam as decisões *here-and-now* são chamadas de variáveis de primeiro estágio, enquanto que variáveis que representam as decisões *wait-and-see* são chamadas de variáveis de segundo estágio (Alem e Morabito, 2015; Birge e Louveaux, 2011). A formulação geral de um modelo de programação estocástica de dois estágios é apresentada em (2-1) e (2-2) a seguir (Birge e Louveaux, 2011).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

$$\begin{aligned} \min z = \; & c^T x + \mathbb{E}_{\boldsymbol{\xi}} Q(x, \boldsymbol{\xi}) \\ \text{s.a. } & A\,x = b, \\ & x \geq 0, \end{aligned} \tag{2-1}$$

Onde:

$$Q(x, \boldsymbol{\xi}) = \min\{\mathbf{q}^T \mathbf{y} | W\mathbf{y} = \mathbf{h} - \mathbf{T}x, \mathbf{y} \geq 0\} \tag{2-2}$$

As variáveis de primeiro estágio são representadas pelo vetor x, enquanto que as variáveis de segundo estágio são representadas pelo vetor y. Os vetores c, b e a matriz A são parâmetros do primeiro estágio, ou seja, não possuem uma variação estocástica. O vetor $\boldsymbol{\xi}$ representa os diversos cenários realizáveis e também pode ser representado como $\xi(\omega)$. Ou seja, a função $Q(x, \boldsymbol{\xi})$ varia conforme o cenário e $\mathbb{E}_{\boldsymbol{\xi}} Q(x, \boldsymbol{\xi})$ é o valor esperado da função $Q(x, \boldsymbol{\xi})$ sobre esses cenários. Os vetores q, h e as matrizes W e T são parâmetros do segundo estágio e podem variar (sendo que W frequentemente é fixo, e nesse caso é denominado como "programação estocástica com recursos fixos") (Birge e Louveaux, 2011). Resumidamente o que as duas equações traduzem é: deseja-se ter o menor custo total $c^T x + \mathbb{E}_{\boldsymbol{\xi}} q^T y$ sujeito a $A\,x = b$ e $x \geq 0$ e dado que, ou a sujeito a, $W\mathbf{y} = \mathbf{h} - \mathbf{T}x$ e $\mathbf{y} \geq 0$. Quando são inseridos todos os valores dos parâmetros, considerando todos os cenários, o modelo passa a ter o mesmo formato de um modelo de programação linear determinístico, de grande porte, e por isso é chamado de "determinístico equivalente".

2.4.1
Construção de cenários e o método de Aproximação pela Média Amostral

A programação estocástica envolve um processo prévio de geração dos cenários. A metodologia mais comum para a construção dos cenários adota aproximações discretas para as curvas de distribuição de probabilidade e gera-se cada cenário a partir da combinação entre as diversas realizações possíveis dos parâmetros. Num caso exemplo simplificado propõem-se uma programação de voos *offshore* na qual todos os tempos de voos e solo se realizassem exatamente conforme o programado, com exceção de um voo, que, devido a características diversas, teria uma probabilidade de se realizar acima do tempo programado ou abaixo do tempo programado. A Figura 2.5 ilustra esse cenário hipotético no qual o segundo voo da aeronave A0, com tempo estimado de voo de ft_2^0, possui uma flutuação em relação ao tempo previsto, com 3 realizações possíveis: uma com tempo de voo ft_2^1, abaixo do previsto e com probabilidade de ocorrência de $p(ft_2^1)$, outros dois acima do tempo estimado, ft_2^2 e ft_2^3 com

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

probabilidades ocorrência de $p(ft_2^2)$ e $p(ft_2^3)$, respectivamente.

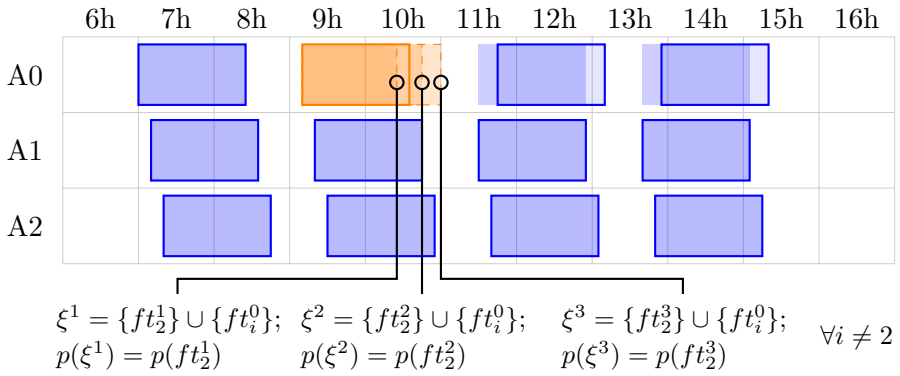


Figura 2.5: Exemplo de cenários realizáveis possíveis em uma programação de voos hipotética. Fonte: o autor.

Sendo assim, caso a programação dos voos fosse realizada considerando essas possíveis variações, num modelo de programação estocástica, teríamos então 3 cenários a serem considerados (ou seja $|\boldsymbol{\xi}| = 3$). Contudo, conforme mencionado, esse é um cenário hipotético, pois na prática os tempos de todos os voos sofrem variações em relação ao programado, assim como os tempos de solo. Dessa forma, desconsiderando a possibilidade de alterar a ordem entre os voos e a aeronave ao qual estão programados (ou seja, podendo alterar apenas o horário programado do voo), as 3 variações possíveis de tempo para cada voo geraria um número de cenários excessivamente elevado: $|\boldsymbol{\xi}| = 3^{12} = 531.441$. Como o objetivo, em situações ruptura da programação, não é apenas definir os horários, mas também o sequenciamento e alocação dos voos às aeronaves, esse número de cenários torna-se muito maior, visto que o problema se torna combinatório, variando portando com o fatorial do número de voos. A Figura 2.6 ilustra a situação apresentada de geração dos cenários com construção de uma árvore de combinações possíveis.

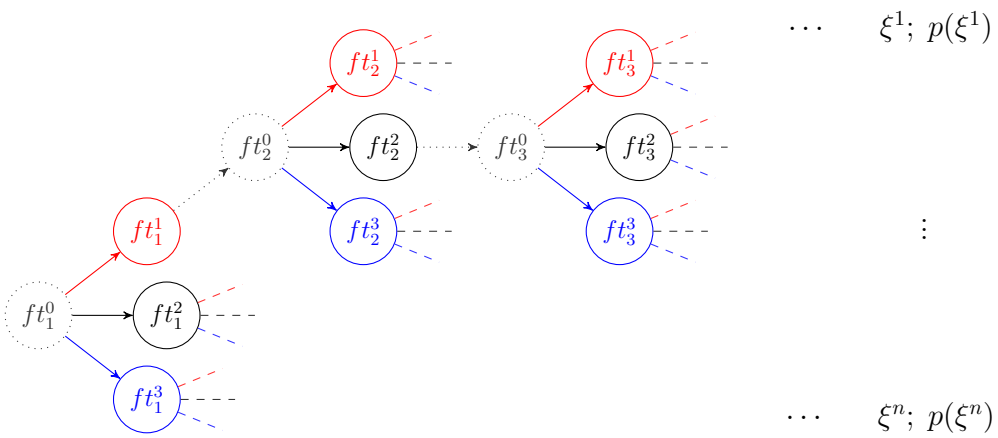


Figura 2.6: Representação da construção de cenários através de distribuições discretas das variáveis aleatórias. Fonte: o autor, adaptado de Birge e Louveaux (2011).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Para problemas combinatórios de pequeno porte (como a roteirização de uma embarcação que pode visitar, por exemplo, até 5 unidades marítimas por viagem) o método apresentado de construção dos cenários pode ser aplicado com algum custo computacional. No entanto, conforme apresentado por Verweij et al. (2003), quando o tamanho da instância aumenta pode ser impossível considerar todos os cenários possíveis. Diante dessa restrição o método SAA (*Sample Average Approximation* ou Aproximação pela Média Amostral) apresenta uma propriedade interessante: o número de cenários gerados com o SAA independe do tamanho da instância. O método SAA baseia-se na geração aleatória dos valores dos parâmetros do segundo estágio, como tempo e distância (Shapiro e Homem-de Mello, 2000). Essa geração aleatória dos valores pode ser feita através de uma simulação de Monte Carlo, mas pode também utilizar, por exemplo, dados históricos, o que também agrega uma outra vantagem ao SAA: não é necessário um conhecimento profundo sobre as distribuições de probabilidade utilizadas. A convergência do método SAA é garantida pela Lei dos Grandes Números (Shapiro e Homem-de Mello, 2000), portanto os valores obtidos para as funções objetivo e variáveis de decisão se comportam de forma assintótica conforme aumenta-se o número de cenários considerados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

2.4.2
Valor Estimado da Informação Perfeita e Valor Estocástico da Solução

Uma das questões relevantes quando decide-se desenvolver um modelo de programação estocástica é avaliar a qualidade da solução estocástica frente a solução determinística. Dependendo do processo modelado que se esteja otimizando pode ser pouco relevante, ou até indiferente, para as soluções geradas considerar parâmetros e variáveis aleatórias. Para que sejam comparadas as duas abordagens, são estabelecidos dois conceitos dentro do arcabouço da Programação Estocástica: o EVPI (*Expected Value of Perfect Information* ou Valor Esperado da Informação Perfeita) e o VSS (*Value of Stochastic Solution* ou Valor da Solução Estocástica) (Birge e Louveaux, 2011).

O EVPI é uma medida que representa o quão distante a solução do Problema Estocástico (também chamado de Problema Recurso ou *Recourse Problem*) está de uma das soluções obtidas em um contexto hipotético, da Informação Perfeita (Birge e Louveaux, 2011). A Informação Perfeita pressupõe que seria possível conhecer antecipadamente todas as informações com precisão. A equação para cálculo do EVPI é apresentada em (2-3) e (2-4).

$$EVPI = RP - WS \tag{2-3}$$

Aonde,

$$WS = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\xi}}\left[\min z(x, \boldsymbol{\xi})\right] = \sum_{i=1}^{|\xi|} p(\xi^i)\, z(x, \xi^i) \tag{2-4}$$

RP é o valor da função objetivo da solução estocástica e $p(\xi^i)$ é a probabilidade do cenário ξ^i se concretizar (ou seja, o modelo estocástico considerando apenas 1 cenário, o ξ^i). Uma interpretação é que o EVPI representa o quanto que se estaria disposto a pagar pela Informação Perfeita (Birge e Louveaux, 2011), mas pode-se também interpretar que seria o quanto que se perde por não a ter.

Ao contrário do EVPI, que mede o quanto se perde, o VSS mede o quanto que se ganha por considerar a estocasticidade, em relação a uma solução determinística para valores médios. Portanto o VSS é obtido através da diferença entre o valor da função objetivo do problema RP e o EEV (*Expectation of the Expected Value problem* ou Esperança do problema com Valores Esperados – tradução nossa). Para calcular o EEV é necessário obter a solução para o problema com valores esperados, o EV (*Expected Value Problem*), que é apresentado em (2-5) (Birge e Louveaux, 2011).

$$EV = \min z(x, \overline{\boldsymbol{\xi}}) \tag{2-5}$$

Onde $\overline{\boldsymbol{\xi}}$ denota o cenário esperado, ou seja, $\overline{\boldsymbol{\xi}} = \mathbb{E}(\boldsymbol{\xi})$. Podendo ser expresso por (2-6):

$$\overline{\boldsymbol{\xi}} = \mathbb{E}(\boldsymbol{\xi}) = \sum_{i=1}^{|\xi|} p(\xi^i)\xi^i \tag{2-6}$$

Ou seja, para obter o $\overline{\boldsymbol{\xi}}$ calcula-se a média para cada um dos parâmetros estocásticos do modelo SP, gerando um cenário médio, com probabilidade de ocorrência de 100%. A partir de então obtém-se a solução EV. Para o EEV fixa-se os valores encontrados para as variáveis de 1º estágio, x, do problema EV nos cenários *wait-and-see* e obtém-se as soluções ótimas para cada cenário. O EEV é a média dessas funções objetivo (2-7).

$$EEV = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\xi}}\left[\min z(\overline{x}(\overline{\boldsymbol{\xi}}), \boldsymbol{\xi})\right] \tag{2-7}$$

O que o EEV traduz é exatamente o que se faria num problema em que não se possua um modelo estocástico: utiliza-se a média dos parâmetros pra rodar um modelo determinístico, e depois, com as variáveis de 1º estágio definidas e fixas, realiza-se correções com as variáveis de 2º estágio nos cenários *wait-and-see*. O VSS é definido como a diferença entre os valores obtidos (2-8).

$$VSS = EEV - RP \tag{2-8}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

3
Descrição do problema

Conforme introduzido no Capítulo 1, a programação de voos *offshore* consiste em confirmar e/ou alterar os voos previamente planejados, com base nas novas informações que se configuram na operação nos momentos próximos do voo (dia anterior a horas antes do voo). Ou seja, a programação, é, em essência, um processo de correção frente aos novos cenários. As decisões na atividade programação de voos tornam-se complexas em situações adversas, quando há carência de recursos logísticos (aeronaves), excesso de demanda (voos não planejados, como os voos de transferência) e/ou redução da jornada operacional (fechamentos devido às condições climáticas desfavoráveis para pousos e decolagens no aeroporto e/ou nas unidades marítimas). Ainda que grandes rupturas de atendimento, como a descrita por Möller et al. (2017), sejam raras, as situações adversas pontuais não são necessariamente atípicas. A inclusão de voos que não estavam planejados, por exemplo, é uma situação frequente. De acordo com os dados da Tabela 3.1 em apenas 55% dos dias de operação nos principais aeródromos aonde o transporte aéreo *offshore* da Petrobras atua não houve atendimento a voos extras.

Tabela 3.1: Número de dias, em 2019, em que ocorreram voos extras. Fonte: o autor, a partir de dados compilados da Petrobras.

Base	Número de voos extras						Sem
	ø	1	2	3	4	≥5	voos
Cabo Frio	215	62	44	25	10	8	1
Campos	218	63	43	19	9	12	1
Jacarepaguá	176	92	53	27	13	2	2
Macaé	135	109	66	33	8	13	1
São Tomé	238	52	45	21	6	2	1
Vitória	224	85	46	9	0	1	0
Média ÷ 365	55.1%	21.1%	13.6%	6.1%	2.1%	1.7%	0.3%

A execução também é um processo que pode sofrer adaptações de acordo com eventos inesperados. Um exemplo dessa adaptação seria no caso de uma falha de uma aeronave: pode-se alterar os voos alocados à mesma para outra aeronave, ou cancelar os voos ou ainda aguardar que a aeronave retorne à operação, mas sem garantias de que de fato retornará. Outro evento que também pode ocorrer, como já mencionado, é a indisponibilidade para voos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

devido a condições climáticas desfavoráveis, podendo ser na unidade marítima e/ou no aeroporto. Esse bloqueio na jornada operacional, chamado aqui de "janelas de indisponibilidade", podem acarretar atrasos sucessivos com riscos do último voo ser impedido de decolar devido à limitação de horário do pôr do sol.

As adversidades meteorológicas e oceanográficas, ou meteoceanográficas, se manifestam de forma diferente em cada unidade marítima. Além dos diferentes microclimas presentes em cada região das bacias (que podem ocasionar, por exemplo, uma baixa visibilidade e/ou teto para apenas algumas poucas UM's que compartilham o mesmo microclima), cada tipo de unidade marítima é afetado de forma diferente pelas condições ambientais. Os ventos e, principalmente, as condições de mar (correnteza, período e altura significativa das ondas, entre outros) geram movimentos nas unidades marítimas flutuantes (*pitch*, *heave* e *rool*). Esses movimentos são mais intensos nas embarcações menores, como PLSV's, do que nas grandes embarcações, como Navios Sonda e FPSO's. Por isso não é incomum que um voo para um PLSV tenha que ser transferido quando as condições de mar estão relativamente adversas, enquanto os voos para outras UM's são realizados.

Observa-se, portanto, que a qualidade e a antecedência na disponibilização de informações são, portanto, os principais fatores que influenciam nas ações de correções adotadas na programação e na execução dos voos, influenciando assim, o nível de serviço prestado. Se fosse possível obter, com bastante antecedência e precisão, as informações futuras (como falhas das aeronaves, condições climáticas, flutuações da demanda de passageiros, entre outras informações) seria possível construir um planejamento perfeito e, portanto, não haveria a necessidade da fase de programação e nem correções na fase execução. Conforme visto no Capítulo 2, essa seria a situação hipotética da Informação Perfeita.

Dessa forma, as abordagens que consideram as incertezas das informações podem, muitas vezes, gerar resultados mais satisfatórios do que as abordagens que consideram um único cenário determinístico. Para lidar com essas incertezas, relacionadas à etapa de execução dos voos, foram desenvolvidos um modelo de programação estocástica de dois estágios – representando a programação dos voos no 1º estágio e a execução no 2º estágio – e um modelo de simulação de eventos discretos.

O modelo de programação estocástica, apresentado na Seção 3.1, tem como objetivo reduzir dois tipos de atrasos de voos, os denominados aqui "atraso da programação", que representa a diferença de tempo entre o horário programado e o horário planejado do voo, e "atraso efetivo", que representa a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

diferença de tempo entre o horário efetivo da decolagem, em um dos possíveis cenários realizáveis do modelo SP, e o horário programado do voo. Esta nomenclatura é indicativa de como cada tipo de atraso afeta os passageiros e a cadeia de suprimentos como um todo. Quando os voos são programados, no dia D-1 (dia anterior à realização do voo), para um horário posterior ao planejado, os passageiros podem ser notificados com antecedência e, portanto, são capazes de tomar medidas para reduzir o impacto do atraso sobre eles ou sobre os outros envolvidos (por exemplo reagendando o horário do transporte até o aeroporto). As unidades marítimas também podem ser notificadas sobre a alteração do horário e realizar ações que reduzam o impacto em suas atividades operacionais. Por outro lado, o atraso devido ao aumento do tempo de processamento, por exemplo, devido ao reabastecimento de aeronaves ou inspeção de passageiros, ou outras situações operacionais imprevisíveis que ocorrem nos minutos antes do horário programado para o voo não permite que passageiros, unidade marítimas e outros envolvidos na cadeia tomem ações preventivas. O Apêndice A apresenta deduções lógicas sobre os tipos de atrasos, sintetizando-os em equações que descrevem os custos dos atrasos.

O modelo de simulação de eventos discretos foi desenvolvido como uma primeira abordagem ao OFSP para a avaliação do nível de serviço de uma programação de voos, retornando os atrasos efetivos. A etapa de análise de dados e detalhamento dos processos necessários para uma boa validação de um modelo de simulação gera uma base de conhecimento que facilita o posterior desenvolvimento de um modelo de otimização, como foi o caso desse estudo. Na Seção 3.2 são apresentados a lógica e os dados sobre o modelo de simulação de eventos discretos, assim como as informações sobre o simulador de Monte Carlo que gera os cenários[1] do modelo de programação estocástica.

[1]NOTA EXPLICATIVA: Há diferença no conceito de "cenário" em simulação de eventos discretos (DES) e em programação estocástica (SP). Em DES um "cenário" representa um caso a ser simulado, como uma programação de voos específica de um dia. Pode-se simular um "cenário" uma única vez, no qual os parâmetros estocásticos recebem valores aleatórios (referentes às distribuições de probabilidade) através de funções pseudoaleatórias. Pode-se também simular várias vezes, alterando os valores aleatórios que os parâmetros recebem e gerando, portanto, realizações diferentes do cenário simulado. Essas simulações, de um mesmo "cenário", são denominadas "replicações". Já em otimização, um caso a ser otimizado é chamado de "instância". Especificamente em SP, uma possível realização da "instância" é chamada de "cenário", no qual os parâmetros de 2º estágio assumem valores com probabilidades associadas. Ou seja, a "instância" em otimização se equivale ao "cenário" em simulação e vice-versa. No caso de SP utilizando o método SAA, os "cenários" se equivalem às "replicações" da simulação. Essa equivalência se dá porque com o SAA todos os "cenários" do SP são equiprováveis e gerados por uma simulação de Monte Carlo, o que é, essencialmente, o mesmo conceito da "replicação". Evitando entendimentos equivocados, o termo "cenário" se refere, nesse texto, sempre ao conceito para SP, enquanto o termo "instância" é adotado para todos os casos otimizados e simulados. O conceito de "replicação" permanece inalterado para simulação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

3.1
Modelo de programação estocástica

Conforme supracitado, o 1º estágio do modelo de programação estocástica desenvolvido se refere à programação dos voos, no qual busca-se minimizar os atrasos da programação. As decisões *here-and-now* são, portanto, a alocação e sequenciamento dos voos nas aeronaves, assim como os horários programados das decolagens. Já o 2º estágio se refere à execução dos voos e tem como objetivo reduzir os atrasos efetivos. A decisão *wait-and-see* é, então, unicamente a decolagem efetiva (ou seja, não é considerado no 2º estágio a possibilidade de alteração da alocação e sequenciamento dos voos nas aeronaves).

O modelo é baseado no de Bastos et al. (2020) com adaptações para considerar a possibilidade de transferência dos voos, como no modelo de Vieira et al. (2020), e uma extensão que considera a possibilidade de janelas de indisponibilidade distintas entre os voos, representando assim a situação descrita de bloqueios por condições climáticas adversas em unidades marítimas específicas. Conforme adotado também por Bastos et al. (2020), visto que o OFSP é um problema NP-difícil, utilizou-se o método SAA para gerar os cenários, através de simulações de Monte Carlo para estimar os parâmetros de 2º estágio. Contudo, algumas diferenças na forma como os valores aleatórios foram gerados, que são debatidas na Seção 3.2, possibilitaram análises da convergência do modelo SP. As nomenclaturas também sofreram algumas alterações em relação ao modelo de Bastos et al. (2020). Uma mudança importante foi o acréscimo de um "cenário zero", que representa o 1º estágio do modelo (ou seja, para o índice s, que representa os cenários das variáveis e constantes – equivalente ao ξ da nomenclatura padrão – tem-se $s = 0$ para o 1º estágio e $s > 0$ para o 2º estágio). Dessa forma foi possível agregar restrições semelhantes do 1º e 2º estágio, obtendo um modelo determinístico equivalente enxuto. A seguir é apresentada a nomenclatura adotada e o modelo matemático, já na sua forma determinístico equivalente, descrito das equações (3-1) a (3-14).

Índices e Conjuntos

$i, j \in \mathcal{F}^*$	Índices e conjunto dos voos.
$i, j \in \mathcal{F}$	Índices e conjunto dos voos incrementado de um voo fictício ($i = 0$) para o início do encadeamento de voos em uma aeronave: $\mathcal{F} = \mathcal{F}^* \cup \{0\}$.
$s \in \mathcal{S}^*$	Índices e conjunto dos cenários.
$s \in \mathcal{S}$	Índices e conjunto dos cenários incrementado pelo cenário zero que se refere ao 1º estágio do modelo estocástico: $\mathcal{S} = \mathcal{S}^* \cup \{0\}$.
$w \in \mathcal{W}$	Índices e conjunto das janelas de tempo disponíveis para as decolagens programadas e efetivas dos voos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Variáveis	
δ_i^0	Atraso da programação: diferença entre o horário planejado e programado de decolagem do voo i.
δ_i^s	Atraso efetivo: diferença entre o horário efetivo e programado de decolagem do voo i no cenário s ($\forall\, s > 0$).
d_i^s	Horário programado de decolagem do voo i ($\forall\ s = 0$) e horário efetivo de decolagem do voo i no cenário s ($\forall\, s > 0$).
x_{ij}	Variável de precedência: designa se um voo i precede um voo j ($x_{ij} = 1$ se precede e $x_{ij} = 0$ se não precede, $\forall\, i, j \in \mathcal{F}$). Quando $i = 0$, x_{0j} designa que o voo j é o primeiro alocado à uma aeronave.
y_{iw}^s	Variável de designação: designa se um voo i está com a decolagem programada dentro da janela de tempo w no cenário s ($y_{iw}^s = 1$ se sim, e $y_{iw}^s = 0$ se não, $\forall\, i \in \mathcal{F}^*,\ s \in \mathcal{S}^*,\ w \in \mathcal{W}$).

Constantes	
M	Número suficientemente grande.
na	Tamanho da frota.
np_i	Número de passageiros no voo i.
c_i	Penalidade dos atrasos (da programação e efetivo) para o voo i.
λ_i	Taxa de penalidade do atraso efetivo para o voo i.
uf_i	Designa se o voo i é não-planejado.
pd_i	Horário planejado de decolagem do voo i.
ft_i^s	Tempo planejado do voo i para $s = 0$ e tempo efetivo de voo para $s > 0$.
pt_i^s	Tempo planejado de processamento dos passageiros do voo i para $s = 0$ e tempo efetivo de processamento dos passageiros para $s > 0$.
at_i^s	Tempo planejado de chegada no terminal dos passageiros do voo i para $s = 0$ e tempo efetivo para $s > 0$.
tt_i^s	Tempo planejado de preparação da aeronave antes do voo i para $s = 0$ e tempo efetivo de preparação para $s > 0$.
$[{}^b upt_{iw}^s, {}^e upt_{iw}^s]$	Janela de tempo w disponível para decolagem do voo i no cenário s. Para $s = 0$ denota a janela em que o voo pode ser programado e para $s > 0$ denota janela em que o decolagem efetiva pode ocorrer. As janelas são pré-calculadas através do Algoritmo 1.

Parâmetros exclusivos para a geração das janelas de tempo	
m_i	Atraso máximo da programação e efetivo do voo i.
wt	Jornada operacional diária.
rt	Tempo de inatividade referente ao período noturno.
$r \in \mathcal{R}$	Índices e conjunto das janelas de tempo indisponível para voos.
$[{}^b dwt_{ir}^s, {}^e dwt_{ir}^s]$	Janela de tempo r indisponível para decolagem do voo i no cenário s. Para $s = 0$ denota a janela em que o voo não pode ser programado (devido à uma inoperância já conhecida) e para $s > 0$ denota uma janela em que o decolagem efetiva não pode ocorrer.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Com a notação apresentada, o modelo matemático proposto para otimização do OFSP é descrito conforme apresentado a seguir:

$$\min \quad \sum_{i \in \mathcal{F}^*} c_i \, np_i \left(\overbrace{(1-\lambda_i)\, \delta_i^0}^{1^{\text{o}}\text{ estágio}} + \sum_{s \in \mathcal{S}^*} \overbrace{\lambda_i \, \delta_i^s \, / \, |\mathcal{S}^*|}^{2^{\text{o}}\text{ estágio}} \right) \tag{3-1}$$

Sujeito a:

$$\delta_i^0 = d_i^0 - pd_i \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^* \tag{3-2}$$

$$\delta_i^s \geq d_i^s - d_i^0 \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^*,\ s \in \mathcal{S}^* \tag{3-3}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{F},\, j \neq i} x_{ij} = 1 \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^* \tag{3-4}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{F},\, i \neq j} x_{ij} = 1 \qquad \forall\, j \in \mathcal{F}^* \tag{3-5}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{F}} x_{0j} \leq na \qquad \forall\, j \in \mathcal{F} \tag{3-6}$$

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^*, j \in \mathcal{F}, i < j \tag{3-7}$$

$$M(1 - x_{ij}) + d_j^s - d_i^s - ft_i^s - tt_j^s \geq 0 \qquad \forall\, i, j \in \mathcal{F}^*,\ i \neq j, s \in \mathcal{S} \tag{3-8}$$

$$(1 - uf_i)\, pd_i + uf_i \, d_i^0 - d_i^s - at_i^s + pt_i^s \leq 0 \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^*,\ s \in \mathcal{S}^* \tag{3-9}$$

$$\sum_{w \in \mathcal{W}} y_{iw}^s = 1 \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^*,\ s \in \mathcal{S} \tag{3-10}$$

$$d_i^s - {}^b upt_{iw}^s + M(1 - y_{iw}^s) \geq 0 \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^*,\ s \in \mathcal{S}, w \in \mathcal{W} \tag{3-11}$$

$$d_i^s - {}^e upt_{iw}^s - M(1 - y_{iw}^s) \leq 0 \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^*, s \in \mathcal{S}, w \in \mathcal{W} \tag{3-12}$$

$$\delta_i^s \leq wt \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^*,\ s \in \mathcal{S}^* \tag{3-13}$$

$$x_{ij}, y_{iw}^s \in \{0, 1\}; \quad \delta_i^s, d_i^s \in \mathbb{R}^+ \tag{3-14}$$

A função objetivo (3-1) minimiza os atrasos de decolagem, considerando que o 1º estágio se refere aos atrasos da programação (δ_i^0), e que o 2º estágio se refere aos atrasos efetivos (δ_i^s). A taxa de contribuição de cada parcela na função objetivo é controlada por λ_i, e o custo total dos atrasos combinados é multiplicado pelo número de passageiros do voo, np_i, e pelo fator c_i. Ou seja, voos com um número de passageiros programados maior, assim como voos mais prioritários (com c_i maior), tem maior peso na função objetivo. É importante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

ressaltar que nos casos de voos não planejados (quando $uf_i = 1$), a constante pd_i representa um horário alvo para decolagem, mas não propriamente um horário planejado. Também vale observar que tornando $\lambda_i = 0$ o modelo deixa de considerar o atraso efetivo na FO e, portanto, torna-se um modelo determinístico. Além disso, como o atraso médio efetivo (2º estágio na FO) reduz com o acréscimo dos horários programados dos voos, a partir de $\lambda_i < 0.5$ a solução gerada para as variáveis de 1º estágio será igual à solução para $\lambda_i = 0$, visto que a contribuição dos atrasos efetivos será menor na FO do que a dos atrasos da programação. O Apêndice A explora as possíveis condições que podem levar o λ_i a assumir diferentes valores.

As restrições (3-2) e (3-3) atribuem os valores dos atrasos à variável δ_i^s (atraso da programação para $s = 0$ e efetivo para $s > 0$). Considerando o domínio $\mathbb{R}^+$ dessa variável, o modelo não contabiliza os adiantamentos de voos, que poderiam reduzir a função objetivo. No entanto, é possível que o horário de decolagem efetiva d_i^s ($\forall\ s > 0$) ocorra antes do horário programado d_i^0 para o voo i no cenário s. Essa situação pode ocorrer caso os voos precedentes ao voo i não sofram atrasos, que impactem o voo i, e a antecedência de chegada dos passageiros no terminal, at_i^s, seja maior do que o tempo de processamento dos passageiros, pt_i^s.

Na restrição (3-4), um voo i é impedido de ter mais de um voo sucessor, enquanto a restrição (3-5) impede que um voo j tenha mais de um antecessor. A restrição (3-6) garante que o número de aeronaves utilizadas seja menor ou igual à frota disponível. A restrição (3-7) garante que o voo i, predecessor de um voo j, não pode suceder o mesmo voo j. A restrição (3-8) garante que um voo j, que sucede o voo i, não pode ser programado antes da chegada do voo i acrescido do tempo de preparação da aeronave (ou tempo entre-voos). A restrição (3-9) impõe que os voos não decolem antes do processamento dos passageiros. Para calcular o horário de chegada dos passageiros no aeródromo, o horário planejado de decolagem é usado como horário de referência para voos planejados, enquanto o horário de decolagem programado é usado como referência para voos não planejados. As restrições (3-10), (3-11) e (3-12) garantem que cada voo decole dentro de uma janela de tempo operacional. A restrição (3-13) impõem que um voo tenha a decolagem efetiva dentro da jornada diária. Caso o voo só possa decolar na janela de tempo referente ao dia seguinte então o horário programado para o voo deve ser alterado para tal. Em (3-14), os domínios das variáveis são apresentados, e os domínios das constantes são: $\lambda_i \in [0,1]$; $uf_i \in \{0,1\}$; $na \in \mathbb{Z}^+$; $c_i, pd_i, ft_i^s, tt_i^s, {}^b upt_{iw}^s, {}^e upt_{iw}^s, \in \mathbb{R}^+$.

As janelas de tempo $[{}^b dwt_{ir}^s,\ {}^e dwt_{ir}^s]$ são geradas através do Algoritmo 1. Primeiramente são criadas janelas referentes aos períodos em que o voo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

não pode ser realizado: antes do horário planejado ou depois do do horário planejado acrescido da tolerância de atraso. Os intervalos referentes aos bloqueios são então unidos aos intervalos referentes a esses períodos fora da janela de voo. Para os casos aonde não há interseção entre os intervalos é criada uma nova janela de indisponibilidade. As janelas de disponibilidade são então formadas pelos intervalos complementares. A Figura 3.1, a seguir, ilustra o funcionamento do algoritmo.

Algoritmo 1: Construção das janelas de tempo

Input do algoritmo: janelas de bloqueio dos voos, horários planejados de decolagem, tempos de processamento dos passageiros, antecedência de chegada dos passageiros no terminal, atraso máximo, jornada operacional e tempo de inatividade noturna.

input : $[{}^b dwt^s_{ir},\ {}^e dwt^s_{ir}],\ pd_i,\ pt^s_i,\ at^s_i,\ m_i,\ wt,\ rt$

Output do algoritmo: janelas de disponibilidade dos voos.

output: $[{}^b upt^s_{iw}, {}^e upt^s_{iw}]$

Inicia o algoritmo com todas as janelas de disponibilidade inviáveis, pois ${}^e upt^s_{iw} < {}^b upt^s_{iw}$, sendo T um número suficientemente grande.

$[{}^b upt^s_{iw}, {}^e upt^s_{iw}] \leftarrow [-T, -T-1];\ \forall i \in \mathcal{F}^*, s \in \mathcal{S}^*, w \in \mathcal{W}$

foreach $i \in \mathcal{F}^*, s \in \mathcal{S}^*$ **do**

Cria um conjunto de janelas de indisponibilidade, $\mathcal{L}^s_i$, com as duas janelas de indisponibilidade previamente conhecidas para cada voo i num cenário s: período anterior ao horário mínimo de decolagem e posterior ao horário máximo de decolagem.

$\mathcal{L}^s_i \leftarrow \{[-T,\ pd_i + pt^s_i - at^s_i], [\min(pd_i + m_i, wt), wt + rt + pt^s_i - at^s_i]\}$

Inclui no conjunto $\mathcal{L}^s_i$ uma janela de indisponibilidade referente ao período posterior ao fim do dia seguinte.

$\mathcal{L}^s_i \leftarrow \mathcal{L}^s_i \cup \{[2wt + rt, 2wt + rt + T]\}$

Une as janelas de indisponibilidade previamente criadas com as de bloqueio (devido, por exemplo, a condições climáticas adversas) quando há interseção entre elas, ou adiciona uma nova janela de indisponibilidade ao conjunto $\mathcal{L}^s_i$ quando não há.

foreach $r \in \mathcal{R}$ **do**

$a \leftarrow$ true

foreach $[{}^b l^s_i, {}^e l^s_i] \in \mathcal{L}^s_i$ **do**

if $[{}^b l^s_i, {}^e l^s_i] \cap [{}^b dwt^s_{ir},\ {}^e dwt^s_{ir}] \neq \emptyset$ **then**

União dos intervalos ou ${}^b l^s_i \leftarrow \min({}^b l^s_i, {}^b dwt^s_{ir})$ e ${}^e l^s_i \leftarrow \max({}^e l^s_i, {}^e dwt^s_{ir})$.

$[{}^b l^s_i, {}^e l^s_i] \leftarrow [{}^b l^s_i, {}^e l^s_i] \cup [{}^b dwt^s_{ir},\ {}^e dwt^s_{ir}]$

$a \leftarrow$ false

if a **then**

$\mathcal{L}^s_i \leftarrow \mathcal{L}^s_i \cup \{[{}^b dwt^s_{ir},\ {}^e dwt^s_{ir}]\}$

Corrige os valores das janelas de disponibilidade com base nas janelas de indisponibilidade do conjunto $\mathcal{L}^s_i$.

$w \leftarrow 1$

foreach $[{}^b l^s_i, {}^e l^s_i] \in \mathcal{L}^s_i$ **do**

${}^b upt^s_{iw} \leftarrow {}^e l^s_i$

$w \leftarrow w + 1$

${}^e upt^s_{iw} \leftarrow {}^b l^s_i$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

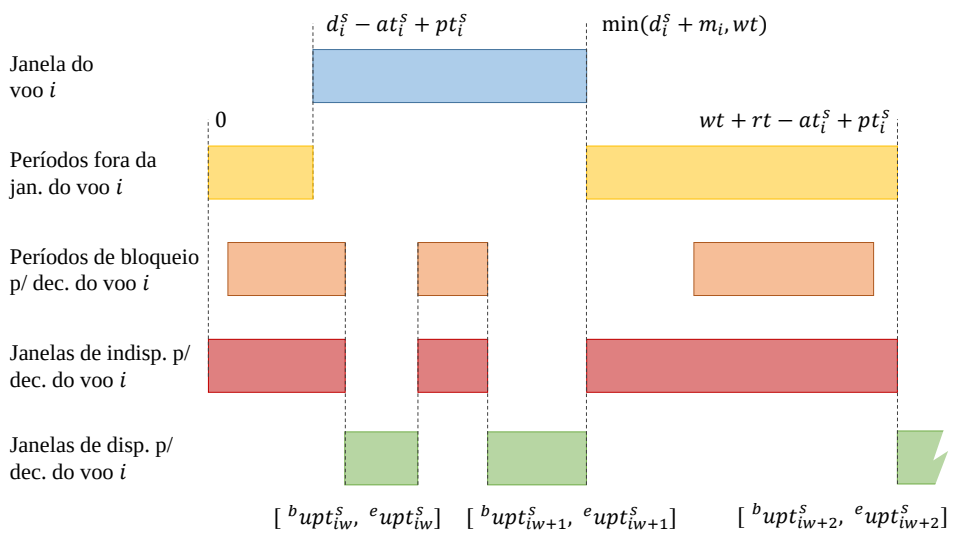


Figura 3.1: Ilustrativo de como as janelas de disponibilidade são geradas. Fonte: o autor.

Como pode ser observado, a cálculo das janelas já considera pd_i, at_i^s, pt_i^s, wt, m_i, de forma que foi possível omitir a restrição $pd_i \leq d_i^0 \leq pd_i + m_i$ (o horário programado do voo deve ser maior ou igual ao horário planejado e não pode ultrapassar a tolerância de atraso) considerada por Bastos et al. (2020). Essa modificação possibilitou lidar com as transferências de voos, que pode ser habilitada ou não adicionando uma janela de tempo referente ao dia seguinte. Também é possível garantir que, dependendo dos horários das janelas, o arco x_{ij} será 0. Isso se dará quando a condição (3-15) for satisfeita.

$$x_{ij} \in \begin{cases} \{0\}, & \text{se } \min\limits_{w}({}^b upt_{iw}^0) + ft_i^0 > \max\limits_{w}({}^e upt_{jw}^0) - tt_j^0 \\ \{0,1\}, & \text{se não} \end{cases} \tag{3-15}$$

Ao desconsiderar as janelas de tempo referente ao dia seguinte para voos que se possua certeza que não poderão ser cancelados, a condição (3-15) permite diminuir o espaço de busca (e a região viável), reduzindo o tempo computacional para obter a solução ótima.

Apesar do modelo apresentado não ser baseado no de Zhu et al. (2015), é relevante ressaltar semelhanças e diferenças entre esses, visto que o artigo de Zhu et al. é o único, publicado até o presente momento, que apresenta uma abordagem de programação estocástica ao problema ARP, que também tem como objetivo minimizar atrasos e cancelamentos. No 1º estágio o modelo de Zhu et al. considera como decisões *here-and-now* a alocação dos voos em uma frota heterogênea, assim como o sequenciamento e os nos horários de decolagem. Contudo, por se tratar de uma abordagem para múltiplos aeroportos (representando a realidade operacional do transporte aéreo comercial), o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

sequenciamento dos voos em uma aeronave é representado como um encadeamento entre os voos intercalado com os aeroportos, ao contrário do modelo apresentado, em que o aeroporto não é considerado, já que os voos *offshore* partem e retornam para o mesmo aeródromo. Ao contrário de Zhu et al., o modelo aqui apresentado considera múltiplas janelas de tempo (no 1º e 2º estágios) que, entre outras propriedades, permitem lidar com os cancelamentos de voos, que são programados na janela de tempo referente ao dia seguinte. Já no modelo de Zhu et al., os cancelamentos de voos são considerados através de uma variável binária que acresce a função objetivo com uma penalidade equivalente, nas análises numéricas de Zhu et al., a um atraso de 8 horas.

No 2º estágio, Zhu et al. (2015) consideram as incertezas do horário de retorno de aeronaves após uma manutenção não programada (devido, por exemplo, a uma falha) e o atraso total esperado dos cenários é minimizado. Os atrasos em Zhu et al. são calculados em referência ao horário previamente planejado e não há, como no modelo proposto aqui ao OFSP, uma segregação entre atrasos da programação (no 1º estágio) e efetivos (no 2º estágio). Além disso, quando a decolagem de um voo em um cenário ocorre antes do novo horário programado no 1º estágio, o atraso negativo (ou seja, adiantamento do voo) é contabilizado na função objetivo, reduzindo-a. Essa consideração de Zhu et al. difere substancialmente das argumentações apresentadas relativas aos atrasos da programação e efetivos, visto que o adiantamento, da decolagem efetiva frente à programada, não melhora os impactos causados pela reprogramação do voo, podendo, inclusive, causar um impacto negativo. Dependendo do adiantamento do voo, poderá, por exemplo, causar um atraso em outro voo programado para um horário anterior, devido à concorrência por recursos como pista de decolagem e canal de inspeção dos passageiros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

3.2
Modelo de simulação de eventos discretos

O modelo de simulação de eventos discretos desenvolvido baseou-se nas operações do Aeroporto de Vitória, que atende à Bacia do Espírito Santo e a algumas unidades do norte da Bacia de Campos. A partir do conhecimento adquirido dos fluxos dos processos, foi desenhado o mapa de processos simplificado apresentado na Figura 3.2. O processo se inicia com a chegada dos passageiros no terminal que, após realizados os procedimentos de *check-in* e *briefing* de segurança, passam pelo canal de inspeção e aguardam a chamada na sala de pré-embarque. Após o procedimento de inspeção e abastecimento da aeronave, o piloto comunica à equipe de rampa que os passageiros podem embarcar. A partir da chegada dos passageiros na aeronave

é realizado um "*briefing* de porta de cabine", no qual o piloto informa sobre procedimentos de segurança. Por fim, o piloto e copiloto realizam o *check-list*, acionam a aeronave e solicitam autorização da torre de controle para taxiar para a pista de decolagem. Com o voo concluído, após o pouso no aeroporto, a aeronave segue os procedimentos para o próximo voo programado.

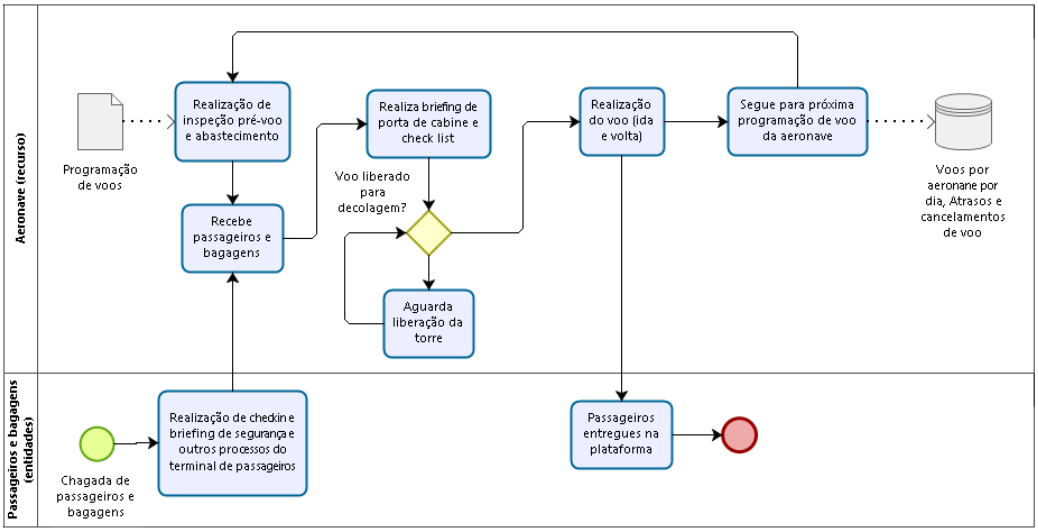
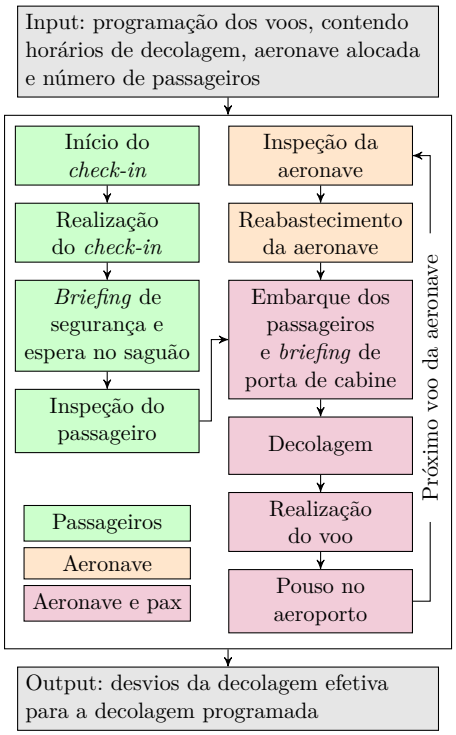


Figura 3.2: Mapa dos processos da operação do transporte aéreo *offshore* no Aeroporto de Vitória. Fonte: o autor.

O objetivo do modelo de simulação é analisar o nível de serviço decorrente das definições da programação de voos. Dessa forma, o modelo foi parametrizado para receber como entrada a programação de voos, com os horários definidos de decolagens, tempos previstos das viagens, número de passageiros e aeronaves alocadas. Ou seja, é possível alterar todos esses parâmetros sem alterar a estrutura do modelo, permitindo assim a análise de diferentes programações de voos. Já os parâmetros fixos do modelo são o próprio fluxo de eventos, número de recursos utilizados em cada evento e os parâmetros das curvas de distribuição associadas aos tempos de cada processo. O quadro da Figura 3.3 apresenta o fluxo dos processos considerado no modelo de simulação e as informações sobre parâmetros fixos adotados, como dados das PDF's (*Probability Density Function* ou Função de Densidade de Probabilidade) e recursos. Outro dado de entrada do modelo são as janelas de disponibilidade $[{}^{b}upt^{s}_{iw}, {}^{e}upt^{s}_{iw}]$ para cada voo i.

O modelo de simulação foi inicialmente desenvolvido no software Arena 14.7 e posteriormente foi traduzido para a linguagem Julia, utilizando o pacote SimJulia. As distribuições de probabilidade adotadas foram estimadas a partir de dados reais e utilizou-se o módulo *Input Analizer* do Arena para realizar os ajustes das curvas, que são detalhados no Apêndice B. A validação do modelo de simulação foi realizada considerando dados da operação do Aeroporto de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA



Processo	Tempo[a]	Recursos
Início[b] do *check-in*	$pd_i - N(65.3, 5.99)$ [min]	-
Realização do *check-in*	$np_i\, 210\, B(2.53, 4.83)$ [seg]	Balcão de *check-in*
Briefing e espera	$7 + \Gamma(3.23, 5.28)$ [min]	-
Inspeção do passageiro	$np_i(5 + W(8.13, 1.37))$ [seg]	Canal de inspeção
Inspeção da aeronave	$T(6, 10.9, 13)$ [min]	-
Reabast. da aeronave	$2.74 + 0.013\, ft_i^0 + 2.46\, B(17.1, 11.7)$ [min]	Caminhão de QAV
Embarque pax	$4.4 + T(7, 8.1, 18)$ [min]	-
Decolagem	$T(40, 60, 120)$ [sec]	Pista de decolagem
Realização do voo	$(ft_i^0 - 2) \cdot (0.75 + L(0.295, 0.0604))$ [min]	-
Pouso no aeroporto	$T(60, 80, 140)$ [seg]	Pista de decolagem

Descrição do recurso	Total no modelo
Balcão de *check-in*	1
Canal de inspeção	1
Pista de decolagem	1

[a]Nomenclatura das PDF's: $N(\mu, \sigma)$ – Normal; $L(\mu, \sigma)$ – Log-normal; $B(\alpha_1, \alpha_2)$ – Beta; $W(\beta, \alpha)$ – Weibull; $\Gamma(\beta, \alpha)$ – Gama; $Exp(\lambda)$ – Exponencial; $T(min, moda, max)$ – Triangular.
[b]Antecedência em relação ao horário programado do voo

Figura 3.3: Quadro resumo dos dados do modelo de simulação de eventos discretos. Fonte: o autor.

Vitória. Utilizou-se como parâmetro para a validação o tempo médio de desvio da decolagem efetiva para a decolagem programada (diferentemente do "atraso efetivo", o desvio considera os valores negativos, ou seja, os adiantamentos dos voos). Comparando os tempos médios de desvio de 9 replicações do modelo com 9 dias de operação obteve-se a validação do modelo para um intervalo de confiança de 95%. A Tabela 3.2 apresenta os dados utilizados para a validação.

As PDF's utilizadas no modelo de simulação de simulação de eventos foram as mesmas utilizados no simulador de Monte Carlo que alimenta o modelo de programação estocástica. Contudo, ao contrário de Bastos et al. (2020), que gerou uma única vez um grande banco de dados com os valores estocásticos utilizados no SP, aqui foi desenvolvido um algoritmo em Julia que gera somente o número de cenários utilizados no SP. Os dados de entrada desse simulador são os tempos previstos de voos (ft_i^0), o número de passageiros por voo (np_i), e as janelas de indisponibilidade ($[^b dwt_{ir}^s, {}^e dwt_{ir}^s]$) que geram as janelas de disponibilidade ($[^b upt_{iw}^s, {}^e upt_{iw}^s]$). Um outro parâmetro de entrada é semente aleatória, denotada aqui por ς, que altera os valores sorteados. Foi garantido que, para uma mesma semente aleatória, ς, os cenários gerados serão sempre os mesmos, caso os outros dados de entrada também sejam. A adoção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

dessa metodologia permite reprodutibilidade dos experimentos.

Tabela 3.2: Dados utilizados para a validação do modelo de simulação - média de desvios da decolagem efetiva e programada. Fonte: o autor.

Referência		Desvios de tempo da decolagem ($d_i^s - d_i^0$) [min]	
Real [data]	Simulado [nº. da replicação]	Real	Simulado
17/02/2018	1	0.00	4.53
22/02/2018	2	-4.08	-11.84
10/03/2018	3	-4.58	-3.16
11/03/2018	4	-9.00	-10.13
25/03/2018	5	-15.42	-9.84
28/03/2018	6	-1.67	-8.09
01/04/2018	7	-6.17	-6.99
01/05/2018	8	-9.58	-8.99
02/06/2018	9	-7.25	-11.50
	Média:	-6.42	-7.34
	Desvio padrão:	4.62	5.16

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

4
Resultados Numéricos

O modelo de programação estocástico apresentado foi implementado na linguagem Julia (versões 1.2 a 1.5.1). Utilizou-se o pacote de programação matemática JuMP (*Julia for Mathematical Programming*) para a modelagem matemática e o solver Gurobi 9.0.1. O modelo de simulação utilizou o pacote SimJulia para modelagem de simulação de eventos discretos. Para a maioria dos resultados finais utilizou-se uma máquina virtual (*virtual machine*) do serviço *Compute Engine* do Google Cloud. A máquina virtual, de código-nome "c2-standard-8" com CPU Xeon 3.80 GHz (8 núcleos) e RAM 32Gb (servidores da região "us-central1-a"), foi utilizada como forma de deixar padronizado o hardware adotado, facilitando possíveis futuras comparações de desempenho de adaptações do modelo apresentado. Além disso, como os preços por uso dessas máquinas virtuais são tabelados, há facilidade na mensuração do custo financeiro ligado ao uso do modelo de programação estocástica. Adicionalmente, também foram utilizados, no desenvolvimento e testes, outros dois computadores: (i) CPU: Intel Core I5-3337U 1.8 GHz (4 núcleos), RAM: 6Gb; e, principalmente, (ii) CPU: i7-8700K 3.70GHz (12 núcleos), RAM 64Gb.

Nas análises numéricas buscou-se analisar dois principais eixos: (i) a eficiência e qualidade da metodologia e (ii) a aplicabilidade do modelo. No eixo relacionado a metodologia foram realizadas análises de convergência (Seção 4.1) e análises de qualidade da solução estocástica (Seção 4.2). No eixo relacionado à aplicabilidade do modelo realizou-se análises com instâncias reais (Seção 4.3). Alguns parâmetros foram mantidos fixos para todas as análises, conforme apresentado na Tabela 4.1. Outro parâmetro que foi mantido fixo exclusivamente para as análises do eixo (i) foi o tempo previsto de voo, ft_i^0, mantido em 75 minutos para todos os voos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela 4.1: Parâmetros mantidos fixos nas análises. Fonte: o autor.

Tempo previsto de preparação da aeronave (ou tempo entre-voos):	$tt_i^0 = 45\text{min}$;	$\forall i \in \mathcal{F}^*$
Antecedência prevista, em relação ao horário de decolagem, para início do *check-in* dos passageiros	$at_i^0 = 60\text{min}$;	$\forall i \in \mathcal{F}^*$
Tempo previsto de processamento dos passageiros no terminal	$pt_i^0 = 60\text{min}$;	$\forall i \in \mathcal{F}^*$
Jornada operacional diária:	$wt = 600\text{min}$	07:00 - 17:00
Tempo de inatividade referente ao período noturno:	$rt = 840\text{min}$	17:00 - 07:00
Tempos máximo de atraso para voos planejados	$m_i = 240\text{min}$;	se $uf_i = 0$
Tempos máximo de atraso para voos não planejados	$m_i = 600\text{min}$;	se $uf_i = 1$
Penalidade do atraso de voos planejados	$c_i = 1$;	se $uf_i = 0$
Penalidade do atraso de voos não planejados	$c_i = 10$;	se $uf_i = 1$

4.1 Análises de convergência

As análises de convergência demonstram-se necessárias devido ao método utilizado para a geração dos cenários, o SAA, ser uma forma não exata de construção dos cenários. Como o simulador de Monte Carlo utilizado gera diferentes valores para os tempos dos processos dependendo da semente aleatória que é informada na entrada, a solução gerada terá variações. Dessa forma realizou-se experimentos para verificar a convergência de 3 tabelas fictícias de planejamento de voos, apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tabelas de voos utilizadas para a análise de convergência. Fonte: o autor

Voo (i)	Tipo do voo (uf_i)	Horário planejado de cada tabela (ft_i^0)		
		tmt_1	tmt_2	tmt_3
1	Não planejado	0	0	0
2	Não planejado	0	0	10
3	Não planejado	0	0	20
4	Planejado	0	0	0
5	Planejado	120	120	120
6	Planejado	240	240	240
7	Planejado	0	5	30
8	Planejado	120	125	150
9	Planejado	240	245	270
10	Planejado	0	10	60
11	Planejado	120	130	180
12	Planejado	240	250	300

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Considerou-se a frota do Aeroporto de Vitória, 3 helicópteros de médio porte ($na = 3$), o que representa uma taxa média de 4 voos por aeronave e, como pode ser visto nas tabelas tmt_1, tmt_2 e tmt_3, os horários planejados reproduzem um sequenciamento dos voos nas aeronaves. Para analisar a convergência foram variados, para cada tabela, o número de cenários considerados, $|\mathcal{S}^*| = \{10, 25, 100, 200, 500\}$, o valor da taxa de penalidade do atraso efetivo, $\lambda_i = \{0.6, 0.7, 0.8\}$, e a semente aleatória considerada na simulação de Monte Carlo, que gera os cenários, $\boldsymbol{\varsigma} = \{0, 1, ..., 9\}$. A primeira análise se refere aos valores obtidos nas funções objetivo. Cada uma das instâncias geradas a partir da combinação dos parâmetros supracitadas foi otimizada até Gap 0%. Foram calculadas as médias e desvios padrão das funções objetivo em relação à semente aleatória, ou seja, $\mathbb{E}_{\boldsymbol{\varsigma}}[FO(tmt, \lambda_i, |\mathcal{S}^*|)]$ e $\sqrt{VAR_{\boldsymbol{\varsigma}}[FO(tmt, \lambda_i, |\mathcal{S}^*|)]}$. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Médias e desvios padrão das funções objetivo para diferentes configurações de λ_i e $|\mathcal{S}^*|$. Fonte: o autor.

Tabela	Cenários	Média ($\mathbb{E}_{\boldsymbol{\varsigma}}$)			Desvio padrão ($\sqrt{VAR_{\boldsymbol{\varsigma}}}$)		
		$\lambda_i = 0.6$	$\lambda_i = 0.7$	$\lambda_i = 0.8$	$\lambda_i = 0.6$	$\lambda_i = 0.7$	$\lambda_i = 0.8$
tmt_1	10	4551.90	3510.55	2469.20	155.569	181.497	207.426
	25	4546.30	3504.02	2461.73	78.822	91.959	105.096
	100	4519.18	3472.38	2425.57	49.387	57.618	65.850
	200	4506.01	3457.01	2408.01	30.448	35.523	40.597
	500	4507.81	3459.11	2410.41	18.474	21.553	24.632
tmt_2	10	4371.91	3375.56	2379.21	155.591	181.523	207.455
	25	4366.37	3369.10	2371.83	78.849	91.991	105.133
	100	4339.18	3337.38	2335.57	49.387	57.618	65.850
	200	4326.01	3322.01	2318.01	30.448	35.523	40.597
	500	4327.81	3324.11	2320.41	18.474	21.553	24.632
tmt_3	10	3831.71	2970.33	2108.95	155.520	181.440	207.360
	25	3825.85	2963.49	2101.13	78.863	92.007	105.150
	100	3798.92	2932.07	2065.23	49.530	57.786	66.041
	200	3785.80	2916.77	2047.74	30.455	35.531	40.607
	500	3787.78	2919.07	2050.37	18.511	21.596	24.681

Como pode ser observado na Tabela 4.3, os valores médios das FO's diminuem com o aumento do λ_i e também diminuem com a tabela, $tmt_1 > tmt_2 > tmt3$. Os atrasos relevantes nessa análise são os da programação, visto que todos os voos planejados sofrem um atraso significativo no horário programado do voo para que os voos não planejados, que possuem maior peso na FO, sejam programados para os primeiros horários das aeronaves. Portanto, como a separação entre voos planejados é maior no caso da tmt_3 em relação à tmt_2 e da tmt_2 em relação à tmt_1, a absorção dos voos não planejados, no início do dia, gera menos atrasos para a tmt_3 e tmt_2. O desvio padrão diminui, logicamente, com o aumento do número de cenários e se mantém estável entre as tabelas, sendo crescente com o λ_i, visto que o mesmo aumenta o peso das

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

variáveis estocásticas na FO. No entanto há uma grande diferença no desvio padrão, tomado em relação ς, dos horários programados para cada voo das tabelas, como pode ser visto na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Desvios padrão dos horários dos voos. Fonte: o autor.

Tabela	λ_i	$\lvert\mathcal{S}^*\rvert$	Voo 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
tmt_1	0.6	10	0	0	0	58	68	0	38	57	38	0	68	58
		100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.8	10	0	0	0	51	68	0	0	57	38	0	0	51
		100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tmt_2	0.6	10	0	0	0	38	38	0	0	0	0	0	0	0
		100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.8	10	0	0	0	38	38	38	0	0	0	0	38	0
		100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tmt_3	0.6	10	0	0	0	7.9	59	58	52	45	8.8	47	36	8.2
		100	0	0	0	37	57	4.8	38	7.1	9.2	65	9.5	9.9
		500	0	0	0	7.9	46	36	43	5.3	7.9	38	44	8.8
	0.8	10	0	0	0	7.4	57	56	58	6.3	7.9	52	64	8.2
		100	0	0	0	37	55	8.2	38	7.1	8.4	65	9.2	7.0
		500	0	0	0	7.9	46	36	43	5.3	7.4	38	44	9.4

Os voos em que o desvio padrão calculado foi nulo, para um determinado número de cenários e valor de λ_i, significam que não houve nenhuma diferença de horário programado para diferente sementes aleatórias, ς. Já os voos com altos desvios padrão se referem às diferenças de horários decorrentes de divergências no encadeamento dos voos. Isso evidencia que, dependendo do caso que se esteja otimizando é necessário um número de cenários elevado para garantir a convergência na alocação e sequenciamento. No caso da tmt_3, por exemplo, considerando $\lambda_i = 0.6$ e $|\mathcal{S}^*| = 500$, a alocação e sequenciamento obtidos para $\varsigma = 2$ foram $A_1 = [1 - 4 - 5 - 9]$, $A_2 = [2 - 10 - 8 - 12]$, $A_3 = [3 - 7 - 11 - 6]$ enquanto que a alocação e sequenciamento obtidos para $\varsigma = 5$ foram $A_1 = [1 - 7 - 11 - 9]$, $A_2 = [2 - 4 - 8 - 6]$, $A_3 = [3 - 10 - 5 - 12]$. Esse resultado indica que o número de cenários pode ser insuficiente para a convergência ou que, dependendo dos parâmetros do caso, poderá haver múltiplas soluções ótimas. Os resultados detalhados podem ser conferidos no Apêndice C.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

4.2
Análises de qualidade da solução estocástica

Conforme foi apresentado na Seção 2.4.2 do Capítulo 3 é importante que sejam analisados os ganhos de se utilizar um modelo de programação estocástica frente a um modelo determinístico, visto que um SP possui, invariavelmente, um custo computacional maior. Para isso analisou-se, para a tabela tmt_1, o EVPI e o VSS considerando janelas de indisponibilidade, $[{}^b dwt^s_{ir}, {}^e dwt^s_{ir}]$, com probabilidades de ocorrência associadas. Também utilizou-se o modelo de simulação de eventos discretos para avaliar os resultados, (simulando as soluções encontradas no problema RP, denotado como DES-RP, e EV, denotado como DES-EV), visto que esse considera peculiaridades operacionais que o modelo SP não considera, como a concorrência entre os voos pelos recursos do aeroporto, como a pista de decolagem e o balcão de *check-in*. Na simulação computou-se os atrasos efetivos e calculou-se o custo total da programação com a mesma equação da função objetivo do modelo de programação estocástica. A janela considerada foi de 100 minutos no início do dia $dwt_1 = [0, 100]$ com probabilidade de ocorrência variando entre 5% e 85%. A Tabela 4.5 apresenta os resultados da análise que considerou $|\mathcal{S}^*| = 100$, $\varsigma = 0$ e todos os casos otimizados até Gap 0%.

Tabela 4.5: Análise de qualidade - resultados do EVPI, VSS e simulação do modelo DES para instâncias com janela de indisponibilidade. Fonte: o autor.

Prob.	RP	EVPI	VSS	DES-RP	DES-EV
5%	5663.1	336.8	1.4	8667.5	8677.2
15%	7865.6	1004.2	706.5	10718.3	11995.4
20%	8965.3	1331.0	1244.5	11722.0	13333.5
25%	10050.4	1660.6	1618.9	12483.6	14016.8
30%	11164.4	1987.5	1904.1	13497.2	14827.4
35%	12261.4	2317.7	2071.9	14706.7	15815.4
40%	13406.6	2670.1	2107.2	15656.3	16521.0
45%	14449.2	2984.4	1975.8	16673.5	17381.5
50%	15585.8	3313.1	1758.2	17734.1	18229.8
55%	16649.5	3648.7	1363.9	18684.4	18853.0
60%	17830.8	4003.5	877.4	19590.9	19503.7
65%	18862.3	4316.1	249.1	20706.4	19941.4
80%	19906.5	3015.4	54.1	20701.9	20762.2
85%	19979.3	2348.3	52.5	20844.3	20861.9

Como pode ser observado o resultado do EVPI cresce significativamente até 65% e depois começa a cair, ou seja, a incerteza da informação que gera o bloqueio passa a se tornar menos relevante a partir desse ponto. O VSS por sua vez apresenta valores bem baixos nos extremos e um pico na janela com 40% de probabilidade. Ou seja, eventos de interrupção no início do dia que possuam esse grau de incerteza maximizam os ganhos absolutos do uso do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

modelo de programação estocástica frente a um modelo determinístico. Esse comportamento convexo é esperado, visto que nos extremos – com janelas de bloqueio com 0% e com 100% de probabilidade de ocorrência – não haverá incertezas relativas às janelas, o que retorna EVPI's e VSS's muito menores do que os obtidos para probabilidades entre esses extremos. Por fim, observa-se que as simulações para os casos com as soluções RP (DES-RP) retornam valores superiores ao das FO's das soluções RP. Evidentemente essa diferença esta associada aos detalhes dos processos que são considerados na simulação, como a competição por recursos (como a pista de decolagem), que geram atrasos efetivos que não são capturados na programação estocástica. O gráfico da Figura 4.1 seguir apresenta o EVPI e VSS normalizados por RP e a diferença entre o DES-EV e DES-RP, o que seria equivalente ao VSS para a simulação, normalizados pelo DES-RP (ou DES-EV/DES-RP – 100%). Os detalhes dos resultados da análise de convergência podem ser conferidos no Apêndice C.

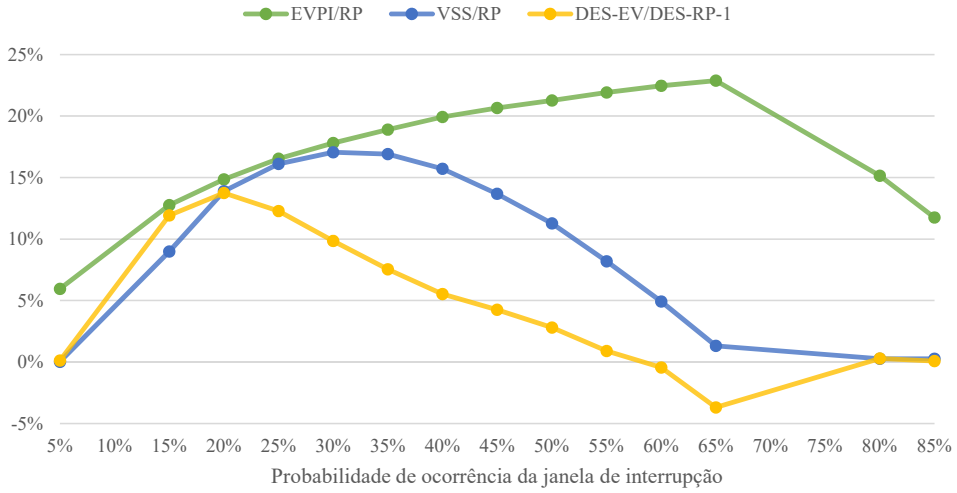


Figura 4.1: Comparação gráfica dos resultados do EVPI, VSS e simulação do modelo DES para instâncias com janela de interrupção com probabilidades diversas de ocorrência. Fonte: o autor.

4.3 Instância reais analisadas

Nessa seção o principal objetivo foi testar o método para casos reais, testando não só a qualidade da solução retornada como também a performance. Utilizou-se duas instâncias analisadas por Vieira et al. (2020). Uma dessas instâncias – I12 – se refere ao dia 20/06/2018 no Aeroporto de Vitória e possui 12 voos, sendo 1 voo de transferência, tratado aqui como não planejado. A outra instância – I45 – se refere ao dia 02/02/2018 no Aeroporto de Macaé, no qual foram realizados 38 voos, somados a 7 voos que haviam sido transferidos para o dia 03/02/2018. Ou seja, a instância possui 45 voos no total, sendo 19

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

voos de transferência referentes ao dia D-1 e 3 voos de transferência referentes ao dia D-2.

Na primeira análise, da instância I12, considerou-se restrições relacionadas aos tempos operacionais semelhantes às adotadas por Vieira et al. (2020), sendo a jornada operacional de 660 minutos a única diferença em relação aos parâmetros fixados na Tabela 4.1. Já em relação às penalidades, por se tratarem de modelos muito diferentes, adotou-se o que já estava estabelecido na Tabela 4.1 (para voos planejados $c_i = 1$ e para voos não planejados, ou de transferência, $c_i = 10$). Considerou-se ainda 100 cenários e $\lambda_i = 0.8$. Os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Programação de voos de um dia de referência de atendimento a recuperação de voos do artigo de Vieira et al. (2020) - Instância I12. Fonte: o autor.

Voo	Tempo de voo	Tipo do voo	Dec. plan.	Dec. prog.	Aeronave alocada
1	107	Plan.	5.0	5.0	1
2	77	Plan.	160.0	160.0	1
3	76	Plan.	360.0	360.9	3
4	83	Plan.	490.0	491.0	2
5	74	Plan.	30.0	118.0	2
6	73	Não plan.	0.0	0.0	2
7	92	Plan.	350.0	350.0	2
8	70	Plan.	480.0	481.9	3
9	91	Plan.	0.0	0.0	3
10	89	Plan.	150.0	150.0	3
11	91	Plan.	330.0	330.0	1
12	102	Plan.	450.0	466.0	1
Tempo de CPU: 13.832[s]; Gap: 0%; FO: 492.947					

É interessante observar que os voos 4 e 8 tiveram um horário programado acima do planejado, mesmo sendo viável, para os tempos previstos, programá-los para horários iguais aos do planejamento. Essa pequena diferença do programado para o planejado se deve à flutuação imposta pelos cenários do SP nos tempos dos processos. Também é importante ressaltar que, como o modelo de programação estocástica possui a simplificação de não considerar intervalo mínimo entre decolagens, os voos 6 e 9 foram programados para o mesmo horário. Para uma operação real, uma das alternativas para evitar os atrasos efetivos, devido à concorrência por recursos (como pista de decolagem), seria utilizar o modelo de simulação para programação proposta pelo modelo SP, avaliando os atrasos e corrigindo os horários programados.

Em uma segunda análise com a instância I12 considerou-se uma janela de indisponibilidade fictícia de 100 minutos no início do dia com probabilidade de ocorrência de 40%, como forma de ilustrar um possível caso prático com rupturas no atendimento devido a condições climáticas adversas. O resultado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

é apresentado na Tabela 4.7. Como pode ser observado, os voos planejados 5 e 9, são programados dentro da janela de indisponibilidade e próximos do fim da mesma. Visto que há 60% de chance de a indisponibilidade não ocorrer, vale mais a pena acrescer o custo da FO com um atraso efetivo de pouco mais de 10 min em 40% dos casos, do que assumir o custo desse atraso na programação para os 60% dos cenários restantes. Já o voo 6, que possui um peso 10 vezes maior na função objetivo, foi programado para o término da janela de indisponibilidade.

Tabela 4.7: Programação de voos de um dia de referência de atendimento a recuperação de voos do artigo de Vieira et al. (2020) - Instância I12 - considerando janelas de indisponibilidades. Fonte: o autor.

Voo	Tempo de voo	Tipo do voo	Dec. plan.	Dec. prog.	Aeronave alocada
1	107	Plan.	5.0	222.7	3
2	77	Plan.	160.0	208.0	1
3	76	Plan.	360.0	374.7	3
4	83	Plan.	490.0	495.7	3
5	74	Plan.	30.0	89.0	1
6	73	Não plan.	0.0	100.0	2
7	92	Plan.	350.0	352.0	2
8	70	Plan.	480.0	489.0	2
9	91	Plan.	0.0	86.7	3
10	89	Plan.	150.0	218.0	2
11	91	Plan.	330.0	330.0	1
12	102	Plan.	450.0	466.0	1
Tempo de CPU: 9.320[s]; Gap: 0%; FO: 3527.56					

A última análise realizada foi com a instância I45, visto que é um caso de grande porte e pode evidenciar quais são as limitações do modelo proposto. Para essa instância não considerou-se o problema RP, mas sim o problema EV, ou seja, o problema com 1 cenário: o cenário médio. Dessa forma gerou-se 1000 cenários para os quais foram obtidas as médias das variáveis aleatórias. O resultado da programação foi simulado[1] no modelo DES para obter o atraso médio efetivo, denotado aqui como $\mathbb{E}[\delta_i^{s_{\text{DES}}}]$. Além disso, diante do fato de existirem voos transferidos do dia D-2, além dos do dia D-1, considerou-se que os do D-2 possuem um peso maior, adotando $c_i = 30$ para esses casos. A Tabela 4.8 apresenta os resultados.

Como pode ser observado, 2 voos não foram atendidos no dia planejado, tendo sido transferidos para a janela referente ao dia seguinte. Como o Gap foi de 31,6% (mesmo com o tempo máximo de CPU em 11000 segundos), não é possível realizar conclusões sobre a qualidade da solução. No entanto, vale

[1]Para tornar o modelo, que representa o Aeroporto de Vitória, mais semelhante às condições operacionais do Aeroporto de Macaé, ajustou-se o número de recursos, passando para 5 de balcões de *check-in* e para 4 caminhões de reabastecimento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

observar que a transferência de 2 voos já indica que a solução é, possivelmente, melhor do que a gerada manualmente na operação, na qual transferiu-se 7 voos. Além disso, a solução gerada atende a alguns requisitos mínimos operacionais, já que todos os voos prioritários foram atendidos e nenhum voo de transferência D-2, com penalidade 30, sofreu atraso. No entanto, assim como nos resultados da instância I12 (sem a janela de indisponibilidade fictícia), na solução apresentada da I45 todos os 11 primeiros voos das aeronaves estão alocados para o mesmo horário, no início da jornada. Os atrasos decorrentes da concorrência por recursos é evidenciada observado-se que os maiores atrasos médios efetivos (obtidos pelo modelo de simulação) se concentram justamente nesses primeiros voos. Ao contrário da instância I12, que poderia ter os horários programados corrigidos com o modelo de simulação, a imposição de uma separação miníma entre decolagens programadas para os 11 primeiros voos da I45 geraria, provavelmente, um grande atraso da programação em alguns deles. Se a separação entre voos fosse, por exemplo, 5 minutos, a última decolagens dos 11 primeiros voos seria 55 minutos depois do horário programado pelo modelo SP. Ou seja, para casos como o da I45, com um grande número de voos no início do dia, possivelmente a solução ótima obtida pelo modelo SP e corrigida pelo modelo DES estaria distante de uma solução ótima considerando um intervalo mínimo entre decolagens.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela 4.8: Programação de voos de um dia de referência de atendimento a recuperação de voos do artigo de Vieira et al. (2020) - Instância I45. Fonte: o autor.

Voo	Tempo de voo	Tipo do voo	Custo do voo	Dec. plan.	Dec. prog.	Atraso ef. $\mathbb{E}[\delta_i^{s_{\text{DES}}}]$	Aeronave alocada
1	96	Não plan.	10	0	0	21.04	1
2	117	Não plan.	10	0	141	20.28	1
3	91	Não plan.	10	0	0	23.38	2
4	135	Não plan.	30	0	0	16.09	3
5	107	Plan.	1	160	308	16.33	5
6	41	Plan.	1	385	429	9.55	9
7	118	Não plan.	30	0	0	18.47	4
8	113	Não plan.	10	0	160	20.63	11
9	84	Plan.	1	35	273	14.02	2
10	92	Não plan.	10	0	136	20.51	2
11	103	Não plan.	10	0	130	18.17	9
12	89	Plan.	1	5	1440	0.00	9
13	85	Plan.	1	135	298	9.68	4
14	92	Plan.	1	155	388	8.02	6
15	106	Não plan.	10	0	0	24.20	5
16	108	Não plan.	10	0	148	21.54	7
17	78	Não plan.	10	0	0	21.47	6
18	81	Não plan.	10	0	123	18.96	6
19	112	Plan.	1	0	180	12.92	3
20	103	Não plan.	10	0	0	23.70	7
21	80	Plan.	1	180	303	14.91	1
22	87	Não plan.	10	0	0	22.67	8
23	112	Não plan.	10	0	151	22.19	5
24	85	Não plan.	10	0	0	21.93	9
25	81	Plan.	1	550	550	6.76	2
26	113	Plan.	1	6	1440	0.00	2
27	102	Não plan.	10	0	283	13.48	10
28	80	Plan.	1	365	428	9.43	1
29	80	Plan.	1	425	428	7.43	4
30	84	Não plan.	30	0	0	19.13	10
31	109	Não plan.	10	0	129	16.80	10
32	79	Não plan.	10	0	132	20.07	8
33	94	Plan.	1	10	249	12.30	6
34	90	Plan.	1	305	318	16.32	11
35	115	Não plan.	10	0	0	22.88	11
36	106	Não plan.	10	0	278	14.75	9
37	90	Plan.	1	0	163	13.87	4
38	87	Plan.	1	295	388	8.62	8
39	95	Plan.	1	540	540	3.97	9
40	84	Plan.	1	390	402	9.85	2
41	93	Plan.	1	185	337	9.32	3
42	87	Plan.	1	430	430	11.16	10
43	99	Plan.	1	400	437	10.54	7
44	87	Plan.	1	20	256	13.31	8
45	91	Plan.	1	265	301	15.52	7
Tempo de CPU: 11013.7[s] (tempo limite); Gap: 31.6%; FO: 79185.7							

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

5
Conclusão e trabalhos futuros

Essa dissertação de mestrado abordou um problema novo na academia, relacionado à programação de voos *offshore* em situações de rupturas do atendimento. Utilizando como base de estudo a operação de transporte aéreo de passageiros para unidades marítimas da Petrobras, a abordagem proposta tem como objetivo maximizar o nível de serviço, considerando incertezas. Na revisão bibliográfica identificou-se dois problemas correlacionados: o HRP – *Helicopter Routing Problem* (ou Problema de Roteamento de Helicópteros) e o ARP – *Aircraft Recovery Problem* (ou Problema de Recuperação de Aeronaves). O trabalhos acadêmicos relacionados ao HRP propõem soluções ótimas para as viagens realizadas pelos helicópteros, reduzindo as distâncias percorridas (nos casos de voos com múltiplos destinos) e/ou maximizando o número de passageiros alocados nos voos. Há ainda abordagens que visam reduzir a janela total de operação (*makespan*) ou diminuir o número de pousos *offshore*, com o intuito de controlar os riscos de acidentes. Contudo, não há, até o presente momento, estudos publicados que tenham como principal objetivo maximizar o nível de serviço do transporte aéreo *offshore*. O ARP é focado na aviação comercial regular e visa encontrar soluções de programações de voos após interrupções na operação, devido, por exemplo, a falhas nas aeronaves e fechamentos meteorológicos, o que o aproxima do problema abordado.

Nesse trabalho foi apresentado um modelo de programação estocástica de dois estágios que minimiza os atrasos de voos através da otimização das decisões na atividade de programação: definição dos horários de decolagens e sequenciamento e alocação dos voos às aeronaves. A perspectiva de atuação do modelo desenvolvido é em situações de crise, quando há intenso número de atrasos e passageiros transferidos, assim como situações pré-crise, quando há previsão de interrupções das operações devido, por exemplo, a condições climáticas adversas. Considerando as variáveis incertas do transporte aéreo (como a previsão meteorológica e tempos dos processos em solo e voo) o modelo de programação estocástica apresenta propostas de programação que elevam o nível de serviço esperado, aumentando a confiabilidade do transporte aéreo. Para avaliar as soluções geradas pelo modelo de programação estocástica também foi desenvolvido um modelo de simulação de eventos discretos que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

representa, de forma mais detalhada, a operação. Eventualmente, esse modelo de simulação poderá ser utilizado para realizar ajustes nas programações de voos geradas.

Conforme apresentado no Capítulo 4, a abordagem estocástica apresenta ganho significativo em relação às abordagens determinísticas nos casos de interrupções do atendimento, ou, como denotado no texto, janelas de indisponibilidade com incertezas associadas. Obteve-se, um valor de VSS acima de 15% da solução RP para instâncias com janelas de bloqueio de 100 minutos no início do dia com probabilidades de ocorrência entre 25% e 40%. Diante dos resultados, observou-se que o modelo de programação estocástica desenvolvido pode gerar resultados promissores para situações adversas da operação do transporte aéreo *offshore*. Além disso, o método aplicado para geração dos cenários, o SAA (*Sample Average Approximation* ou Aproximação pela Média Amostral), possui grandes vantagens na aplicação em problemas NP-difícil, como o abordado aqui. No entanto, é necessário cautela em relação à convergência do método, que pode gerar soluções significativamente diferentes dependendo dos valores das variáveis aleatórias sorteadas.

Como trabalhos futuros, recomenda-se realizar análises estatísticas de dados meteorológicos (previsão e realização), possibilitando empregar o modelo de otimização para instâncias reais com janelas de indisponibilidade adequadamente estimadas. Também é indicada a incorporação de outras variáveis incertas ligadas ao transporte aéreo *offshore*, como, por exemplo, as falhas de aeronaves e consequente redução da frota disponível para realizar os voos. Por fim, sugere-se a avaliação da inclusão de uma restrição que considere um intervalo mínimo entre decolagens no aeroporto. Contudo, essa e outras representações da realidade operacional no modelo matemático, como a possibilidade de lidar com uma frota heterogênea, podem aumentar de forma expressiva o número de variáveis de decisão e tornar o problema intratável com a abordagem de programação estocástica.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Referências bibliográficas

Abbasi-Pooya, A. e Kashan, A. H. (2017). New mathematical models and a hybrid grouping evolution strategy algorithm for optimal helicopter routing and crew pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 112:35–56.

Agência Nacional da Aviação Civil (2020a). ANACpédia. Disponível em <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/index.html>. Acesso em 17 ago. 2020.

Agência Nacional da Aviação Civil (2020b). Histórico de Voos. Disponível em <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/historico-de-voos>. Acesso em 17 ago. 2020.

Agência Nacional da Aviação Civil (2020c). Listas de Aeródromos Civis Cadastrados. Disponível em <https://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/aerodromos/cadastro-de-aerodromos-civis>. Acesso em 17 ago. 2020.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2019). Anuário Estatístico 2019. Disponível em <http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico>. Acesso em 20 ago. 2020.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2020a). Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural – Julho de 2020. Disponível em <http://www.anp.gov.br/publicacoes/boletins-anp/2395-boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em 20 ago. 2020.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2020b). Dados de Exploração e Produção. Disponível em <http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/gestao-de-contratos-de-e-p/dados-de-e-p>. Acesso em 19 ago. 2020.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2020c). Projetos de PD&I. Disponível em <http://www.anp.gov.br/pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao/investimentos-em-p-d-i/projetos-de-pd-i>. Acesso em 19 ago. 2020.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Alem, D. e Morabito, R. (2015). Planejamento da produção sob incerteza: programação estocástica versus otimização robusta. *Gestão & Produção*, 22(3):539–551.

Argüello, M. F., Bard, J. F., e Yu, G. (1997). A grasp for aircraft routing in response to groundings and delays. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1(3):211–228.

Arias, P., Mota, M. M., Guimarans, D., e Boosten, G. (2013). A methodology combining optimization and simulation for real applications of the stochastic aircraft recovery problem. In *2013 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, pages 265–270. IEEE.

Ballou, R. (2006). *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial*. Bookman.

Bastos, Y. B., Fleck, J. L., e Martinelli, R. (2020). A stochastic programming approach for offshore flight scheduling. In *15th IFAC Workshop on Discrete Event Systems*, pages 1–7, Rio de Janeiro. International Federation of Automatic Control.

Bastos, Y. B., Hermeto, N. d. S. S., e Hermeto, T. d. S. (2018). Estudo de caso heliponto privado de farol de são tomé - modelo de simulação para análise de aeródromos offshore. In *Anais do XVII SITRAER*, São Paulo. Simpósio de Transporte Aéreo.

Belobaba, P., Odoni, A., e Barnhart, C. (2009). *The Global Airline Industry*. Aerospace Series. Wiley.

Birge, J. R. e Louveaux, F. (2011). *Introduction to stochastic programming*. Springer Science & Business Media.

Bodin, L. e Golden, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11(2):97–108.

Bowersox, D., Closs, D., Cooper, M., e Bowersox, J. (2013). *Gestão Logística da Cadeia de Suprimentos*. AMGH Editora.

Brasil (2018). Aprova a Norma Regulamentadora n.º 37 - Segurança e Saúde em Plataformas de Petróleo. *Diário Oficial da União*. Acesso em 5 set. 2020.

Clausen, J., Larsen, A., Larsen, J., e Rezanova, N. J. (2010). Disruption management in the airline industry—concepts, models and methods. *Computers & Operations Research*, 37(5):809–821.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

de Oliveira, Í. R., Magalhães, J. M., dos Reis, D. C. S., Leão, B., De Conto, A., Malta, L., Hermeto, T., Hermeto, N., e Bastos, Y. (2015). Capacity analysis of offshore helicopter traffic in southeast brazil. In *2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1B1–1. IEEE.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo (2018a). DECEA conclui infraestrutura para operar ADS-B na Bacia de Campos. Disponível em <https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=comitiva-oficializa-obrigatoriedade-do-uso-do-ads-b-na-bacia-de-campos>. Acesso em 18 ago. 2020.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo (2018b). Regras e Procedimentos Especiais de Tráfego Aéreo para Helicópteros. Disponível em <https://publicacoes.decea.gov.br/index.cfm?i=publicacao&id=4911>. Acesso em 18 ago. 2020.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo (2020). Centro do Gerenciamento da Navegação Aérea. Disponível em <https://www.decea.gov.br/?i=unidades&p=cgna>. Acesso em 5 set. 2020.

Fiala Timlin, M. T. e Pulleyblank, W. R. (1992). Precedence constrained routing and helicopter scheduling: heuristic design. *Interfaces*, 22(3):100–111.

Furini, F., Kidd, M. P., Persiani, C. A., e Toth, P. (2015). Improved rolling horizon approaches to the aircraft sequencing problem. *Journal of Scheduling*, 18:435–447.

Galvão, R. D. e Guimarães, J. (1990). The control of helicopter operations in the brazilian oil industry: Issues in the design and implementation of a computerized system. *European Journal of Operational Research*, 49(2):266–270.

Gribkovskaia, I., Halskau, O., e Kovalyov, M. Y. (2015). Minimizing takeoff and landing risk in helicopter pickup and delivery operations. *Omega*, 55:73–80.

Heringer, F. M. (2019). Aplicação de uma heurística ao problema de múltiplas mochilas de tamanhos variados para a redução de custos no transporte aéreo offshore. In *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, pages 2602–2613, Balneário Camburiú. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Hermeto, N. d. S. S. e Bastos, Y. B. (2015). Planejamento de alocação de frota para transporte aéreo offshore. In *Anais do XIV SITRAER*, pages 262–269, São José dos Campos. Simpósio de Transporte Aéreo, E-Papers.

Hermeto, N. d. S. S., Ferreira Filho, V. J. M., e Bahiense, L. (2014). Logistics network planning for offshore air transport of oil rig crews. *Computers & Industrial Engineering*, 75:41–54.

Hermeto, T. S. (2019). Sao tome aircraft parking area redesign: An international infrastructure regulation study case. In *23nd ATRS World Conference Amsterdam*, pages 1–16, Netherland. Air Transport Research Society.

Hermeto, T. S. e Müller, C. (2014). Analysis of offshore helicopter air traffic operations at the campos basin. In *18th ATRS World Conference Amsterdam*, pages 1–19, Bordeaux. Air Transport Research Society.

Hillier, F. S. e Lieberman, G. J. (2013). *Introdução à pesquisa operacional*. McGraw Hill Brasil.

IHS Markit (2020). Petrodata Offshore Rig Day Rate Trends. Disponível em <`https://ihsmarkit.com/products/oil-gas-drilling-rigs-offshore-day-rates.html`>. Acesso em 18 ago. 2020.

Juan, A. A., Barrios, B. B., Vallada, E., Riera, D., e Jorba, J. (2014). A simheuristic algorithm for solving the permutation flow shop problem with stochastic processing times. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46:101–117.

Kotnyek, B. e Richetta, O. (2006). Equitable models for the stochastic ground-holding problem under collaborative decision making. *Transportation Science*, 40:133–146.

Machado, A. M., Mauri, G. R., Boeres, M. C. S., e de Alvarenga Rosa, R. (2019). A milp model and a grasp algorithm for the helicopter routing problem with multi-trips and time windows. In *International Conference on Computational Logistics*, pages 204–218. Springer.

Mendes, G. V., Lopes, L. A. S., e da Silva Júnior, O. S. (2019). Proposta de otimização do transporte de passageiros por helicópteros em operações offshore da petrobras. In *LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pages 1–12, Limeira. Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional.

Menezes, F., Porto, O., Reis, M. L., Moreno, L., Aragão, M. P. d., Uchoa, E., Abeledo, H., e Nascimento, N. C. d. (2010). Optimizing helicopter transport of oil rig crews at Petrobras. *Interfaces*, 40(5):408–416.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Möller, E. B., Vianna, M. d. F. D., Vianna, D. S., e Meza, E. B. M. (2017). Definição de nível de serviço para situação de crise no transporte aéreo offshore utilizando o método ahp–analytic hierarchic process.

Moreno, L., de Aragão, M. P., e Uchoa, E. (2006). Column generation based heuristic for a helicopter routing problem. In *International Workshop on Experimental and Efficient Algorithms*, pages 219–230. Springer.

Petrobras (2020). Canal do Fornecedor. Disponível em <`https://canalfornecedor.petrobras.com.br/pt/regras-de-contratacao/catalogo-de-padronizacao/#especificacoes-tecnicas`>. Acesso em 18 ago. 2020.

Qian, F., Gribkovskaia, I., Laporte, G., e Halskau sr, Ø. (2012). Passenger and pilot risk minimization in offshore helicopter transportation. *Omega*, 40(5):584–593.

Qian, F., Gribkovskaia, I., e Øyvind Sr, H. (2011). Helicopter routing in the norwegian oil industry: Including safety concerns for passenger transport. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(4):401–415.

Qian, F., Strusevich, V., Gribkovskaia, I., e Halskau, Ø. (2015). Minimization of passenger takeoff and landing risk in offshore helicopter transportation: Models, approaches and analysis. *Omega*, 51:93–106.

Romero, M., Sheremetov, L., e Soriano, A. (2007). A genetic algorithm for the pickup and delivery problem: An application to the helicopter offshore transportation. In *Theoretical advances and applications of fuzzy logic and soft computing*, pages 435–444. Springer.

Sena, N. d. S. (2011). Planejamento de rede logística de transporte aéreo de pessoas para atividades de exploração e produção de petróleo em bacia marítima utilizando programação inteira mista. Dissertação de mestrado.

Shapiro, A. e Homem-de Mello, T. (2000). On the rate of convergence of optimal solutions of monte carlo approximations of stochastic programs. *SIAM journal on optimization*, 11(1):70–86.

Teodorović, D. e Guberinić, S. (1984). Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation. *European Journal of Operational Research*, 15(2):178–182.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Verweij, B., Ahmed, S., Kleywegt, A. J., Nemhauser, G., e Shapiro, A. (2003). The sample average approximation method applied to stochastic routing problems: a computational study. *Computational Optimization and Applications*, 24(2-3):289–333.

Vieira, T., De La Vega, J., Tavares, R., Munari, P., Morabito, R., Bastos, Y., e Ribas, P. C. (2020). An event-based model and heuristic approaches to reschedule helicopter flights for personnel transportation in the oil industry. Working paper.

Zhu, B., Zhu, J.-f., e Gao, Q. (2015). A stochastic programming approach on aircraft recovery problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

A
Análises sobre o atraso da programação e o atraso efetivo

Esse apêndice tem como objetivo apresentar pressupostos lógicos associados à operação do transporte aéreo *offshore* que facilitem a dedução de valores teóricos para parâmetros subjetivos utilizados no modelo de programação estocástica apresentado no Capítulo 3. Os dois principais parâmetros subjetivos apresentados no modelo são o c_i e λ_i, que juntos compõem o custo dos atrasos da programação e efetivos do voo i na função objetivo. Sendo assim, são propostas três variáveis que representam os custos dos atrasos dos voos, de acordo com qual *stakeholder* é impactado pela queda do nível de serviço. A variável C_k^{pax}, definida em (A-1), representa o custo do atraso percebido diretamente pelo passageiro k de um voo i. A variável C_k^{clt}, definida em (A-2), representa o custo do atraso percebido pelas unidades marítimas devido ao atraso de embarque e desembarque do passageiro k de um voo i. Por fim, a variável C_i^{sc}, definida em (A-3), representa o impacto na cadeia logística (transporte marítimo de cargas, operações de alívio de plataformas, o próprio transporte aéreo *offshore* de pessoas, entre outros) relativo ao atraso do voo i.

$$C_k^{\text{pax}} = a_k\, \delta_i^{\text{sch}} + \delta_i^{\text{eff}} \qquad \forall\, k \in \mathcal{K}_i,\ i \in \mathcal{F}^* \tag{A-1}$$

$$C_k^{\text{clt}} = p_k \left(\delta_i^{\text{sch}} + \delta_i^{\text{eff}}\right) \qquad \forall\, k \in \mathcal{K}_i,\ i \in \mathcal{F}^* \tag{A-2}$$

$$C_i^{\text{sc}} = u_i\, \delta_i^{\text{sch}} + \delta_i^{\text{eff}} \qquad \forall\, i \in \mathcal{F}^* \tag{A-3}$$

A variável $\mathcal{K}_i$ representa o conjunto de passageiros do voo i e as variáveis δ_i^{sch} e δ_i^{eff} representam aqui, respectivamente, o atraso da programação e o atraso efetivo do voo i (ou seja, δ_i^0 e δ_i^s, respectivamente, na nomenclatura[1] utilizada no Capítulo 3). Os domínios das variáveis são $a_k, p_k, u_i \in \{0, 1\}$; $\delta_i^{\text{sch}}, \delta_i^{\text{eff}} \in \mathbb{R}^+$.

Em (A-1) a variável a_k está relacionada à antecedência, em relação ao horário de início do *check-in*, que o passageiro foi comunicado sobre a reprogramação do voo. Se o passageiro foi comunicado com uma antecedência mínima, que o permita tomar uma ação que se ajuste ao novo horário, como reagendar o transporte até o aeroporto, então $a_k = 0$ e o atraso da programação não deve ser computado para esse passageiro. Caso contrário o atraso da

[1] Adotou-se outra nomenclatura que simplificasse o desenvolvimento, evitando o índice de referente aos cenários, que não importam nesse contexto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

programação deve ser computado e $a_k = 1$ (como, por exemplo, na situação limite, em que o passageiro é comunicado apenas no momento do *check-in*).

Em (A-2) a variável p_k representa a prioridade do passageiro para a unidade marítima, e é um valor específico e que pode mudar bastante entre diversos passageiros devido às atividades que eles exercem. Um passageiro que necessita embarcar para realizar a manutenção de um equipamento crítico pode ter uma prioridade mais alta do que outros passageiros. Ou ainda um passageiro que teve o voo cancelado no dia anterior também possui alta prioridade. Contudo, para a unidade marítima não importa a antecedência que o passageiro foi comunicado sobre uma eventual reprogramação do seu voo, mas sim tê-lo a bordo no horário no horário previsto.

A expressão (A-3) é muito semelhante à (A-1), e possui os mesmos sentidos. A variável u_i está relacionada à antecedência em que a unidade marítima é informada sobre a reprogramação do voo. Como no caso dos passageiros, uma antecedência mínima para comunicação é necessária para que sejam programadas as ações para receber a aeronave, visto que outras atividades (como operações com guindastes) necessitam ser interrompidas quando o helicóptero pousa no *helideck*. Como a informação dos horários programados dos voos é disponibilizada pelo sistema SITAER para toda a empresa, na prática, essa antecedência mínima sempre é atendida, de forma que são realizadas ações prévias para receber a aeronave, como solicitar o afastamento de PSV's que estejam realizando uma operação de *load* ou *backload* (carga ou descarga). Ou seja, podemos assumir que para a maioria dos casos $u_i = 0$.

A partir de (A-1), (A-2) e (A-3) é possível determinar o custo total do atraso do voo i, denotado por C_i^{tot} e definido em (A-4).

$$C_i^{\text{tot}} = \alpha\, C_i^{\text{sc}} + \beta \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} C_k^{\text{clt}} + \gamma \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} C_k^{\text{pax}} \tag{A-4}$$

As variáveis α, β e γ representam fatores do negócio que definem o quanto cada tipo de custo de atraso é relevante, sendo que $\alpha + \beta + \gamma = 1$. A equação (A-4) pode então ser reescrita em função de δ_i^{sch} e δ_i^{eff} em (A-5) e (A-6).

$$C_i^{\text{tot}} = \alpha \left(\delta_i^{\text{eff}} + a_k\, \delta_i^{\text{sch}}\right) + \beta \left(\delta_i^{\text{eff}} + \delta_i^{\text{sch}}\right) \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} p_k + \gamma \left(\delta_i^{\text{eff}} + \delta_i^{\text{sch}} \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} u_i\right) \tag{A-5}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

$$C_i^{\text{tot}} = \delta_i^{\text{eff}} \overbrace{\left(\alpha + \beta \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} p_k + \gamma\right)}^{c_i\,\lambda_i} + \delta_i^{\text{sch}} \overbrace{\left(\alpha\, u_i + \beta \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} p_k + \gamma \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} a_k\right)}^{c_i(1-\lambda_i)} \tag{A-6}$$

Considerando a equação da função objetivo do modelo de programação estocástica (3-1) do Capítulo 3, pode-se então deduzir valores para os parâmetros c_i e λ_i através das equações em (A-7).

$$c_i\,(1-\lambda_i) = \alpha\, u_i + \beta \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} p_k + \gamma \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} a_k; \quad c_i\,\lambda_i = \alpha + \beta \frac{1}{|\mathcal{K}_i|} \sum_{k \in \mathcal{K}_i} p_k + \gamma \tag{A-7}$$

Considerando as relações de (A-7) foram realizadas variações em α, β, γ, a_k, e p_k para obter os valores de c_i e λ_i. Assumiu-se $u_i = 0$ e os valores a_k, e p_k foram considerados iguais para todos os passageiros $k \in \mathcal{K}_i$. Os resultados são apresentados na Tabela A.1.

Tabela A.1: Valores de c_i e λ_i em função de α, β, γ, a_k, e p_k. Fonte: o autor.

				$a_k = 1$				$a_k = 0$			
				$p_k = 1$		$p_k = 10$		$p_k = 1$		$p_k = 10$	
	α	β	γ	c_i	λ_i	c_i	λ_i	c_i	λ_i	c_i	λ_i
$\alpha = \beta$	0.50	0.50	0.00	1.50	0.67	10.50	0.52	1.50	0.67	10.50	0.52
	0.45	0.45	0.10	1.55	0.65	9.65	0.52	1.45	0.69	9.55	0.53
	0.40	0.40	0.20	1.60	0.63	8.80	0.52	1.40	0.71	8.60	0.53
	0.35	0.35	0.30	1.65	0.61	7.95	0.52	1.35	0.74	7.65	0.54
	0.30	0.30	0.40	1.70	0.59	7.10	0.52	1.30	0.77	6.70	0.55
	0.25	0.25	0.50	1.75	0.57	6.25	0.52	1.25	0.80	5.75	0.57
	0.20	0.20	0.60	1.80	0.56	5.40	0.52	1.20	0.83	4.80	0.58
	0.15	0.15	0.70	1.85	0.54	4.55	0.52	1.15	0.87	3.85	0.61
	0.10	0.10	0.80	1.90	0.53	3.70	0.51	1.10	0.91	2.90	0.66
$0.9\,\alpha = \beta$	0.50	0.45	0.05	1.50	0.67	9.60	0.53	1.45	0.69	9.55	0.53
	0.45	0.41	0.15	1.55	0.65	8.84	0.53	1.41	0.71	8.70	0.53
	0.40	0.36	0.24	1.60	0.63	8.08	0.52	1.36	0.74	7.84	0.54
	0.35	0.32	0.34	1.65	0.61	7.32	0.52	1.32	0.76	6.99	0.55
	0.30	0.27	0.43	1.70	0.59	6.56	0.52	1.27	0.79	6.13	0.56
	0.25	0.23	0.53	1.75	0.57	5.80	0.52	1.23	0.82	5.28	0.57
	0.20	0.18	0.62	1.80	0.56	5.04	0.52	1.18	0.85	4.42	0.59
	0.15	0.14	0.72	1.85	0.54	4.28	0.52	1.14	0.88	3.57	0.62
	0.10	0.09	0.81	1.90	0.53	3.52	0.51	1.09	0.92	2.71	0.67
$1.1\,\alpha = \beta$	0.45	0.50	0.05	1.55	0.65	10.46	0.52	1.50	0.67	10.41	0.52
	0.40	0.44	0.16	1.60	0.63	9.52	0.52	1.44	0.69	9.36	0.53
	0.35	0.39	0.27	1.65	0.61	8.58	0.52	1.39	0.72	8.32	0.54
	0.30	0.33	0.37	1.70	0.59	7.64	0.52	1.33	0.75	7.27	0.55
	0.25	0.28	0.48	1.75	0.57	6.70	0.52	1.28	0.78	6.23	0.56
	0.20	0.22	0.58	1.80	0.56	5.76	0.52	1.22	0.82	5.18	0.58
	0.15	0.17	0.69	1.85	0.54	4.82	0.52	1.17	0.86	4.14	0.60
	0.10	0.11	0.79	1.90	0.53	3.88	0.51	1.11	0.90	3.09	0.64
	0.05	0.06	0.90	1.95	0.51	2.94	0.51	1.06	0.95	2.05	0.73

Para satisfazer às equações deduzidas em (A-7), considerando a não

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

negatividade dos parâmetros, necessariamente $\lambda_i \geq 0.5$. De fato, não há lógica do atraso efetivo pesar menos no custo total de atraso do que o atraso da programação, visto ambos impactam toda a cadeia de suprimentos. Contudo, o atraso da programação é uma informação definida com antecedência em relação ao voo e, sendo compartilhada, possibilita que os *stakeholders* reduzam seus impactos. Já o atraso efetivo só conhecido após a decolagem da aeronave para realização do voo.

Para aprimorar a percepção da influência do λ_i no custo total do atraso foram construídos gráficos (Figura A.1), utilizando a plataforma online Desmos[2] (para manipulação de equações em ambiente gráfico e dinâmico), a partir das equações do modelo de programação estocástica e uma amostra de 50 cenários de tempos efetivos. O gráficos mostram a variação do C_i^{tot} com o horário programado, para $\lambda_i = \{0.5, 0.6, ..., 1.0\}$. Utilizando como base o segundo voo planejado para uma aeronave, o eixo x dos gráficos referem-se ao horário da programação do voo e o eixo y ao custo total do atraso, que é influenciado pelas variações da duração do primeiro voo, assim como os tempos relativos ao processamento de passageiros e de preparação da aeronave para o segundo voo. O primeiro voo é planejado para decolar no minuto 0 com duração planejada de 90 minutos, e, considerando os valores da Tabela 4.1 do Capítulo 4 para o tempo entre-voos planejado (45 minutos) e atraso máximo (240 minutos), o segundo voo não pode ser programado para antes de 135 minutos, nem depois de 375 minutos.

O custo de atraso também é influenciado por uma janela de bloqueio no início da jornada com duração de 100 minutos, que gera um atraso no primeiro voo e, consequentemente no segundo também. Na Figura A.1 (a), considerou-se que essa janela possui 0% de probabilidade de ocorrência (ou seja, sem janela de bloqueio). Para $\lambda_i \neq 1.0$, o custo de atraso cresce com o adiamento do horário da programação do voo e, conforme esperado, o horário que retorna o menor custo é exatamente o horário mínimo, 135 minutos. Essa convergência no horário planejado, que também é observada em alguns resultados numéricos do Capítulo 4, ocorre porque os tempos planejados dos processos são significativamente superiores às médias dos respectivos tempos efetivos, para as PDF's utilizadas. Essa diferença dos tempos garante, para as situações sem rupturas, a robustez do planejamento dos voos. Sendo assim, para identificar outros pontos de mínimo nas curvas de custo de atraso versus horário programado, gerou-se os gráficos (b), (c), (d), (e) e (f) da Figura A.1, considerando, respectivamente, as probabilidades de 20%, 40%, 60%, 80% e

[2]O gráfico pode ser visualizado e manipulado, alterando parâmetros, no link `https://www.desmos.com/calculator/e1ccov7upk`.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

100% de ocorrência da janela de bloqueio.

Como pode ser observado, para (b) a (f) há valores de λ_i que retornam curvas com convexidade no intervalo $[135, 375]$, evidenciando que o custo total pode ser reduzido aumentando o atraso da programação para reduzir o atraso efetivo. Também é interessante observar que no caso de $\lambda_i = 1.0$ o atraso da programação torna-se indiferente, de forma que o fim na janela é um dos pontos de mínimo, o que indica esse valor λ_i pode ser distante da realidade operacional. Por fim, no caso de $\lambda_i = 0.5$ para a janela de bloqueio com 100% de probabilidade de ocorrência, gráfico (f) da Figura A.1, o início da janela do voo é um dos pontos ótimos, com menor custo do atraso total. Isso indica que $\lambda_i = 0.5$ também diverge da realidade operacional, visto que a solução ótima não seria programar no mesmo horário planejado diante de uma janela de bloqueio conhecida com 100% de probabilidade de ocorrência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

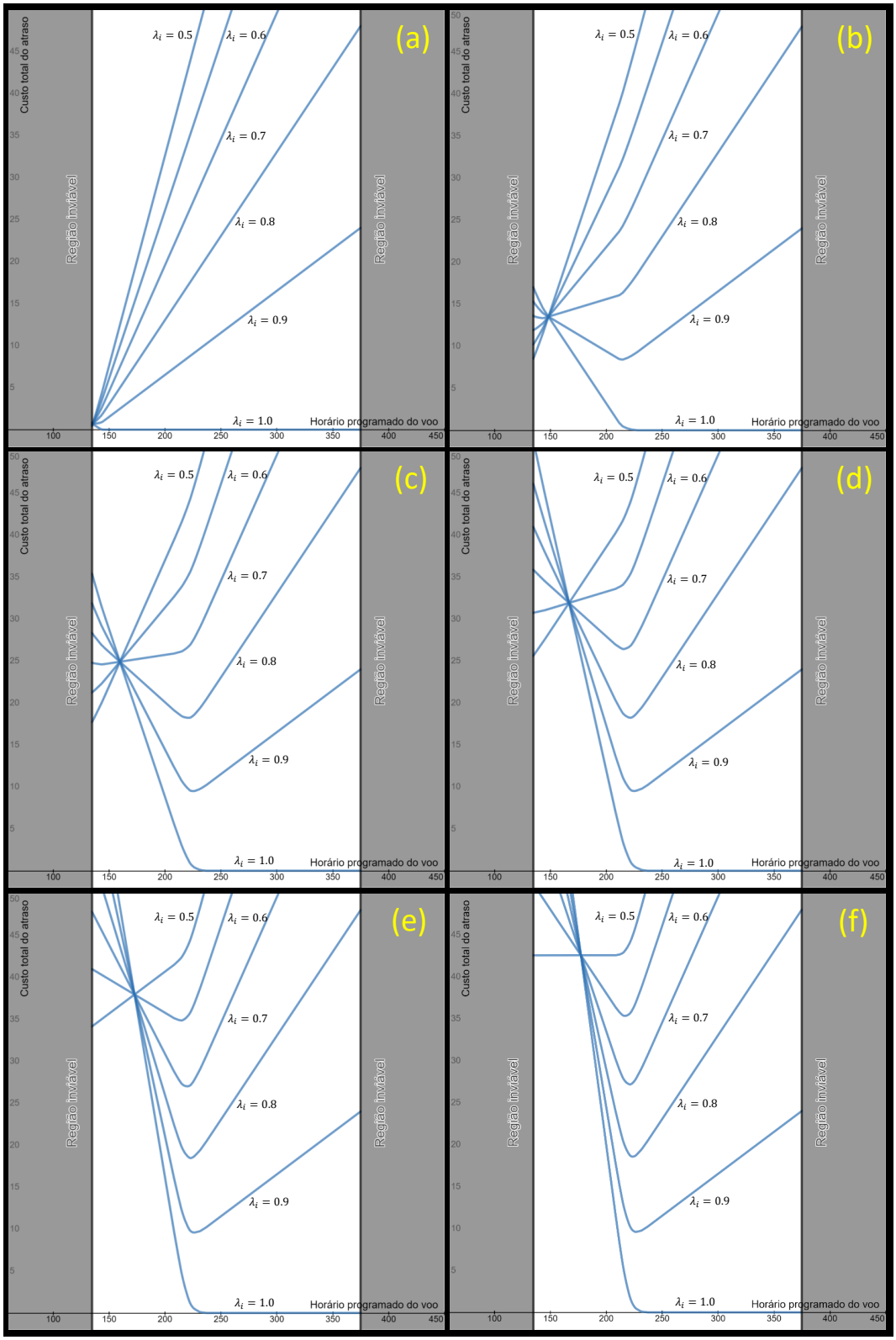


Figura A.1: Variação do custo total de atraso em função do horário programado do voo. Fonte: o autor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

B
Dados e ajustes de curvas

Nesse apêndice são apresentados os dados de entrada, assim como metodologias utilizadas no tratamento de dados. Esse apêndice está dividido em 3 seções: Dados de processamento de passageiros (Seção B.1); Dados de tempos operacionais dos helicópteros (Seção B.2) e Dados de intervalo entre decolagens e pousos de aeronaves comerciais (Seção B.3).

B.1
Dados de processamento de passageiros

Os dados de processamento de passageiros foram obtidos através relatórios do Sistema Integrado do Transporte Aéreo (SITAER). A Figura B.1 apresenta a tela inicial do sistema, e uma tela de exibição de relatório de status de passageiros (horários de registro de início em cada etapa do processo).

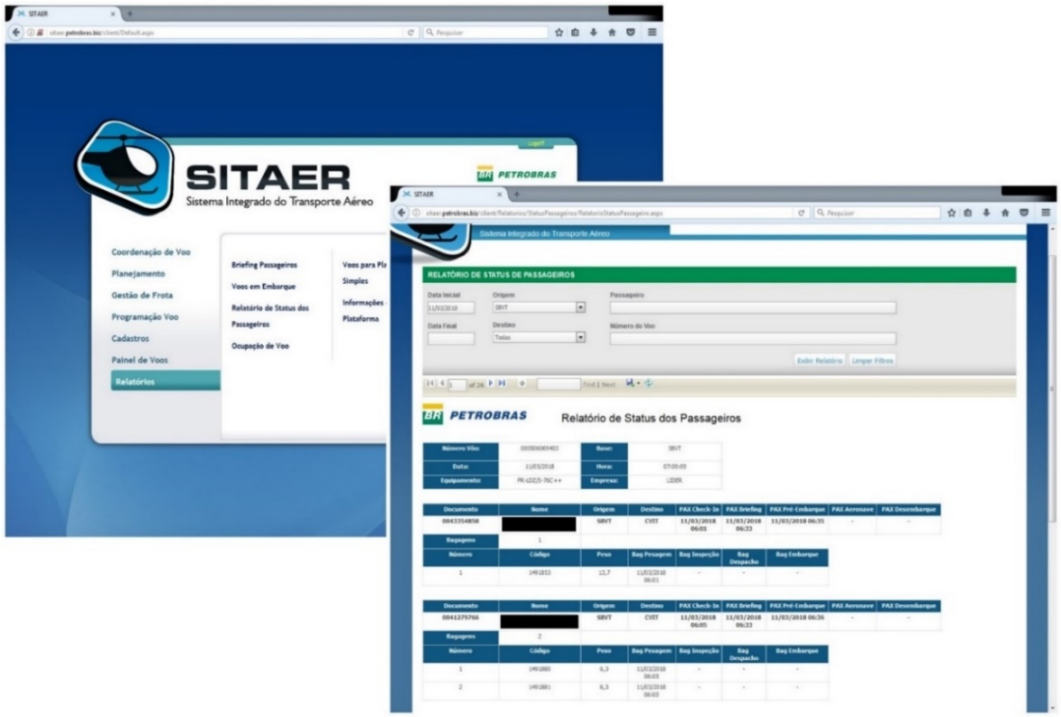


Figura B.1: Imagens da tela do SITAER. Fonte: Petrobras.

A partir dos registros de horários de processamentos de passageiros provenientes dos relatórios de 46 dias de operação no aeroporto de Vitória, foram obtidas amostras da antecedência de início de *check-in* em relação ao

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

horário programado para o voo (obtido através do horário de início de *check-in* do 1º passageiro do voo), tempo de *check-in* por passageiro (média por voo – obtida pela diferença do horário de início do 1º passageiro e último passageiro dividido pelo número de passageiros), número de passageiros no voo, tempo de espera e *briefing* de segurança (diferença entre o horário do último passageiro do *check-in* e o primeiro passageiro do pórtico) tempo de processamento no pórtico magnético (média por voo – obtida pela diferença do horário de início do 1º passageiro e último passageiro dividido pelo número de passageiros). A Figura B.2 e Figura B.3 apresentam diagramas *boxplot* da amostra coletada com e sem *outliers*, respectivamente. A Tabela B.1 apresenta os parâmetros calculados para tratamento *outliers* e a partir das amostras ajustas foram realizados ajustes de curvas de distribuição com o *Input Analizer* do Arena (Figura B.4 e Figura B.5).

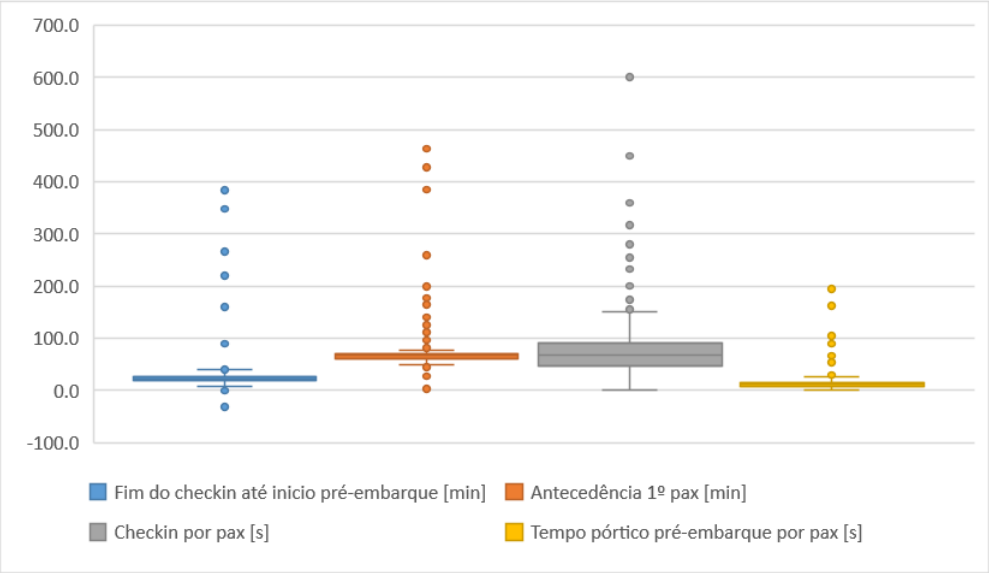


Figura B.2: *Boxplot* dos tempos de processamento de passageiros no terminal (com *outliers*). Fonte: o autor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

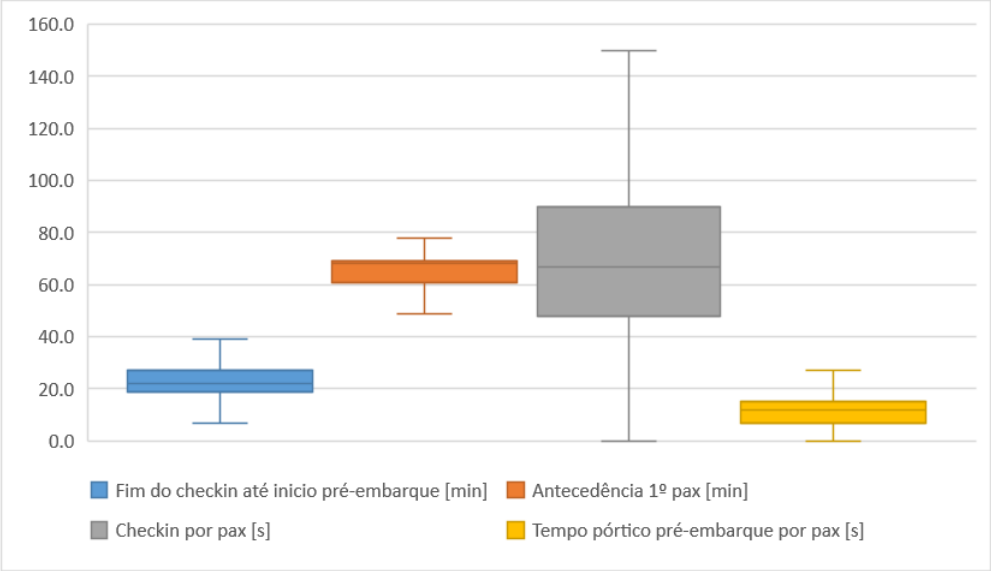


Figura B.3: *Boxplot* dos tempos de processamento de passageiros no terminal (sem *outliers*). Fonte: o autor.

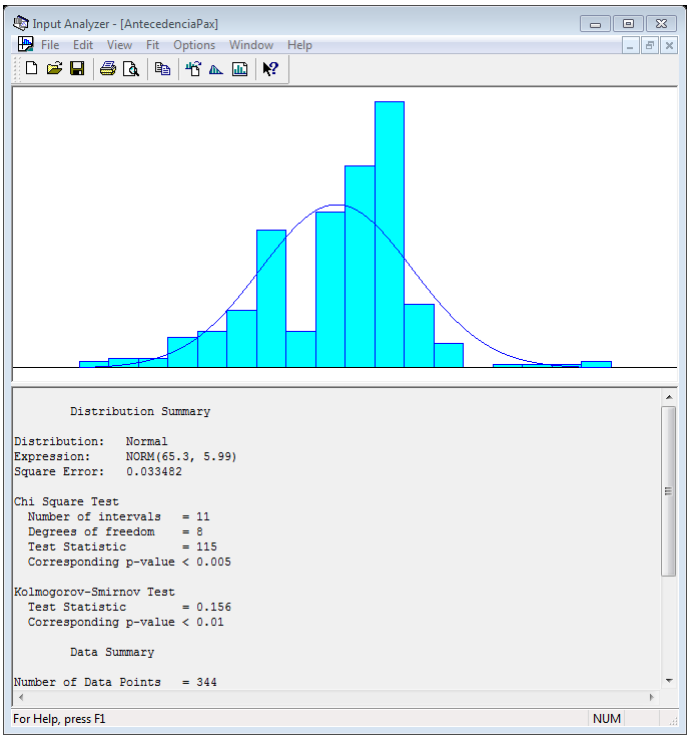


Figura B.4: Ajuste do *Input Analizer* para a antecedência de início de *check-in*. Fonte: o autor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

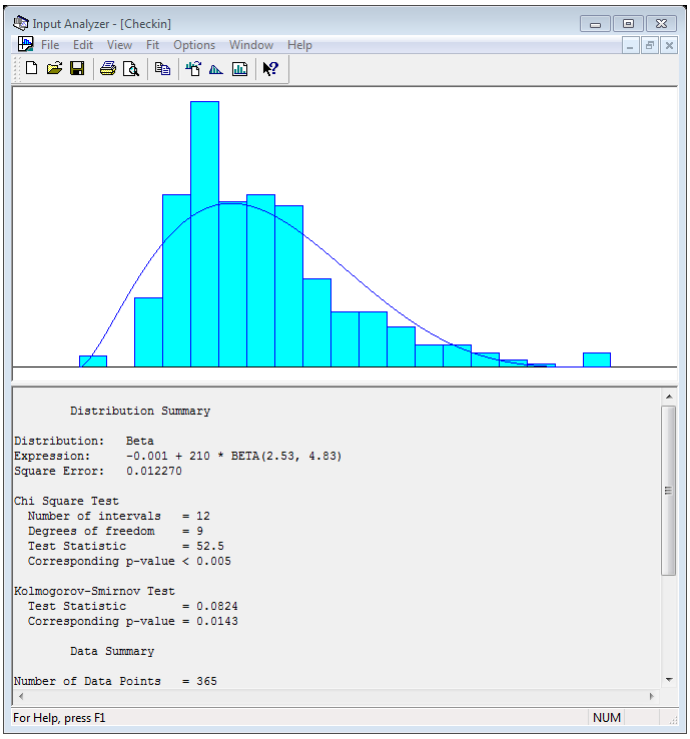


Figura B.5: Ajuste do *Input Analizer* para o tempo de *check-in* por passageiros. Fonte: o autor.

Tabela B.1: Parâmetros calculados para tratamento de *outliers*. Fonte: o autor.

Parâmetro	*Check-in* até pré-embarque [min]	Antecedência 1º pax [min]	*Check-in* por pax [s]	Tempo pórtico por pax [s]
Média	27.82	72.66	78.77	15.4
Desvio padrão	32.41	38.74	56.94	19.79
Quartil 1	20	61	48	7.5
Quartil 2	23	68	66.67	12
Quartil 3	27	69	90	15
Intervalo interquartil	7	8	42	7.5
Mínimo (para amostra sem *outliers*)	-1	37	-78	-15
Máximo (para amostra sem *outliers*)	48	93	216	37.5
Tamanho da amostra com *outliers*	356	374	374	356
Tamanho da amostra sem *outliers*	348	344	365	341

B.2
Dados de tempos operacionais dos helicópteros

Os tempos relacionados aos processos dos helicópteros foram obtidos através de um estudo de campo, realizado em 2016, no heliporto de Farol de São Thomé. Alguns tempos possuem bons ajustes de curvas, enquanto outros, devido a amostra pequena coletada, não retornaram ajustes com p-valor menor do que 0.005. Nesses casos utilizou-se distribuições triangulares para ajuste. O tempo de abastecimento está fortemente correlacionado com o tempo de voo, visto que missões mais longas requerem mais combustível. Sendo assim, é apresentado em uma subseção específica (B.2.1) a metodologia

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

para ajuste de curva do tempo de abastecimento. O tempo real de voo, um dos parâmetros estocásticos mais importantes do modelo, também está correlacionado com o tempo previsto de voo e é detalhado a metodologia na Subseção B.2.2. Os tempos de inspeção e *briefing* de porta de cabine possuíam amostra pequena, com ajustes pouco aderentes. Para esses tempos utilizou-se distribuições triangulares. A Figura B.6 e Tabela B.2 apresentam dados da amostra utilizada e as Figuras B.7 e B.8 apresentam os resultados do ajuste no *Input Analizer* para as distribuições triangulares para os tempos de *briefing* de porta de cabine e inspeção, respectivamente.

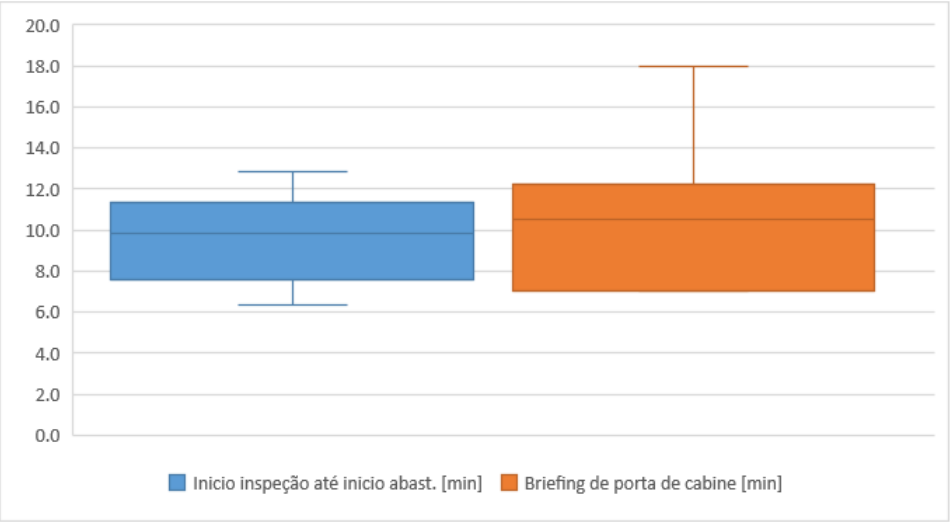


Figura B.6: *Boxplot* de tempos operacionais dos helicópteros. Fonte: o autor.

Tabela B.2: Parâmetros de amostras de tempos operacionais dos helicópteros. Fonte: o autor.

Parâmetro	Inicio inspeção até inicio abast. [min]	Briefing de porta de cabine [min]
Média	9.69	10.32
Desvio padrão	2.18	2.88
Quartil 1	7.59	7.00
Quartil 2	9.85	10.5
Quartil 3	11.34	12.25
Intervalo interquartil	3.76	5.25
Mínimo (para amostra sem *outliers*)	-3.68	-8.75
Máximo (para amostra sem *outliers*)	22.61	28.00
Tamanho da amostra com *outliers*	8	22
Tamanho da amostra sem *outliers*	8	22

B.2.1
Tempo de abastecimento da aeronave

O processo de abastecimento é composto, basicamente por 3 etapas: a chegada do caminhão e conexão da mangueira de abastecimento, o processo de bombeamento do combustível e desconexão da mangueira e saída do caminhão tanque. O processo que leva mais tempo, o bombeamento do combustível, varia

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

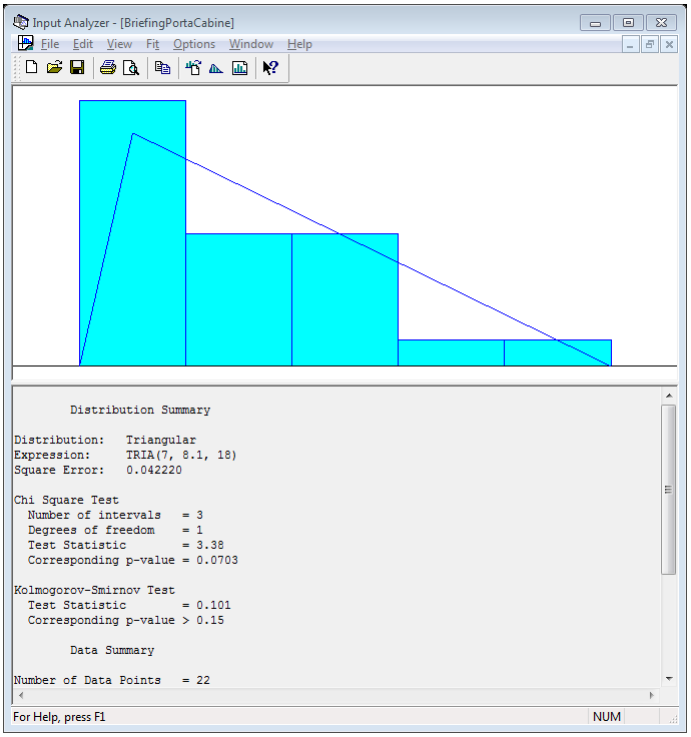


Figura B.7: Ajuste do *Input Analizer* para o tempo de *briefing* de porta de cabine (adotou-se a distribuição triangular). Fonte: o autor.

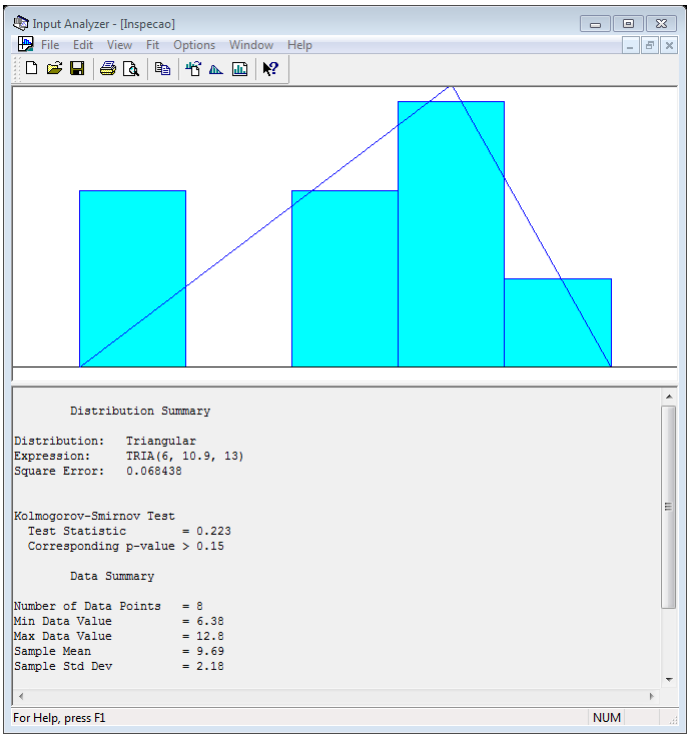


Figura B.8: Ajuste do *Input Analizer* para o tempo de inspeção (adotou-se a distribuição triangular). Fonte: o autor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

linearmente com a quantidade de combustível requerida pela aeronave. E como a quantidade de combustível requerida varia com o tempo de voo, deduz-se a correlação do tempo de abastecimento com o tempo de voo. Sendo assim, os dados de tempo de abastecimento foram tratados conjuntamente com os dados de tempos de voos. A Figura B.9 apresenta um gráfico com a amostra de tempo de voo e tempo da abastecimento com e sem tratamento de *outliers*.

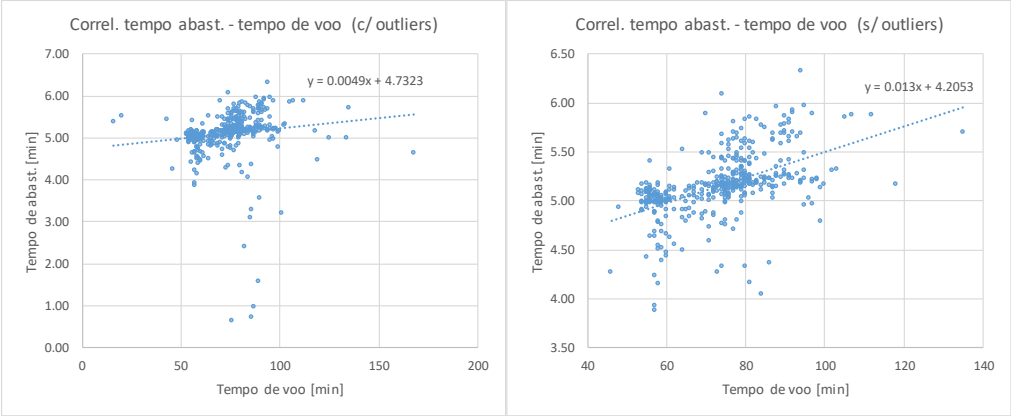


Figura B.9: Correlação entre o tempo de abastecimento e o tempo de voo (amostra com *outliers* à esquerda e sem *outliers* à direita). Fonte: o autor.

Para se determinar quais elementos da amostra seriam expurgados foi realizado o tratamento de *outliers* para a razão entre tempo de abastecimento e tempo de voo, cujos parâmetros são apresentados na Tabela B.3.

Tabela B.3: Parâmetros de amostras de tempos operacionais dos helicópteros. Fonte: o autor.

Parâmetro	Razão entre tempo de abast. e tempo de voo
Média	0.072
Desvio padrão	0.021
Quartil 1	0.064
Quartil 2	0.069
Quartil 3	0.08
Intervalo interquartil	0.016
Mínimo (para amostra sem *outliers*)	0.04
Máximo (para amostra sem *outliers*)	0.104
Tamanho da amostra com *outliers*	445
Tamanho da amostra sem *outliers*	429

Após o tratamento foi calculada a diferença entre o tempo estimado para o abastecimento através do tempo de voo e o tempo efetivo de abastecimento. Essa diferença foi ajustada no *Input Analizer*, conforme apresentado na Figura B.10.

B.2.2
Variação do tempo de voo da aeronave

O tempo de voo real possui uma variação em relação ao tempo de voo previsto, ou calculado. Com base em uma amostra de relatório de voos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

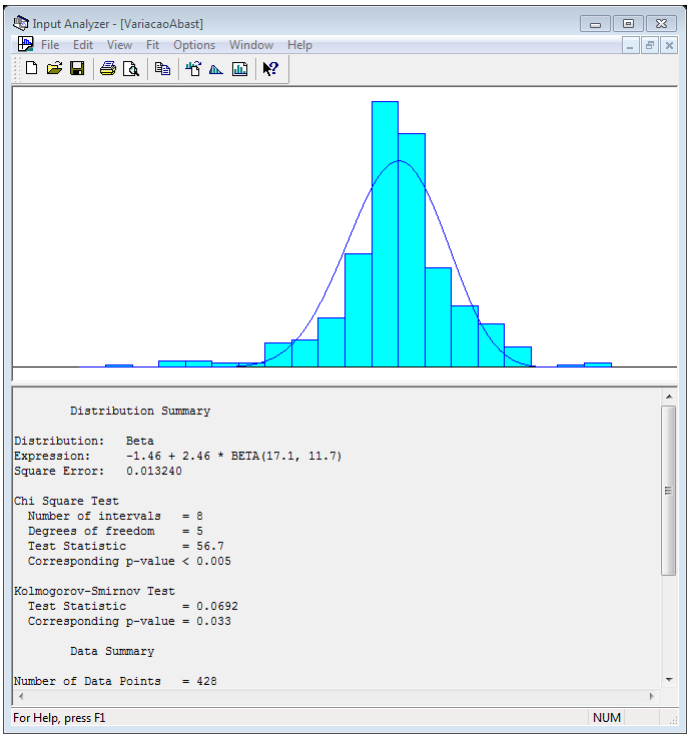


Figura B.10: Ajuste do *Input Analizer* para a diferença entre tempo de abastecimento estimado e tempo de abastecimento realizado. Fonte: o autor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

realizado de 2017 foi realizada uma análise dessa variação. Na Figura B.11 é apresentado um gráfico no qual pode ser observada essa correlação, e como os valores de tempo real de voo variam em torno da reta de melhor ajuste. Considerando a linearidade da relação, o tempo de voo real pode ser descrito em função do tempo de voo calculado como:

$$t_{voo\ real} = \alpha\, t_{voo\ calc} + \beta$$

Desprezando o parâmetro β, por simplificação, a equação se reduz a:

$$\alpha = t_{voo\ real}/t_{voo\ calc}$$

É apresentado no gráfico da Figura B.12 essa razão tempos (para amostra analisada) em função do tempo de voo calculado.

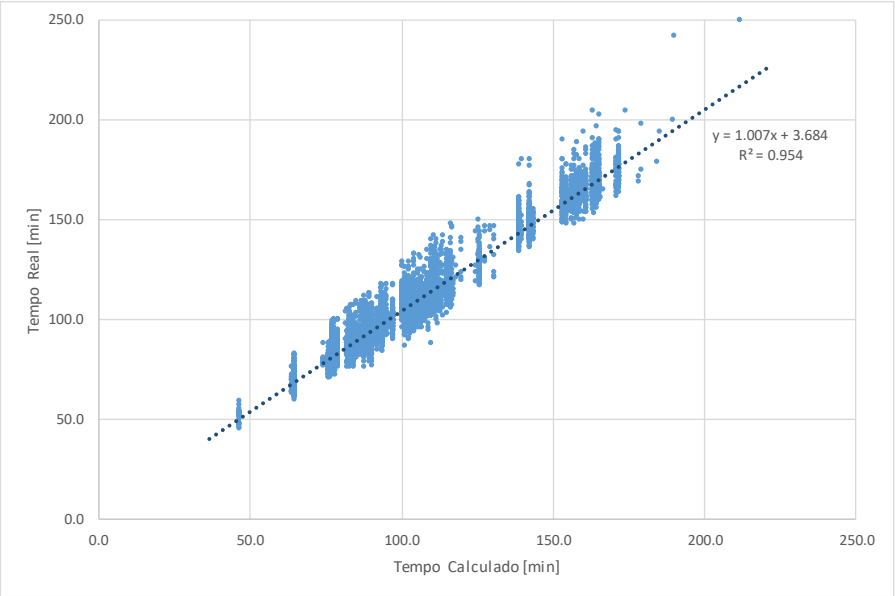


Figura B.11: Correlação entre tempo de voo calculado e tempo de voo real. Fonte: o autor.

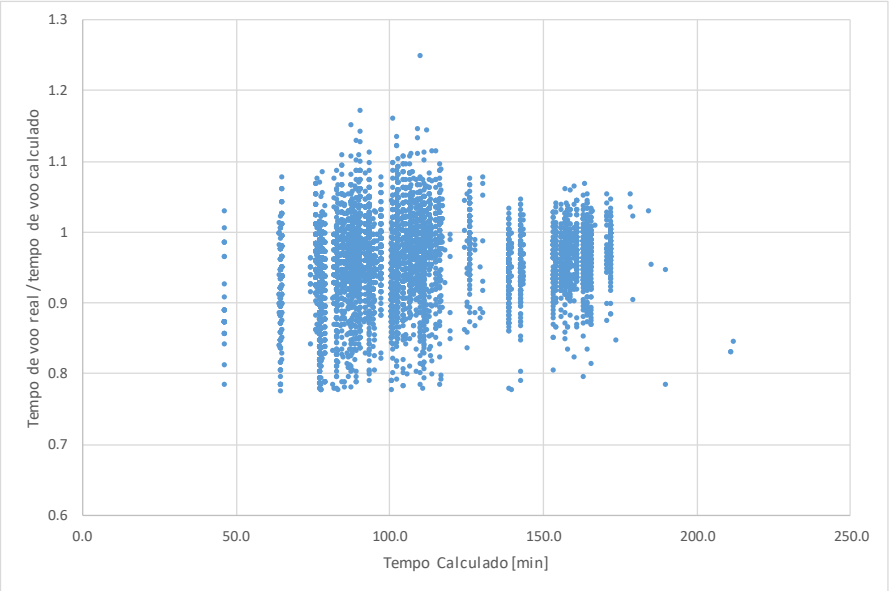


Figura B.12: Razão de tempos de voo real e calculado versus tempo de voo calculado. Fonte: o autor.

Para essa razão de tempos foi realizado o tratamento de *outliers* (Tabela B.4) e ajuste utilizando o *Input Analizer* (Figura B.13).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela B.4: Parâmetros do tratamento de *outliers* da razão entre tempo de voo realizado e tempo de voo calculado. Fonte: o autor.

Parâmetro	Tempo de voo real / tempo de voo calculado
Média	1.053
Desvio padrão	0.122
Quartil 1	1.004
Quartil 2	1.037
Quartil 3	1.076
Intervalo interquartil	0.072
Mínimo (para amostra sem *outliers*)	0.786
Máximo (para amostra sem *outliers*)	1.294
Tamanho da amostra com *outliers*	8739
Tamanho da amostra sem *outliers*	8576

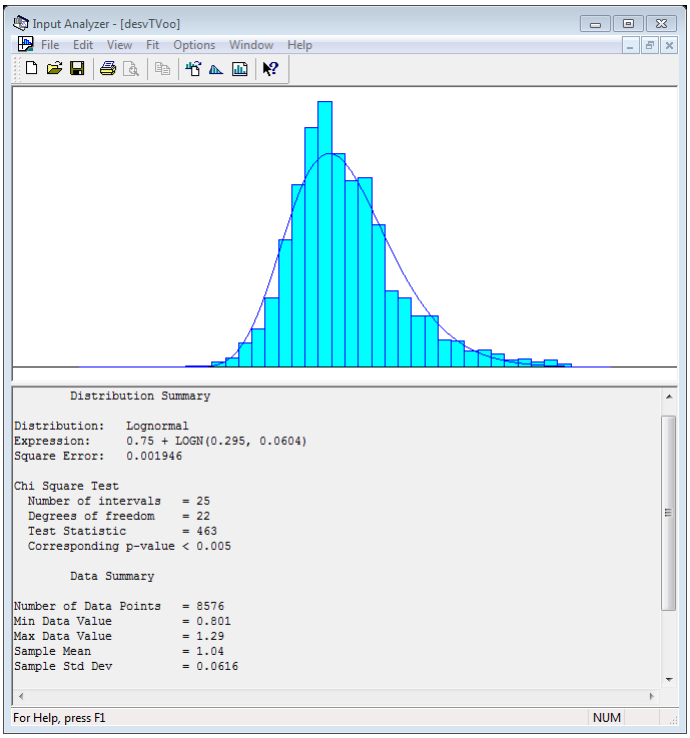


Figura B.13: Ajuste do *Input Analizer* para a razão entre tempo de voo realizado e tempo de voo calculado. Fonte: o autor.

B.3
Dados de intervalo entre decolagens e pousos de aeronaves comerciais

Os dados de intervalo entre decolagens e pousos de aeronaves comerciais do aeroporto de Vitória foram obtidos no banco de dados abertos do site da Agência Nacional da Aviação Civil (2020b). Os voos comerciais foram considerados no modelo de simulação com o único objetivo de gerar ocupação de recurso pista de decolagem. A Tabela B.5 apresenta os parâmetros calculados para tratamento *outliers* e a Figura B.14 os ajustes de curvas de distribuição utilizando o *Input Analizer*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela B.5: Parâmetros do tratamento de *outliers* do tempo entre decolagens/pousos. Fonte: o autor.

Parâmetro	Intervalo entre decolagens/pousos [min]
Média	45.9
Desvio padrão	282.4
Quartil 1	11
Quartil 2	25
Quartil 3	43
Intervalo interquartil	32
Mínimo (para amostra sem *outliers*)	-85
Máximo (para amostra sem *outliers*)	139
Tamanho da amostra com *outliers*	106941
Tamanho da amostra sem *outliers*	101415

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

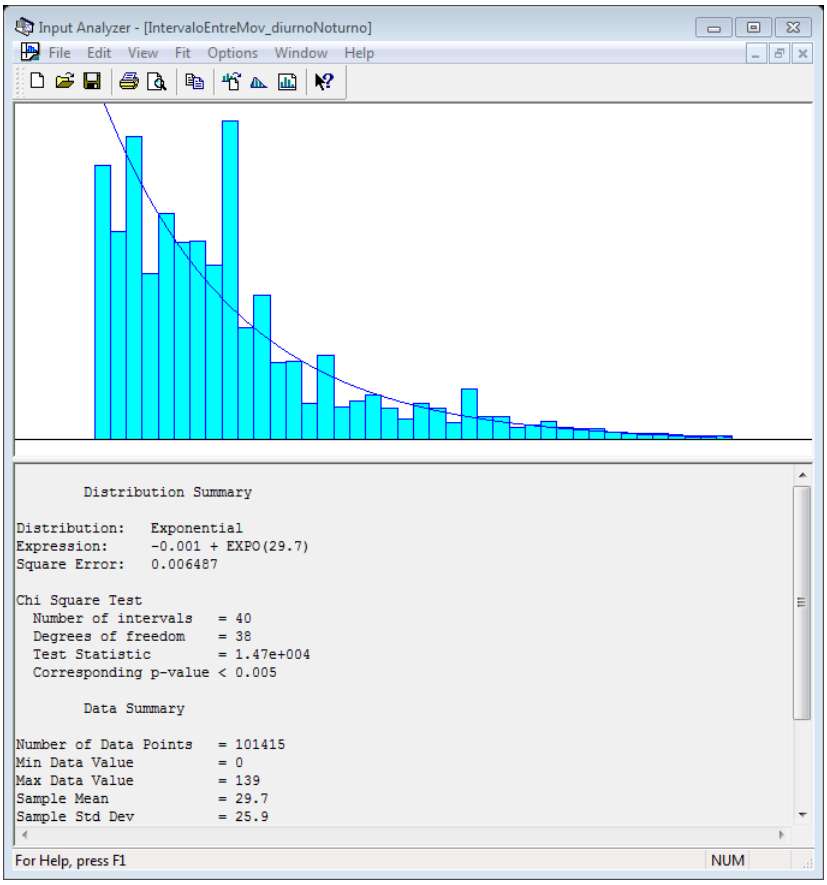


Figura B.14: Ajuste do *Input Analizer* para intervalo entre decolagens/pousos de aeronaves comerciais no aeroporto de Vitória. Fonte: o autor.

C
Estrutura de dados e resultados expandidos

Esse apêndice tem como objetivo apresentar em mais detalhes a estrutura de dados do modelo de otimização e simulação e apresentar resultados detalhados apresentados no Capítulo 4. Para suportar as diversas análises que foram realizadas, muitas além do escopo dessa dissertação, foi necessário desenvolver um *framework* para lidar com os dados de entrada e saída. Dessa forma utilizou-se algumas bibliotecas da linguagem Julia para estruturar os dados, escrever e ler arquivos e gerar valores aleatórios para as simulações de Monte Carlos (do SAA) e de eventos discretos. A Figura C.1 apresenta um fluxo dessa estrutura com os *inputs* e *outputs* e os pacotes do Julia utilizados, e a Figura C.2 apresenta uma imagem da saída de resultados do otimizador.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

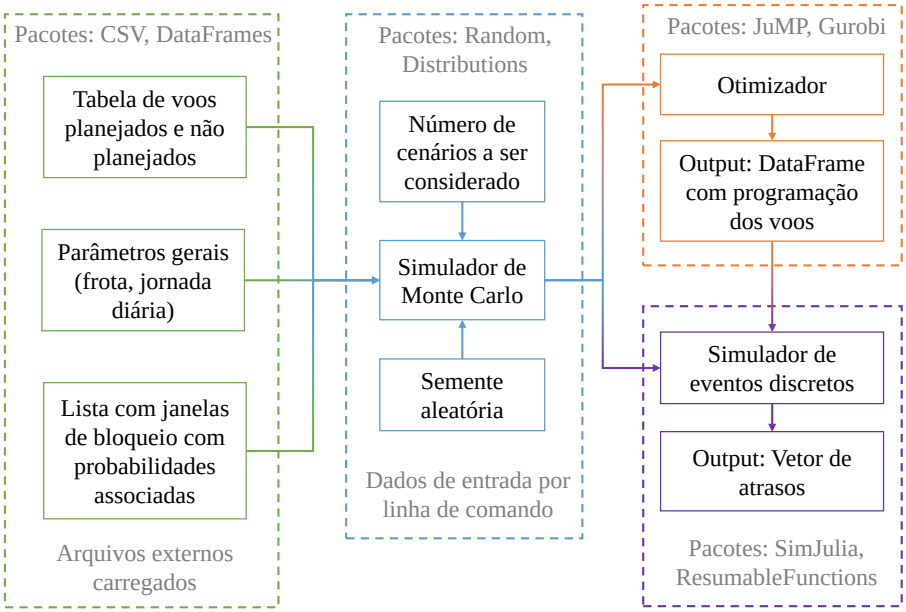


Figura C.1: Fluxo de dados dos modelos de otimização e simulação. Fonte: o autor.

Conforme pode ser visto na Figura C.2, uma das colunas se refere ao cenário, que no caso do cenário zero refere-se às variáveis de primeiro estágio. A coluna "sch_eff_dep" corresponde à variável d_i^s e a coluna "sch_aircraft" corresponde à aeronave alocada ao voo. As demais colunas se referem aos dados de entrada. Como seria inviável apresentar todos os cenários referentes a todas as instâncias que foram analisadas, definiu-se apresentar apenas as variáveis decididas do 1º estágio, ou seja, horários programados, d_i^0, e aeronaves

julia> out.sch

2412×9 DataFrame

Row	scenario	flight	flight_time	unplanned_flight	penalty_delay	stoch_ratio	planned_dep	sch_eff_dep	sch_aircraft
	Int64	Int64	Float64	Bool	Float64	Float64	Float64	Float64	Int64
1	0	1	75.0	1	10.0	0.8	0.0	0.0	1
2	0	2	75.0	1	10.0	0.8	0.0	0.0	2
3	0	3	75.0	1	10.0	0.8	0.0	0.0	3
4	0	4	75.0	0	1.0	0.8	0.0	120.0	1
5	0	5	75.0	0	1.0	0.8	5.0	120.0	3
6	0	6	75.0	0	1.0	0.8	10.0	120.0	2
7	0	7	75.0	0	1.0	0.8	120.0	240.0	2
8	0	8	75.0	0	1.0	0.8	125.0	240.0	1
9	0	9	75.0	0	1.0	0.8	130.0	240.0	3
10	0	10	75.0	0	1.0	0.8	240.0	360.0	3
11	0	11	75.0	0	1.0	0.8	245.0	360.0	1
12	0	12	75.0	0	1.0	0.8	250.0	360.0	2
13	1	1	74.3879	1	10.0	0.8	0.0	-17.6735	1
14	1	2	85.1834	1	10.0	0.8	0.0	-24.6965	2
15	1	3	75.4489	1	10.0	0.8	0.0	-5.63439	3
16	1	4	82.9489	0	1.0	0.8	0.0	85.9359	1
17	1	5	78.149	0	1.0	0.8	5.0	102.963	3
18	1	6	70.4198	0	1.0	0.8	10.0	120.0	2
19	1	7	78.809	0	1.0	0.8	120.0	228.117	2
20	1	8	86.923	0	1.0	0.8	125.0	202.456	1
21	1	9	81.1379	0	1.0	0.8	130.0	212.456	3
22	1	10	79.962	0	1.0	0.8	240.0	319.527	3
⋮									
2390	199	2	75.0233	1	10.0	0.8	0.0	-5.21472	2
2391	199	3	72.5159	1	10.0	0.8	0.0	-10.9663	3
2392	199	4	88.4338	0	1.0	0.8	0.0	124.946	1
2393	199	5	78.3376	0	1.0	0.8	5.0	92.3343	3

Figura C.2: *Output* do otimizador. Fonte: o autor.

alocadas. Sendo assim os dados apresentados no Capítulo 4 sobre as instâncias reais já estão no formato final para essa dissertação, contudo as instâncias referentes às análises de convergência e de qualidade da solução estocástica necessitam ser detalhadas. Dessa foram condensados nas Tabelas C.1 a C.9 todos os resultados de horário programado e aeronave alocada para todas as instâncias da análise de convergência, em função dos parâmetros que foram alterados. A Tabela C.10 apresenta os resultados das instâncias da análise de qualidade, incluindo as informações sobre o tempo de CPU.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.1: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_1 e $\lambda_i = 0.6$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	0|2	0|3	120|3	360|2	360|3	120|2	240|3	360|1	120|1	240|2	240|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|3	240|2	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|2	360|1	120|2	360|2	240|3
	3	0|1	0|2	0|3	240|3	120|2	360|3	120|3	360|2	240|1	120|1	240|2	360|1
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|3	120|2	240|1	360|2	120|3	360|1	240|3
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	240|3	240|2	360|2	120|2	120|1	360|1
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|2	360|3	120|1	240|1	360|2
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|3	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	240|1	240|3	360|2	120|2	120|3	360|3	120|1	240|2	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	240|2	120|1	360|1	120|2	240|3	360|3	120|3	240|1	360|2
25	0	0|1	0|2	0|3	240|2	240|1	360|2	120|2	120|1	360|3	120|3	240|3	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	240|1	240|3	360|3	120|2	120|3	360|1
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|2	360|3	120|1	240|1	360|2
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|1	240|2	360|1	120|2	240|3	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	240|1	120|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3	120|1	240|1	360|1
100	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|1	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|3	120|2	240|1	360|2	120|3	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3	120|2	240|2	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|3	240|2	360|1	120|1	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
200	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2	120|1	240|2	360|3
500	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1	120|2	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|1	240|3	360|2	120|3	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|1	120|1	240|1	360|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.2: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_1 e $\lambda_i = 0.7$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	360|2	360|1	120|1	240|2	240|3
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|3	360|3	120|3	240|2	360|2
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|3
	3	0|1	0|2	0|3	240|2	120|2	360|3	120|3	240|3	240|1	120|1	360|1	360|2
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|1	240|1	360|1	240|2	120|2	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|3	120|1	240|1	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	240|3	240|2	360|1	120|2	120|1	360|2	120|3	240|1	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|1	120|2	360|3	240|3	240|2	360|1	120|3	240|1	360|2
25	0	0|1	0|2	0|3	240|2	240|1	360|1	120|2	120|1	360|2	120|3	240|3	360|3
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|3	360|3	120|2	240|2	360|2
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|1	240|1	360|1
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	240|2	240|3	360|2	120|2	240|1	360|3	120|1	120|3	360|1
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|3	360|2	240|1	120|1	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|1
100	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|2	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|2
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1	120|3	240|1	360|3
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|1	360|2	120|1	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|1	360|3	120|2	240|3	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|2
200	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|3
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|2	120|1	240|2	360|1
500	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1	120|2	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|1	240|3	360|2	120|3	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|1	120|1	240|1	360|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.3: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_1 e $\lambda_i = 0.8$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	0|2	0|3	120|3	360|3	360|2	120|2	240|1	360|1	120|1	240|3	240|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|3	240|2	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	360|1	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	240|2
	3	0|1	0|2	0|3	240|3	120|2	360|1	120|3	360|3	240|1	120|1	240|2	360|2
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|1	360|2	120|1	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|2	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	240|1	240|3	360|2	120|2	120|3	360|3	120|1	240|2	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
25	0	0|1	0|2	0|3	240|2	240|1	360|3	120|2	120|1	360|2	120|3	240|3	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|1	240|1	360|3	120|2	240|2	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|1	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|1	240|2	240|1	360|3	120|1	120|3	360|2
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|3	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|1	240|2	360|3	120|2	240|1	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|1	240|1	120|1	360|2
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2
100	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|1	120|2	240|1	360|3	120|3	240|3	360|2
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|2	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|3	360|3	120|1	240|1	360|2
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|1	120|2	240|3	360|3	120|3	240|1	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|3	360|2
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3	120|2	240|3	360|2
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2
200	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	4	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2	120|1	240|2	360|3
500	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|1	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|2
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1	120|2	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|1	240|3	360|2	120|3	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|1	120|1	240|1	360|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.4: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_2 e $\lambda_i = 0.6$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|3	120|1	240|2	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|1	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	240|2	120|3	360|1	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2	120|1	240|2	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|1	360|1	120|1	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|3	120|1	240|1	360|1	120|3	240|2	360|2
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|1	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3	120|3	240|1	360|1
25	0	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|3	120|3	240|3	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|2	360|2
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|2
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1	120|1	240|2	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|3
100	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|2	120|3	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|2
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3	120|3	240|1	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|1	360|2	120|1	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|1	360|1	120|2	240|3	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|3
200	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3
	3	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2	120|1	240|2	360|3
500	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1	120|2	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|1	240|3	360|2	120|3	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|1	120|1	240|1	360|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.5: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_2 e $\lambda_i = 0.7$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	240|2	120|3	240|3	360|2	120|2	360|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|2	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	240|2	120|3	360|2	120|1	240|3	360|1	120|2	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|2
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|2
	9	0|1	0|2	0|3	240|3	120|1	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
25	0	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|3	120|3	240|3	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|2	240|1	360|3
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|1	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|1	240|1	360|1
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1	120|1	240|2	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|1	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|3	360|2	120|1	240|1	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|3
100	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|1	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|2	240|1	360|3	120|3	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|3	360|2	120|1	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|1	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3	120|2	240|3	360|2
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
200	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1
	3	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|3
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2	120|1	240|2	360|3
500	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1	120|2	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|1	240|3	360|2	120|3	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|1	120|1	240|1	360|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.6: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_2 e $\lambda_i = 0.8$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	240|3	120|2	240|2	360|3	120|3	360|2	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|3	360|3	120|2	240|2	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	240|3	120|3	360|3	120|1	240|2	360|1	120|2	240|1	360|2
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|2	120|3	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|1	120|1	240|2	360|3	120|2	240|1	360|2
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|3	120|1	240|1	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|1	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2
	9	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1	120|3	240|2	360|2
25	0	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|3	120|3	240|3	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|2	360|2
	2	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|1	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|1	240|2	360|3	120|2	240|1	360|1
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|1	360|2
	8	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|1	360|2	120|1	240|3	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|2	240|3	360|1	120|1	240|1	360|2
100	0	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	1	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|2	120|2	240|2	360|3
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|3	240|3	360|2	120|1	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|3	240|1	360|1	120|1	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3	120|2	240|3	360|2
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|1	120|2	240|1	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
200	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|3	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|1	120|2	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3
	3	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|1	240|2	360|2	120|2	240|3	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|2	240|1	360|2	120|1	240|3	360|1	120|3	240|2	360|3
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|2	120|1	240|1	360|1	120|3	240|3	360|3
	7	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|3	240|1	360|2	120|2	240|2	360|3
	9	0|1	0|2	0|3	120|3	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1	120|1	240|2	360|3
500	0	0|1	0|2	0|3	120|1	240|3	360|1	120|2	240|2	360|3	120|3	240|1	360|2
	1	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	2	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|1	120|2	240|3	360|2
	3	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|1	240|3	360|2	120|3	240|1	360|3
	4	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|2	360|1
	5	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|1	240|2	360|1	120|3	240|1	360|3
	6	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|3	240|2	360|2	120|2	240|3	360|1
	7	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|3	120|1	240|3	360|2	120|2	240|1	360|1
	8	0|1	0|2	0|3	120|1	240|2	360|2	120|3	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
	9	0|1	0|2	0|3	120|2	240|3	360|2	120|3	240|2	360|1	120|1	240|1	360|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.7: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_3 e $\lambda_i = 0.6$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	260|3	130|2	360|1	380|3	120|1	240|1	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	360|1	130|2	240|1	380|3
	2	0|1	10|2	20|3	140|3	130|2	380|3	260|3	250|2	370|2	120|1	240|1	360|1
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	250|2	120|1	260|3	380|3	240|1	360|1	370|2
	4	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	250|2	130|2	360|1	380|3	140|3	240|1	370|2
	5	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	370|2	120|1	260|3	360|1	240|1	250|2	380|3
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	260|3	370|2	140|3	240|1	360|1	120|1	250|2	380|3
	7	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	380|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	360|1
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	240|1	250|2	380|3	130|2	260|3	370|2
	9	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	380|3	130|2	260|3	370|2	140|3	250|2	360|1
25	0	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	380|3	250|2	240|1	360|1	140|3	260|3	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	360|1	120|1	240|1	380|3	130|2	260|3	370|2
	2	0|1	10|2	20|3	140|3	130|2	380|3	120|1	260|3	360|1	250|2	240|1	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	360|1	250|2	140|3	260|3	370|2	120|1	240|1	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	260|3	120|1	250|2	360|1	130|2	370|2	380|3
	5	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	240|1	260|3	370|2
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	360|1	140|3	260|3	380|3	120|1	250|2	370|2
	7	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	370|2	240|1	260|3	380|3	140|3	250|2	360|1
	8	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	140|3	240|1	380|3	120|1	260|3	360|1
	9	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	360|1	130|2	260|3	370|2	120|1	240|1	380|3
100	0	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	260|3	380|3	240|1	250|2	360|1
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	250|2	260|3	360|1	130|2	240|1	380|3
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	250|2	380|3	260|3	240|1	360|1
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	140|3	260|3	360|1	120|1	240|1	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	260|3	380|3	250|2	240|1	370|2
	5	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	370|2	130|2	250|2	380|3	120|1	260|3	360|1
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	370|2	140|3	250|2	360|1	120|1	260|3	380|3
	7	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	360|1	140|3	240|1	370|2	250|2	260|3	380|3
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	130|2	240|1	360|1
	9	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	360|1	120|1	260|3	370|2	130|2	240|1	380|3
200	0	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	240|1	260|3	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	380|3	130|2	260|3	370|2	250|2	240|1	360|1
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	260|3	240|1	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	360|1	120|1	250|2	370|2	130|2	260|3	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	380|3	120|1	260|3	360|1	140|3	250|2	370|2
	5	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	250|2	380|3	240|1	260|3	360|1
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	120|1	240|1	360|1	140|3	260|3	380|3
	7	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	260|3	120|1	250|2	360|1	130|2	370|2	380|3
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	360|1	140|3	240|1	370|2	130|2	250|2	380|3
	9	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	380|3	120|1	260|3	360|1	250|2	240|1	370|2
500	0	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	360|1	130|2	250|2	380|3	140|3	240|1	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	360|1	120|1	260|3	370|2	250|2	240|1	380|3
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	380|3	140|3	250|2	360|1	130|2	260|3	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	360|1	120|1	260|3	370|2	140|3	240|1	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	380|3	120|1	260|3	370|2	130|2	250|2	360|1
	5	0|1	10|2	20|3	130|2	260|3	370|2	120|1	250|2	360|1	140|3	240|1	380|3
	6	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	260|3	140|3	250|2	370|2	130|2	380|3	360|1
	7	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	380|3	120|1	260|3	360|1	130|2	240|1	370|2
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	130|2	240|1	360|1
	9	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	370|2	260|3	250|2	360|1	120|1	240|1	380|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.8: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_3 e $\lambda_i = 0.7$. Fonte: o autor.

		Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	380|3	130|2	240|1	370|2	120|1	260|3	360|1
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	360|1	130|2	250|2	380|3	140|3	260|3	370|2
	2	0|1	10|2	20|3	140|3	130|2	360|1	260|3	250|2	380|3	120|1	240|1	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	250|2	120|1	260|3	360|1	240|1	370|2	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	250|2	130|2	260|3	360|1	140|3	370|2	380|3
	5	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	260|3	130|2	360|1	380|3	250|2	240|1	370|2
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	370|2	140|3	250|2	360|1	120|1	260|3	380|3
	7	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	250|2	120|1	370|2	360|1	140|3	260|3	380|3
	8	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	370|2	120|1	260|3	360|1	250|2	240|1	380|3
	9	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	380|3	130|2	250|2	360|1	140|3	240|1	370|2
25	0	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	380|3	250|2	240|1	370|2	140|3	260|3	360|1
	1	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	370|2	120|1	260|3	380|3	130|2	250|2	360|1
	2	0|1	10|2	20|3	140|3	130|2	370|2	120|1	260|3	360|1	250|2	240|1	380|3
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	260|3	250|2	140|3	380|3	360|1	120|1	240|1	370|2
	4	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	380|3	120|1	250|2	360|1	130|2	260|3	370|2
	5	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	380|3	120|1	250|2	370|2	130|2	260|3	360|1
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	380|3	140|3	260|3	360|1	120|1	240|1	370|2
	7	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	370|2	260|3	240|1	360|1	140|3	250|2	380|3
	8	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	360|1	140|3	260|3	370|2	120|1	240|1	380|3
	9	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	360|1	130|2	260|3	370|2	120|1	240|1	380|3
100	0	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	260|3	380|3	240|1	250|2	360|1
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	250|2	260|3	370|2	130|2	240|1	380|3
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	260|3	240|1	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	140|3	260|3	360|1	120|1	240|1	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	260|3	360|1	250|2	240|1	380|3
	5	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	370|2	130|2	250|2	380|3	120|1	260|3	360|1
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	370|2	140|3	250|2	380|3	120|1	260|3	360|1
	7	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	370|2	140|3	240|1	360|1	250|2	260|3	380|3
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	130|2	240|1	360|1
	9	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	380|3	120|1	260|3	360|1	130|2	240|1	370|2
200	0	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	240|1	260|3	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	260|3	380|3	250|2	240|1	360|1
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	250|2	380|3	260|3	240|1	360|1
	3	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	360|1	120|1	250|2	370|2	130|2	260|3	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	380|3	120|1	260|3	360|1	140|3	250|2	370|2
	5	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	250|2	380|3	240|1	260|3	360|1
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	120|1	240|1	360|1	140|3	260|3	380|3
	7	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	260|3	120|1	250|2	370|2	130|2	380|3	360|1
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	360|1	140|3	240|1	370|2	130|2	250|2	380|3
	9	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	360|1	120|1	260|3	370|2	250|2	240|1	380|3
500	0	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	360|1	130|2	250|2	380|3	140|3	240|1	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	360|1	120|1	260|3	370|2	250|2	240|1	380|3
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	380|3	140|3	250|2	360|1	130|2	260|3	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	360|1	120|1	260|3	370|2	140|3	240|1	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	380|3	120|1	260|3	370|2	130|2	250|2	360|1
	5	0|1	10|2	20|3	130|2	260|3	370|2	120|1	250|2	360|1	140|3	240|1	380|3
	6	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	260|3	140|3	250|2	370|2	130|2	380|3	360|1
	7	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	380|3	120|1	260|3	370|2	130|2	240|1	360|1
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	130|2	240|1	360|1
	9	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	370|2	260|3	250|2	360|1	120|1	240|1	380|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.9: Resultados detalhados da análise de convergência para tmt_3 e $\lambda_i = 0.8$

$\|\mathcal{S}^*\|$	ς	Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	260|3	130|2	250|2	370|2	120|1	380|3	360|1
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	250|2	140|3	240|1	380|3	260|3	360|1	370|2
	2	0|1	10|2	20|3	140|3	130|2	360|1	260|3	250|2	380|3	120|1	240|1	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	250|2	120|1	260|3	360|1	240|1	380|3	370|2
	4	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	360|1	130|2	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3
	5	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	360|1	240|1	250|2	370|2	120|1	260|3	380|3
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	120|1	240|1	360|1
	7	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	260|3	120|1	250|2	360|1	140|3	380|3	370|2
	8	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	360|1	120|1	260|3	370|2	140|3	250|2	380|3
	9	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	370|2	240|1	250|2	380|3	140|3	260|3	360|1
25	0	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	380|3	250|2	240|1	370|2	140|3	260|3	360|1
	1	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	370|2	120|1	240|1	380|3	130|2	260|3	360|1
	2	0|1	10|2	20|3	140|3	130|2	260|3	120|1	370|2	380|3	250|2	240|1	360|1
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	260|3	250|2	140|3	370|2	380|3	120|1	240|1	360|1
	4	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	380|3	120|1	250|2	370|2	130|2	260|3	360|1
	5	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	380|3	130|2	240|1	370|2	250|2	260|3	360|1
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	380|3	140|3	260|3	360|1	120|1	250|2	370|2
	7	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	360|1	260|3	250|2	380|3	140|3	240|1	370|2
	8	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	360|1	140|3	260|3	380|3	120|1	240|1	370|2
	9	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	360|1	130|2	260|3	370|2	120|1	240|1	380|3
100	0	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	260|3	380|3	240|1	250|2	360|1
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	250|2	260|3	370|2	130|2	240|1	380|3
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	260|3	240|1	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	120|1	240|1	360|1
	4	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	380|3	130|2	260|3	370|2	250|2	240|1	360|1
	5	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	380|3	130|2	250|2	360|1	120|1	260|3	370|2
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	370|2	140|3	250|2	380|3	120|1	260|3	360|1
	7	0|1	10|2	20|3	120|1	130|2	380|3	140|3	240|1	360|1	250|2	260|3	370|2
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	130|2	240|1	360|1
	9	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	360|1	120|1	260|3	380|3	130|2	250|2	370|2
200	0	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	240|1	260|3	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	260|3	380|3	250|2	240|1	360|1
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	360|1	130|2	250|2	380|3	260|3	240|1	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	360|1	120|1	250|2	370|2	130|2	260|3	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	130|2	240|1	370|2	120|1	260|3	360|1	140|3	250|2	380|3
	5	0|1	10|2	20|3	120|1	140|3	370|2	130|2	250|2	380|3	240|1	260|3	360|1
	6	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	370|2	120|1	240|1	360|1	140|3	260|3	380|3
	7	0|1	10|2	20|3	240|1	140|3	260|3	120|1	250|2	360|1	130|2	380|3	370|2
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	360|1	140|3	240|1	370|2	130|2	250|2	380|3
	9	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	370|2	120|1	260|3	380|3	250|2	240|1	360|1
500	0	0|1	10|2	20|3	120|1	260|3	360|1	130|2	250|2	380|3	140|3	240|1	370|2
	1	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	360|1	120|1	260|3	370|2	250|2	240|1	380|3
	2	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	380|3	140|3	250|2	360|1	130|2	260|3	370|2
	3	0|1	10|2	20|3	130|2	250|2	360|1	120|1	260|3	370|2	140|3	240|1	380|3
	4	0|1	10|2	20|3	140|3	240|1	380|3	120|1	260|3	370|2	130|2	250|2	360|1
	5	0|1	10|2	20|3	130|2	260|3	370|2	120|1	250|2	360|1	140|3	240|1	380|3
	6	0|1	10|2	20|3	120|1	240|1	260|3	140|3	250|2	370|2	130|2	380|3	360|1
	7	0|1	10|2	20|3	140|3	250|2	380|3	120|1	260|3	370|2	130|2	240|1	360|1
	8	0|1	10|2	20|3	120|1	250|2	370|2	140|3	260|3	380|3	130|2	240|1	360|1
	9	0|1	10|2	20|3	130|2	140|3	370|2	260|3	250|2	360|1	120|1	240|1	380|3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1821636/CA

Tabela C.10: Resultados detalhados da análise de qualidade (soluções dos problemas RP e EV). Fonte: o autor.

Probabilidade	Problema	T. CPU	Índice do voo / Horário programado | aeronave alocada											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5%	EV	0.82	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|2	360|2
	RP	8.61	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
15%	EV	2.47	6|1	3|2	8|3	123|2	243|2	368|3	126|1	246|1	363|2	128|3	248|3	366|1
	RP	10.91	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|1	120|1	240|1	360|2	120|3	240|3	360|3
20%	EV	9.76	12|1	9|2	13|3	132|1	253|3	373|3	129|2	249|2	369|2	133|3	252|1	372|1
	RP	9.64	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|1
25%	EV	14.57	16|1	15|2	19|3	135|2	255|2	379|3	136|1	256|1	375|2	139|3	259|3	376|1
	RP	17.99	0|1	0|2	0|3	120|3	240|2	360|2	120|1	240|3	360|3	120|2	240|1	360|1
30%	EV	0.55	22|1	21|2	23|3	143|3	261|2	382|1	141|2	262|1	383|3	142|1	263|3	381|2
	RP	13.96	0|1	0|2	0|3	120|2	240|2	360|3	120|1	240|1	360|2	120|3	240|3	360|1
35%	EV	1.04	28|1	27|2	29|3	147|2	267|2	388|1	148|1	269|3	387|2	149|3	268|1	389|3
	RP	15.69	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|2	360|2
40%	EV	0.46	35|1	31|2	35|3	155|3	275|3	395|1	151|2	271|2	395|3	155|1	275|1	391|2
	RP	29.70	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|1
45%	EV	0.38	39|1	38|2	40|3	158|2	278|2	400|3	159|1	279|1	399|1	160|3	280|3	398|2
	RP	90.69	0|1	0|2	0|3	120|1	240|1	360|3	120|2	240|3	360|1	120|3	240|2	360|2
50%	EV	0.37	45|1	44|2	47|3	167|3	287|3	407|3	165|1	285|1	404|2	164|2	284|2	405|1
	RP	113.85	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|1	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|2
55%	EV	0.36	50|1	49|2	51|3	170|1	290|1	409|2	171|3	289|2	411|3	169|2	291|3	410|1
	RP	162.87	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|3	360|1	120|1	240|2	360|2
60%	EV	0.40	57|1	54|2	57|3	177|3	297|1	417|1	174|2	294|2	417|3	177|1	297|3	414|2
	RP	231.59	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|2	120|2	240|3	360|3	120|1	240|2	360|1
65%	EV	0.42	61|1	60|2	62|3	181|1	301|1	422|3	182|3	302|3	421|1	180|2	300|2	420|2
	RP	242.52	0|1	0|2	0|3	120|3	240|1	360|3	120|2	240|3	360|1	120|1	240|2	360|2
80%	EV	0.65	78|1	77|2	79|3	199|3	317|2	439|3	198|1	318|1	437|2	197|2	319|3	438|1
	RP	456.63	86|1	86|2	85|3	205|3	326|2	445|3	206|1	325|3	446|2	206|2	326|1	446|1
85%	EV	0.60	83|1	84|2	83|3	204|2	323|3	443|3	203|3	323|1	444|2	203|1	324|2	443|1
	RP	218.53	90|1	91|2	88|3	208|3	331|2	448|3	210|1	328|3	451|2	211|2	330|1	450|1