



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE E SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES
DE ROTAS AÉREAS

Sandro Jerônimo de Almeida

Belo Horizonte

Março de 2017

Sandro Jerônimo de Almeida

Análise e simulação baseada em agentes de rotas aéreas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Poley
Martins Ferreira

Belo Horizonte

Março de 2017

A447a

Almeida, Sandro Jerônimo.

Análise e simulação baseada em agentes de rotas aéreas
[manuscrito] / Sandro Jerônimo Almeida. – 2017.
xiv, 108 f., enc.: il.

Orientador: Ricardo Poley Martins Ferreira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 99-108.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aerovias - Teses. 3. Aeronaves -
Consumo de combustível - Teses. 4. Mineração de dados (Computação) -
Teses. 5. Métodos de simulação - Teses. I. Ferreira, Ricardo Poley
Martins. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"ANÁLISE E SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES DE ROTAS
AÉREAS"**

SANDRO JERÔNIMO DE ALMEIDA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto Mecânico**".

Tese aprovada no dia 17 de março de 2017.

Por:

Prof. Ricardo Poley Martins Ferreira
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Ricardo Luiz Utsch de Freitas Pinto
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Luiz Ricardo Pinto
Departamento de Engenharia de Produção/UFMG

Prof. Nilson Tadeu Ramos Nunes
Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia/UFMG

Prof. Luis Enrique Zarate Galvez
Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais

Prof. Denilson Laudaes Rodrigues
Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais

Resumo

Companhias aéreas e Governos têm trabalhado para otimizar o uso de seus recursos e operar de forma eficiente, frente à crescente demanda de voos, aumento de preço de combustíveis, custos operacionais e infraestrutura limitada. Alguns trabalhos têm analisado o desempenho de um conjunto restrito de voos, enquanto outros exploraram problemas pontuais, como por exemplo, a otimização de trajetórias e de alocação de horários de voos. Este trabalho tem por objetivo principal o estudo e o desenvolvimento de tecnologias que permitam às companhias aéreas melhorarem a eficiência operacional de seus voos. Por meio de técnicas de análise, mineração e visualização de dados, conduziu-se um estudo do desempenho de 36.190 voos realizados em diferentes regiões do mundo. Isso permitiu mostrar a relação entre os dados, como por exemplo, a relação entre a distância voada por fases de voo e aeroportos. Essas relações e métricas extraídas podem servir como referência para companhias aéreas utilizarem em seus estudos de melhoria de operações de voo. Este trabalho traz como contribuições a sistematização de um processo e implementação de ferramenta computacional escalável para obtenção, extração, transformação, limpeza, enriquecimento, tratamento de inconsistências, processamento, mineração, visualização de grandes volumes dados de voos e descoberta de padrões operacionais de voos. Um sistema multiagente também foi proposto e desenvolvido visando:

- (i) a reprodução voos históricos através de suas trajetórias e computação/estimativa de métricas operacionais desses voos, como distância voada e consumo de combustível;
- (ii) A simulação de cenários hipotéticos e estratégias operacionais. Em estudos de casos conduzidos mostrou-se que companhias aéreas podem economizar até 15% de combustível e aumentar a disponibilidade de assentos em um cenário irrestrito e ideal.

Os resultados alcançados trazem ainda luz à duas hipóteses:

- (i) o estudo evidenciou a possibilidade de uso da tecnologia de sistemas multiagentes para computação, de forma escalável e distribuída, de grandes volumes de dados. Neste caso, o sistema multiagente pode ser visto como ferramenta alternativa a “processamento *Big Data*”;
- (ii) A construção do simulador e resultados obtidos com sua aplicação fortalecem a hipótese de que uma abordagem mais ampla e holística, que combine a aplicação conjunta de várias técnicas, tende a ser mais eficiente do que uma abordagem pontual.

Palavras chaves: consumo de combustível, desempenho de aeronaves, dados ADS-B, simulação multiagente, rotas aéreas, *bigdata*, mineração de dados.

Abstract

Airlines and Governments have worked to optimize the use of their resources and operate efficiently, given the growing flight demand, increasing oil price, operational costs, and limited infrastructures. Some works have analyzed the performance of a limited set of flights, while others have explored specific problems, such as the flight trajectory optimization and the flight schedule problems. The objective of this work is the study and the development of technologies that can lead airlines to improve the efficiency of their flights operations. By using data analysis, mining and visualizations techniques, we conducted a performance study of 36,190 worldwide flights. This analysis showed relations among the flights data, for example, the aircrafts distance flown per flight phase and airports. These identified relations and extracted performances metrics can serve as reference for airlines consider in their operations improvement studies. A contribution of this work is the systematization of a process and implementation of scalable computational tools for data: obtaining, extraction, transformation, cleaning, enrichment, inconsistency treatment, processing, data-mining, visualization of large flights datasets and operational flight data patterns discovery.

A multiagent system was also proposed and developed aiming:

- i) to reproduce historical flights data through their trajectories and the computation/estimation of operational metrics, such as flight distance flown and fuel burned.
- ii) to simulate hypothetical scenarios and operational strategies. Case studies showed that airlines could save about 15% of fuel and increase seat availability in an unconstrained and best-case scenario.

The obtained results reinforce two hypotheses:

- i) the study showed the possibility of using multiagent system technology for scalable and distributed computation of large datasets. In this case, the multiagent system can be seen as an alternative tool for *Big Data processing*.
- ii) the obtained results by using the simulator reinforce the idea that a holistic approach which combine different techniques, tend to be more efficient that a punctual technique application.

Keywords: fuel consumption, aircraft performance, ADS-B data, multiagent simulation, routes, bigdata, data mining.

*Aos meus pais
Pelo amor
e incentivo.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a DEUS pela oportunidade, pela saúde física e mental, por permitir que este trabalho fosse finalizado e por colocar todas as pessoas mencionadas a seguir no meu caminho.

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Ricardo Poley pela motivação, inspiração, paciência, dedicação, solicitude, apoio nos momentos mais difíceis, amizade e contribuições de natureza técnica, científica e humanística para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação acadêmica, profissional e humana. São inestimáveis o valor e a gratidão pela orientação recebida.

Agradeço ao professor Dr. Morton O'Kelly pela co-orientação e por ter me aceitado e recebido na Universidade Estadual de Ohio nos EUA. As discussões acerca do trabalho foram muito ricas e produtivas. O apoio no processo de instalação e convivência na cidade de Columbus (Ohio) é inesquecível.

Agradeço aos professores do departamento de Engenharia Mecânica da UFMG pela contribuição na minha formação. Destaque para o professor Dr. Ricardo Luiz Utsch pelos seus conselhos serenos e sugestões, e para o falecido professor Dr. Marcos Pinotti pela inspiração, suas aulas, dicas e conexões com a inovação. Os funcionários, demais professores do departamento e membros da banca de defesa de tese também terão sempre a minha gratidão por todas as contribuições e auxílios.

Agradeço aos colegas do laboratório *Center for Urban and Regional Analysis (CURA)* na *The Ohio State University* pelo acolhimento, parceria e troca de conhecimentos. Matthew Adair, Shaun Fontanella, Jake Carr, Calvin Tribby, Ying Song, Bo Zhao e Caio Franco, têm o meu respeito e admiração. No *Laboratório de Otimização e Simulação de Sistemas (LABOSS)* da UFMG agradeço aos meus colegas Milad Yousefi e Moises Dornelles pela convivência harmônica e aprendizado mútuo. Agradeço também ao Comandante Pedro Scorza, até então Diretor Técnico de Operações da empresa GOL linhas aéreas, pela recepção e abertura para discussões práticas no Centro de Operações da empresa.

No âmbito familiar, agradeço aos meus pais pelo amor incondicional, incentivo e inspiração. Aos meus amigos brasileiros em Ohio agradeço pela sincera amizade e companhia.

Aos amigos de Belo Horizonte, irmãos e familiares agradeço pela paciência durante a minha ausência. A Lívia Borges, minha namorada, agradeço especialmente pelo carinho, atitude motivadora na reta final da escrita da tese e criteriosa revisão do texto.

No âmbito das instituições, agradeço:

- As agências de fomento CAPES, pela bolsa no programa de doutorado sanduíche no exterior (PDSE), e FAPEMIG (projeto APQ-01356-13) pelo apoio financeiro oferecido.
- A *The Ohio State University* e *Center for Urban and Regional Analysis* pelo acolhimento, infraestrutura e recursos para participação em evento técnico-científico nos EUA.
- A empresa *Planefinder.net* e a instituição *EUROCONTROL* pela disponibilização de dados para condução de estudos acadêmicos.
- A Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela acesso gratuito aos estudos, ambiente acadêmico e infraestrutura favoráveis à minha formação.

Conteúdo

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	1
1.1 Análise de dados	3
1.1.1 Objetivo	5
1.2 Simulação multiagente	6
1.2.1 Objetivo	7
1.3 Organização do texto	7
2 Revisão Bibliográfica	8
2.1 Métricas de desempenho operacional de companhias aéreas e aeronaves	8
2.1.1 Desempenho de aeronaves	8
2.1.2 Custo operacional	9
2.1.3 Consumo de combustível	11
2.1.4 Atrasos	12
2.2 Tecnologias digitais no futuro da aviação	13
2.2.1 Portais de dados online e a Internet das coisas	14
2.3 Sistemas Multiagentes	15
2.3.1 Sistemas complexos e simulação computacional	17
2.3.2 Agentes	17
2.3.3 <i>Frameworks</i> de simulação multiagentes	19
2.4 Trabalhos Relacionados	22

3	Análise de Dados de Voos	25
3.1	Obtenção de dados	27
3.2	Extração, Transformação e Carregamento	28
3.2.1	Extração de dados	30
3.2.2	Transformação de dados	30
3.2.3	Carregamento de dados	33
3.3	Processamento de dados	35
3.3.1	Segmentação de trajetória de voo	35
3.3.2	Métricas de desempenho	37
3.4	Visualização de dados	40
3.5	Mineração de dados	42
3.6	Resultados	43
3.6.1	Visão geral dos voos	43
3.6.2	Análise das distâncias de voos	44
3.6.3	Análise de consumo de combustível	53
3.6.4	Mineração de dados	57
4	Simulação Multiagente	60
4.1	Sistema computacional	61
4.1.1	Modelagem multiagente	62
4.1.2	Modelo de dados	63
4.1.3	Diagrama de classes	65
4.1.4	Computação distribuída	67
4.1.5	Simulação de cenários e políticas	68
4.2	Modelos computacionais	70
4.2.1	Deslocamento de aeronaves	70
4.2.2	Consumo de combustível	72
4.2.3	Vento	78
4.2.4	Validação de modelos	78
4.3	Resultados	83
4.3.1	Estratégias de substituição de aeronaves e trajetórias	83
4.3.2	Estratégia para diminuição de atrasos em voo	85

5	Comentários e Conclusões	93
5.1	Limitações e trabalhos futuros	97
	Bibliografia	99
	Apêndice	108

Lista de Figuras

1.1	Trechos e rotas	2
2.1	Estrutura de custos de companhias aéreas em 2014 [EUROCONTROL, 2015]	10
2.2	Coletores ADS-B e uma rede de cobertura [FlightAware, 2017a]	14
2.3	Estrutura de um sistema <i>RDP</i> [Sichman, 2003]	16
2.4	Agentes interagindo com o ambiente [Russell and Norvig, 2003]	18
2.5	Visão geral do <i>framework Repast</i> [North and Macal, 2005]	22
2.6	Interface gráfica de usuário da ferramenta TAAM [Jeppesen, 2015]	24
3.1	Metodologia de análise, mineração e visualização de dados de voo	25
3.2	Dados ADS-B	27
3.3	Dados obtidos, sua extração, transformação e organização final	29
3.4	Procedimento de extração de dados	31
3.5	Procedimento de transformação de dados	32
3.6	Procedimento de carregamento de dados	34
3.7	Algoritmo de classificação sequencial de fases de voos	36
3.8	Métricas de distância: GCD vs. WPD	38
3.9	Modelos de aeronaves e configuração de assentos adotada	40
3.10	Alguns dados sobre o aeroporto de São Francisco, CA, EUA	42
3.11	Distribuição de voos obtida da Planefinder.net (Outubro de 2013)	44
3.12	Amostra de voos utilizada na análise: uma visão geral de partidas e rotas	44
3.13	Distância da fase de voo pela distância total	45
3.14	Desvios por fases de voo	46
3.15	<i>Waypoints</i> de 32 voos entre Las Vegas (VN) e Long Beach (CA) nos EUA	47

3.16	Voos operados por companhias aéreas da Europa e seus desvios médios em trajetórias	52
3.17	Voos operados por companhias aéreas nos EUA e seus desvios médios em trajetórias	53
3.18	Consumo de combustível por fase e distância de voos	54
3.19	Eficiência de consumo de combustível por fase de voo de companhias aéreas na Europa	55
3.20	Eficiência de consumo de combustível por fase de voo de companhias aéreas nos EUA	55
3.21	Variação da massa inicial da aeronave e sua eficiência de consumo por segmento de voo	57
3.22	Regras extraídas utilizando o algoritmo Apriori	58
4.1	Arquitetura do IFMAS	60
4.2	Tela principal do simulador	62
4.3	Diagrama de entidade e relacionamento	64
4.4	Diagrama de classes do simulador	66
4.5	Distribuição do processamento das simulações	67
4.6	Painel de parâmetros de simulação	69
4.7	Trajetória real vs. estimada com diferentes altitudes	70
4.8	Algoritmo de processamento de deslocamento discreto de aeronaves	71
4.9	Voo <i>LMI2933</i> : trajetória realizada pela aeronave [The Aviation Herald, 2017]	80
4.10	Voo <i>LMI2933</i> : variação da altitude na trajetória	81
4.11	Voo <i>LMI2933</i> : variação da velocidade na trajetória	81
4.12	Voo <i>LMI2933</i> : dados ADS-B obtidos da trajetória	82
4.13	Distribuição dos voos da companhia aérea easyJet	86
4.14	Distribuição média dos atrasos: antes e depois	89
4.15	Redução de atraso vs. aumento do consumo de combustível	90
4.16	Pesquisa sobre a preferência/prioridade dos passageiros Europeus [easyJet, 2013]	92

Lista de Tabelas

3.1	Desvios por fases de voo	46
3.2	Desvios por modelo de aeronave	48
3.3	Desvios nos aeroportos europeus	50
3.4	Desvios nos aeroportos norte-americanos	51
3.5	Modelo de escolha de modelos de aeronaves	59
4.1	Voo <i>LMI2933</i> : avaliação de métricas de desempenho	83
4.2	Modelo de escolha de modelos de aeronaves	84
4.3	Distribuição de voos selecionados por aeronave e dia do mês	87
4.4	Distribuição de atrasos de voos da empresa easyJet (Setembro de 2013) . .	87
4.5	Impacto da aceleração de aeronaves no tempo e consumo de combustível de voos	91

Lista de Siglas

ADS-B - Automatic dependent surveillance-broadcast
ATM - Air Traffic Management
BADA - Base of Aircraft Data
BSD - Berkeley Software Distribution
CI - Cost Index
DER - Diagrama de entidade e relacionamento
ETL - Extraction, Transformation and Loading
FAA - Federal Aviation Administration
FACET - Future Air Traffic Management Concepts Evaluation Tool
FIPA - Foundations for Intelligent Physical Agents
FDR - Flight data recorder
GE - General Eletric
GCD - Great circle distance
GDP - Ground Delay Program
GNU - General Public License
IA - Inteligência artificial
IAD - Inteligência artificial distribuída
ICAO - International Civil Aviation Organization
IFMAS - Intelligent Flight Multiagent System
IoT - Internet of Things
JADE - Java Agent DEvelopment Framework
LABOSS - Laboratório de Otimização e Simulação de Sistemas
MASON - Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods
MBI - Modelos baseados em indivíduos
MTOW - Maximum take-off weight
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NextGen - Next Generation Air Transportation System
NM - Nautical Miles

OEW - Operating empty weight
RDP - Resolução distribuída de problemas
SESAR - Single European Sky ATM Research
SGBD - Sistema de gerenciamento de banco de dados
SMA - Sistemas Multiagentes
TSFC - Thrust specific fuel consumption
WPD - Waypoint distance

Capítulo 1

Introdução

A busca pela eficiência operacional na aviação é uma atividade contínua e importante. Governos, fabricantes de aeronaves e componentes, autoridades de controle de tráfego aéreo e companhias aéreas tentam otimizar o uso dos seus recursos e operar de forma eficiente, tendo em vista a crescente demanda por voos, aumento do preço do petróleo, custos operacionais e infraestrutura limitada.

De acordo com relatório da Eurocontrol (*Seven-year forecast report*), durante o período de 2015-2021 o tráfego aéreo na Europa deverá crescer a uma taxa anual média de 2,5% [Eurocontrol, 2015]. A agência federal de aviação dos Estados Unidos (FAA¹) estima que nos próximos 20 anos (2015-2035) o volume de passageiros em voos domésticos nos Estados Unidos deverá crescer a uma taxa de 2% ao ano [Federal Aviation Administration, 2015]. Vale destacar que esse crescimento tem influência diretamente nas emissões de CO_2 na atmosfera.

Alguns trabalhos tem abordado formas de otimizar essas questões, como a redução de atrasos em voos [Tu et al., 2005], minimização de custos operacionais e consumo de combustível [Lee and Balakrishnan, 2008], melhoria do uso de aeroportos [Bertsimas et al., 2011], otimização de escala de voos [Yan and Tseng, 2002] e escalas e manutenções de aeronaves [Sriram and Haghani, 2003]. Os agentes envolvidos na aviação podem usar diferentes estratégias para resolver essas questões. Por exemplo, companhias aéreas podem economizar combustível e reduzir emissão de CO_2 a partir da seleção de aeronaves mais apropriadas para certos tipos de rotas, considerando que a eficiência de aeronaves varia de acordo com as fases e tipo de missão do voo.

Embora existam várias técnicas para aumentar a eficiência de uma companhia aérea, tais técnicas tem sido aplicadas em problemas pontuais. Um exemplo que contextualiza essa abordagem, é o GE Flight Quest Challenge [General Electric, 2014]. A empresa

¹Do inglês: Federal Aviation Agency

General Eletric (GE) propôs em 2012 e 2013 uma competição, na qual os participantes deveriam desenvolver algoritmos para geração de trajetórias de voos de custo mínimo, seguindo um modelo de custos fornecidos pela empresa.

Para ilustrar a complexidade relacionada a escolha de estratégias de gestão dos custos operacionais de uma companhia aérea considere o cenário descrito a seguir: a companhia opera os seguintes trechos: i) voo de São Paulo (SP) para Brasília(DF), ii) voo do Rio de Janeiro (RJ) para Brasília (DF) e iii) voo de Brasília para Salvador (BA). Considere que inicialmente estava planejado que o trecho [Brasília→Salvador] seria realizado pela mesma aeronave que fez o voo [São Paulo→Brasília], Figura 1.1. Suponha também que existam passageiros e cargas com destino a Salvador vindos de São Paulo e do Rio de Janeiro. No planejamento das operações da companhia está definido que os passageiros de São Paulo para Salvador farão apenas uma escala em Brasília. Os passageiros vindos do Rio de Janeiro com destino a Salvador farão uma conexão em Brasília mudando para a aeronave que seguirá até Salvador. Considere também que a trajetória de cada rota foi otimizada para cada aeronave e suas condições de operação.

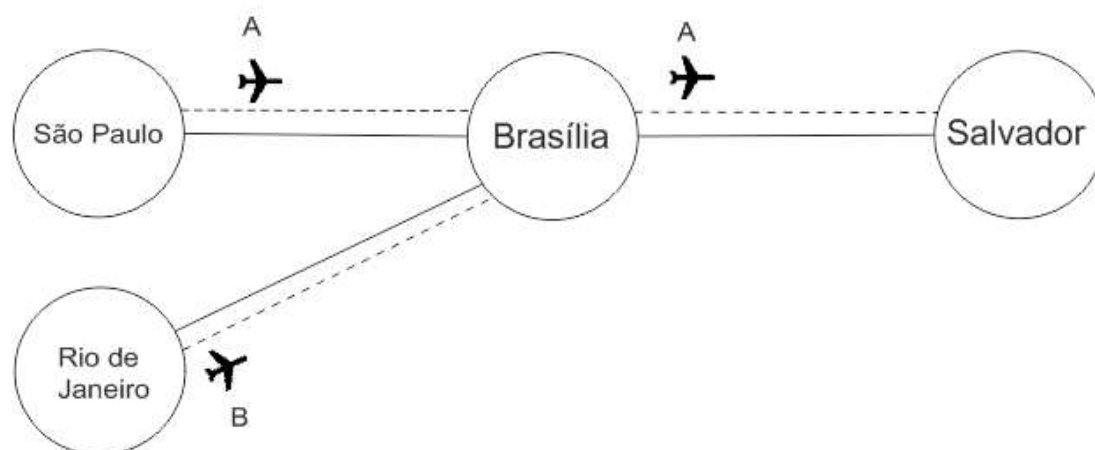


Figura 1.1: Trechos e rotas

Entretanto, imagine que o voo de São Paulo para Brasília sofra um atraso. Como a linha aérea deve proceder? Qual a melhor estratégia a ser adotada? Fazer o trecho [São Paulo→Brasília] mais rápido visando recuperar o atraso, mesmo que esta decisão leve a um aumento significativo de consumo de combustível? Alocar a aeronave que veio do Rio de Janeiro para a rota [Brasília→Salvador], mesmo sabendo que ela teria que retornar vazia devido a restrições de manutenção? Aceitar o atraso da chegada da aeronave de São Paulo e atrasar a partida do voo para Salvador?

O cenário descrito indica que para se obter a melhor decisão, uma análise complexa

precisa ser realizada. A operação de uma companhia aérea possui características de um sistema complexo [Joslyn and Rocha, 2000], ou seja, não basta apenas otimizar as ações de cada aeronave, é necessário tratar o problema como um sistema.

Uma hipótese estudada neste trabalho é: uma abordagem mais ampla, que combine a aplicação conjunta de várias técnicas, pode ser mais eficiente do que uma abordagem pontual.

Este trabalho tem por objetivo principal o estudo e o desenvolvimento de tecnologias, que usadas de forma combinada, permitam às companhias aéreas melhorarem a eficiência operacional. As oportunidades, problemas e objetivos específicos são divididos em dois grupos, apresentados a seguir:

1.1 Análise de dados

A análise de dados tem sido aplicada em diferentes problemas e áreas do conhecimento, visando a descoberta de informações úteis, sugestões de conclusões e apoio a tomada de decisão [Levine and Roos, 2002]. Nesse processo, pode-se destacar dois conjuntos de técnicas: a análise visual de dados e a mineração de dados.

As técnicas de análise visual de dados unem algoritmos computacionais e ferramentas de visualização de dados, com o propósito de permitir as pessoas identificarem padrões e estruturas em bases de dados volumosas, heterogêneas e dinâmicas. Esse tipo de técnica permite a manipulação de variáveis em tempo real [Johnson et al., 2010]. Existem exemplos de aplicação da análise visual de dados no contexto de companhias aéreas [merlot.aero, 2014]. As empresas do setor aéreo são candidatas a esse tipo de técnica, uma vez que diariamente geram grandes volumes de dados. Em termos de operação da companhia, são gerados dados relacionados a voos, tripulação, aeroportos, condições climáticas, passageiros, aeronaves, etc. Apenas para ilustrar, uma aeronave do tipo Boeing 747-400 gera por minuto, centenas de parâmetros e variáveis [Jones et al., 2005].

A mineração de dados consiste em aplicar algoritmos e métodos estatísticos a fim de identificar padrões não óbvios [Fayyad et al., 1996]. Existem diferentes técnicas de mineração de dados, tais como técnicas estatísticas de regressão (predição), algoritmos de classificação e agrupamentos de dados, e algoritmos para extração de regras de associação.

A medida que uma empresa aérea ou fabricante de aeronaves tem acesso a indicadores que mostram como aeronaves estão consumindo combustível e deslocando em diferentes fases de voo, essas empresas podem usar esses indicadores para comparar com seus voos realizados, e conseqüentemente ter uma ideia se sua operação está próxima ou não da média. Em outras palavras, compreender o padrão de métricas operacionais de voos pode

ajudar os agentes da aviação a identificarem potenciais gargalos e oportunidades para operarem de forma mais eficiente. Por exemplo, se uma companhia aérea identifica como aeronaves tendem a desviar em suas fases de subida e descida dos voos em comparação com um valor médio de outras empresas, então essa empresa poderia analisar o motivo de eventuais discrepâncias, e estudar estratégias para melhorar a operação de seus voos de forma a economizar combustível e tempo de voo.

Diversos relatórios técnicos e artigos científicos têm descrito a eficiência de voos globais e locais em termos de consumo de combustível [Park and O’Kelly, 2014], emissões de CO_2 [Kim et al., 2007] e outras métricas operacionais. Alguns desses trabalhos estimam o consumo de combustível a partir de algumas poucas variáveis, como a distância ortodrômica² entre o aeroporto de partida e o aeroporto de chegada, o que acaba limitando a precisão da estimativa de consumo.

Por outro lado, existem trabalhos que tem abordado o uso de modelos de estimativa de consumo mais detalhados e precisos, a medida que usam dados reais das rotas voadas (*waypoints*). No entanto, tais trabalhos têm se limitado a mostrar métricas operacionais de voo relacionadas a apenas um conjunto de voos (ex. voos chegando ou saindo de/para aeroportos específicos) [Belle and Sherry, 2013]. Essa limitação se dá principalmente pela dificuldade de se obter amplamente os dados dos voos de diferentes companhias aéreas. Mesmo para uma companhia aérea, nem sempre é uma tarefa fácil acessar, estruturar e compartilhar esses dados de voos com a comunidade acadêmica.

Utilizando um modelo de mais “alto nível” baseado na distância de rotas (*great circle distance*), Park e O’Kelly (2014) apresentam uma comparação de uso de combustível entre diferentes modelos de aeronaves em diferentes rotas, especialmente em regiões de voos de longa distância (1500-2000 NM). Kim et al. (2007) utilizam um modelo de consumo de combustível detalhado para estimar a emissão global de CO_2 decorrente do tráfego aéreo. Esse modelo foi baseado nas equações do *Base of Aircraft Data (BADA)* [Eurocontrol, 2017], o qual é primariamente proposto para estimar consumo de combustível de rotas geradas pelo modelo e não dados reais da trajetória do voo [Eurocontrol, 2014].

Oaks et al. (2010) propõem adaptações no modelo BADA de forma a estimar consumo de combustível a partir de dados reais de trajetórias (não trajetórias geradas). Esse trabalho foi estendido por outros pesquisadores, como Belle e Sherry (2013) que analisaram o consumo de combustível por aeronaves que pousaram no aeroporto Internacional de Chicago (*Chicago Midway International Airport*).

²Também conhecida em inglês como Great Circle Distance

1.1.1 Objetivo

Como pode ser visto, os trabalhos atuais utilizam modelos não muito precisos para estimar consumo de combustível, ou são limitados a um conjunto de voos locais. Diante disso, um dos objetivos deste trabalho é analisar o desempenho de voos históricos realizados em escala mundial, em termos de distância voada, desvios na trajetórias (eq. 3.6) e consumo de combustível, e mostrar a relação entre os dados, o que poderá servir como referência para companhias aéreas utilizarem em seus estudos de melhoria de operações de voo. Por exemplo, este trabalho mostra a relação entre a distância voada por fases de voo e aeroportos.

Utilizando modelo de estimativa de consumo de combustível baseado nas equações do BADA e nas adaptações propostas por Oaks et al. (2010), foi analisada uma amostra de 36.190 voos extraídos de um conjunto inicial de aproximadamente um milhão de voos, os quais foram coletados pela empresa Planefinder.net [Planefinder, 2017] durante o mês de setembro de 2013.

Este trabalho é também relacionado ao contexto da Internet das Coisas (IoT) ³ [Want et al., 2015], em que usuários alimentadores do sistema ADS-B possuem dispositivos com antenas e conectividade com a internet, o que os permite coletar dados de voos em sua proximidade e compartilhar com empresas online, tais como Planefinder.net e Flightware [FlightAware, 2017b].

Este estudo é focado em voo com distância inferior a 1.000 milhas náuticas⁴ (NM), o que representa mais de 50% dos voos em todo o mundo [Planefinder, 2017] e 80% dos voos na Europa [Eurocontrol, 2013]. Este trabalho se diferencia de outros relacionados ao combinar: conjunto de dados voos em escala global, modelo de estimativa de consumo de combustível com maior acurácia (menor que 5%) e a identificação de padrões de métricas operacionais.

A metodologia adotada combina o uso de processo ETL ⁵ [Vassiliadis et al., 2002], sistemas multiagentes [Vlassis, 2003, Wooldridge, 2002] e técnicas de mineração de dados [Aggarwal and Yu, 1999]. A metodologia consistiu nos seguintes passos: extração, transformação, carregamento, processamento, mineração e avaliação de padrões em dados.

A etapa de processamento de dados foi realizada utilizando sistemas multiagentes (abordado na próxima seção). Um sistema multiagente foi desenvolvido e utilizado na reprodução da amostra de 36.190 voos. Essencialmente, agentes aeronaves foram implementados para seguirem waypoints derivados dos dados obtidos através do sistema ADS-

³Do inglês: Internet of Things

⁴Uma milha náutica equivale a 1.852 km.

⁵Do inglês: Extract, Transform and Load

B [Duan and Rankin, 2010, Hicok and Lee, 1998, Stark et al., 2013], tais como latitude, longitude, altitude e velocidade (*ground speed*). Esses dados permitiram a computação das distâncias das fases dos voos e a estimativa do consumo de combustível das aeronaves com base nas equações do BADA [Eurocontrol, 2017] e nas adaptações propostas em [Oaks et al., 2010].

1.2 Simulação multiagente

Uma técnica que tem sido utilizada para analisar o efeito de diferentes estratégias em sistemas complexos é a simulação computacional. A simulação computacional tem sido empregada no auxílio à tomada de decisão [Chung, 2003]. Simular um fenômeno através do computador pode ajudar na compreensão deste fenômeno e na obtenção de respostas para perguntas difíceis de serem respondidas devido a limitações econômicas, ambientais, éticas, tecnológicas e científicas. A simulação pode ser utilizada como um laboratório virtual, no qual questionamentos do tipo “E se?” podem ser feitos e respondidos [Peck, 2004].

Um exemplo de um simulador de tráfego aéreo é o FACET (Future Air Traffic Management Concepts Evaluation Tool) [Bilimoria, 2001, NASA, 2010], também desenvolvido nos laboratórios da NASA. Esse sistema permite aos administradores do espaço aéreo norte americano investigarem diferentes cenários e examinarem estratégias que maximizem a capacidade do espaço aéreo.

A simulação pode ser utilizada como ferramenta que auxilia em processos de decisão, na medida em que diferentes alternativas podem ser investigadas ou testadas e soluções viáveis podem ser identificadas. Nesse sentido, uma técnica que recentemente tem ganhado relevância é denominada Simulação Multiagente. Wooldridge define *Sistemas Multiagente* como sistemas compostos pela múltipla interação de elementos computacionais, conhecidos por agentes [Wooldridge, 2002]. De acordo com Russell e Norvig um agente é uma entidade capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores [Russell and Norvig, 2003]. O uso da simulação multiagentes na investigação de problemas relacionados ao controle de tráfego aéreo já é uma realidade [Kuchar and Yang, 2000], [Hill et al., 2005a], [Hill et al., 2005b], [Sislak et al., 2008, Sislak et al., 2012]. No entanto, esses trabalhos têm focado em resolver problemas decorrentes da automação das aeronaves, tais como evitar colisão.

1.2.1 Objetivo

Neste trabalho um dos objetivos propostos é o desenvolvimento de um simulador flexível, escalável e capaz de simular cenários operacionais de uma linha aérea. O simulador possui modelagem baseada em sistemas multiagentes, no qual agentes representam aeronaves com características de desempenho. Este módulo permite analisar como novas condições de tráfego aéreo irão afetar a operação destes sistemas.

O simulador desenvolvido também foi utilizado para reproduzir dados de voos reais para a extração de métricas de desempenho, tais como consumo de combustível e a distância voada por fase de voo.

Dentre os principais elementos do simulador, pode-se destacar: modelo de estimativa de consumo de combustível, computação de componentes aerodinâmicas (arrasto, empuxo), algoritmo de deslocamento físico de aeronaves, algoritmo de classificação de fases de voo, mecanismos de visualização *2D* e *3D* dos voos simulados. Esses modelos foram preliminarmente validados por meio da simulação de um voo real. O voo escolhido, operado com a identificação LMI2933, é popularmente conhecido como o voo da *Chapecoense*.

1.3 Organização do texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 aborda conceitos importantes, assim como uma análise dos trabalhos relacionados. No Capítulo 3 é descrita a metodologia de pesquisa relacionada a análise de dados, assim como os resultados obtidos. O Capítulo 4 aborda os aspectos computacionais do sistema multiagente desenvolvido, assim como os modelos envolvidos e simulações realizadas. Por fim, comentários e conclusões sobre o trabalho são descritos no Capítulo 5.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os trabalhos relacionados ao trabalho desenvolvido e conceitos relacionados aos temas *Métricas de desempenho operacional de companhias aéreas e aeronaves*, *Tecnologias digitais no futuro da aviação* e *Sistemas Multiagentes*.

2.1 Métricas de desempenho operacional de companhias aéreas e aeronaves

2.1.1 Desempenho de aeronaves

A área de estudos de desempenho de aeronaves aborda vários tópicos. Alguns desses tópicos são:

i) Equações de movimento de aeronaves [Anderson, 1978] - nesse tópico são estudadas equações relacionadas ao movimento das aeronaves e suas variáveis envolvidas, como velocidade, arrasto, altitude, distâncias, consumo de combustível, etc. Pode se citar, como exemplo, a equação de Breguet [Freeman, 2006], que tem por objetivo relacionar matematicamente as seguintes variáveis de uma aeronave: consumo de combustível, altitude, velocidade, peso, potência e alcance e autonomia de voo.

ii) Projeto de aeronaves [Newman, 2002], - outro tópico explorado, principalmente pela Indústria Aeronáutica, diz respeito ao projeto otimizado de aeronaves. Nesse tópico são estudadas questões diversas, como por exemplo, as dimensões de componentes, espaço interno das aeronaves, a potência de motores e propulsores.

iii) Otimização de trajetória de aeronaves - nesse tópico são explorados os aspectos relacionados a escolha otimizada de trajetórias de aeronaves [Ross and Fahroo, 2002]. Dado um ponto inicial e um objetivo, técnicas de otimização de trajetórias propostas

visam determinar um trajeto entre a origem e o objetivo com o menor custo possível, atendendo as restrições físicas da aeronave e restrições de operações de voo. Um método de otimização de trajetória baseado em técnicas de otimização de colônias de formigas é apresentado em [Hamy, 2016].

Tipicamente, as técnicas propostas a partir dos estudos de desempenho de aeronaves visam ajustar parâmetros que afetam o desempenho das aeronaves, como a minimização de consumo e combustível, de ruídos, de tempo de deslocamento de aeronaves, entre outros.

2.1.2 Custo operacional

Diversos fatores influenciam o custo do transporte aéreo, por exemplo: o tempo de voo dos funcionários, o tempo de operação, o tempo ocioso das aeronaves, os atrasos nos voos. Uma maneira de baratear o custo operacional de uma companhia é minimizar o consumo de combustíveis fósseis. Atualmente 40% a 50% dos custos operacionais de linhas aéreas brasileiras são gastos com combustível [Scorza, 2010, Dornelles, 2012]. Em relatório produzido pela EUROCONTROL [ref] com dados de custos operacionais de 59 companhias aéreas de diferentes países (51% europeias), o custo médio com combustível dessas companhias equivale a 33,4% do custo total. A composição dos custos identificada nesse trabalho pode ser vista no gráfico presente na Figura 2.1.

Diversas métricas tem sido utilizadas para calcular a eficiência de uma companhia aérea [Swan, 2002]. Algumas métricas são: custo por quilômetro voado, custo por passageiro, custo por assento, custo de tripulação, etc. Um outro índice que tem sido adotado para calcular a eficiência de uma aeronave é o *Cost Index (CI)*, desenvolvido pela fabricante de aeronaves *Boeing* [Roberson, 2007]. Resumidamente, o cálculo desse índice é baseado na razão do custo de tempo de operação de uma aeronave (\$/hora) e o custo de combustível. A equação do *Cost Index* é dada por:

$$CI = \frac{\text{custo relativo ao tempo}}{\text{custo de combustível}} \quad (2.1)$$

As técnicas visando redução de custos operacionais podem ser adotadas por companhias aéreas na figura de seus gestores, coordenadores de voos e pilotos. Algumas dessas técnicas podem ser agrupadas em:

i) Planejamento baseado em demanda: tipicamente realizada por gestores experientes os quais possuem uma visão geral sobre a companhia aérea e demandas de negócio. Modelos computacionais de otimização não linear apoiam esses profissionais para determinar melhores alocações de rotas e escalas de horário, de forma a atender demandas de seus

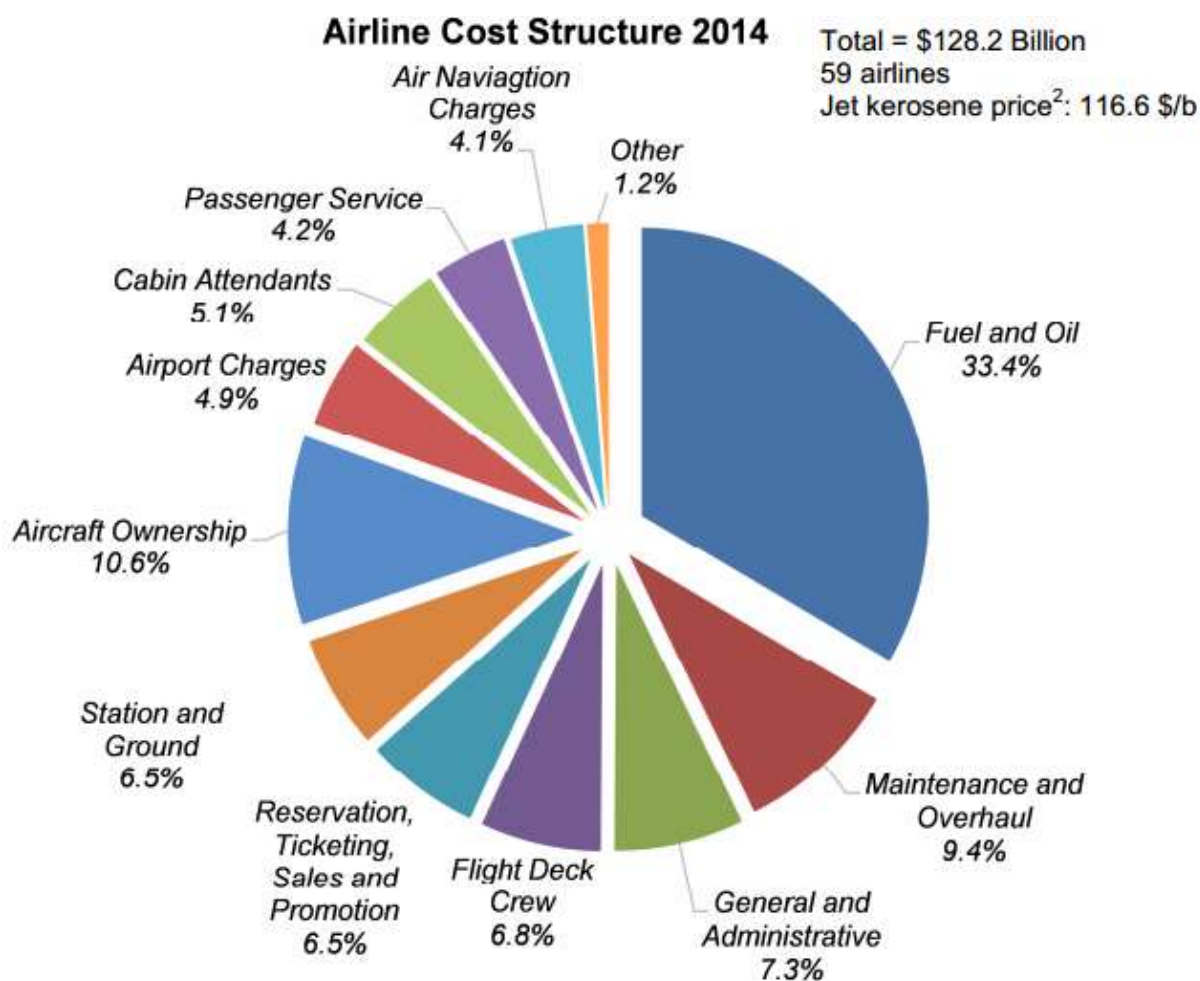


Figura 2.1: Estrutura de custos de companhias aéreas em 2014 [EUROCONTROL, 2015]

clientes.

ii) Coordenação de operações: abordagens geridas por coordenadores de voos responsáveis por realizar planejamentos de curto prazo. Eventos não planejados, que requerem rápida resolução são também resolvidos por esses coordenadores. O coordenador de voos decide, por exemplo, as ações que devem ser tomadas no caso de uma aeronave apresentar problemas durante o pouso em um determinado aeroporto.

iii) Operações de voo: essas operações são geralmente empregadas por pilotos. Algumas das atividades praticadas por pilotos visando uma maior eficiência operacional são: - Gerenciamento de ar-condicionado;

- Gerenciamento de volume ótimo de combustível;

- Técnicas de pilotagem econômica;

- Definição de plano de voo considerando altitudes e velocidade ótimas;

- Modo de aproximação em solo (baixo arrasto, baixo ruído);
- Seleção ótima de *flaps*;
- Ativação de reversores no pouso;
- Decisões em situações adversas.

Dentro dessas abordagens, existem técnicas que são inseridas em softwares que apoiam as decisões operacionais de pilotos e companhias aéreas. Entre os softwares existentes, podemos citar o SORT (Simulation and Optimization of Rocket Trajectories), desenvolvido pela Agência Espacial Norte Americana (NASA)[Wahbah, 1987], cujo objetivo é simular a trajetória de aeronaves no espaço. Outro software é o PACE [PACE Company, 2014], que tem por objetivo a otimização de trajetórias de aeronaves militares e comerciais. A empresa de aviação Lufthansa tem transformado seu *know-how* em produtos. A companhia possui ferramentas computacionais que auxiliam companhias aéreas na gestão da empresa e redução de custos [Lufthansa Airline, 2014].

2.1.3 Consumo de combustível

Dois tipos de métodos para estimar consumo de combustível de aeronaves tem sido proposto: os métodos de mais “alto nível” e os métodos mais detalhados. Os métodos de “alto nível” envolvem poucas variáveis. Geralmente são baseados em dados históricos relacionados a média de consumo de combustível e distância voada, e oferecem um senso mais geral de como um tipo específico de aeronave consome combustível em uma rota [O’Kelly, 2012]. Métodos desse tipo não são tão precisos quando comparados a métodos mais detalhados, no entanto, são simples de utilizar e possuem uma boa relação de custo benefício quando aplicado em nível de planejamento estratégico, tais como projetos de conexões de voos [O’Kelly, 2014]. É comum esse tipo de modelo ser utilizado também como parte da função objetivo de problemas otimização de planejamento. Em [Abdelghany et al., 2005] é proposto e estudado um modelo matemático de otimização que avalia o custo-benefício em relação a estratégia de abastecer uma aeronave com o máximo possível de combustível que seja oferecido a um preço baixo em algum aeroporto, adicionando custo de carregamento extra de combustível e manutenção.

O segundo tipo de modelo de estimativa de consumo de combustível é mais detalhado e envolve variáveis e equações da física de desempenho de aeronaves. Geralmente esse tipo de modelo é utilizado/recomendado para cenário táticos, onde a análise de consumo é feita pontualmente em um ou mais voos e a precisão do modelo de combustível é importante. Um dos trabalhos precursores nessa direção foi proposto por [Collins, 1982],

cujos funcionamento se dá pelo balanceamento de energias cinéticas e potenciais.

Um dos modelos de estimativa de consumo de combustível mais importantes que tem sido utilizado é o modelo BADA, proposto pela EUROCONTROL e baseado nos fundamentos propostos por [Collins, 1982]. As equações do BADA são primariamente projetadas para calcular o desempenho de aeronaves no contexto da simulação de trajetórias e gerenciamento de sistemas de tráfego aéreo (ATM¹) [Eurocontrol, 2014]. O BADA possui equações que podem ser utilizadas para gerar trajetórias e estimar o consumo de combustível dessas trajetórias. Autoridades gestoras do tráfego aéreo podem, por exemplo, usar o modelo para analisar diferentes procedimentos de descida de novas trajetórias e medir o impacto em termos de consumo de combustível [Nikoleris et al., 2012]. O BADA tem sido utilizado em diferentes aplicações. Alguns pesquisadores tem utilizado o BADA para estimar o consumo de combustível relacionado a aeroportos específicos [Belle and Sherry, 2013], enquanto outros tem usado o modelo para estimar emissões globais de CO_2 decorrente de atividades de tráfego aéreo [Kim et al., 2007]. A descrição das equações do BADA aplicadas no presente trabalho podem ser vistas na seção 4.2.2.

Ainda na linha de modelos detalhados, vale considerar o modelo proposto pela empresa General Electric (GE) em 2012 e 2013 em uma competição, na qual os participantes deveriam desenvolver algoritmos para geração de trajetórias de voos de custo mínimo. A função de custo foi fornecida pela empresa. Um dos elementos que compõe esse custo é o consumo de combustível. Em termos de modelos baseados em algoritmo de aprendizado, em [Trani et al., 2004] é proposto um modelo de rede neural artificial para estimar consumo de combustível. Utilizaram-se dados de voos realizados com aeronaves Fokker 100 e SAAB 2000. Os resultados da rede neural foram comparados com modelos analíticos.

Uma revisão completa sobre métodos para economia de combustível é realizado em [Singh and Sharma, 2015]. Nesse trabalho, os autores apresentam uma revisão de modelos e estratégias de economia de combustível. A revisão é baseada em 277 artigos científicos publicados entre 1973 e 2014.

2.1.4 Atrasos

O atraso em voo é um problema que desafia a aviação global. Devido a complexas escalas de voo, operação da rede aérea com vários agentes e fenômenos climáticos, atrasos podem ocorrer. Atrasos implicam em custos extras na estrutura de aeroportuária, nas operações das companhias aéreas e, quase sempre, impactam a rotina dos viajantes e suas atividades profissionais/econômicas.

¹Do inglês: Air Traffic Management

Um estudo realizado pela consórcio Nextor da FAA estimou que os atrasos em voos no ano de 2007 representaram um custo de 32,9 bilhões de dólares para a economia dos EUA [Ball, 2010]. Segundo o estudo, aproximadamente a metade desse valor (US\$ 16,7 bilhões) representou custo para os passageiros. Dependendo do atraso, o passageiro pode enfrentar ainda problemas de perda de conexões seguintes. As companhias aéreas também tem seus custos operacionais afetados, tendo em vista que são obrigadas a ampliar jornada de trabalho de sua tripulação e eventualmente oferecer serviço de auxílio aos passageiros, como alimentação e hospedagem.

Estratégias têm sido implementadas por autoridades do setor aéreo visando minimizar o problema dos atrasos. Uma program implementado pela FAA nos EUA, para minimizar o problema de atrasos de voos é chamado *Ground Delay Program (GDP)*. Esse programa essencialmente funciona da seguinte forma: quando um aeroporto atinge sua capacidade de pousos, como por motivos climáticos, um GDP é inicializado, e as aeronaves que teriam como destino o aeroporto sobrecarregado, aguardam por um determinado período em sua origem uma ordem para decolar. Trabalhos diversos tem sido realizados visando medir o impacto do programa e propor melhorias e configurações adequadas de parâmetros de funcionamento, como por exemplo, o tempo necessário que as aeronaves devem aguardar na origem [Jixin Liu and Han, 2017].

2.2 Tecnologias digitais no futuro da aviação

As aeronaves comerciais possuem os chamados sistema de registro de voos (FDR²), coloquialmente conhecidos como “caixa preta”, que armazenam dados relacionados aos voos. Esse tipo de tecnologia e procedimento de armazenamento é útil por questões de segurança e auditoria. Os computadores embarcados das aeronave armazenam dados de diferentes sensores e equipamentos, tais como altímetros e GPS. Tipicamente, mais de 1.400 parâmetros de voos são armazenados no FDS a cada segundo. Esses computadores, por sua vez, compartilham esses dados com estações em solo ou com outras aeronaves por meio de satélites ou tecnologia de rádio. A principal tecnologia utilizada pelas aeronaves para compartilhar sua localização é a *Automatic dependent surveillance - broadcast (ADS-B out)* [Strohmeier et al., 2014].

Transmissores ADS-B embarcados enviam dados periodicamente, tais como a identificação da aeronave, a posição atual, altitude e velocidade [Strohmeier et al., 2014]. Estações em terra recebem esses dados por meio de antenas e mantém os controladores de tráfego aéreo atualizados em relação à posição das aeronaves, o que os habilita a

²Do inglês: Flight Data Record.

posicionarem e definirem separações de altitude entre aeronaves de forma precisa. Outras aeronaves podem também utilizar essa informação para evitar colisão.

O ADS-B é um elemento chave em projetos que têm sido propostos para aumentarem a segurança e eficiência de uso do espaço aéreo. No EUA e na Europa existem os projetos *US Next Generation Air Transportation System (NextGen)* e *Single European Sky ATM Research (SESAR)*, respectivamente, os quais permitem por exemplo, a redução de atrasos em voos, o aumento da capacidade do espaço aéreo, o uso de rotas mais curtas e conseqüentemente redução de consumo de combustível, além de permitir que controladores aéreos monitorem e gerenciem aeronaves com boas margens de segurança [Duan and Rankin, 2010].

O projeto *NextGen* foi proposto para modificar processos nos EUA e a forma como o sistema aéreo é operado. Uma das mudanças esperadas é dar mais autonomia para pilotos e aeronaves em voo, de forma a reduzir a intervenção de controladores de voo. Algumas tecnologias tem sido desenvolvidos para auxiliar a tomada de decisão no sistema de tráfego aéreos [Duan and Rankin, 2010].

2.2.1 Portais de dados online e a Internet das coisas

Entusiastas tem utilizado antenas ADS-B, na frequência de 1.090 MHz, para monitorar aeronaves voando próximo a sua localidade, coletar e compartilhar dados dos voos com empresas como *FlightAware*, *FlightStats*, *FlightRadar24h.com* e *Planefinder.net*. Essas empresas possuem serviços online (web sites) que disponibilizam informações sobre voos. A Figura 2.2 ilustra coletores ADS-B e áreas de cobertura dos usuários alimentadores da rede *FlightAware*.



Figura 2.2: Coletores ADS-B e uma rede de cobertura [FlightAware, 2017a]

Usuários WEB podem acessar os *websites* dessas empresas e ver o status e localização de voos. Empresas desse tipo também vendem dados coletados por meio de serviços de assinatura *premium* ou via *web-services*. Os assinantes *premium* possuem acesso a funcionalidades avançadas, tais como gráficos estratégicos, alertas de voos e acesso ilimitado aos dados. Os acesso aos *web-services* geralmente é feito por empresas interessadas em integrar dados de voos em seus software, tais como agências de turismo, aeroportos e inclusive as próprias companhias aéreas.

Esse formato de comunicação entre aeronaves, usuários alimentadores do sistema ADS-B e usuários da WEB, pode ser visto sob a ótica do recente conceito de internet da coisas (IoT), na qual objetos se conectam por meio da internet e compartilham dados. A disponibilização de dados de voos, habilitada por esse modelo de comunicação com usuários de antenas ADS-B, eleva o potencial de trabalhos como este, que visam explorar dados de voos e trazer contribuições para a melhoria no setor aéreo. Alguns exemplos de trabalhos foram desenvolvidos por [Oaks et al., 2010, Belle and Sherry, 2013, Chatterji, 2011].

2.3 Sistemas Multiagentes

Segundo Rich e Knight, a inteligência artificial distribuída (IAD) é uma sub-área da inteligência artificial (IA), em que a busca por soluções considera aspectos de individualidade que emergem no sentido coletivo. Enquanto a IA clássica define modelos de tomada de decisão que sejam capazes de resolver problemas de forma eficiente (resultados precisos e obtidos rapidamente), a IAD se preocupa em definir modelos de raciocínio artificial que sejam eficientes e adotem o paradigma tomada de decisão distribuído [Rich and Knight, 1991].

Sichman afirma que o foco da IAD está na interação e no comportamento social, isto é, aborda-se o problema considerando a possível construção de uma inteligência “grupala”. Adotam-se agentes inteligentes autônomos para representarem os indivíduos do modelo [Sichman, 2003]. Ainda segundo Sichman, a IAD pode ser dividida em duas sub-áreas: resolução distribuída de problemas (RDP) e sistemas multiagentes (SMA). Na área de RDP estudam-se formas de dividir um problema em partes que cooperam no desenvolvimento de uma solução. Nos SMA estudam-se mecanismos de interação entre agentes e os efeitos destas interações [Sichman, 2003].

Faraco afirma que na RDP as entidades que interagem, os agentes, são “programados” para realizarem tarefas específicas e para se comunicarem com outros agentes da sociedade a fim de atingir o objetivo global proposto [Faraco, 1998]. Neste tipo de abordagem, a aplicação da computação paralela e distribuída tende a melhorar o tempo de

processamento da solução, uma vez que as “partes do problema” podem ser divididas e distribuídas entre outros computadores [Rich and Knight, 1991]. A Figura 2.3 ilustra a estrutura de um sistema de *RDP*.

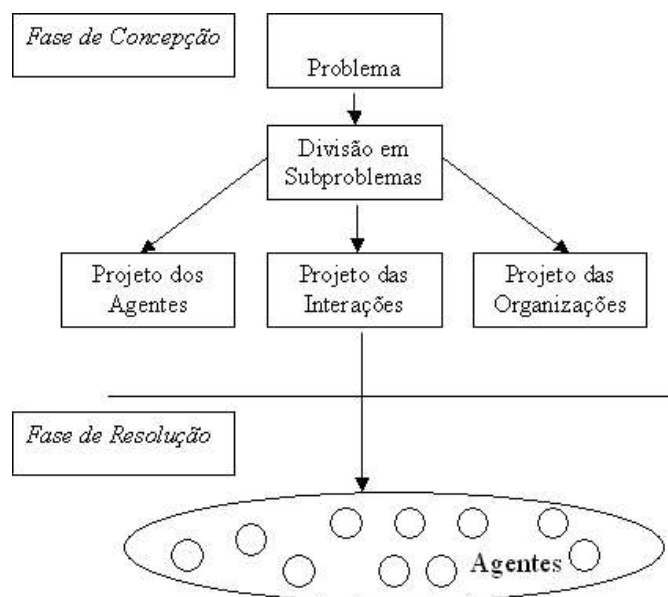


Figura 2.3: Estrutura de um sistema *RDP* [Sichman, 2003]

De acordo com Sichman, não existe uma definição com semântica precisa para *SMA*. Isso se deve ao fato dos *SMA* serem utilizados por diversas áreas como *IA*, ecologia, engenharia, sociologia, economia, administração e filosofia [Sichman, 2003].

Wooldridge define *SMA* como sistemas compostos pela múltipla interação de elementos computacionais, conhecidos por agentes [Wooldridge, 2002]. Considerando esta definição, os *SMA* podem ser considerados um tipo de modelo baseado em indivíduo, no qual os indivíduos do modelo são implementados através de agentes computacionais.

Dentre as diversas aplicações dos *SMA*, destacam-se as seguintes:

1. *Simulação computacional* - Por se tratar de um modelo baseado em indivíduo, os *SMA* podem ser utilizados para simulação computacional. Diversos trabalhos têm utilizado este tipo de abordagem para simulações, como por exemplo simulações de pedestres, propagação de vírus, veículos, centros urbanos, etc.
2. *Entretenimento* - A indústria de jogos tem utilizado sistemas multiagentes para representar indivíduos em um cenário. Em um jogo eletrônico que incorpora esse tipo de abordagem, o jogador real (pessoa) pode interagir com agentes inteligentes no ambiente virtual. Esses agentes podem ser implementados através de *SMA*.

3. *Processo de tomada de decisão distribuída* - A descentralização da tomada de decisão em determinados cenários tem se mostrado eficiente. Bertsekas propõe um modelo de tomada de decisão distribuído baseado no modelo econômico de um *leilão* [Bertsekas, 1992]. Nesse modelo, cada agente envolvido no *leilão* efetua um lance a um item que *mais lhe satisfaz*, e como consequência, fica atribuído a determinado item o agente participante do leilão que tiver maior interesse e condição econômica pelo referido item. O modelo proposto é aplicado na resolução de alguns problemas de otimização, como o problema do fluxo mínimo em redes [Bertsekas and Catañon, 1991], o problema atribuição e de transporte [Bertsekas and Catañon, 1989], o problema do menor caminho [Bertsekas, 1991], entre outros [Bertsekas, 1988]. Esse tipo de abordagem pode ser implementado através de um SMA.
4. *Segurança em redes* - Alguns trabalhos têm adotado SMA para monitoramento de pacotes de dados em redes de comunicação de dados. Nessas aplicações, agentes computacionais inspecionam a rede. Eventuais tentativas de ataque por invasores são detectadas por esses agentes, que trabalhando de forma cooperativa tentam inibir o invasor [Zaki and Sobh, 2005].

2.3.1 Sistemas complexos e simulação computacional

Um sistema é denominado complexo quando apresenta propriedades emergentes, ou seja, propriedades que não são o resultado da simples combinação de seus elementos constituintes [Joslyn and Rocha, 2000]. Essas propriedades emergentes surgem por causa da interação entre os elementos do sistema e por causa do fato de muitas vezes estas relações serem não-lineares. Embora, cada elemento separadamente possa ter seu comportamento bem conhecido, quando um grande número de elementos interagem entre si, é difícil estabelecer o comportamento analítico do sistema como um todo.

2.3.2 Agentes

De acordo com Russell e Norvig um agente é tudo o que pode ser considerado capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores [Russell and Norvig, 2003]. Essa ideia é ilustrada na Figura 2.4.

Wooldridge e Jennings considera que agentes inteligentes podem ser caracterizados pela presença das seguintes capacidades [Wooldridge and Jennings, 1994]:

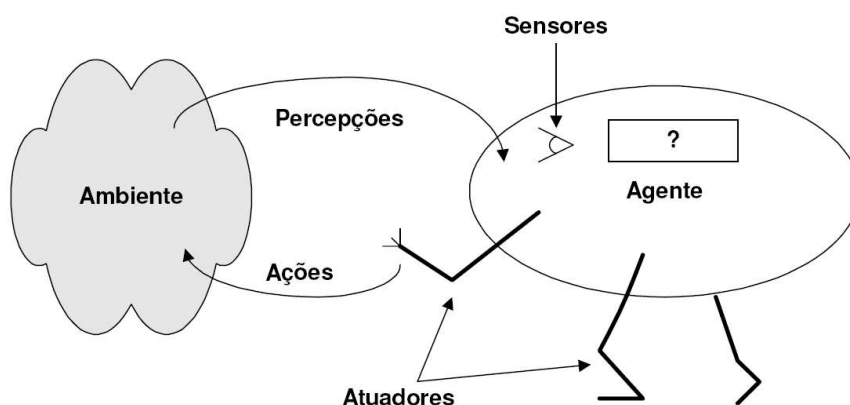


Figura 2.4: Agentes interagindo com o ambiente [Russell and Norvig, 2003]

1. *Autonomia*: o agente deve poder funcionar sem a intervenção do homem, buscando suas ações em seu conhecimento armazenado sobre o ambiente.
2. *Reatividade*: ao perceber o ambiente, o agente deve ser capaz de responder as mudanças em tempo hábil para atingir seus objetivos.
3. *Habilidade social*: o agente interage com outros agentes através de uma linguagem de maneira a satisfazer seus objetivos.
4. *Pró-atividade*: O agente deve atuar maximizando o cumprimento de seus objetivos.

Além dessas capacidades apresentadas, Fernandes discorre sobre as seguintes características que podem estar presentes nos agentes [Fernandes, 2005]:

1. *Mobilidade* - Alguns agentes podem se mover através de um ambiente.
2. *Cooperação* - Os agentes podem cooperar com outros agentes na medida em que trabalham juntos e visam atingir um objetivo comum.
3. *Comunicabilidade* - Segundo Franklin e Graesser, os agentes podem se comunicar com outros agentes, objetos, o próprio ambiente ou ainda com seres humanos [Franklin and Graesser, 1996].
4. *Aprendizagem* - Os agentes podem aprender e com o aprendizado podem tomar decisões mais apropriadas em relação a seus objetivos.

Existem diversas classificações para agentes [Sichman, 2003, Wooldridge, 2002] [Fernandes, 2005]. As classificações são determinadas com base nas propriedades dos agentes. Nas classificações encontradas em [Sichman, 2003, Wooldridge, 2002] os agentes são divididos em:

1. *Agentes reativos* - Sichman afirma que os agentes reativos são normalmente baseados em modelos de sociedades biológicas, como sociedades de abelhas e de formigas. Os agentes reativos funcionam segundo um modelo de estímulo-resposta. A representação do ambiente não é explícita. Os agentes não possuem memória e nem planejam o futuro. As sociedades de agentes reativos normalmente possuem um grande número de agentes (ordem de milhares) [Sichman, 2003].
2. *Agentes cognitivos* - De acordo com Sichman os agentes cognitivos são baseados em modelos de sociedades humanas, como grupos, hierarquias e mercados. Possuem uma representação explícita do ambiente, memória do passado e normalmente planejam o futuro. Interagem com outros agentes através de mensagens e podem aprender com os resultados das suas ações. Tipicamente, as sociedades de agentes cognitivos possuem poucos agentes - entre 10 e 20 agentes [Sichman, 2003].
3. *Agentes híbridos* - Os agentes híbridos são agentes que apresentam simultaneamente características de agentes reativos e cognitivos. Esses agentes podem ainda incorporar outras características, como mobilidade.

2.3.3 Frameworks de simulação multiagentes

Existem esforços para padronizar o desenvolvimento de SMA. Uma das principais entidades que padroniza modelos de construção de SMA é a *Foundations for Intelligent Physical Agents* (FIPA) [FIPA, 1996]. Essa entidade é uma associação internacional, sem fins lucrativos, formada por organizações que produzem especificações genéricas para tecnologias de agentes. A FIPA não foca em desenvolvimento de tecnologia específica para uma aplicação, mas na especificação de tecnologias genéricas para diversas áreas de aplicação independente da plataforma utilizada, de maneira a garantir interoperabilidade entre diferentes plataformas [FIPA, 1996].

As especificações produzidas pela FIPA baseiam-se em duas suposições. A primeira é que o tempo necessário para se projetar e implementar estas especificações não deve ser longo. A segunda é que somente comportamentos externos dos componentes devem ser especificados, deixando detalhes de implementação e arquiteturas internas para o desenvolvedor dos agentes [FIPA, 1996].

Existem diversos *frameworks* para construção de simulações baseadas em agentes. Pode-se citar os *frameworks*: i) Swarm [Minar et al., 1996]; ii) Jade [Bellifemine et al., 1999]; iii) MASON [Luke et al., 2005]; iv) Repast [Collier, 2000, North et al., 2006]; v) NetLogo [NetLogo, 2007]. Existem dezenas de *frameworks* semelhantes aos citados.

Railsback et al. apresentam um estudo comparativo entre *frameworks* de simulação multiagente [Railsback et al., 2006]. Este estudo compara alguns *frameworks* sob aspectos de desempenho computacional, dificuldade de utilização, disponibilidade de documentação e escalabilidade. Algumas sugestões quanto a escolha de *frameworks* para determinadas situações são apresentadas.

O *framework* *Swarm* foi o primeiro a ser desenvolvido para construção de simulações multiagentes. Inicialmente suas bibliotecas foram escritas na linguagem de programação *Objective-c*. Atualmente, os desenvolvedores do *Swarm* disponibilizam uma versão desta ferramenta na linguagem de programação *Java* em [Swarm Development Group, 2004]. O *Swarm* é distribuído sob licença *GNU* (General Public License), o que obriga os desenvolvedores a tornarem o código de sua aplicação aberto.

Os *frameworks* *MASON* (Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods) e *NetLogo* são mais recentes. Essas ferramentas permitem que os desenvolvedores de agentes criem suas aplicações em *alto nível*, ou seja, o desenvolvedor não precisa se preocupar com aspectos muito técnicos de programação. O *framework* *NetLogo* possui uma linguagem de programação própria, enquanto o *MASON* possibilita a criação de agentes na linguagem de programação *Java*.

JADE (Java Agent DEvelopment Framework) é um *framework* baseado nas especificações FIPA. Segundo Bellifemine et al. [Bellifemine et al., 1999], o objetivo desse *framework* é simplificar o desenvolvimento, assegurando o padrão FIPA através de um conjunto de serviços de agentes e ferramentas.

O *framework* *Repast* (The Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) herdou vários conceitos do *framework* *Swarm* [Collier, 2000]. Entretanto, o *Repast* é diferente do *Swarm* em vários aspectos. O *Repast* é disponível em *Java* e *Microsoft.NET*. Este *framework* é distribuído utilizando uma variação da licença *BSD* (Berkeley Software Distribution), que não exige a liberação do código-fonte por parte dos desenvolvedores de aplicações baseadas em agentes. A versão mais atual do *Repast*, adotada neste trabalho, é denominada *Symphony* [Macal and North, 2009]. O *Repast* fornece um conjunto de bibliotecas integradas para *redes neurais*, *algoritmos genéticos*, modelagem de simulações sociais e outros tópicos [Collier, 2000, North and Macal, 2005].

O *Repast* foi desenvolvido na Universidade de Chicago (EUA) e é mantido pelo laboratório *Argonne National Laboratory* (EUA). Esse *framework* possui código aberto. North e Macal discorrem sobre as seguintes características do *framework* *Repast* [North and Macal, 2005]:

- O *Repast* é totalmente orientado a objetos.

- O *Repast* inclui bibliotecas para configuração de escalonamento de eventos discretos.
- O *Repast* oferece recursos de registro de variáveis dinâmicas e exibição gráfica dos valores das mesmas.
- O *Repast* possui bibliotecas para automação de simulação Monte Carlo.
- O *Repast* permite o acesso e modificação de propriedades de agentes e do modelo de simulação em tempo de execução.
- O *Repast* inclui bibliotecas para geração de números aleatórios, regressão linear, algoritmos genéticos e redes neurais.
- O *Repast* possui ferramentas de auxílio a simulações de redes sociais.
- O *Repast* fornece suporte a integração de sistemas de informações geográficas.
- O *Repast* permite implementações de modelos nas linguagens disponíveis no *framework* Microsoft.NET: C#, Managed C++, Visual Basic.NET, Managed Lisp, Managed Prolog, Managed Cobol. Além dessas linguagens é possível implementar modelos na linguagem de programação Python scripting.
- O *Repast* é disponível nas plataformas Windows, Mac OS e Linux.

O *Repast* possui duas camadas. A camada “núcleo” é responsável pela execução dos componentes internos, não visíveis para os usuários. A camada mais externa é relacionada ao modelo de simulação desenvolvido pelo usuário do *framework* [North and Macal, 2005]. A Figura 2.5 ilustra os componentes envolvidos nas simulações realizadas com o *framework Repast*.

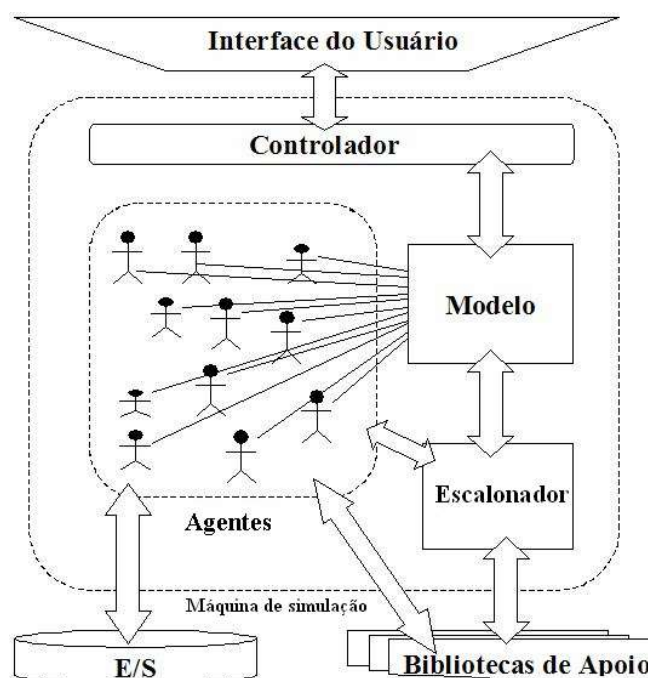


Figura 2.5: Visão geral do *framework Repast* [North and Macal, 2005]

2.4 Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos visando o aumento da eficiência no setor aeroespacial. Relacionados ao contexto deste projeto, podem-se destacar os trabalhos que utilizam técnicas de análise de dados e simulação computacional. A seguir são listados alguns desses trabalhos.

Análise de dados

A exploração de dados operacionais de voos e companhias aéreas é uma atividade comum em empresas do setor aéreo, órgãos de controle e meio acadêmico. Alguns dos trabalhos realizados tem por objetivo a caracterização de fluxo de voos e identificação de potenciais padrões no sistema aéreo. Nessa direção, Bolaños e Murphy propuseram uma análise de atrasos injetados no sistema aéreo norte-americano causados pelo aeroporto de New York [Bolaños and Murphy, 2013]. Bhadra e Kee estudam a demanda de passageiros por voos domésticos nos Estados Unidos [Bhadra and Kee, 2008], enquanto Umang foca seus estudos na avaliação dos atrasos de voos sofridos por esses passageiros [Umang, 2010].

No contexto nacional, Scorza analisou dados de aeronaves da companhia VRG Linhas aéreas [Scorza, 2010]. O seu estudo foi centrado na proposta de métodos de análise dos eventos de aceleração dos motores e dissipação de energia, através do uso de freios aerodinâmicos dos modelo de aeronave Boeing 737 (fase de descida). Também com abor-

dagem de análise de dados, Dornelles analisa a condição de energia de aeronaves a jato durante a fase de descida e aproximação para pouso [Dornelles, 2012].

Algumas empresas têm se especializado no desenvolvimento de ferramentas para exploração de dados de companhias aéreas. A empresa Merlot.aero criou um software que permite a análise de grandes volumes de dados operacionais (*BigData*) de uma companhia aérea e identificação de correlações entre as informações.

Simulação

A simulação é frequentemente utilizada com o foco na reprodução do comportamento de uma aeronave específica [citar Flight Gear, Microsoft Flight Simulator]. Contudo, abordagens que visam a simulação de um conjunto de aeronaves tem sido desenvolvidas. A NASA desenvolveu o simulador FACET (Future ATM Concepts Evaluation Tool) [Bilimoria, 2001, NASA, 2010], que permite aos administradores do espaço aéreo norte-americano investigarem diferentes cenários e examinarem estratégias que maximizem a capacidade do espaço aéreo. O FACET auxilia a investigação de políticas para a nova geração de sistemas de gerenciamento de tráfego aéreos (ATM) dos Estados Unidos (Next-Gen).

Em um contexto similar ao FACET, na Europa existem iniciativas focadas na melhoria do uso do espaço aéreo e condições de voos. O simulador AGENTFLY é uma dessas iniciativas [Sislak et al., 2008, Sislak et al., 2012], e tem sido aplicado no estudo do conceito de voo livre (*freeflight*). O conceito de voo livre diz respeito a um cenário onde não são estabelecidas rotas fixas no espaço aéreo e não existe a figura do controlador de voos, como hoje é conhecido [Hill et al., 2005b]. Geralmente, as aeronaves são autônomas no voo livre. Essa abordagem permite o aumento do número de aeronaves no espaço aéreo, entretanto, as condições de operação tornam-se mais críticas em relação a segurança dos voos [Kuchar and Yang, 2000]. Experimentos com o AGENTFLY tem sido realizados visando a validação de procedimentos para evitar colisão entre aeronaves em voo. O AGENTFLY é desenvolvido utilizando uma abordagem baseada em sistemas multiagentes.

Essas ferramentas possuem potencial para apoiar a redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa na atmosfera. Nessa direção, a agência de segurança aérea europeia desenvolveu uma ferramenta, denominada AERO-MS, que permite examinar os impactos de diferentes políticas na redução da emissão de CO_2 pela aeronaves [European Aviation Safety Agency, 2010].

Uma ferramenta computacional que vale destacar é o *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM), mantida pela Jeppesen, uma empresa do grupo BOEING [Jeppesen, 2017].

A ferramenta permite a análise de cenários e condições de operações relativas a aeroportos. Com essa ferramenta, o aeroporto e espaço aéreo podem ser modelados, e então o impacto na infraestrutura, operações e escalas de voos pode ser avaliado. A Figura 2.6 ilustra uma interface gráfica da ferramenta TAAM.

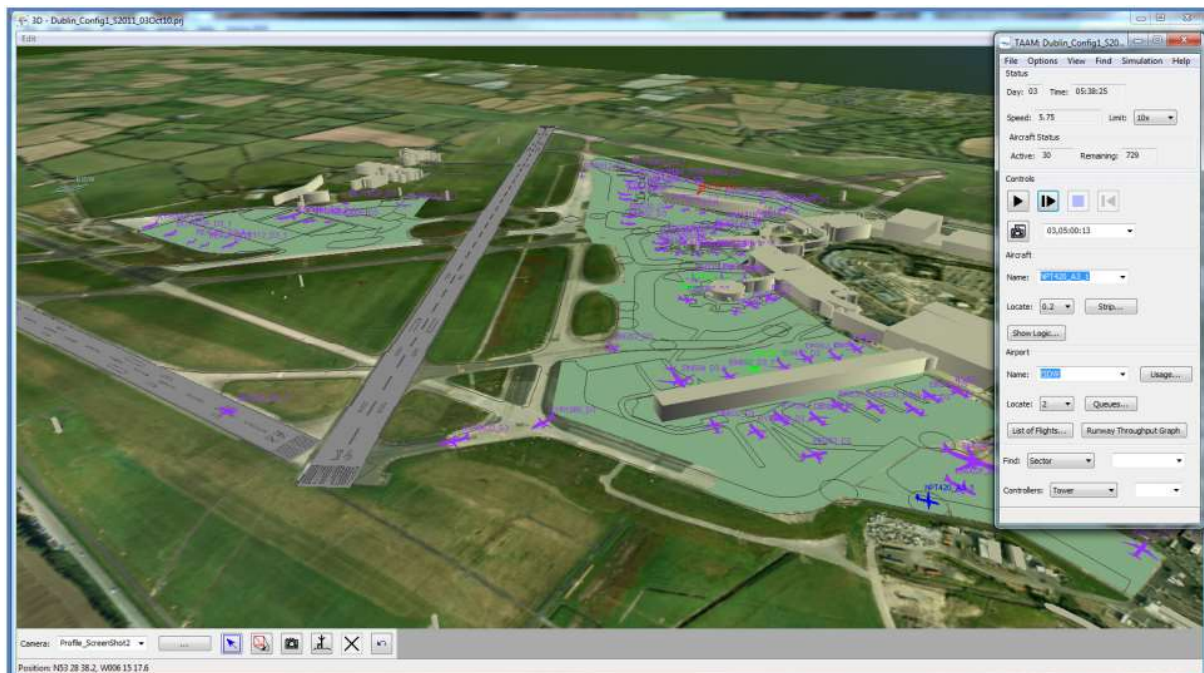


Figura 2.6: Interface gráfica de usuário da ferramenta TAAM [Jeppesen, 2015]

Capítulo 3

Análise de Dados de Voos

O objetivo da análise de dados históricos proposta neste trabalho é analisar a eficiência de voos por meio da exploração da relações entre métricas operacionais de desempenho de aeronaves. Além dos voos em si analisados, este trabalho traz uma inovação no aspecto metodológico: a união de métodos de análise de dados e a tecnologia de sistemas multiagentes para processamento de dados. Essa inovação é sistematizada como um processo escalável para obtenção, extração, transformação, limpeza, enriquecimento, tratamento de inconsistências, processamento, visualização de grandes volumes dados de voos e descoberta de padrões. Esse processo possui uma sequência de passos (Figura 3.1).

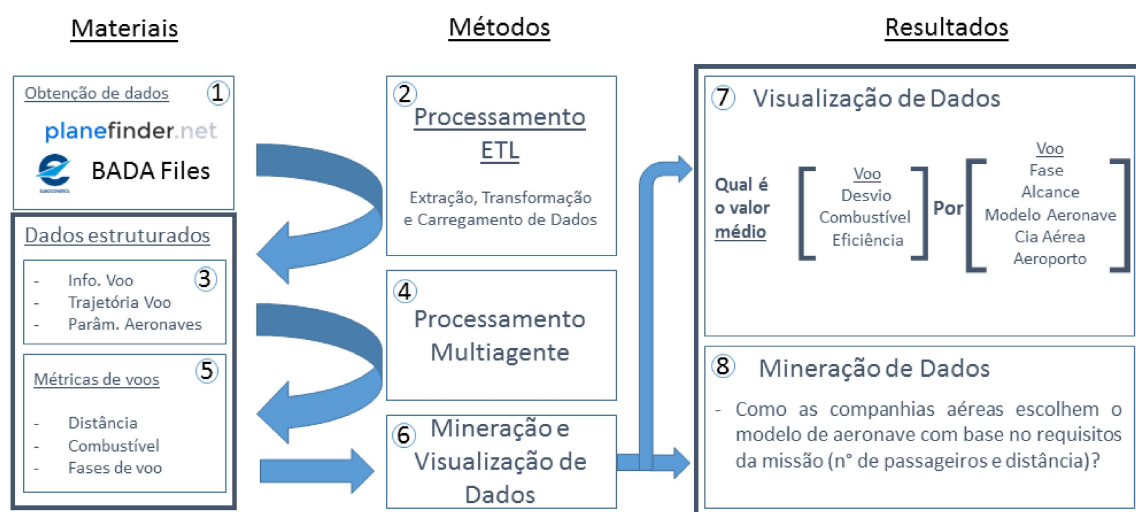


Figura 3.1: Metodologia de análise, mineração e visualização de dados de voo

Conforme pode ser visto na Figura 3.1, os passos 1, 2 e 3 compõe o pré-processamento dos dados que resultam em dados estruturados, para que posteriormente possam ser processados pelo sistema multiagente desenvolvido (4). Após o processamento dos dados pelo sistema multiagentes, as métricas obtidas (5) são utilizadas para se chegar aos resultados finais do processo (análise da eficiência de voos), seguindo os passos 6, 7 e 8. Em síntese, essa abordagem combinada pode ser entendida como um modelo viável de análise e processamento de grande volume de dados.

O detalhamento de cada um dessas passos metodológicos são:

1. Obtenção de dados: conjuntos de dados com voos reais e parâmetros de desempenho de aeronaves.
2. Processamento ETL: os dados originais obtido foram extraídos, transformados e carregados em um banco de dados relacional.
3. Dados de voos estruturados: dados de voos, tais como origem, destino, modelo de aeronave, companhia aérea, posições e velocidades da aeronave ao longo das trajetórias, e parâmetros de aeronave foram estruturados em uma tabela relacional.
4. Processamento multi-agente: a tarefa de processamento de dados foi realizada utilizando um sistema multiagentes, descrito no capítulo 4. Essa tarefa utiliza dados de voos e parâmetros das aeronaves para extração de métricas de performance.
5. Métricas de voo: distância voada, consumo de combustível e desvio por fases de voo são computadas pelo sistema multiagentes.
6. Mineração e visualização de dados: os dados de voos estruturados (passo 3) e as métricas de desempenho obtidas (passo 5) são processados por algoritmos de mineração de dados e ferramentas de visualização de dados.
7. Resultados visuais: um conjunto de gráficos apresentados ilustram a performance dos voos (consumo de combustível, distância voada e desvio) para cada uma das dimensões: fase, distância, tipo de aeronave, companhia aérea, e aeroportos de origem e destino.
8. Análise de resultados de mineração de dados: os resultados minerados mostram como as companhias aéreas escolhem seu modelos de aeronave baseados em requisitos das missões (distância e número de assentos).

Os detalhes da metodologia são apresentados nas subseções a seguir.

3.1 Obtenção de dados

Considerando que um dos objetivos deste trabalho é analisar distâncias de voos e consumo de combustível, decidiu-se utilizar dados de trajetórias de voos e parâmetros de desempenho de aeronaves para estimar consumo de combustível, distâncias voadas e desvios.

A empresa PlaneFinder.net [Planefinder, 2017] disponibilizou um conjunto de dados com trajetórias de voos, coletados por usuários alimentadores do sistema PlaneFinder.net (feeders) ao longo do mês de setembro de 2013. Geralmente, os usuários alimentadores são entusiastas que possuem antenas ADS-B que coletam dados de voos enviados periodicamente pelas aeronaves, tais como número do voo, latitude, longitude, altitude e velocidade atual da aeronave. Os dados são então compartilhados com empresas via internet, conforme pode ser visto na Tabela 3.2.

Dados	Descrição	Exemplo	Onde foi usado
Latitude	Latitude (graus)	44.0107	Criação da trajetória
Longitude	Longitude (graus)	-69.5628	
Altitude	Altitude em relação ao nível do mar (pés)	30.975	
Heading	Direção (radianos em relação ao norte polar)	37	
Speed	Velocidade em relação ao solo (milhas náuticas por hora)	496,8	
Squawk	Identificação do transponder/aeronave	1712	--
mtime	Data e hora da coleta do dado (segundos desde 1/1/1970)	1377993601	Criação da trajetória
Registration	Identificação única da aeronave	SU-GDM	Criação do histórico de movimentação da aeronave
Type	Tipo de aeronave	B77W	Criação do voo
ADSHex	Não identificado	01012B	--
Callsign	Identificação da companhia aérea e número do voo	MSR986	Criação da trajetória/voo
Route	Rota (Origem-Destino)	JFK-CAI	Criação da trajetória/voo
Flight Number	Número do voo	MS986	Criação da trajetória

Figura 3.2: Dados ADS-B

Os dados relativos a coordenadas geográficas utilizam como padrão o sistema geodésico mundial (WGS 84)¹, padrão esse adotado pelo sistema de posicionamento global (GPS) e dados ADS-B.

Um vez que o sistema ADS-B não trabalha com dados da massa das aeronaves, necessário para determinar o consumo de combustível das mesmas, foi utilizado modelo de estimativa de consumo de combustível baseado nas equações e conjunto de parâmetros do BADA, desenvolvido pela EUROCONTROL [Eurocontrol, 2014]. O BADA consiste de arquivos com coeficientes de desempenho projetados para serem utilizados em suas equações [D. Poles, 2009]. Foi adotada a versão 3.12 do BADA, a qual permitiu-se o cálculo do desempenho de 437 diferentes modelos de aeronaves. O acesso ao BADA foi permitido por meio de licença acadêmica disponibilizada ao Laboss (Laboratório de Otimização e Simulação e Sistemas da UFMG).

3.2 Extração, Transformação e Carregamento

O processo de extração, transformação e carga (ETL) consiste em buscar dados de uma origem inserindo-os em uma outra base de dados [Vassiliadis et al., 2002], geralmente estruturada de forma a facilitar tarefas de análise de dados. Esse processo foi realizado sob os dados ADS-B obtidos e arquivos de parâmetros de aeronaves do BADA.

Utilizando ferramenta ETL da empresa Microsoft [Microsoft Corporation, 2017d], arquivos obtidos foram carregados e os dados extraídos e movidos para um banco de dados relacional. Uma visão geral sobre o processo ETL e a representação final dos dados estruturados podem ser visualizados na Figura 3.3.

¹Do inglês: World Geodetic System

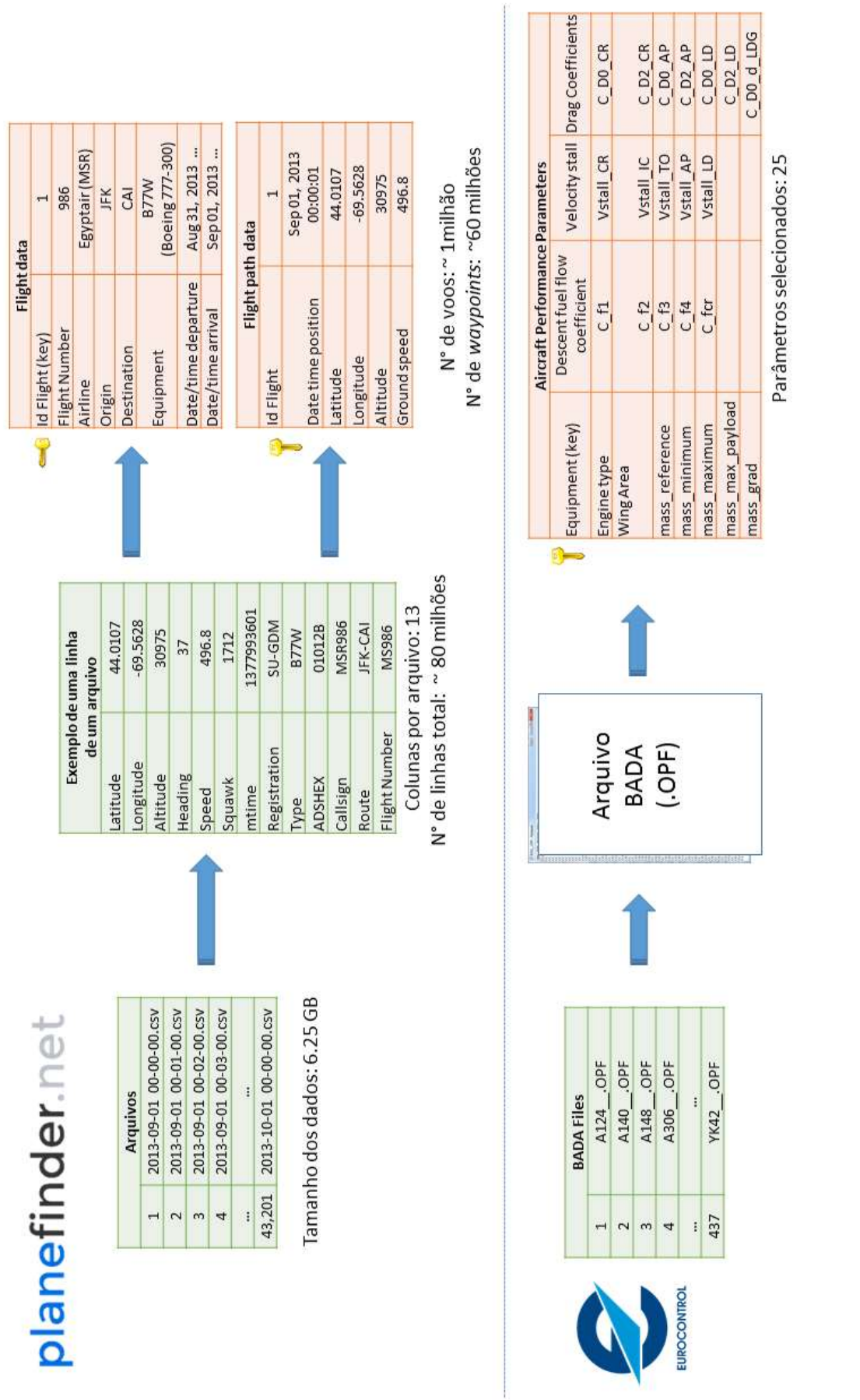


Figura 3.3: Dados obtidos, sua extração, transformação e organização final

Os dados de parâmetros de aeronaves foram lidos a partir de arquivos definidos no manual BADA [Eurocontrol, 2014]. Cada modelo de aeronave possui um arquivo texto estruturado (no formato OPF) com os parâmetros de desempenho da aeronave. Os dados utilizados desses arquivos são ilustrados na tabela resultante [Aircraft Performance Parameters], ilustrada na Figura 3.3.

Os procedimentos de extração, transformação e carga de dados relativos aos dados de voos e trajetórias são detalhados nas subseções seguintes.

3.2.1 Extração de dados

A base de dados obtida com dados de trajetórias ADS-B é composta por um conjunto de arquivos (formato CSV). Cada arquivo representa o estado do espaço aéreo em um determinado minuto (instante) relativo a uma aeronave voando. Cada linha da tabela representa os dados do estado de uma aeronave, coletados minuto-a-minuto. Existem 13 colunas em cada arquivo que representam dados do voo. Alguns desses dados: companhia aérea, modelo de aeronave (ICAO Code), registro da aeronave (id), número do voo, latitude, longitude, altitude e velocidade em relação ao solo.

Neste processo, colunas irrelevantes foram ignoradas, enquanto outras conversões de tipos de dados se fizeram necessárias. Registros com dados incompleto foram eliminados, como por exemplo, a ausência de número do voo, reduzindo assim os 80 milhões de registros obtidos para 60 milhões. O procedimento de extração de dados é ilustrado na Figura 3.4.

3.2.2 Transformação de dados

O conjunto de dados relativo ao posicionamento das aeronaves em cada instante/minuto do voo (data e hora de coleta, latitude, longitude, altitude) e velocidade em relação ao solo neste trabalho é referenciado como *waypoint*.

Um procedimento para transformar *waypoints* em voos e trajetórias foi proposto e implementado, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Os *waypoints* foram agrupados em voos utilizando as colunas *callsign code* e *flight number* e ordenados de acordo com a data e hora de coleta do *waypoint*. O procedimento também considerou o intervalo de tempo entre *waypoints* para determinar se um conjunto de *waypoints* deve ser dividido em diferentes voos. Se um par de *waypoints* sequenciais possui mais de 30 minutos de diferença - ainda que tenha um mesmo *callsign code* e *flight number* - esses *waypoints* são divididos em diferentes voos.

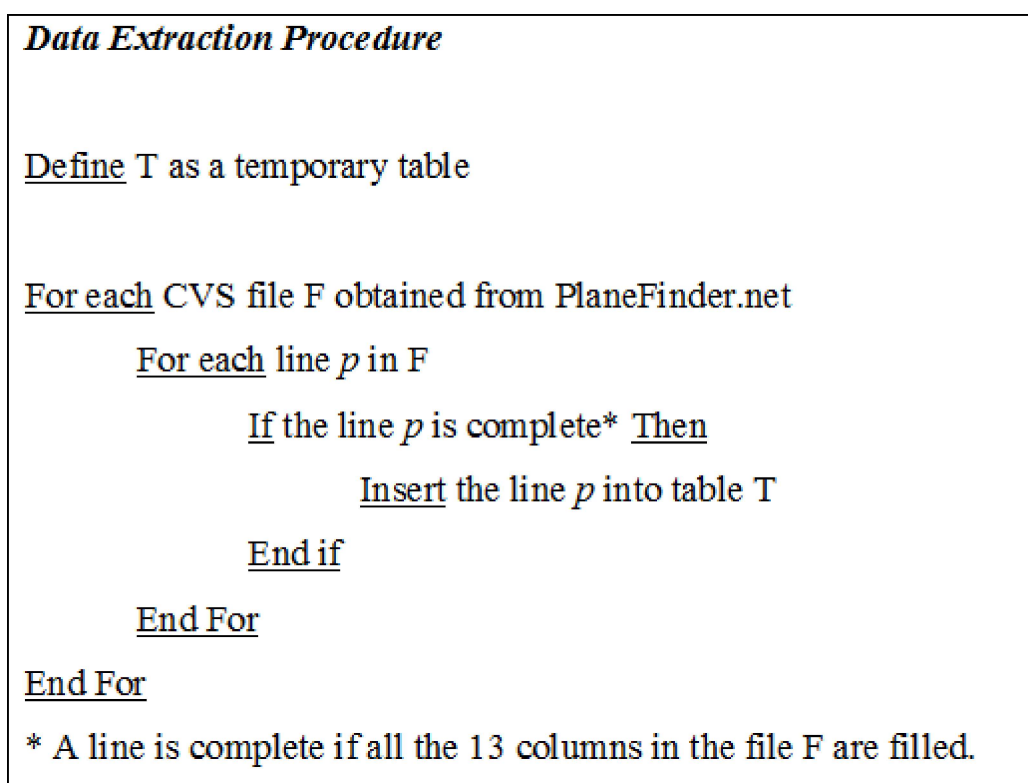


Figura 3.4: Procedimento de extração de dados

A aplicação desse procedimento resultou em um conjunto de aproximadamente um milhão de voos.

Filtragem de Dados

Os seguintes procedimentos complementares também foram aplicados visando reduzir inconsistências nos dados obtidos:

i) Remoção de voos com trajetórias incompletas: devido a limitação de cobertura das antenas ADS-B (200 a 400 km) [FlightAware, 2017a], muitos dos voos possuem somente *waypoints* nas etapas de subida e descida, enquanto outros voos presenciaram a falta de *waypoints* em diferentes momentos da trajetória.

Visando se ter um conjunto de dados de trajetórias consistente para estimar distâncias voadas e consumo de combustível, optou-se por considerar apenas voos com distâncias entre *waypoints* inferior a 20 km. Consequentemente, voos com considerável distância entre *waypoints* e aeroportos foram ignorados. Analisando visualmente diferentes trajetórias, observou-se que 20 km é uma distância na qual aeronaves tendem a não desviar muito.

Uma outra alternativa que poderia ser aplicada nos dados selecionados, seria a complementação de *waypoints* faltantes, ao invés da remoção de voos incompletos. Um método


```
Data Transformation Procedure  
  
Assume T is the temporary table created in the Extract Procedure  
Order the table T by the columns [T.Callsign, T.FlightNumber, T.Route, T.mtime]  
Define the auxiliary variables  
    idFlight_valid ← 1  
    mtime_last ← NULL  
  
For each line data p in the table T  
  
    If mtime_last <> NULL and (mtime_last – p.mtime) > 30 minutes Then  
        idFlight_valid ← idFlight_valid + 1  
    End if  
  
    p.idFlight ← idFlight_valid  
    Update the table T with the line p  
    mtime_last ← p.mtime  
  
End for
```

Figura 3.5: Procedimento de transformação de dados

baseado em redes neurais artificiais, interpolação e computação de médias, foi proposto e criado para esse fim. Validações iniciais, com uma amostra de 517 voos obtidos junto a empresa Planefinder.net, mostram que o método tem a precisão superior a 92% para estimativa dos *waypoints* faltantes.

ii) Remoção de voos com modelo de aeronave não padronizado: tipicamente, os dados ADS-B obtidos possuem o modelo das aeronaves, assim como os arquivos BADA, o que permite uma precisa associação entre os dados ADS-B e modelo de aeronave definido no BADA. Voos com código de equipamentos não padronizados nos padrões da *International Civil Aviation Organization (ICAO)* foram eliminados.

Voos operados por modelos de aeronaves não suportados pelo BADA (versão 3.12)

também foram ignorados, como por exemplo o modelo EMBRAER-195.

iii) Redução de ruídos nos dados: para reduzir ruídos nas trajetórias, foi aplicado o algoritmo de filtro da mediana [Zhu and Huang, 2012] sobre os dados da trajetória. O algoritmo foi parametrizado utilizando-se janela de tamanho três. Análises visuais mostraram que o método suavizou de forma consistente os ruídos sobre a trajetória 4-Dimensional (latitude, longitude, altitude e velocidade em relação ao solo).

Ao final desses procedimentos complementares obteve-se uma amostra de 36.190 voos que são considerados na etapa seguinte de processamento de dados.

3.2.3 Carregamento de dados

Por fim, os dados transformados foram carregados de uma estrutura temporária para as tabelas [Fligh] e [Flight path], presentes no diagrama da Figura 3.3. Esse procedimento é ilustrado na Figura 3.6.

Data Loading Procedure – Table [Flight]

Assume:

T is the temporary table created in the *Extract Procedure*

[Flight] is the flight target table in the Relational database

Define *f* a flight data auxiliary variable

For each set of lines L in the table T grouped by the column [T.idFlight]

f.FlightNumber ← L.FlightNumber

f.Airline ← Substring (L.Callsign, 1, 3)

f.Origin ← Substring (L.Route, 1, 3)

f.destination ← Substring (L.Route, 5, 3)

f.equipment ← L.type

f.dtDeparture ← min(L.mtime)

f.dtArrival ← max(L.mtime)

Insert the values *f* into the table [Flight]

End for

* The substring function return part of a text. It signature is: Substring (text, begin position, size) [ref].

Figura 3.6: Procedimento de carregamento de dados

3.3 Processamento de dados

A etapa de processamento de dados utilizou o sistema multiagente (SMA) proposto e apresentado no capítulo 4. A partir do SMA desenvolvido, foi possível extrair as estimativas de distância voada e consumo de combustível para cada uma das fases dos voos selecionados.

Esse processamento possibilitou combinar diferentes métricas em uma análise multidimensional, tais como análises de desempenho por companhias aéreas e aeroportos. Neste trabalho o SMA foi conectado a base de dados de voos, funcionando como uma ferramenta de processamento de dados. Os detalhes relativos ao funcionamento interno do SMA são apresentados no capítulo 4, enquanto os detalhes de processamento dos dados de voos são apresentados nas subseções a seguir.

3.3.1 Segmentação de trajetória de voo

As principais análises de dados de voos foram realizadas por segmentos de voos. Por exemplo, o consumo de combustível na etapa de subida. No entanto, como os dados de voos obtidos não são segmentados por fases de voo, foi necessário criar e implementar um algoritmo para classificar os *waypoints* das trajetórias quanto a fase de voo.

O algoritmo proposto utiliza as definições de fase de voo estabelecidas pelo *The International Civil Aviation Organization* (ICAO) e sugestões apresentadas no manual do BADA [Eurocontrol, 2014]. As fases classificadas pelo algoritmo são: taxiamento de saída (taxi-out), decolagem (take-off), subida (climb), cruzeiro (cruise), descida (descent), pouso (landing) e taxiamento de chegada (taxi-in).

A Figura 3.7 exibe o algoritmo em formato de máquina de estados finitos. Cada círculo representa um possível estado do voo, e cada seta entre estados representa a condição que faz o voo sair de uma fase para outra.

O método é considerado *forward classifier*, o que significa que classifica fases de voo sequencialmente a partir do taxiamento de saída (taxi-out) até a fase de taxiamento de chegada (taxi-in), sem voltar em fases anteriores. Por exemplo, o algoritmo não considera a possibilidade de classificar *waypoints* como relativos a fase de descida, e depois classificar os *waypoints* seguintes como pertencentes a fase de subida.

Estabeleceu-se um parâmetro $p = 3.000$ (pés) que define limites de variação de altitude entre *waypoints* para determinar se a aeronave ainda está na fase de cruzeiro.

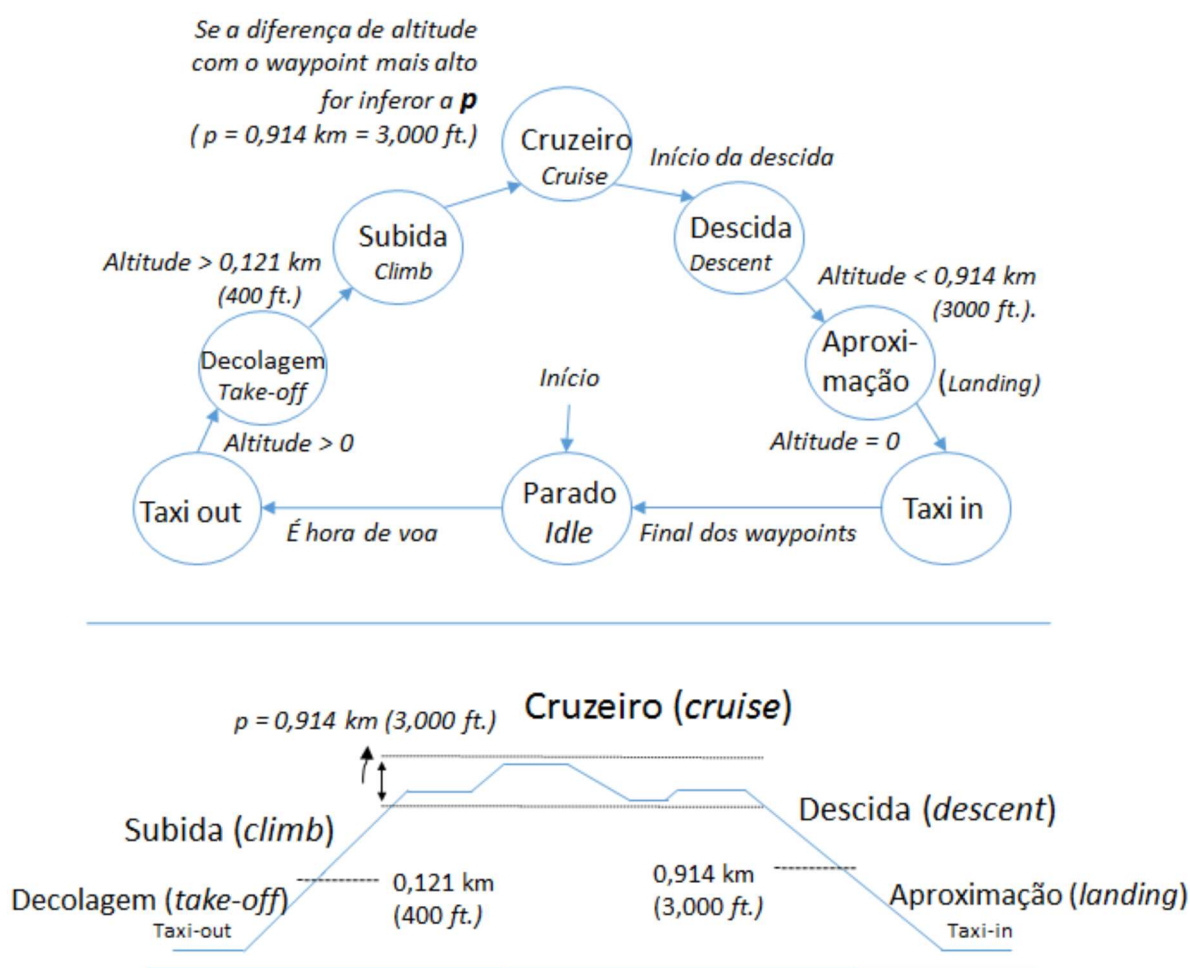


Figura 3.7: Algoritmo de classificação sequencial de fases de voos

Adicionalmente a representação do algoritmo na Figura 3.7, considerou ainda as seguintes condições de classificação:

- 1- Para que a fase seja considerada decolagem ou subida (take-off ou climb), necessariamente a diferença entre a altitude atual e a anterior deve ser positiva.
- 2- Para que a fase seja considerada descida ou pouso (descent ou landing), necessariamente a diferença entre a altitude atual e a anterior deve ser negativa.

Em relação a precisão do método proposto, análises visuais mostraram a correta classificação de fases de voos, em diferentes rotas. A Figura 3.15 ilustra um conjunto de 32 voos e a classificação dos *waypoints* relacionados ao voo.

3.3.2 Métricas de desempenho

Para cada voo na base de dados, o sistema multiagente processou *waypoints* como entradas e extraiu métricas em duas categorias: (i) distâncias de voos, e (ii) consumo de combustível. Essas métricas foram computadas para trajetória completas (entre aeroportos) e também para os seguintes segmentos de voo: subida (taxi-out + take-off + climb), cruzeiro e descida (descent + landing + taxi-in).

Métricas de distância

As métricas de distância são importantes para inferir a eficiência dos voos em relação à sua trajetória. Estabeleceu-se neste trabalho três métricas relacionadas a distância.

1) *Great Circle Distance* (GCD): também conhecida como distância ortodrômica, representa a distância do arco sobre duas localidades geográficas na superfície da terra, que representam o início e o fim de um segmento de voo, tais como a subida, cruzeiro e segmento de descida, ou pode representar também a distância entre aeroportos de origem e destino. A equação de Haversine (Wikipedia, 2015) foi utilizada para calcular a GDC, como segue:

$$a = \sin^2\left(\frac{\varphi_i - \varphi_j}{2}\right) + \cos \varphi_i \times \cos \varphi_j \times \sin^2\left(\frac{\lambda_i - \lambda_j}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$c = 2 \times \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (3.2)$$

$$G_{ij} = R \times c \quad (3.3)$$

Onde:

- G_{ij} representa a GDC entre os pontos i e j (km).
- φ_i representa a latitude do ponto geográfico i (radianos).
- λ_i representa a longitude do ponto geográfico i (radianos).
- R é tamanho aproximado do raio da terra (6.371 km).

2) *Waypoint Distance* (WPD): representa uma aproximação para a distância real voada por uma aeronave. Essencialmente, essa métrica considera a soma das distâncias entre *waypoints*. Foram propostas as seguintes equações para computar esta distância

através de um conjunto de *waypoints*:

$$W_S = \sum_{i \in S}^{|S|-1} W_{ij} \tag{3.4}$$

$$W_{ij} = \sqrt{(G_{ij})^2 + (z_j - z_i)^2} \tag{3.5}$$

Onde:

- W_S representa a distância voada por uma aeronave passando pelo conjunto de *waypoints* S.
- S representa o conjunto de *waypoints* sequenciais relacionados a trajetória da aeronave.
- W_{ij} representa a WPD entre um par de *waypoints* sequencias (i, j) em S.
- G_{ij} representa a GCD entre um par de *waypoints* sequencias (i, j) em S.
- z_k representa a altitude do *waypoint* k (km).

Baseando-se no teorema de pitágoras, a equação proposta para computar a WPD (eq. 3.4) considerou a fórmula de Haversine (G_{ij}) e a diferença de altitude entre *waypoints*.

A Figura 3.8 ilustra as métricas de distância GCD e WPD para três segmentos de um voo: subida (taxi-out, take-off e climb), cruzeiro, e descida (descent, landing e taxi-in).

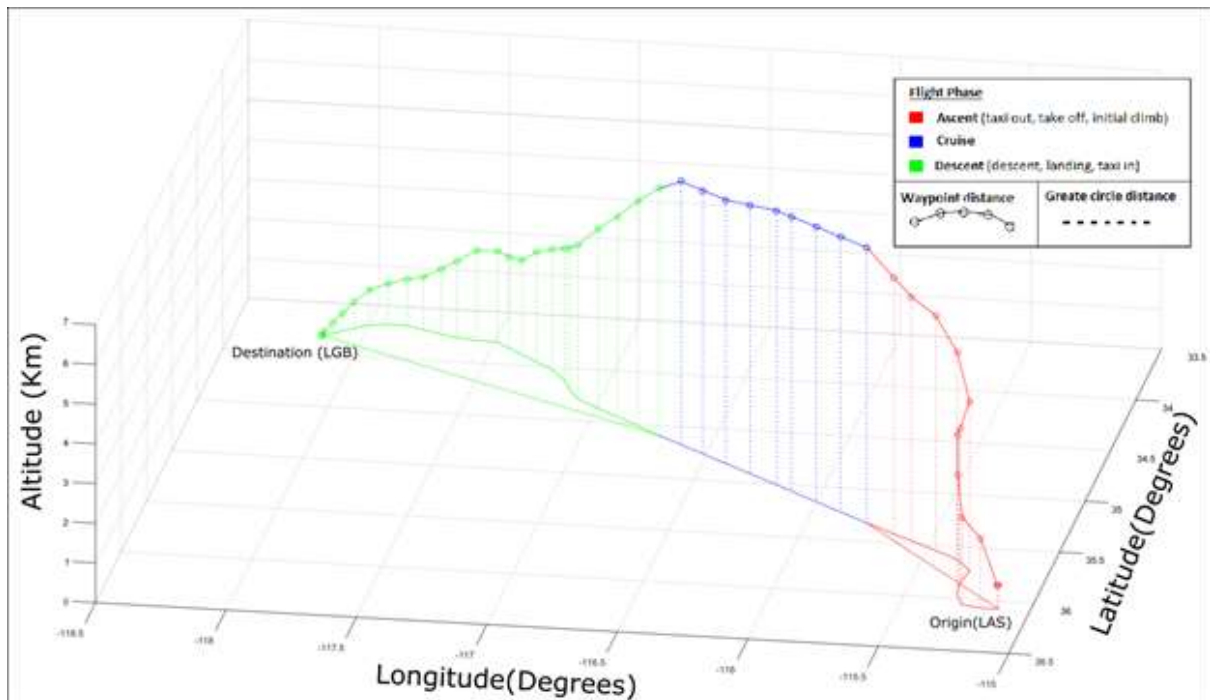


Figura 3.8: Métricas de distância: GCD vs. WPD

3) Desvio na trajetória: esta métrica indica uma medida de desempenho (percentual)

do qual uma aeronave desvia da *Great Circle Distance*. A equação 3.6 indica a forma como o desvio de uma trajetória é calculado.

$$D_s = \left(\frac{W_S}{G_S} - 1 \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

- W_S representa a *waypoint distance* (WPD) de um conjunto de *waypoints* S (eq. 3.5)
- G_S representa a *great circle distance* (GCD) entre o primeiro e o último *waypoint* de S.

Apesar da fórmula de Haversine [Wikipedia, 2017] simplificada assumir que a terra é uma esfera perfeita, isso não afeta significativamente a computação das distâncias, pois:

i) A GCD é comparada com a WPD, funcionando como um parâmetro relativo para estimar o desvio na trajetória (eq. 3.6), e não como uma métrica de desempenho direta.

ii) Na computação da WPD, somente voos com distâncias entre *waypoints* inferiores a 20 km foram considerados. Consequentemente, voos com consideráveis espaçamentos entre *waypoints* foram ignorados. A computação da WPD pode ser vista como um método de discretização, com aproximação aceitável para distância efetivamente voadas, tendo em vista que as distâncias entre *waypoints* são pequenas.

iii) Como pode ser visto na Figura 3.11, os voos analisados neste trabalho estão concentrados na Europa e EUA, ou seja, estão concentrados em regiões distantes dos polos da terra, onde a fórmula de Haversine apresenta maior precisão.

Métricas de consumo de combustível

As métricas relacionadas a consumo de combustível são:

1) Estimativa de consumo de combustível: um dos elementos mais importantes neste trabalho, esta métrica representa o combustível gasto por uma aeronave (kg). As equações envolvidas neste cálculo são apresentadas na seção 4.2.2.

2) Eficiência/intensidade de consumo de combustível: esta métrica representa a eficiência ou intensidade de combustível de um voo, a partir da combinação das métricas de distância voada (WPD), consumo de combustível e do número de assentos disponível na aeronave.

$$E = \frac{F}{s \times w_p} \quad (3.7)$$

Na equação 3.7, F é o consumo de combustível (kg), s é o número de assentos na aeronave e W_p é a distância voada passando pelo conjunto de *waypoints* p . A configuração

de assentos adotada foi obtida a partir de dados públicos disponíveis no Wikipedia and popular websites (ex. <http://www.seatguru.com>) os quais coletam dados de fabricantes de aeronaves. A Figura 3.9 apresenta a configuração de assentos adotada neste trabalhos.

Modelo	Assentos	Modelo	Assentos	Modelo	Assentos	Modelo	Assentos
A306	266	AT76	68	B738	189	E190	100
A318	132	B733	149	B739	215	F100	100
A319	156	B734	188	B752	228	F70	85
A320	150	B735	140	B753	289	RJ1H	100
A321	220	B736	132	B763	350	RJ85	85
A388	853	B737	149	B788	250	--	--

Figura 3.9: Modelos de aeronaves e configuração de assentos adotada

Eficiência de consumo de combustível é geralmente definida como a quantidade de uma métrica de produtividade (ex. distância) pelo consumo de combustível, enquanto a intensidade de consumo de combustível é usualmente definida como a quantidade de combustível utilizada por uma métrica de produtividade. As unidades tradicionais são kg/ASK (kg por assentos disponíveis e distância em km ²) or lb/ASM (libras por assentos e distância em milhas ³). Apesar dessas definições clássicas, neste trabalho decidiu-se utilizar o termo “Eficiência de consumo” e a unidade kg/ASM, assim como tem sido feito por outros autores [Park and O’Kelly, 2014].

3.4 Visualização de dados

A exploração dos resultados neste trabalho iniciou-se por meio de análise visual das métricas de distâncias voadas e consumo de combustível. A análise mostra como aeronaves desviam em suas rotas e consomem combustível considerando diferentes fases de voo, modelos de aeronave, companhias aéreas e aeroportos norte americanos e europeus. Algumas análises realizadas foram:

- i) Média de distâncias voadas e consumo de combustível por faixas de distância e fase de voo.
- ii) Aeroportos e seu impacto na eficiência de consumo de combustível e desvio nas etapas de subidas e descida.
- iii) Desvios nas trajetórias por modelo de aeronave.

²Do inglês: kg per available seat kilometer

³Do inglês: pounds per available seat mile

iv) Eficiência de consumo de combustível por companhia aérea e fase de voo.

A análise visual de dados foi realizada utilizando:

i) *Software excel*: gráficos e tabelas foram conectados a base de dados relacional implantada no sistema de gerenciamento de banco de dados *Microsoft SQL Sever 2014* [Microsoft Corporation, 2017c]. Os resultados apresentados são agregados (média e soma).

ii) Ferramenta de análise de dados WEB⁴: em função da complexidade e do grande volume de dados importados e/ou gerados pelas simulações, foi desenvolvida uma ferramenta para visualização de dados. Essa ferramenta possui um conjunto de relatórios dinâmicos que permitem a investigação de padrões nos dados de uma companhia aérea (dados passados e simulados).

Os principais relatórios dinâmicos desenvolvidos e disponíveis na ferramenta são:

- Relatório por companhia aérea:

Tempos e atrasos de voo

Mapa de voos

Listagem de voos

Distâncias (média, menor, maior)

Velocidades (média, menores, maiores)

Listagem de modelos de aeronaves

Histograma de Distâncias e voos

- Relatório por Aeroportos:

Mapa de voos

Listagem de voos

Companhias aéreas

Modelos de aeronaves

- Relatório referente a modelos aeronaves:

Número de voos x distâncias médias

Velocidades médias x Distância média

Um exemplo de relatório dinâmico é ilustrado na Figura 3.10. Nesse relatório é possível visualizar informações sobre o aeroporto de São Francisco, na Califórnia (EUA).

Assim como o software excel, a ferramenta de análise de dados de voos e companhias

⁴Acesso pela URL: <http://ifinas.azurewebsites.net>

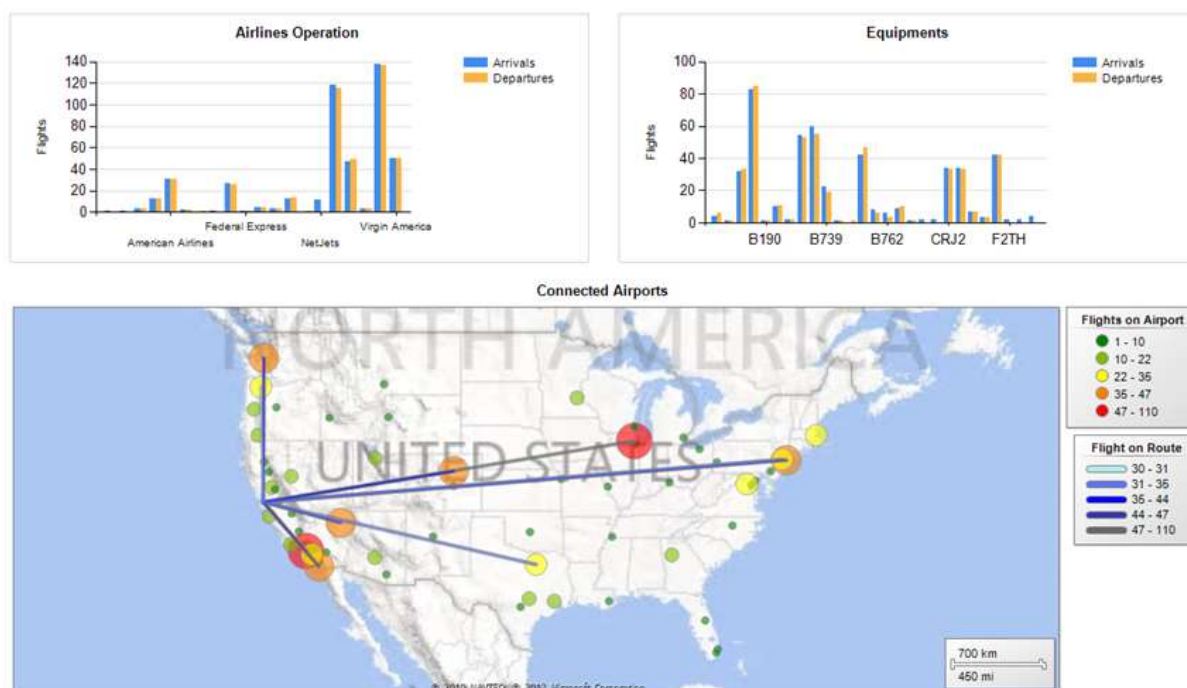


Figura 3.10: Alguns dados sobre o aeroporto de São Francisco, CA, EUA

aéreas, também utiliza o sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) *Microsoft SQL Server 2014*. Esse sistema possui recursos para armazenamento, manipulação, mineração, transformação e visualização de dados (relatórios dinâmicos). O trabalho foi desenvolvido com o uso de licença acadêmica (estudantil) cedida pela empresa Microsoft Corporation [Microsoft, 2017], o que viabiliza o desenvolvimento do projeto sem custos.

3.5 Mineração de dados

A combinação do conjunto de dados de voos obtidos e as métricas extraídas pelo sistema multiagente resultou em grande volume de dados na base de dados relacional. Para explorar esses dados complexos e extrair padrões operacionais, utilizou-se algoritmos de extração de regras de associação e modelos de árvores de decisão. Essencialmente, essas técnicas técnicas foram usadas para mostrar como companhias aéreas escolhem seus modelos de aeronave baseando-se em requisitos da missão, tais como o número de passageiros transportados em uma rota e a distância do voo.

Os algoritmos utilizados são nativamente implementados no software *Microsoft SQL Server Analysis Services (SSAS)* [Microsoft Corporation, 2017a, Microsoft Corporation, 2017b].

3.6 Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelo processamento do conjunto de dados de voos coletados por usuários alimentadores do sistema Planefinder.net e conjunto de parâmetros de desempenho de aeronaves disponível no BADA EUROCONTROL.

Os resultados são agrupados em: (i) visão geral dos dados de voos, (ii) análise de distância de voos, (iii) análise de consumo de combustível e (iv) mineração de dados.

As métricas computadas são apresentadas nesta seção de acordo com o sistema internacional de unidades (SI), com exceção da métrica de distância, que foi convertida para milhas náuticas (NM), medida essa comumente utilizada na indústria da aviação. A análise considerou valores agregados de conjuntos de voos, como a soma e média de valores.

3.6.1 Visão geral dos voos

O processo de extração, transformação e carregamento de dados (ETL) apresentado na seção 3.2, estruturou o conjunto inicial de dados obtidos da empresa Planefinder.net, resultando em um conjunto de 1.001.074 voos.

A distribuição desses voos em termos de distâncias e continentes (decolagens) são apresentados na Figura 3.11. Os voos são concentrados na Europa, Ásia e América do Norte. Os Estados Unidos possuem 71% do total de 137.706 voos na América do Norte. Brasil e Austrália são os países que possuem mais voos em seus continentes - respectivamente 67% e 82% do total de voos.

A maioria dos voos selecionados possui distância inferior a 1.000 NM, o que representa 52% de todos os voos no conjunto de dados obtido da empresa PlaneFinder.net.

Conforme abordado na subseção 3.2.2, os seguintes procedimentos de filtragem de dados foram aplicados: (i) remoção de voos com trajetórias incompletas, (ii) remoção de voos com modelo de aeronave não padronizado e (iii) redução de ruídos nos dados. Com isso, a amostra selecionada para análise foi reduzida de 1.001.074 para 36.190 voos, operados por 84 companhias aéreas e 28 modelos de aeronaves. Esses voos estão concentrados na Europa e EUA, como pode ser visto na Figura 3.12. Um número menor de voos na Ásia, Oceania e América do Sul também foi considerado nesta análise.

Percebeu-se que algumas regiões, como por exemplo os oceanos, grandes florestas e desertos, apresentam cobertura ADS-B limitada. Esse problema tende a ser comum também em regiões com baixo desenvolvimento socioeconômico, como por exemplo, no continente africano. A principal justificativa para essa tendência nessas regiões são os baixos números de voos efetivamente realizado e números de usuários alimentadores do

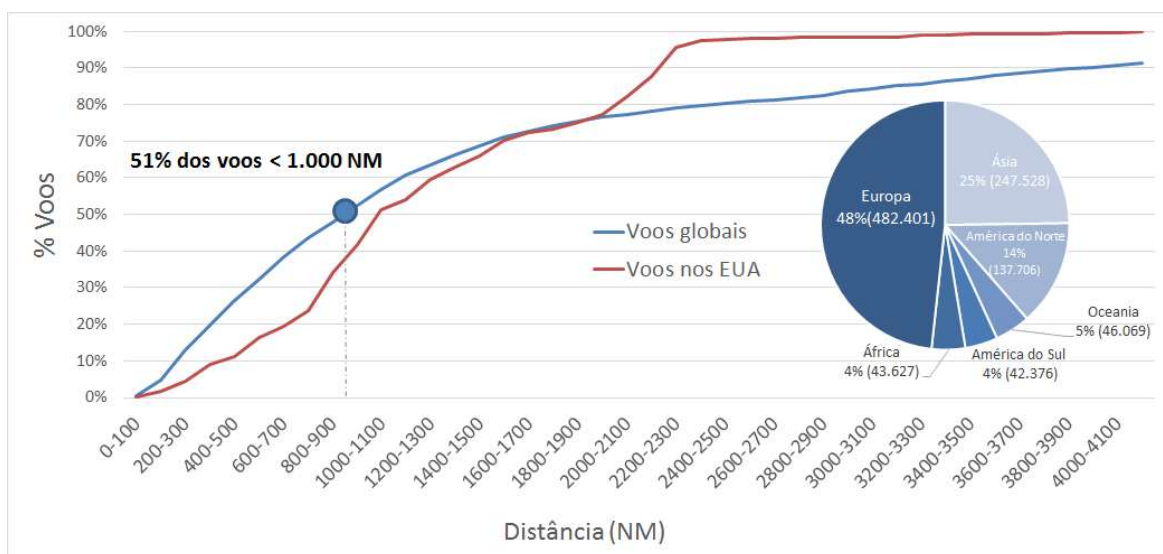


Figura 3.11: Distribuição de voos obtida da Planefinder.net (Outubro de 2013)

sistema ADS-B, com acesso a internet.



Figura 3.12: Amostra de voos utilizada na análise: uma visão geral de partidas e rotas

3.6.2 Análise das distâncias de voos

A análise de padrões de como aeronaves voam é uma importante tarefa para companhias aéreas, e autoridades do espaço aéreo identificarem ineficiências (ouliers) e corrigi-las. A análise das distâncias de voos foi realizada considerando as métricas de distância voada (WPD - eq. 3.4), a *great circle distance* (GCD - eq. 3.3) e a métrica de desvio, que

essencialmente compara a GCD com a WPD (eq. 3.6) e expressa seu resultado em percentual de diferença entre essas métricas. A média das distâncias e desvios foi calculada para as dimensões: fase de voo, faixa de distância, modelo de aeronave, companhia aérea e aeroportos norte americanos e europeus. Para simplificar a análise visual, as fases de voos foram agrupadas em:

- (i) Etapa de subida: combina as fases taxi-out, take-off e climb.
- (ii) Etapa de cruzeiro: corresponde a fase de voo de cruzeiro (cruise).
- (iii) Etapa de descida: combina as fases descent, landing e taxi-in.

A Figura 3.13 mostra a média das distâncias das fases de voos por faixas de distâncias totais dos voos. Nota-se uma relação não-linear nas distâncias das fases de voos com distância total inferior a 500 NM (926 km). Voos com distância total maior que 500 NM são mais constantes no tamanho das fases de subida e descida - aproximadamente 100 e 125 NM respectivamente - enquanto a fase de cruzeiro tende a ser mais previsível e linear com a distância total do voo.

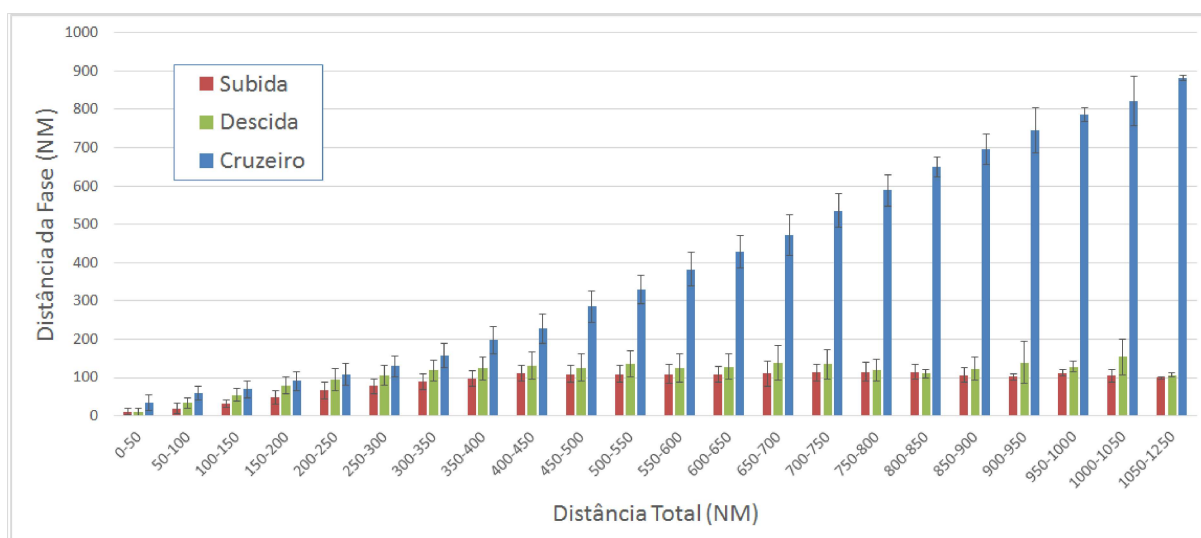


Figura 3.13: Distância da fase de voo pela distância total

A Figura 3.14 mostra os desvios médios (eq. 3.6) para diferentes distâncias de voos. Os maiores desvios estão concentrados em voos com distância total inferior a 500 NM, especialmente na etapa de descida (desvio médio de 28,31%). Desvios na fase de subida são aproximadamente 13%. A média dos desvios por fase de voo são sumarizados na Tabela 3.1.

Como pode ser visto na Tabela 3.1, o segmento de subida é onde encontram-se os

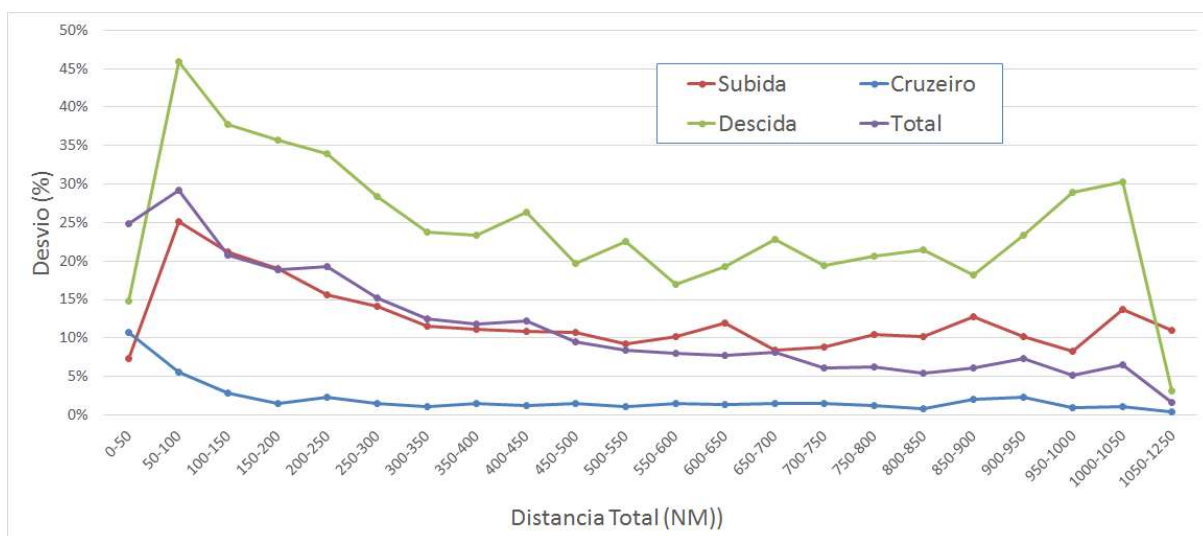


Figura 3.14: Desvios por fases de voo

Métrica (valor médio)	Segmento de Voo			Total
	Subida	Cruzeiro	Descida	Origem-Destino
GCD (% da trajetória)	21.96 % [63.60 NM]	51.51 % [149.15 NM]	26.52 % [76.80 NM]	100 % [289.55 NM]
WPD (% da trajetória)	22.41 % [72.23 NM]	47.01 % [151.48 NM]	30.58 % [98.54 NM]	100 % [322.25 NM]
Desvio	13.58 %	1.56 %	28.31 %	13.97 %

Tabela 3.1: Desvios por fases de voo

maiores desvios, enquanto a fase de cruzeiro tende a ser mais previsível. Para confirmar essa tendência, a Figura 3.15 ilustra a dispersão de *waypoints* (latitude e longitude) relacionada a um conjunto de 32 voos realizados entre Las Vegas (NV) e Long Beach (CA), nos EUA. Esses voos foram operados pela companhia aérea JetBlue por meio de aeronaves modelo A320 em diferentes dias no mês de setembro de 2013.

A comparação entre a distância voada (WPD) e a *great circle distance* (GCD) para diferentes modelos de aeronaves é apresentada na Tabela 3.2, em que pode-se observar o desvio médio nas trajetórias por tipo de aeronave e fase de voo. Somente modelos de aeronaves que tiveram pelo menos cinco voos foram considerados nessa tabela, pois isso o número total de voos (36.184) na tabela é inferior número de voos anteriormente selecionados (36.190). Aeronaves do tipo B735 desviam mais na fase de subida (22,8%), enquanto os voos com modelo de aeronave RJ1H tendem a desviar mais na fase de descida (65,36%). Isso não é uma assertão conclusiva em termos de eficiência geral desses modelos

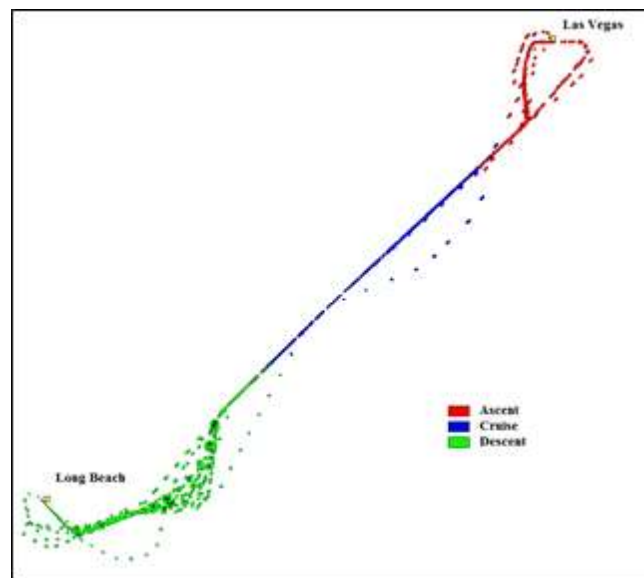


Figura 3.15: *Waypoints* de 32 voos entre Las Vegas (VN) e Long Beach (CA) nos EUA

de aeronave, pois o desvio depende dos requisitos da missão, tais como carga útil da aeronave, passageiros e distância a ser voada.

Modelo Aeronave	Desvio médio (%) por segmento de voo			
	Subida	Cruzeiro	Descida	Nº Voos
A306	19,90	0,90	38,92	98
A318	12,49	2,34	27,31	509
A319	14,57	1,38	29,82	10.180
A320	13,70	1,51	32,70	7.986
A321	12,48	1,27	31,26	1.686
A388	18,43	0,19	30,57	5
AT76	15,19	3,44	51,39	439
B733	16,24	1,02	21,63	745
B734	19,97	1,04	15,36	5
B735	22,86	1,15	17,29	114
B736	10,42	0,53	22,09	711
B737	12,14	1,02	21,94	2.161
B738	12,85	1,89	22,07	7.542
B739	15,05	1,47	35,56	233
B752	19,09	1,41	38,57	66
B753	14,25	1,55	40,45	5
B763	13,64	1,06	29,86	69
B788	7,16	2,05	24,06	16
E190	17,09	4,66	15,94	27
F100	10,54	2,93	36,06	107
F70	12,52	1,83	28,14	2.216
RJ1H	17,03	3,73	65,36	377
RJ85	12,89	1,83	34,87	887
Média	14,81	1,75	30,92	36.184 (total)

Tabela 3.2: Desvios por modelo de aeronave

Uma análise de desvio nas trajetórias de voos por aeroporto nos EUA e na Europa é apresentada nas Tabelas 3.3 e 3.4. Resultados indicam que os seguintes aeroportos - representados por códigos IATA - possuem consideráveis desvios nos segmentos de subida ou descida, comparado ao desvio médio das trajetórias:

- i) Aeroportos na Europa (segmento de subida): EDI, FRA, LGW e ORY;
- ii) Aeroportos nos EUA (segmento de subida): BOS, JFK, MIA e SNA;
- iii) Aeroportos na Europa (segmento de descida): ZRH e LGW;
- iv) Aeroportos nos EUA (segmento de descida): LGA, MCO e SLC.

Uma hipótese que explica o motivo pelos desvios na etapa de subida é porque aeronaves decolam em direção ao oceano para evitar ruídos em áreas residenciais. Desvios na fase de subida podem também ocorrer em alguns aeroportos devido a de restrições impostas no espaço aéreo em função da proximidade de outros aeroportos, como por exemplo, o aeroporto JFK é próximo aos aeroportos EWR e LGA. Na fase de descida, aeronaves podem desviar em função de várias razões, tais como restrições no espaço aéreo e congestionamentos.

Aerportos Europeus			Desvio médio (%) por segmento de voo			Número de voos	
Código IATA	Cidade	País	Subida	Cruzeiro	Descida	Pousos	Decolagens
AMS	Amsterdam	Netherlands	12,38	1,22	27,66	3.744	3.553
BFS	Belfast	United Kingdom	9,63	1,67	15,17	932	959
BGO	Bergen	Norway	10,03	1,08	19,87	631	450
BHX	Birmingham	United Kingdom	13,65	2,06	22,00	472	348
BOD	Bordeaux	France	10,83	0,75	5,87	275	423
BRS	Bristol	United Kingdom	17,86	3,03	20,01	523	470
BRU	Brussels	Belgium	6,75	2,53	34,15	534	457
CDG	Paris	France	13,20	1,19	32,94	2.371	1.616
CPH	Copenhagen	Denmark	6,67	0,83	14,36	1.319	1941
DUB	Dublin	Ireland	18,15	3,01	28,40	2.095	2.712
DUS	Düsseldorf	Germany	14,58	1,93	33,99	477	1.050
EDI	Edinburgh	United Kingdom	26,43	1,37	20,81	1.091	1.108
FRA	Frankfurt	Germany	23,19	1,32	26,38	115	837
GLA	Glasgow	United Kingdom	15,81	1,39	20,03	633	658
HAM	Hamburg	Germany	8,66	1,21	33,07	901	595
LGW	London	United Kingdom	19,81	1,48	41,02	1.456	1.153
LHR	London	United Kingdom	16,92	1,13	57,71	3.309	2.732
LPL	Liverpool	United Kingdom	12,13	1,14	23,66	463	393
LTN	London	United Kingdom	17,15	1,20	30,60	712	609
MAN	Manchester	United Kingdom	17,85	1,87	33,97	961	776
ORY	Paris	France	22,39	1,38	31,30	524	276
OSL	Oslo	Norway	9,56	0,44	14,18	936	1.411
STN	London	United Kingdom	10,20	2,11	24,90	1.272	1.048
SVG	Stavanger	Norway	14,58	0,71	12,20	828	221
ZRH	Zurich	Switzerland	9,80	1,48	42,35	803	650
Média aritmética			14,33	1,5	26,66	27.377 (total)	26.446 (total)

Tabela 3.3: Desvios nos aeroportos europeus

Os resultados indicam também que os seguintes aeroportos - representados por códigos IATA - possuem pequenos desvios nos segmentos de subida ou descida, comparado ao desvio médio das trajetórias:

- i) Aeroportos na Europa (segmento de subida): BRU, CPH, HAM, OSL e ZRH;
- ii) Aeroportos nos EUA (segmento de subida): DEN, IAH, ORD, SAN e SMF.
- iii) Aeroportos na Europa (segmento de descida): BOD, CPH, OSL e SVG;
- iv) Aeroportos nos EUA (segmento de descida): DFW, OAK e SFO.

Código IATA	Cidade	Nome	Desvio médio (%) por segmento de voo		
			Subida	Cruzeiro	Descida
AUS	Austin	Austin Bergstrom Intl	10,45	2,78	18,67
BOS	Boston	General Edward Lawrence Logan Intl	42,00	2,43	22,82
BWI	Baltimore	Baltimore Washington Intl	23,60	0,83	18,33
DCA	Washington	Ronald Reagan Washington Natl	16,37	0,34	13,92
DEN	Denver	Denver Intl	6,09	0,54	20,60
DFW	Dallas-Fort Worth	Dallas Fort Worth Intl	19,43	0,84	9,13
FLL	Fort Lauderdale	Fort Lauderdale Hollywood Intl	20,56	0,51	13,87
IAH	Houston	George Bush Intercontinental	6,78	2,48	22,67
JFK	New York	John F Kennedy Intl	38,04	1,76	25,60
LAS	Las Vegas	McCarran Intl	16,52	0,57	12,67
LAX	Los Angeles	Los Angeles Intl	17,23	0,50	28,43
LGA	New York	La Guardia	12,18	0,69	34,15
LGB	Long Beach	Long Beach	14,48	0,38	35,31
MCO	Orlando	Orlando Intl	21,07	5,43	33,66
MIA	Miami	Miami Intl	26,26	0,29	22,97
OAK	Oakland	Metropolitan Oakland Intl	23,78	0,59	2,57
ORD	Chicago	Chicago O'Hare Intl	3,72	0,63	29,40
SAN	San Diego	San Diego Intl	6,18	0,67	24,00
SFO	San Francisco	San Francisco Intl	17,41	1,50	7,52
SLC	Salt Lake City	Salt Lake City Intl	12,34	1,96	38,65
SMF	Sacramento	Sacramento Intl	4,22	1,94	13,05
SNA	Santa Ana	John Wayne Airport	45,09	0,21	14,54
Média aritmética			18,35	1,27	21,05

Tabela 3.4: Desvios nos aeroportos norte-americanos

Alguns aeroportos europeus possuem padrões interessantes relacionados a desvios nos segmentos de subida e descida. Os aeroportos CPH (Copenhague) e OSL (Oslo) possuem pequenos desvios nos segmentos de subida e descida, enquanto o aeroporto LGW (London) possui grande desvio em ambos segmentos. O aeroporto ZRH (Zurich) possui pequeno desvio (9,8%) no segmento de subida dos voos que decolaram desse aeroporto, no entanto, os desvios no segmento de descida dos voos que chegam nesse aeroporto mostraram se grandes (42,35%).

Os aeroportos nos EUA adicionam mais desvio no segmento de subida do que os aeroportos Europeus (18,35% vs 14,33%). Por outro lado, as aeronaves que chegam nos aeroportos dos EUA tendem a desviar menos em seus estágios de descida, do que as aeronaves que pousam nos aeroportos europeus (21.05 % vs 26.66 %).

As Figuras 3.16 e 3.17 complementam a análise de desvios em trajetórias, ilustrando os desvio médios por fase de voo e companhias aéreas. Similar a análise de modelo de aeronave, os desvios por companhia aérea não podem ser utilizados isoladamente para inferir a eficiência da companhia aérea sem levar em consideração os requisitos da missão.

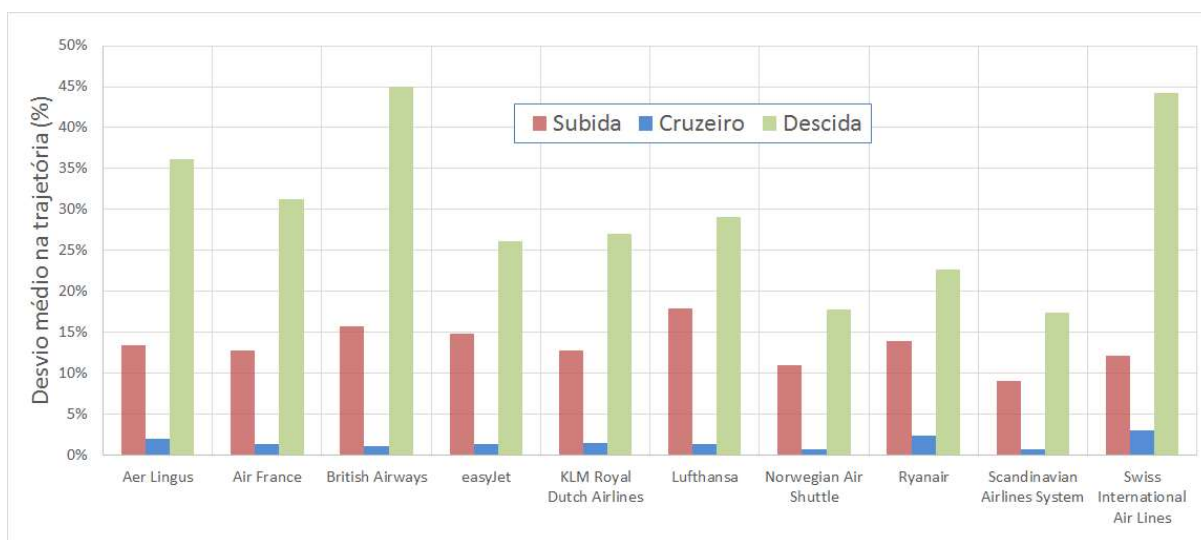


Figura 3.16: Voos operados por companhias aéreas da Europa e seus desvios médios em trajetórias

As companhias aéreas europeias tendem a ser similares entre si em termos de desvios na etapa de subida. A diferença nos desvios médios no segmento de subida da companhia aérea que mais desvia e a que menos desvia na Europa é inferior a 9%, enquanto a diferença para as companhias aéreas norte americanas é aproximadamente 22%.

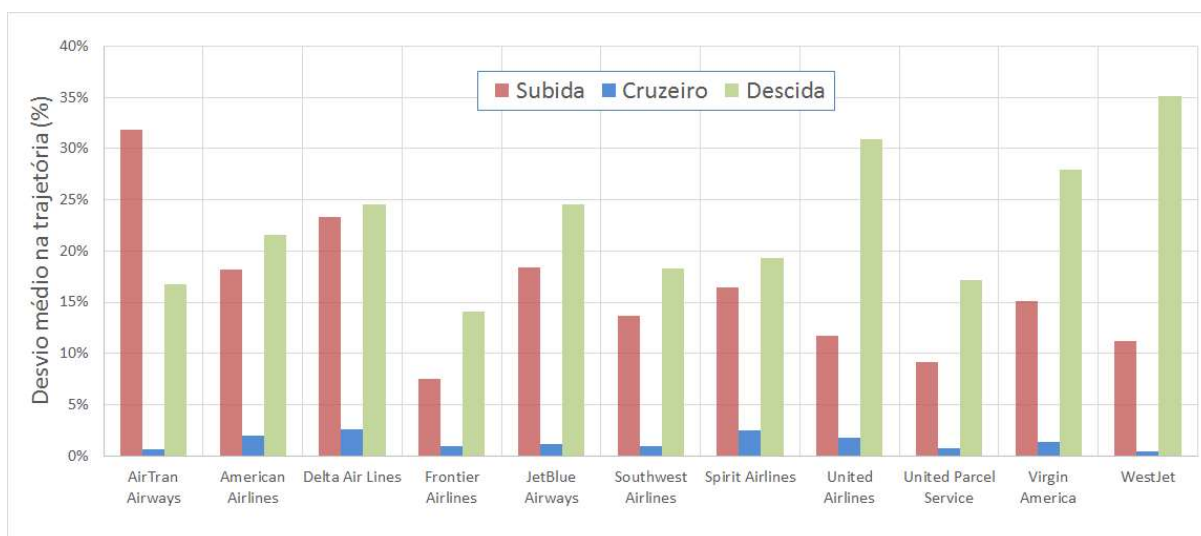


Figura 3.17: Voos operados por companhias aéreas nos EUA e seus desvios médios em trajetórias

3.6.3 Análise de consumo de combustível

Esta subseção mostra uma análise da eficiência de combustível para diferentes distâncias de voos e companhias aéreas. Na Figura 3.18 observa-se que a estimativa da quantidade de combustível consumido no segmento de subida é maior que o combustível consumido na fase de cruzeiro, para voos com distância abaixo de 500 NM.

Similar ao gráfico da distância voada (Figura 3.13), o consumo de combustível tende a ser linear para voos com distância maior que 500 NM. Nesse caso, o consumo de combustível no estágio de subida é aproximadamente três vezes maior que o consumo durante a descida. Esses consumos médios são respectivamente 1.350 kg e 450 kg. Na fase de cruzeiro o consumo mostrou-se aproximado para a seguinte equação linear:

$$f(x) = 5,05x + 770,78 \quad (3.8)$$

Onde, x é a *great circle distance* entre os aeroportos de origem e destino, $a = 5,05$ e $b=770,78$ são coeficientes de obtidos utilizando método de regressão linear (Weisberg, 2013).

As companhias aéreas da Europa e EUA (apresentadas nas Figuras 3.16 e 3.17) foram analisadas em termos de eficiência de consumo de combustível (kg por assento x distância em NM). Por razões de anonimato, as companhias não foram identificadas neste estudo.

Os resultados apresentados na Figura 3.19 e 3.20 mostram a eficiência média de consumo de combustível para cada segmento de voo analisado, assim como para a trajetória

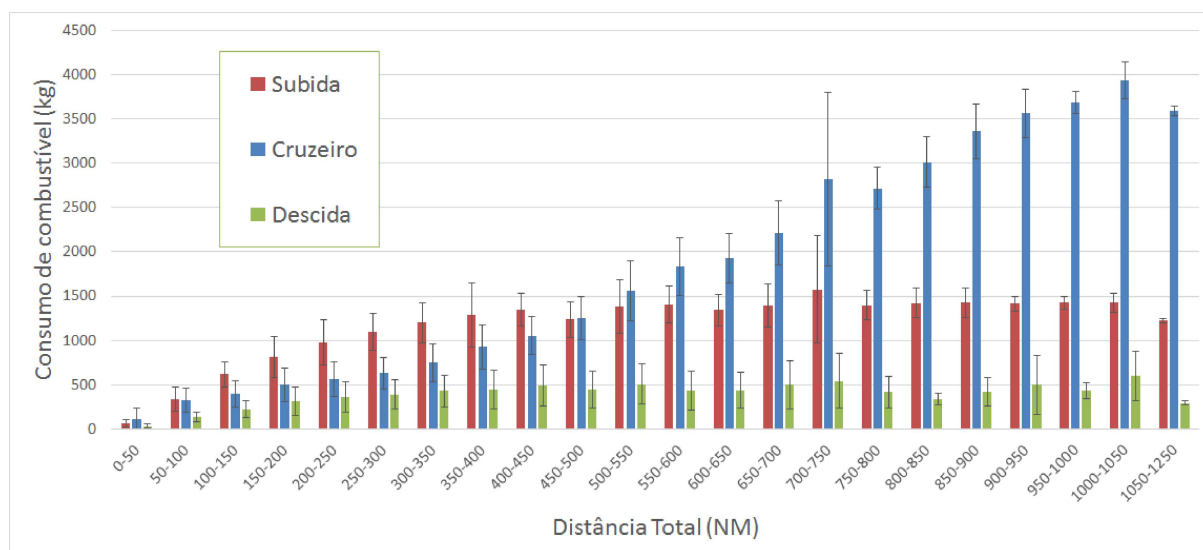


Figura 3.18: Consumo de combustível por fase e distância de voos

completa. Nesta análise foram selecionadas as 10 companhias aéreas com mais voos na Europa, e todas as 11 companhias aéreas norte americanas presentes na amostra de dados filtrada.

As eficiências das companhias aéreas analisadas variam de 0,036 (A) a 0,051 (J), enquanto a eficiência das companhias aéreas do EUA variou de 0,036 (A) a 0,046 (K). Quanto maior o valor dessa métrica, menos eficiente são os voos da empresa. A comparação mostra que a companhia aérea europeia mais eficiente (A) é 28,5% mais eficiente que a décima companhia aérea (J) e 14,8% mais eficiente que a média (0,042).

A companhia aérea norte americana mais eficiente (A) é 20,9% mais eficiente que a menos eficiente (K) e 11,7% mais eficiente que a média (0,041). A diferença entre a média e a companhia menos eficiente é 10,3%. Essa diferença mostra que existem oportunidades para companhias aéreas melhorarem sua eficiência no consumo de combustível.

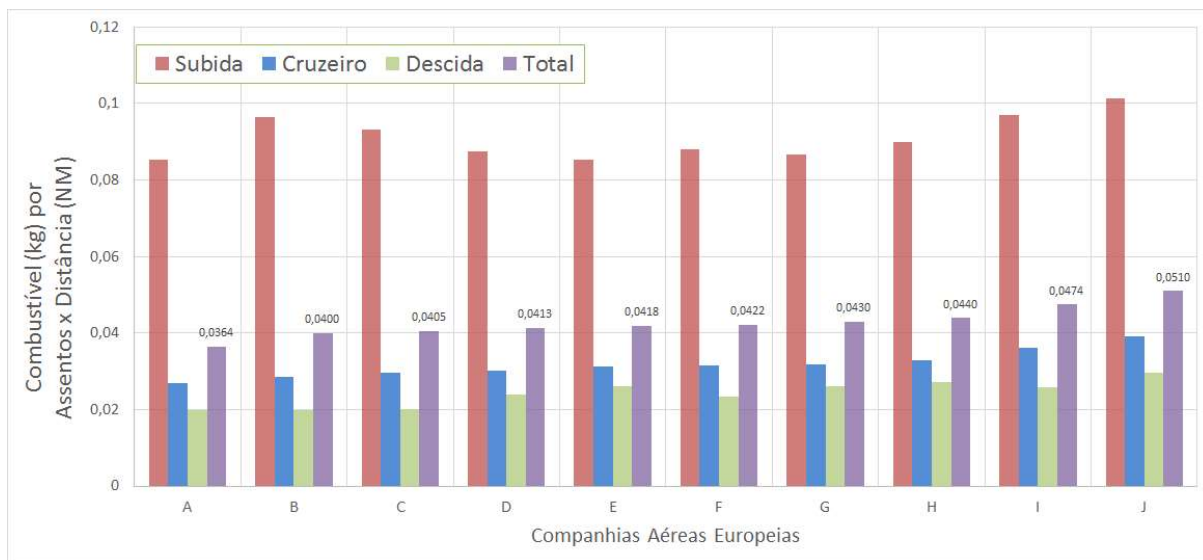


Figura 3.19: Eficiência de consumo de combustível por fase de voo de companhias aéreas na Europa

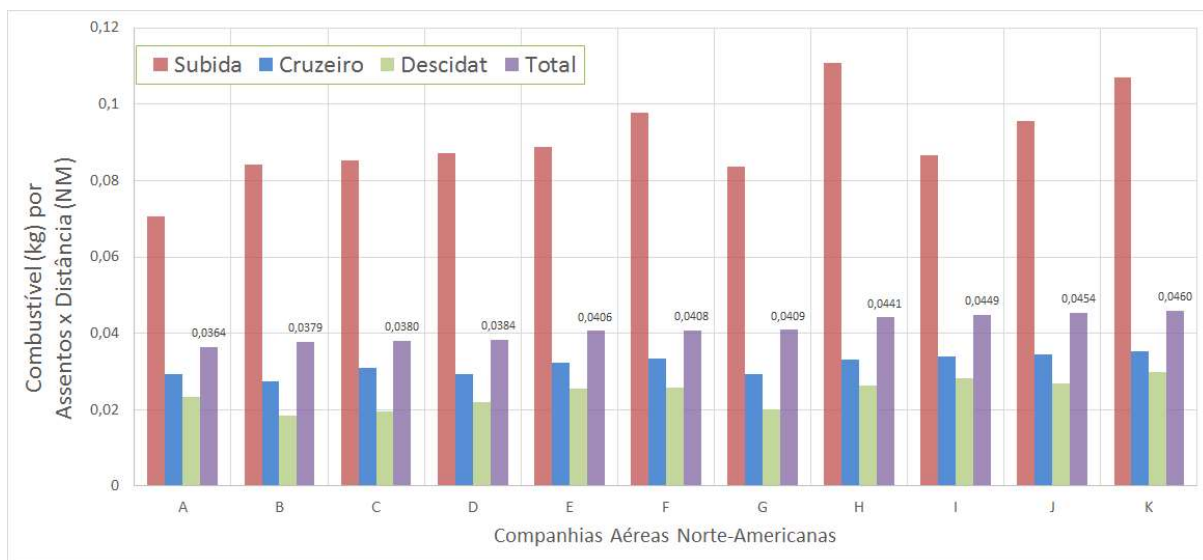


Figura 3.20: Eficiência de consumo de combustível por fase de voo de companhias aéreas nos EUA

A obtenção ampla de dados de desempenho de aeronaves a partir de *Flight Data Recorder* (FDR) junto a companhias aéreas não é uma tarefa fácil. Muitas das companhias aéreas não possuem processos internos estruturados para acesso e compartilhamento desses dados com a comunidade científica. Em função disso, trabalhos com o propósito de uso de dados de voos de diferentes companhias aéreas, como este trabalho, se restringem a utilizar dados como aqueles transmitidos por dispositivos ADS-B das aeronaves. Dada a limitação de acesso a dados de performance de voos, duas simplificações neste trabalho foram assumidas:

A primeira simplificação diz respeito a massa inicial das aeronaves, o qual foi assumido como sendo constante. A massa inicial foi considerada como 50% da diferença entre a aeronave vazia⁵ (OEW) e a máxima massa de decolagem⁶ (MTOW), interpretado como 50% de combustível e 50% da carga útil da aeronave (*payload*). Essa suposição é razoável, pois:

(i) embora a massa inicial de uma aeronave possua efeito direto sobre a estimativa de consumo de combustível do voo, a análise proposta neste trabalho considerou valores médio (de vários voos), o que tende a absorver discrepâncias sem afetar globalmente os resultados.

(ii) os voos analisados possuem distância inferior a 1.000 NM. Com isso, o combustível necessário tende a ser inferior a 50% ao volume máximo que a aeronave pode carregar. Visando confirmar a validade dessas suposições, os 36.190 voos da amostra selecionada deste trabalho foram simulados/reproduzidos 75 vezes com diferentes massas iniciais, variando de 25% a 100% da diferença entre MTOW e OEW (MTOW - OEW).

A classificação das companhias aéreas dos EUA (anonimizadas) e conclusões em termos de eficiência de consumo de combustível, independente da configuração de massa inicial das aeroves, não sofreu alterações, como pode ser visto na Figura 3.21.

A segunda simplificação neste trabalho diz respeito ao uso de dados de vento no modelo de estimativa de consumo de combustível. O modelo de consumo de combustível utilizou a velocidade em relação ao solo (*ground speed*) disponível nos dados ADS-B obtidos, ao invés da velocidade em relação ao ar (*true airspeed*). Certamente, a *true airspeed* tende a ser diferente da *ground speed*, mas o uso da *ground speed* se mostrou razoável, pois:

(i) Um voo típico geralmente voa utilizando o vento (*ground speed* tende a ser maior que *true airspeed*). Fazendo o modelo de consumo de combustível utilizar a *ground airspeed*, levará esse modelo a sobrestimar o consumo de combustível. Metodologicamente, isso faz com que os consumos sejam padronizados no pior caso, em termos de consumo, o que reduz

⁵Do inglês: *operating empty weight*

⁶Do inglês: *maximum take-off weight*

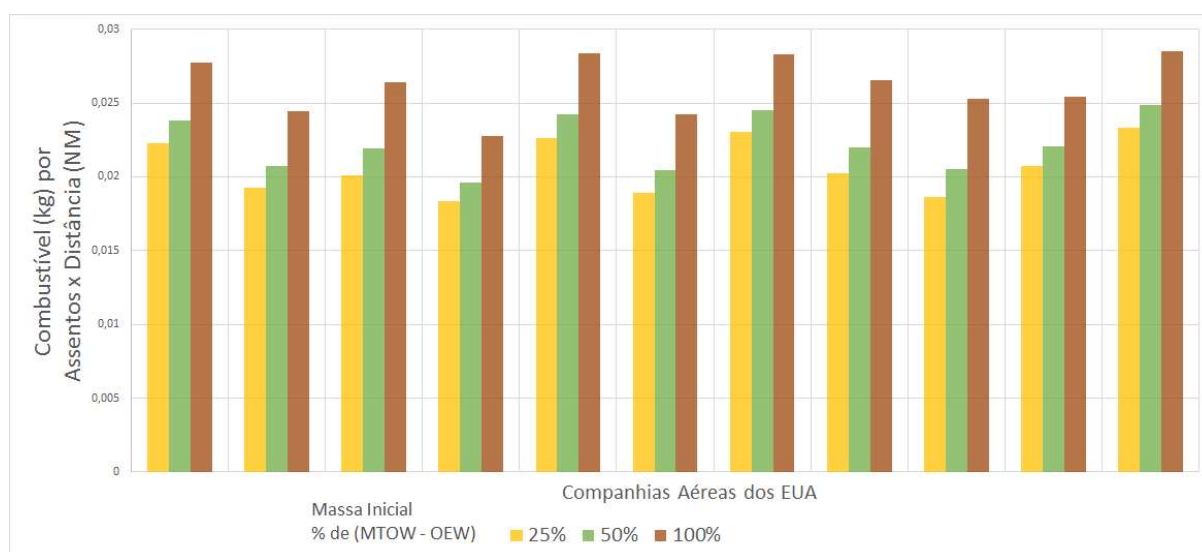


Figura 3.21: Variação da massa inicial da aeronave e sua eficiência de consumo por segmento de voo

a chance das companhias aéreas e voos obterem vantagens em análises comparativas.

(ii) De forma similar as discussões sobre a massa inicial da aeronave, embora a *true airspeed* de um voo individual possua efeito direto sobre a estimativa de consumo de combustível, as análises foram feitas utilizando valores médios, o que tende a observar discrepâncias sem afetar os resultados globais da análise.

Embora não se tenha utilizado na análise de dados o modelo de computação de vento, sua implementação é descrita no próximo capítulo, na seção 4.2.3.

3.6.4 Mineração de dados

Foi realizada um análise descritiva que mostra como companhias aéreas escolhem o modelo de aeronave com base nos requisitos de missão: número de passageiros e distância voada. Essa análise é potencialmente no planejamento de novas trajetórias e alocação de aeronaves. O uso de técnicas de mineração de dados se mostra apropriado, tendo o volume de dados disponível para construção e validação de modelos.

Diferentemente das análises anteriores que considerarm a amostragem de 36.190 voos completos, nesta análise descritiva foram considerados os 1.001.074 voos extraídos do conjunto de dados obtidos junto a empresa Planefinder.net. Essa ampliação da amostragem de dados foi possível pois não foi necessário analisar trajetórias das aeronaves.

Regras de associação e um modelo de árvore de decisão foram extraídos a partir da seleção aleatória de 70% dos voos (aproximadamente 700 mil voos). Os outros 30% dos

voos (aproximadamente 300 mil voos) foram utilizados para validar as regras e modelos extraídos. O algoritmo apriori, o qual é parametrizado pelas medidas estatísticas de suporte e confiança, foi utilizado para extrair as regras de associação (Aggarwal and Yu, 1999; Wu et al., 2008). Regras foram consideradas relevantes se possuem confiança maior que 40%. Os resultados são apresentados na Figura 3.22.

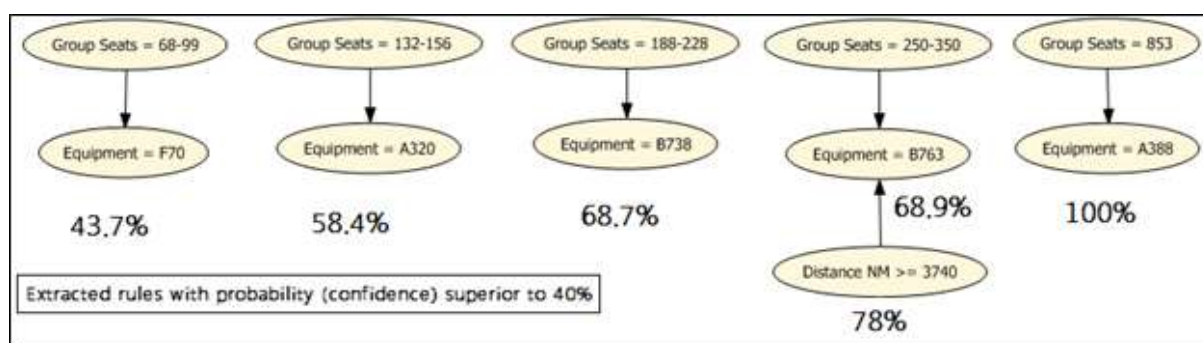


Figura 3.22: Regras extraídas utilizando o algoritmo Apriori

As regras extraídas estão apresentadas no formato (S → E) e (S, D → E), onde E representa o número de assentos requisitados, D é a distância da viagem (*great circle distance*), e E representa o modelo de aeronave escolhido.

Observa-se que o modelo de aeronave F70 foi utilizado em 43,7% de todos os voos onde o número de assentos varia de 68 a 99. Os modelos de aeronaves A320 e B738 foram os mais utilizados em seus grupos de assento - aproximadamente 58,4% e 68,7% respectivamente. O modelo de aeronave B763 foi utilizado em 68,9% dos voos com assentos entre 250 e 360. A confiança do modelo B763 aumenta para 78% nos casos em que a distância é superior a 3,740 NM. O modelo Airbus 388 não possui competidores na sua categoria (aproximadamente 850 assentos).

Todas as regras extraídas pelo algoritmo apriori foram coincidentes com o modelo de árvore de decisão extraído. No entanto, alguns novos padrões foram descobertos na extração da árvore de decisão, conforme pode ser visto na Tabela 3.5.

Voos com 100 assentos tendem a ser distribuídos uniformemente entre os modelos de aeronave E190, F100 e RJ1H. Se for considerada a distância, então essa distribuição tende a ser diferente, como mostrado na Tabela 3.5.

Outros grupos de assentos possuem padrões quando considerada a distância. Por exemplo, voos no grupo de assentos 188-288 tendem a utilizar o modelo de aeronave B738 (68,7%), de acordo com as regras extraídas pelo algoritmo Apriori (Figura 3.22). Porém, se a distância for entre 2.550 e 3.400 NM, o modelo de aeronave B752 é utilizado em 81,9% dos voos.

Grupo de Assentos	Distância (NM)	Voos	Modelo Aeronave	Probabilidade (confiança) (%)
100 <u>Distribuição</u> - E190 (32,89%) - F100 (34,01%) - RJ1H (33,09%)	< 83	1.354	RJ1H	52,24
	= 332 e < 581	840	F100	61,49
	= 581 e < 825	645	F100	71,90
	= 825 e < 4,950	25	E190	52,67
	= 4,950	29	F100	93,37
132-156	= 2,805 e < 3,060	76	A318	85,38
188-228	= 2,550 e < 3,400	3.135	B752	81,98
250-350	= 4,760 e < 5,100	343	B788	64,23
	= 5,100	215	B788	89,05

Tabela 3.5: Modelo de escolha de modelos de aeronaves

Capítulo 4

Simulação Multiagente

Como forma de auxiliar companhias aéreas no estudo de estratégias para minimização de custos operacionais, foi desenvolvido um simulador multiagente capaz de reproduzir voos históricos e simular novos cenários/estratégias e avaliar seu impacto. O simulador é parte de uma ferramenta computacional chamada *IFMAS - Intelligent Flight Multiagent System*. Além do simulador, o *IFMAS* possui também uma ferramenta de análise de dados WEB, apresentada na seção 3.4.

A Figura 4.1 traz uma visão sistemática sobre a arquitetura do *IFMAS*.

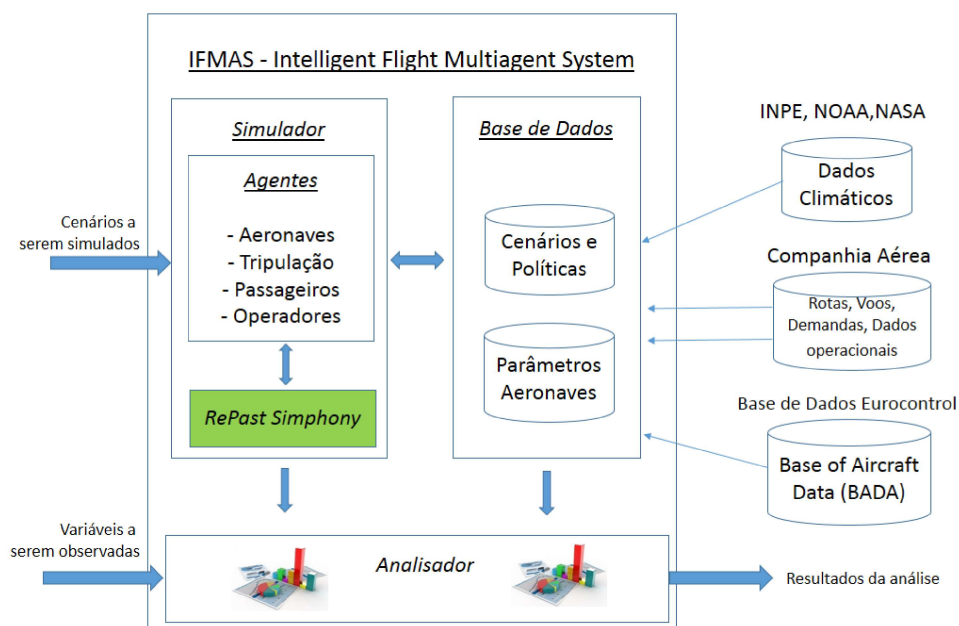


Figura 4.1: Arquitetura do IFMAS

Observa-se na Figura 4.1 que o *IFMAS* possui três módulos principais. O módulo de simulação é conectado ao módulo de base de dados. Isso permite, por exemplo, simular políticas e cenários pré-configurados e armazenados. Nesse caso, o usuário deve informar o cenário e as condições que deseja simular.

O módulo de análise de dados é capaz de gerar gráficos dinâmicos e estatísticos a partir de dados resultantes de simulações ou a partir de dados importados de fontes externas (ex. dados de voos de uma companhia aérea). Para isso, o usuário deve informar ao sistema os parâmetros que irão definir o conjunto de dados a ser analisado, como por exemplo, as datas e os aeroportos que farão parte da análise.

A base de dados do *IFMAS* é alimentada por fontes externas de dados ou retroalimentada com resultados das simulações. Os dados atualmente mapeados de fontes externas são: dados climáticos (NOAA), dados de voos (Planefinder.net e FlightAware) e parâmetros de aeronaves (Eurocontrol BADA).

Nas próximas seções são apresentados os aspectos computacionais do sistema multiagente desenvolvido, os seus modelos envolvidos e os resultados de experimentos computacionais realizados utilizando o sistema.

4.1 Sistema computacional

Uma visão geral do simulador e seus recursos é apresentada na Figura 4.2. A ferramenta possui recursos para configuração de diferentes cenários, parâmetros e gráficos a serem analisados. É possível visualizar as simulações de forma detalhada, por meio de recursos gráficos tridimensionais (*GIS 3D*).

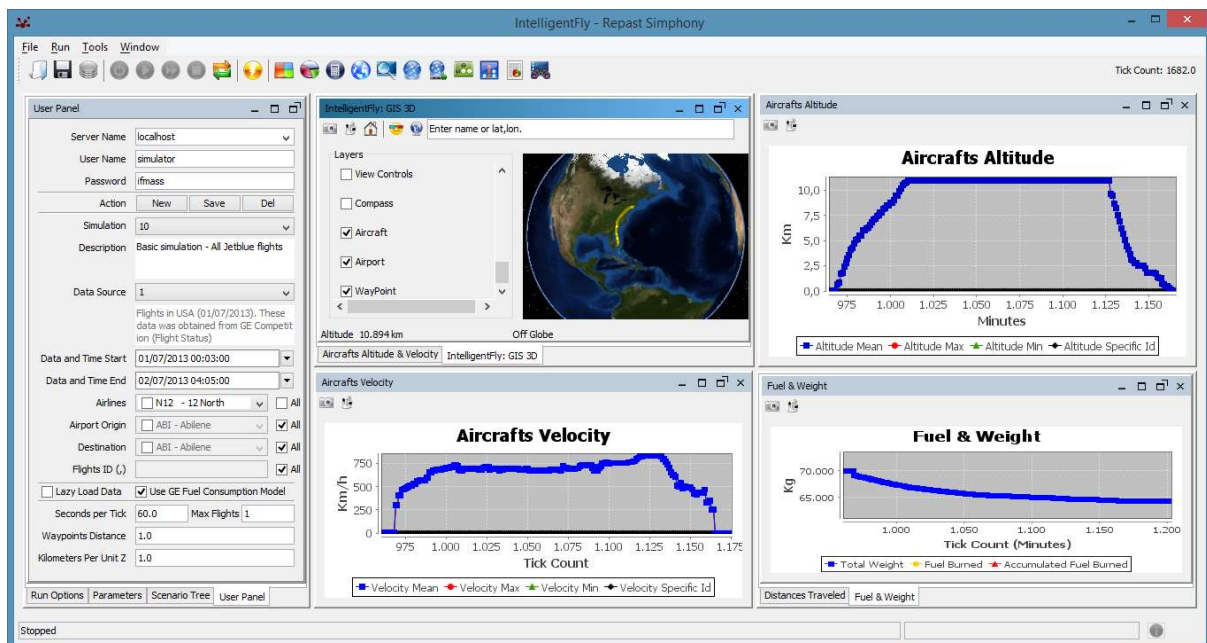


Figura 4.2: Tela principal do simulador

No simulador, alguns gráficos estão disponíveis para acompanhamento instantâneo das simulações. Esses gráficos permitem a visualização de consumo do combustível das aeronaves, velocidades, altitudes, massas, distâncias, níveis de energia (cinética, potencial, dissipada) e uso do espaço aéreo.

4.1.1 Modelagem multiagente

No sistema multiagente desenvolvido, cada aeronave foi modelada como um agente, conectado a um objeto *Flight*. Os objetos *Flight* possuem dados da missão, tais como número do voo, companhia aérea, aeroportos de origem e destino, data e hora de partida e chegada. O objeto *Flight* também é composto de outros objetos do tipo *waypoint*, os quais possuem os atributos: latitude, longitude, velocidade em relação ao solo e *bearing angle*. Os agentes *Aircraft* seguem suas trajetórias computando os objetos *waypoints* sequencialmente.

Apesar dos agentes *Aircraft* não interagirem diretamente com outros agentes, o sistema de simulação proposto foi desenvolvido utilizando tecnologia de sistemas multiagentes em função da complexidade do projeto como um todo. A implementação das aeronaves como agentes habilita a adição futura de novos agentes e interações, tais como passageiros, bagagens, agentes controladores de tráfego aéreo, agentes gestores de voos nas companhias aéreas (*flight dispatcher*), entre outros.

No desenvolvimento do simulador, optou-se pelo uso das tecnologias de desenvolvimento de software *Java* [Oracle Technologies, 2007], *Eclipse* [The Eclipse Foundation, 2017] e o *framework* de simulação multiagentes *Repast Symphony* - versão 2.2 [Repast, 2017]. A escolha de tais tecnologias foi baseada em sua maturidade e amplo uso por parte da comunidade científica. Além disso, não existe custo para uso de tais tecnologias (licenciamento gratuito).

4.1.2 Modelo de dados

O diagrama de entidade e relacionamento do banco de dados do sistema *IFMAS* é apresentado na Figura 4.3

Existem duas tabelas importantes nesse diagrama: *flight* e *simulation*. A primeira armazena os dados de voos (voos históricos ou hipotéticos) e possui ligações com as tabelas de aeroporto (*airport*), companhia aérea (*airline*), posições/waypoints (*flight-position*), modelo de aeronave (*aircraft*) e fonte de dados (*data-source*). Já a tabela *simulation* armazena dados relacionados a configuração de simulações computacionais que estejam vinculadas aos voos da tabela *flight*. Os resultados da simulação são armazenados na tabela *simulation-result*. Tipicamente, essa tabela armazena as métricas de desempenho dos voos, como consumo de combustível e distância voada. A frequência e detalhes de como essas métricas serão monitoradas são estabelecidos por configurações armazenadas nas tabelas *target* e *simulation-target*.

A ferramenta de visualização de dados WEB também se conecta a diferentes tabelas do sistema *IFMAS* para exibição dos dados, estabelecendo aqui sua maior conexão com o simulador multiagente.

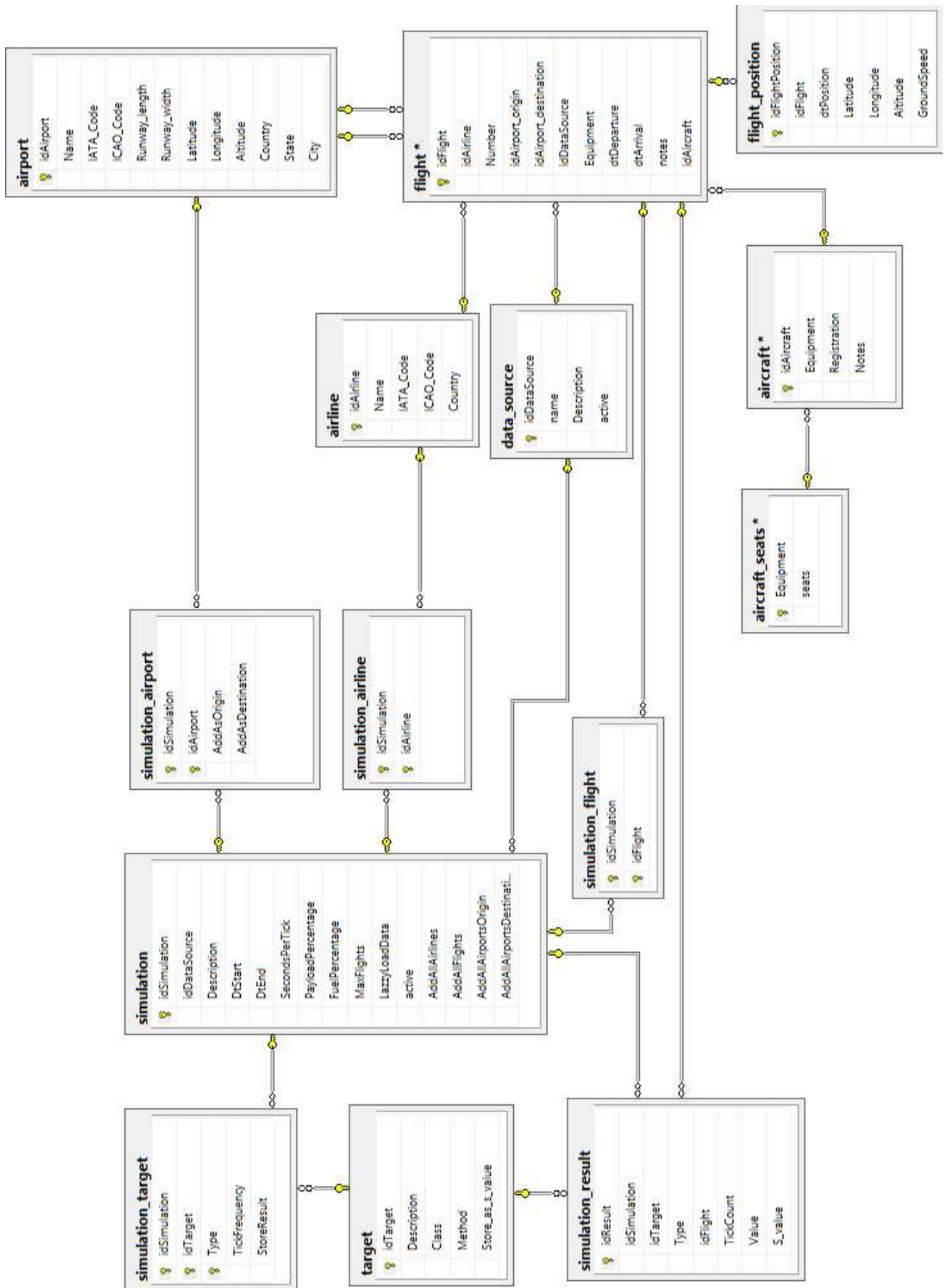


Figura 4.3: Diagrama de entidade e relacionamento

4.1.3 Diagrama de classes

O diagrama de classes do simulador é apresentado na Figura 4.4. Esse diagrama foi feito utilizando a linguagem de modelagem UML¹ [Rumbaugh et al., 2005].

Destaca-se no diagrama de classe a entidade *Aircraft* que possui propriedades e métodos relacionados a simulação de aeronaves. Essa entidade é vinculada a outras classes, como *Waypoint*, *Flight*, *Event*, e *FuelBurnModel*. Essencialmente, quando uma simulação é inicializada, o método principal da classe *MainContext* invoca na classe *FlightDataBase* método para buscar no banco de dados *IFMAS*, dados de voos a serem simulados. Ao obter esses dados, objetos da classe *Aircraft* referente aos voos selecionados são instanciados e adicionados a simulação. A partir daí, a simulação é inicializada.

O código-fonte com implementações do simulador está comentado e disponível em <http://ifmas.visualstudio.com>.

¹Do inglês: Unified Modeling Language

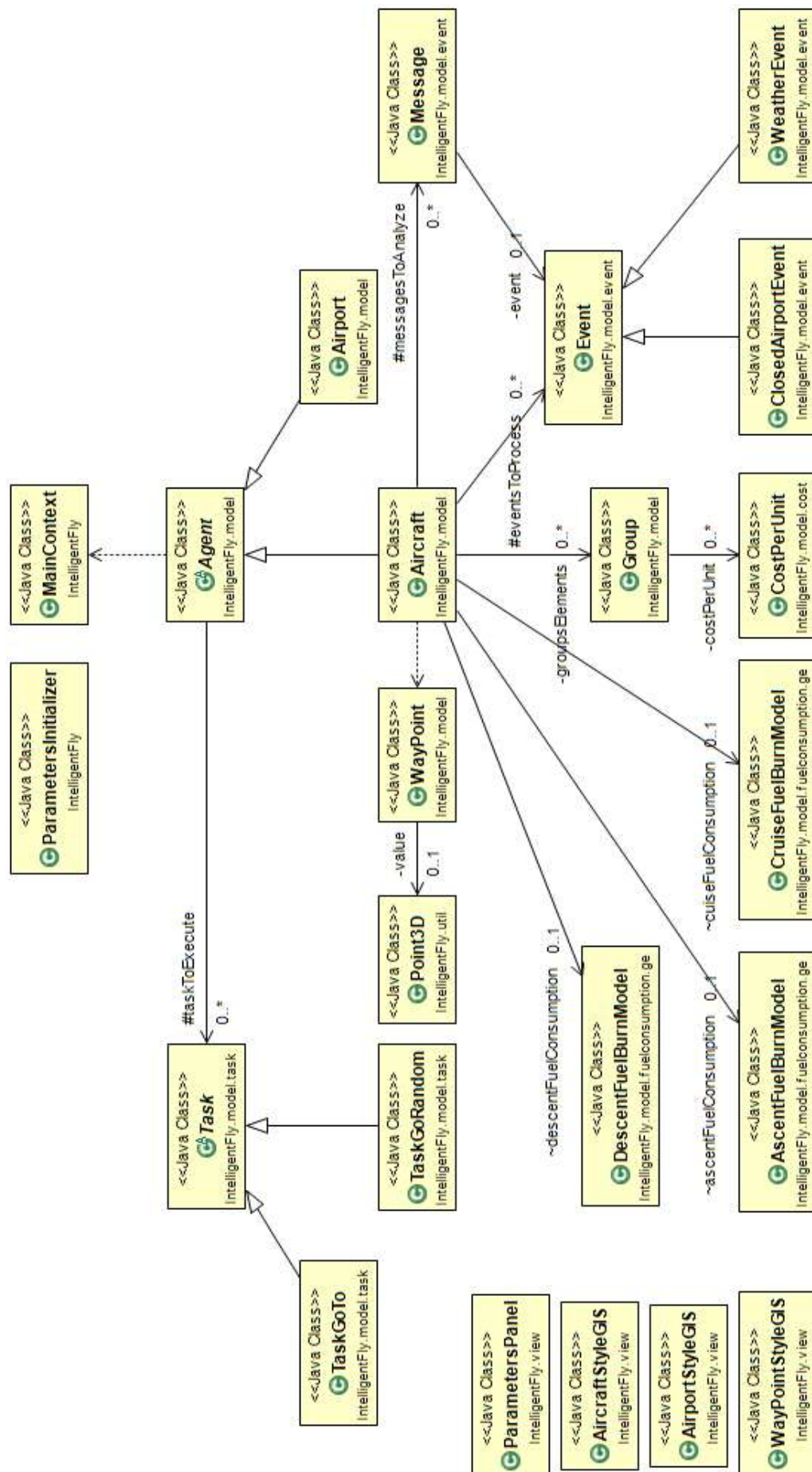


Figura 4.4: Diagrama de classes do simulador

4.1.4 Computação distribuída

Um dos recursos disponíveis no *framework* de simulação multiagentes *Repast Symphony 2.2* é a possibilidade da execução simultânea de simulações computacionais, seja em um mesmo computador ou em computadores distribuídos por uma rede local ou na internet.

Nos experimentos computacionais realizados neste trabalho, esse recurso foi utilizado visando distribuir o processamento de dados de voos entre diferentes computadores e realizar as simulações em menos tempo.

A Figura 4.5 apresenta um exemplo que ilustra o uso desse recurso. O processamento dos 36.190 voos obtidos junto a empresa Planefinder.net extraiu métricas relativas a distância voada e consumo de combustível. Considerando que os voos foram realizados entre o primeiro e o trigésimo dia do mês de setembro de 2013 (30 dias), e que haviam disponíveis cinco computadores para processamento simultâneo de cinco simulações, optou-se então em dividir a computação dos dados de voos nesse computadores. Cada um dos cinco computadores recebeu seis simulações (uma para cada dia do mês), que foram processadas sequencialmente. Na média, cada dia simulado possui 1.200 voos, que exigiram aproximadamente três minutos para computação da dinâmica dos voos das aeronaves, cálculo das métricas e tempo de comunicação para busca e gravação de dados no banco de dados do sistema IFMAS. Utilizando os mecanismos de processamento distribuído e recursos apresentados, o tempo total de processamento foi de aproximadamente 18 minutos.

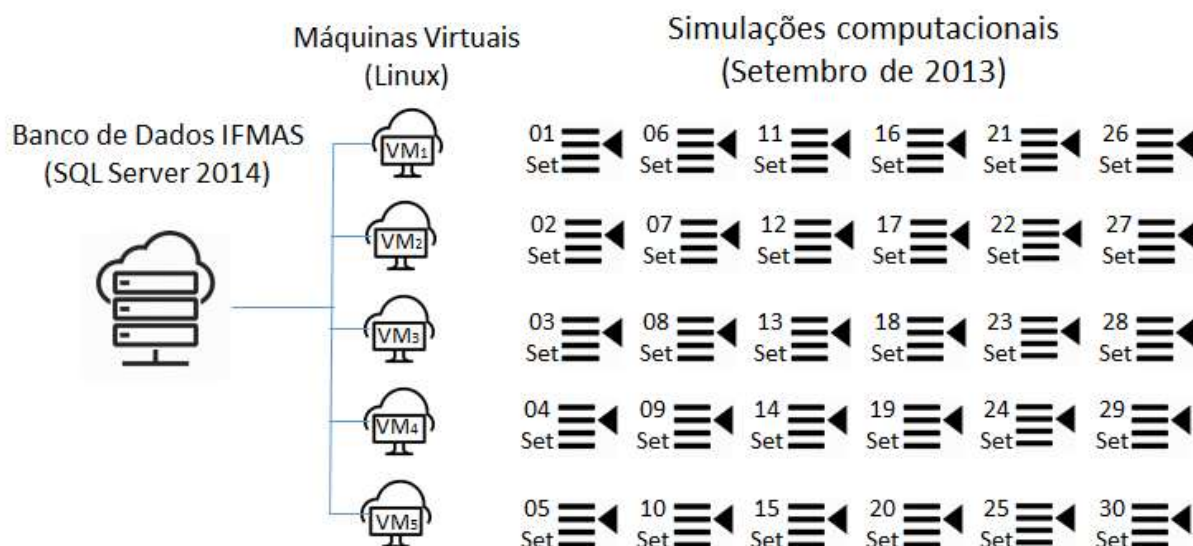


Figura 4.5: Distribuição do processamento das simulações

Os computadores disponíveis para processamento, assim como o sistema de banco de dados *IFMAS* foram hospedados no sistema de computação em nuvem *Microsoft Azure*. Esse computadores são máquinas virtuais localizadas no sul dos EUA. O acesso ao sistema *Microsoft Azure* se deu por meio de licença gratuita e experimental, válida para volume de dados e período de acesso limitados.

4.1.5 Simulação de cenários e políticas

A simulação de novos cenários, políticas de operações de voos, assim como qualquer outra condição de operação hipotética, pode ser configurada em três pontos no sistema *IFMAS*, como segue:

(i) Interface gráfica: uma painel de parâmetros foi adicionado ao simulador multiagente para permitir que usuários possam definir condições de simulação e/ou reprodução de voos. Por exemplo, é possível definir a massa inicial de uma aeronave a ser simulada por meio de configurações visuais. A Figura 4.6 ilustra esse painel com os parâmetros ajustáveis.

Do ponto de vista de facilidade de uso do simulador, o ideal seria que os cenários a serem simulados sempre fossem configurados por meio de ferramentas gráficas.

The screenshot shows a 'User Panel' window with the following configuration details:

- Server Name: laboss-db-srv.cloudapp.net
- User Name: ifmas_simulator
- Password: [Redacted]
- Action: New, Save, Del
- Simulation: 1061
- Description: EasyJet Flights Simulation
>> Scenary: no events
>> Simulated Strategy: Increase sp
- Data Source: 9
- Data and Time Start: 01/09/2013 00:01:00
- Data and Time End: 30/09/2013 23:59:00
- Airlines: N12 - 12 North All
- Airport Origin: AAL - Aalborg All
- Destination: AAL - Aalborg All
- Flights ID (,): All
- Lazy Load Data Simulation Active
- Seconds per Tick: 60.0 Max Flights: 0
- Payload (%): 50.0
- Initial Fuel (%): 50.0

Figura 4.6: Painel de parâmetros de simulação

(ii) Banco e dados: uma segunda forma de trabalhar com a simulação de diferentes condições de operação é criando dados fictícios para serem reproduzidos pelo simulador multiagente. Por exemplo, se for necessário simular modificações em trajetórias atuais, isso pode ser feito adicionando uma nova trajetória modificada ao banco de dados do sistema *IFMAS*. A Figura 4.7 ilustra uma trajetória real e uma trajetória fictícia. Esse seria o cenário onde deseja-se analisar o impacto da alteração da altitude da fase cruzeiro de um voo.

Nesta abordagem, o usuário do sistema *IFMAS* deve conhecer a arquitetura de dados da ferramenta e ter habilidade para manipular dados em linguagem SQL.

(iii) Código-fonte: simulações mais complexas podem ser configuradas diretamente no código-fonte do simulador. Situações que envolvem a combinação de vários ajustes são

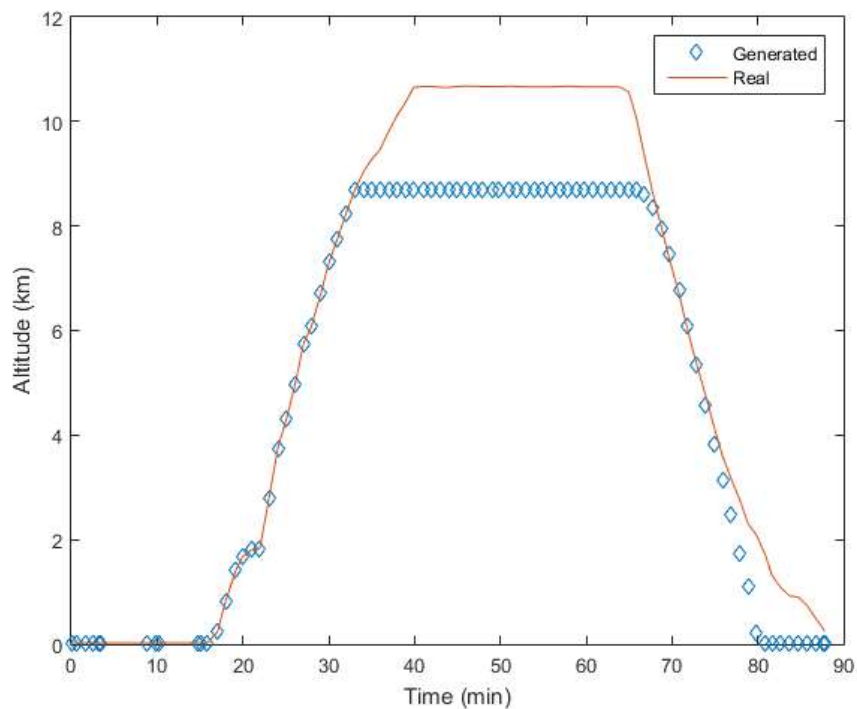


Figura 4.7: Trajetória real vs. estimada com diferentes altitudes

mais facilmente implementadas no código-fonte da aplicação, como por exemplo, a análise de como estratégias de aceleração da aeronave podem afetar atrasos de voos. Alguns cenários mais complexos, como esse, são apresentados na seção de resultados (4.3).

Alterações em código-fonte devem ser feitas na linguagem de programação *Java*, obedecendo a arquitetura do simulador IFMAS e os padrões de projetos impostos pelo framework de simulação *Repast Symphony*.

4.2 Modelos computacionais

Os modelos computacionais relativos a dinâmica e física de voo das aeronaves do simulador são descritos nas subseções a seguir.

4.2.1 Deslocamento de aeronaves

As aeronaves no sistema multiagente deslocam-se no espaço aéreo simulado através de waypoints obtidos de dados reais. Um algoritmo foi proposto para computar esse deslocamento (Figura 4.8).

```

Input:    $T$  is the is size of tick (discrete time unity)
            $L$  is a list of waypoints ( $lat, lon, h, v$ ) of size  $N | N > 3$ 
Define:  $index$  is the current index of the list  $L$ 
            $i$  is the waypoint related to the current location and speed of the aircraft (can be an interpolated or original waypoint from the list  $L$ )
            $j$  is the next waypoint in the list  $L$  (correspond to the element [ $index+1$ ] in  $L$ )
            $k$  is a potential waypoint to be interpolated between the waypoints  $i$  and  $j$ 
            $t_m$  is the time to move between the waypoints  $i$  and  $j$ 
            $t_r$  is the remaining time to process the aircraft movement
            $d_m$  is the distance to move in the time  $t_r$ 
            $d$  is the distance between the waypoints  $i$  and  $j$ 
            $a$  is the acceleration between the waypoints  $i$  and  $j$ 
Initialize:
            $index \leftarrow 1$ 
            $i \leftarrow L[1]$  -- assume  $i$  as the first waypoint of the list  $L$ 
            $j \leftarrow L[2]$  -- assume  $j$  as the second element of the list  $L$ 
While ( $index < N$ )
            $t_m \leftarrow 0, t_r \leftarrow T$ 
           Repeat
                $t_r \leftarrow t_r - t_m$  -- compute the remaining time in the iteration
                $d \leftarrow \sqrt{(z_j - z_i)^2 + (GCD_{ij})^2}$  -- compute the waypoint distance between the waypoints  $i$  and  $j$  (eq. 4)
                $a \leftarrow \frac{v_j^2 - v_i^2}{2 \times d}$  -- compute the acceleration between the waypoint  $i$  and  $j$  (eq. 10)
                $d_m \leftarrow v_i \cdot t_r + \frac{a \cdot t_r^2}{2}$  -- compute distance to move based on remaining time, initial speed and acceleration
               If ( $d_m < d$ ) Then -- interpolate a new waypoint  $k$  to move
                    $lat_k \leftarrow lat_i + \frac{d_m}{d} \cdot (lat_j - lat_i)$ 
                    $lon_k \leftarrow lon_i + \frac{d_m}{d} \cdot (lon_j - lon_i)$ 
                    $h_k \leftarrow h_i + \frac{d_m}{d} \cdot (h_j - h_i)$ 
                    $v_k \leftarrow \sqrt{v_i^2 + 2 \cdot a \cdot d_m}$ 
                    $t_m \leftarrow t_r$ 
               Else
                    $t_m = \begin{cases} \frac{d}{v_i}, & \text{if } a = 0 \\ \frac{(v_j - v_i)}{a}, & \text{otherwise} \end{cases}$  -- compute the time elapsed during the movement between  $i$  and  $j$  (eq. 9)
                    $k \leftarrow j$  -- assume  $k$  correspond to the waypoint  $j$  in the list  $L$ 
                    $index \leftarrow index + 1$  -- update the index of the list  $L$ 
                    $j \leftarrow L[index + 1]$  -- assume  $j$  correspond to the next available element in the list  $L$  ( $index + 1$ )
               End If
               move ( $k$ ) -- make the aircraft go to the waypoint  $k$  (which can be an interpolated or original waypoint)
                $i \leftarrow k$  -- assume  $i$  correspond to the waypoint  $k$ 
           While ( $d_m \geq d$  and  $index < N$ )
End While

```

Figura 4.8: Algoritmo de processamento de deslocamento discreto de aeronaves

O simulador possui um mecanismo que discretiza o tempo em unidades, denominadas *ticks*. Cada *tick* corresponde a um quantia de tempo simulado (T). Por padrão, nas simulação realizadas o valor de um tick corresponde a 60 segundos do mundo real ($T = 60s$), no entanto, esse é um parâmetro que pode ser alterado para se obter maior desempenho computacional (a medida que o valor de T aumenta) ou melhorar a precisão dos modelos (a medida que o valor de T diminui).

Como o tempo de coleta dos waypoints obtidos (L) não é regular, foi necessário que o método proposto fosse capaz de interpolar waypoints na trajetória de forma a coincidir com o tempo discretizado do simulador. Os waypoints por onde a aeronave se desloca são interpolados a cada T segundos.

4.2.2 Consumo de combustível

O manual do BADA propõe equações para estimar a taxa de consumo de combustível (kg/min), a partir de trajetórias geradas. Oaks et al. (2010) propõem ajustes nessas equações para que as mesmas possam funcionar utilizando dados de trajetórias voadas (e não trajetórias geradas pelo BADA). Neste trabalho adotaram-se as equações do manual do BADA e sugestões de Oaks et al.(2010) e Belle e Sherry (2013) para computar o consumo de combustível. Utilizou-se a taxa de consumo de combustível multiplicada pelo tempo transcorrido entre dois waypoints (Δt), obtendo assim o consumo de combustível entre waypoints. A soma desses consumos entre pares sequenciais de waypoints representa o consumo total de combustível do voo.

A forma como estimamos o consumo de combustível neste trabalho é expressa pelas equações a seguir.

$$F = \sum_{i \in S}^{|\mathcal{S}|} fb_i \quad (4.1)$$

$$fb_i = f_i \times \frac{\Delta t_{i-1,i}}{60} \quad (4.2)$$

$$(4.3)$$

$$m_i = \begin{cases} m_{i-1} - f_{i-1}, & \text{se } x > 0 \\ \theta, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$(4.4)$$

$$\Delta t_{ij} = \begin{cases} \frac{W_{ij}}{v_i}, & \text{se } a_{ij} = 0 \\ \frac{v_j - v_i}{a_{i-1,i}}, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \frac{v_j^2 - v_i^2}{2 \times W_{ij}} \quad (4.5)$$

Onde:

- F representa o consumo total de combustível de aeronave em sua trajetória (em kg).
- S representa um conjunto de waypoints sequenciais.
- fb_i representa o consumo de combustível da aeronave no *waypoint* i (em kg).
- f_i representa a taxa de consumo de combustível no *waypoint* i (em kg/min).
- Δt_{ij} representa o tempo transcorrido por uma aeronave voando entre um par de *waypoints* sequenciais (i, j) (em segundos).
- m_i representa a massa da aeronave no *waypoint* i (em kg).
- θ representa a massa inicial da aeronave (in kg).
- W_{ij} representa a WPD entre um par de *waypoints* sequencias (i, j) (eq. 3.5).
- v_k é a velocidade da aeronave no *waypoint* k em relação ao solo (*ground speed*) (em m/s).
- a_{ij} representa a aceleração da aeronave entre um par de *waypoints* sequenciais (i, j) (em m/s^2).

Apesar dos dados obtidos de trajetórias de voos possuírem informações sobre a data e hora na qual cada *waypoint* foi coletado, decidiu-se não utilizar essa informação obtida para calcular o tempo transcorrido entre pares de waypoints. Optou-se por estimar o tempo transcorrido baseando-se no deslocamento retilíneo de aeronaves entre waypoints, conforme expresso na equação 4.5. Esse cálculo considera a diferença entre as velocidades dos waypoints (inicial e final) e a distância estimada entre os waypoints. A distância entre waypoints foi computada pela equação apresentada no capítulo anterior (eq. 3.5), na qual utiliza-se informação de latitude, longitude e altitude dos waypoints.

O manual BADA propõe diferentes equações para calcular a taxa de consumo de combustível (f_i) dependendo do tipo de motorização da aeronave (*Jet*, *Turboprop* ou *Piston*), do modo de operação de voo (*idle descent* ou *nominal*) e da fase de voo.

As equações a seguir expressam a taxa de consumo de combustível proposta pelo BADA:

Motorização dos tipos *Jet* e *Turboprop*

$$f_i = \max(f_{min}, f_{nom}) \quad (4.6)$$

$$f_{min} = C_{f3} \times \left(1 - \frac{H_p}{C_{f4}}\right) \quad (4.7)$$

$$f_{nom} = \eta \times Thr \times \begin{cases} C_{fcr}, & \text{se a fase de voo é cruzeiro} \\ 1, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$\eta = C_{f1} \times \begin{cases} \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}}\right), & \text{se o motor é do tipo } Jet \\ \left(1 - \frac{V_{TAS}}{C_{f2}}\right) \times \left(\frac{V_{TAS}}{1.000}\right), & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Motorização do tipo *Piston*

$$f_i = \begin{cases} f_{min}, & \text{se a aeronave está descendo} \\ f_{nom}, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$f_{min} = C_{f3} \quad (4.8)$$

$$f_{nom} = C_{f1} \times \begin{cases} C_{fcr}, & \text{se a fase de voo é cruzeiro} \\ 1, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Onde:

- f_i representa a taxa de consumo de combustível no *waypoint* i (em kg/min).
- f_{min} representa a taxa de consumo mínimo no *waypoint* i (em kg/min).
- f_{nom} representa a taxa de consumo nominal no *waypoint* i (em kg/min).
- η representa o *thrust specific fuel consumption* (TSFC) no *waypoint* i (em kg/(min x kN)).
- V_{TAS} representa a velocidade em relação ao ar (*true airspeed*) da aeronave (em knot).
- C_{f1} representa o primeiro coeficiente de *thrust specific fuel consumption*.
[*jet* : kg/(min x kN)|*turboprop* : kg/(min x kN x knot)|*piston* : kg/min].
- C_{f2} representa o segundo coeficiente de *thrust specific fuel consumption* (em knots).
- C_{f3} representa o primeiro coeficiente (descida) da taxa de consumo (em kg/min).
- C_{f4} representa o segundo coeficiente (descida) da taxa de consumo (em pés).
- C_{fcr} representa o coeficiente de correção (cruzeiro) da taxa de consumo (sem unidade de medida).

- H_p representa a altitude de pressão geopotencial² no *waypoint* i (em pés).
- Thr representa o empuxo (*thrust*) da aeronave no *waypoint* i (em Newtons).

Os coeficientes $C_{f1}, C_{f2}, C_{f3}, C_{f4}$ e C_{fcr} são disponibilizados na base de dados do BADA. As equações relacionadas as motorizações *Jet* e *Turboprop* possuem adicionalmente as variáveis H_p e Thr . A variável H_p é utilizada na equação de cálculo da taxa de consumo em condições *Idle* (eq. 4.7), enquanto a variável Thr é multiplicada pelo *thrust specific fuel consumption* η no cálculo da taxa de consumo nominal. As equações para calcular H_p são:

$$H_p = [1 - (\frac{p}{p_0})^{0,190280}] \times 145366,45 \quad (4.9)$$

$$p = p_0 \times (1 - \frac{L \times h}{T_0})^{(\frac{g \cdot M}{R \cdot L})} \quad (4.10)$$

Onde:

- H_p representa a altitude de pressão geopotencial no *waypoint* i (em pés).
- p representa a pressão atmosférica na altitude h do *waypoint* i (em kPa).
- p_0 representa a pressão atmosférica padrão em nível do mar (101.325 kPa).
- h representa a altitude da aeronave acima do nível do mar (em metros).
- L representa a taxa de decaimento da temperatura atmosférica em função do aumento da altitude (0.0065 K/m).
- T_0 representa a temperatura padrão no nível do mar (288.15 K).
- g_0 representa a aceleração da gravidade ($9.80665 m/s^2$).
- M representa a massa molar do ar seco (0.0289644 kg/mol).
- R representa a contante universal dos gases [$8.31447 J/(mol \times K)$].

A variável Thr apresentada nas equações relacionadas as motorizações do tipo *Jet* e *Turboprop*, representa a força resultante necessária para mover uma aeronave. O consumo de combustível é diretamente relacionado a essa força (empuxo). A equação usada para calcular o empuxo da aeronave em um específico *waypoint* foi derivada do modelo denominado *Total-Energy*, o qual equaciona o trabalho feito pelas forças atuantes na aeronave com o aumento das energias cinéticas e potenciais [Eurocontrol, 2014]. O modelo *Total-Energy* é expresso pela equação:

$$(Thr - D) \cdot V_{TAS} = m \cdot g_0 \cdot \frac{dh}{dt} + m \cdot V_{TAS} \times \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (4.11)$$

²Do inglês: Geopotential pressure altitude

Onde:

- Thr representa o empuxo (thrust) atuando paralelamente ao vetor velocidade da aeronave (em Newtons).
- D representa o arrasto aerodinâmico (em Newtons).
- m representa massa da aeronave (em kg).
- h representa a altitude da aeronave em relação ao mar (em metros).
- g_0 representa a aceleração da gravidade ($9.80665m/s^2$).
- V_{TAS} representa a velocidade em relação ao ar (*true airspeed*) da aeronave (em m/s).
- $\frac{d}{dt}$ representa a derivada do tempo (em segundos).

Oaks et al. (2010) propõem que para calcular o empuxo/thrust da aeronave, o termo Thr seja isolado na equação 4.12 e sejam discretizadas as derivadas de h e V_{TAS} em relação ao tempo. A equação resultante implementada no simulador multiagente é apresentada a seguir:

$$Thr = D + \frac{m_i \cdot g_0 \cdot \frac{\Delta h_{ij}}{\Delta t_{ij}}}{V_{TAS_i}} + m_i \cdot \frac{\Delta V_{TAS_{ij}}}{\Delta t_{ij}} \quad (4.12)$$

Onde:

- $\Delta V_{TAS_{ij}}$ representa a variação da *true airspeed* entre os *waypoints* i e j (em m/s).
- Δh_{ij} representa a variação de altitude entre os *waypoints* i e j (em metros).
- Δt_{ij} representa o tempo transcorrido pela aeronave voando entre os *waypoints* i e j (em segundos).

As variáveis m_i e Δt_{ij} são respectivamente computadas pelas equações 4.3 e 4.4. A variável $\Delta V_{TAS_{ij}}$ é calculada pela diferença entre a *true airspeed* dos *waypoints* i e j. Finalmente, a força do arrasto é determinada pela seguinte equação do BADA:

$$D = \frac{C_D \times \rho \times (V_{TAS})^2 \times S}{2} \quad (4.13)$$

$$C_D = (C_L)^2 \times \begin{cases} C_{DO,AP} \times C_{D2,AP}, & \text{se a fase de voo é aproximação (Approach)} \\ C_{DO,\Delta LDG} \times C_{DO,LD} \times C_{D2,LD}, & \text{se a fase de voo é pouso (Landing)} \\ C_{DO,CR} \times C_{D2,CR}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$C_L = \frac{2 \times m_i \times g_0}{\rho \times (V_{TAS})^2 \times S \times \cos \theta} \quad (4.14)$$

Onde:

- ρ representa a densidade do ar (em kg/m^3).
- S representa a área de referência das asas da aeronave (m^2).
- C_D representa o coeficiente de arrasto.
- C_L representa o coeficiente de sustentação.
- θ representa o ângulo de rolamento da aeronave (*bank angle*). Importante ressaltar que na análise dos dados realizadas no capítulo 3, assumiu-se a θ como sendo a zero, em função da inexistência dessa informação nos dados ADS-B obtidos.
- $C_{D0,AP}$, $C_{D0,LD}$ e $C_{D0,CR}$ representam coeficientes de arrasto parasita³ para as fases de aproximação, pouso e cruzeiro, respectivamente.
- $C_{D2,AP}$, $C_{D2,LD}$ e $C_{D2,CR}$ representam coeficientes de arrasto induzido⁴ para as fases de aproximação, pouso e cruzeiro, respectivamente.
- $C_{D0,\Delta LDG}$ representa o coeficiente de arrasto parasita relacionado ao trem de pouso na fase de pouso (*landing gear*).

A área de referência das asas (S) e os coeficientes de arrastos parasitas e induzidos são providos pelo BADA, enquanto a densidade do ar ρ é calculada como:

$$\rho = \frac{p \times M}{R \times T} \quad (4.15)$$

$$T = T_0 - (L - h) \quad (4.16)$$

Onde:

- p representa a pressão na altitude de h do *waypoint* i (em kpa) (eq. 4.10).
- M representa a massa molar do ar seco (0.0289644 kg/mol).
- R representa a constante universal dos gases [$8.31447J/(mol \times K)$].
- h representa a altitude da aeronave acima do nível do mar (em metros).
- T representa a temperatura absoluta na altitude h (em Kelvin).
- T_0 representa a temperatura padrão no nível do mar (288.15 K).
- L representa a taxa de decaimento da temperatura atmosférica em função do aumento da altitude (0.0065 K/m).

Uma consideração sobre as equações do BADA é que, diferentemente da definição de fases de voos abordadas no capítulo anterior (seção 3.3.1), o BADA estipula que as

³Do inglês: parasitic drag

⁴Do inglês: induced drag

fases de voos sejam estabelecidas com base na configuração aerodinâmica instantânea da aeronave, que inclui: a altitude, variação de altitude, e condições de velocidade da aeronave. Diante disso, optou-se por utilizar os critérios definidos no manual BADA [Eurocontrol, 2014] para determinar a fase de voo que a aeronave se encontra, e não o método proposto na seção 3.3.1.

4.2.3 Vento

Embora a análise dos dados de voos realizada no capítulo 3 não tenha considerado informações de vento, o simulador possui implementado um modelo para computar a velocidade em relação ao ar (*true airspeed*), utilizada no modelo de consumo de combustível, a partir da velocidade em relação ao solo (*ground speed*) disponível nos dados ADS-B obtidos e dados climáticos (direção e velocidade do vento,) obtidas de fontes externas (ex. NOAA). As equações para cálculo da *true airspeed* são apresentadas a seguir:

$$V_{TAS} = \sqrt{v^2 + \nu^2} \quad (4.17)$$

$$v = G_S \times \sin \phi - W_S \times \sin \lambda \quad (4.18)$$

$$\nu = G_S \times \cos \phi - W_S \times \cos \lambda \quad (4.19)$$

Onde:

- V_{TAS} representa a velocidade em relação ao ar (*true airspeed*) da aeronave (em m/s).
- G_S representa a velocidade da aeronave em relação ao solo (*ground speed*) (em m/s).
- W_S representa a velocidade do vento (em m/s).
- ϕ representa a direção/ângulo da aeronave em relação ao norte (em radianos).
- λ representa a direção/ângulo do vento em relação ao norte (em radianos).

4.2.4 Validação de modelos

Em termos de incertezas e validações do modelo de consumo de combustível, as equações e coeficientes do modelo BADA tem sido validado por meio de extensos processos de comparação de dados reais de voos com os resultados estimados pelas equações do modelo [Abramson and Ali, 2012, D. Poles, 2009, Eduardo Gallo, 2006, Eurocontrol, 1996]. Essas validações são realizadas para diferentes modelos de aeronaves, segmentos de tra-

jetórias e condições específicas. De uma forma geral, acurácia média global do modelo BADA tem se mostrado em torno de 5%.

Oaks et al. (2010) mostram que suas adaptações do BADA apresentaram acurácia de 98% na estimativa de consumo de combustível de um voo de seis horas. Um modelo de aeronave *Bombardier Global 500* voou de *Atlantic City International Airport (ACY)* para *Los Angeles International Airport (LAX)* e consumiu 17.457 libras (7.918 kg) de combustível, de acordo com dados no FDR (caixa preta) da aeronave, versus 17.799 libras (8.073 kg) de combustível estimado por esse método. Chatterji (2011) propõe melhorias no método, que o faz ter 99% de acurácia para esse mesmo voo [Chatterji, 2011].

A fim de buscar validações para os modelos do simulador desenvolvidos, neste trabalho foi realizada comparação de métricas de desempenho de um voo real com um voo reproduzido no simulador. O voo escolhido, operado com a identificação LMI2933, é popularmente conhecido como o voo da *Chapecoense*.

No dia 28 de novembro de 2016 às 22h18 (horário local), uma aeronave modelo British Aerospace 146 (Avro RJ85), registro CP-2933, operada pela empresa aérea Lamia (Línea Aérea Merideña Internacional de Aviación), originária da Venezuela e com operações na Bolívia, saiu do Aeroporto de Internacional de Santa Cruz de Sierra (Bolívia), com destino ao Aeroporto Internacional José María Córdova, em Medellín (Colômbia). Por volta das 2h55 do dia seguinte, a aeronave parou de enviar dados ADS-B pelo seu equipamento de transmissão embarcado. Infelizmente, a aeronave que transportava jornalistas e jogadores da equipe brasileira de futebol Chapecoense, caiu a poucos quilômetros do seu destino, sendo que 71 pessoas morreram na queda e seis sobreviventes foram resgatados.

Investigações realizadas por autoridades Colombianas sugeriram que a queda da aeronave se deu por falta de combustível. Não foi encontrado combustível junto a fuselagem da aeronave. Além disso, a distância estimada de voo (2.975 km - *great circle distance*) é muito próxima aos limites de autonomia informados pelo fabricantes da aeronave (2.965 km). A figura 4.9 ilustra a trajetória feita pela aeronave com indicação do local do acidente.

A escolha do voo da Chapecoense neste processo de validação do simulador, se deu pelo fato dos seus dados estarem amplamente disponíveis na internet, como: dados da trajetória, estimativa da massa inicial e consumo de combustível (capacidade do tanque). Os dados de trajetória disponíveis são formados por registros de posições (latitude, longitude, altitude, velocidade) e a data e hora da coleta dos dados.

Um relatório detalhado sobre o voo da Chapecoense foi disponibilizado na plataforma online *The Aviation Herald* [The Aviation Herald, 2017]. Nessa plataforma são reportados diariamente incidentes e situação críticas relacionadas a aviação civil. Nesse relatório,



Figura 4.9: Voo *LMI2933*: trajetória realizada pela aeronave [The Aviation Herald, 2017]

dados importantes são apresentados sobre o voo da Chapecoense: a distância voada, tempo de voo, a carga útil (*payload*) inicial da aeronave, e o volume estimado do tanque de combustível.

As variações das velocidades e altitudes da aeronave ao longo da trajetória simulada podem ser vistas nas figuras 4.10 e 4.11, geradas pela ferramenta de simulação multiagentes.

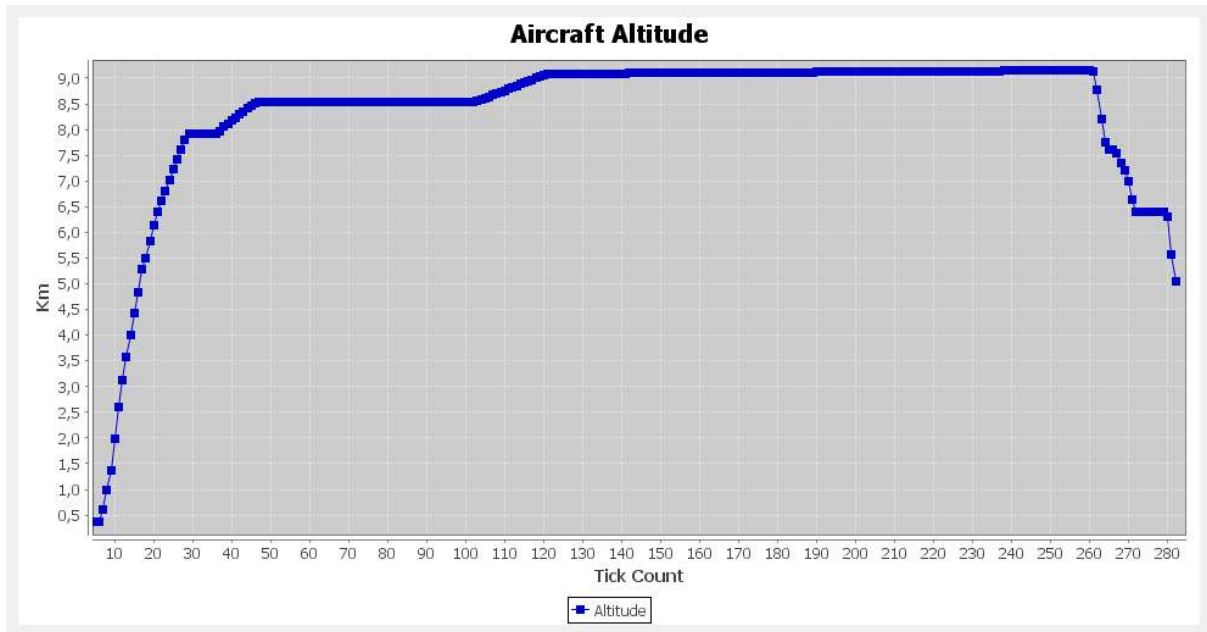


Figura 4.10: Voo *LMI2933*: variação da altitude na trajetória

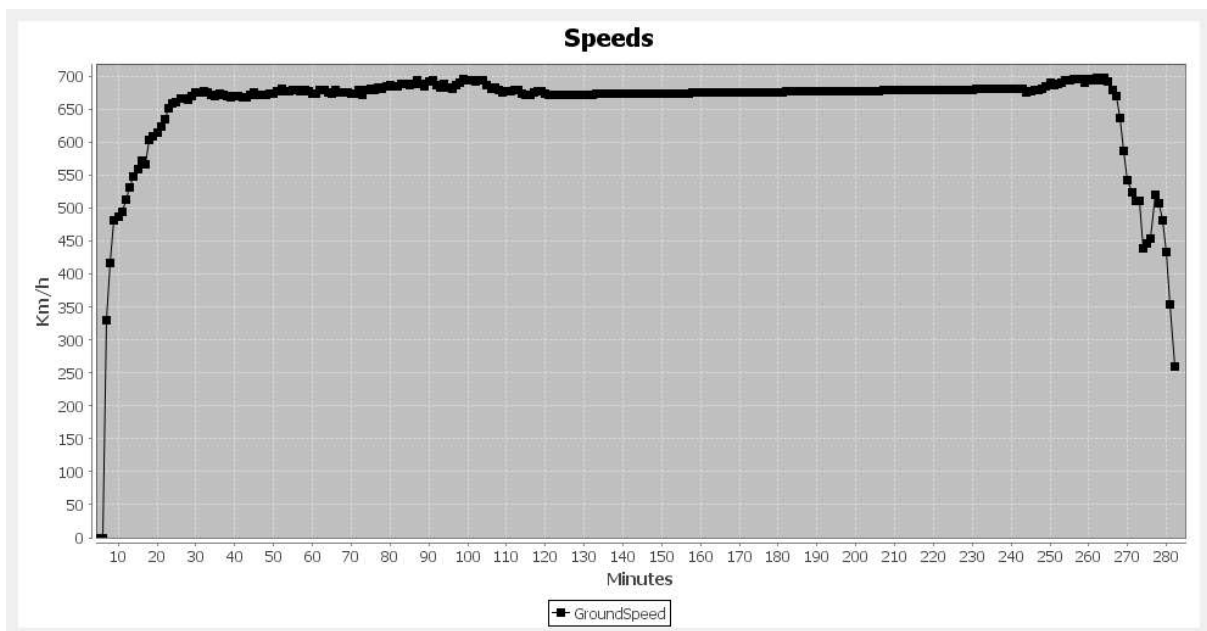


Figura 4.11: Voo *LMI2933*: variação da velocidade na trajetória

Algo que pode ser visto nas figuras 4.10 e 4.11 é uma estabilização da velocidade e altitude da aeronave entre os minutos 120 e 240. Isso deu pelo fato de haver cobertura de antenas ADS-B na região pela qual a aeronave voou nesse período. Essa é a região da floresta amazônica na América do Sul. Os dados nesse segmento foram interpolados (novos waypoints) utilizando as médias da velocidade e altitude na fase de voo cruzeiro. A Figura 4.12 traz um mapa, gerado pelo simulador IFMAS, com a trajetória voada pela aeronave.

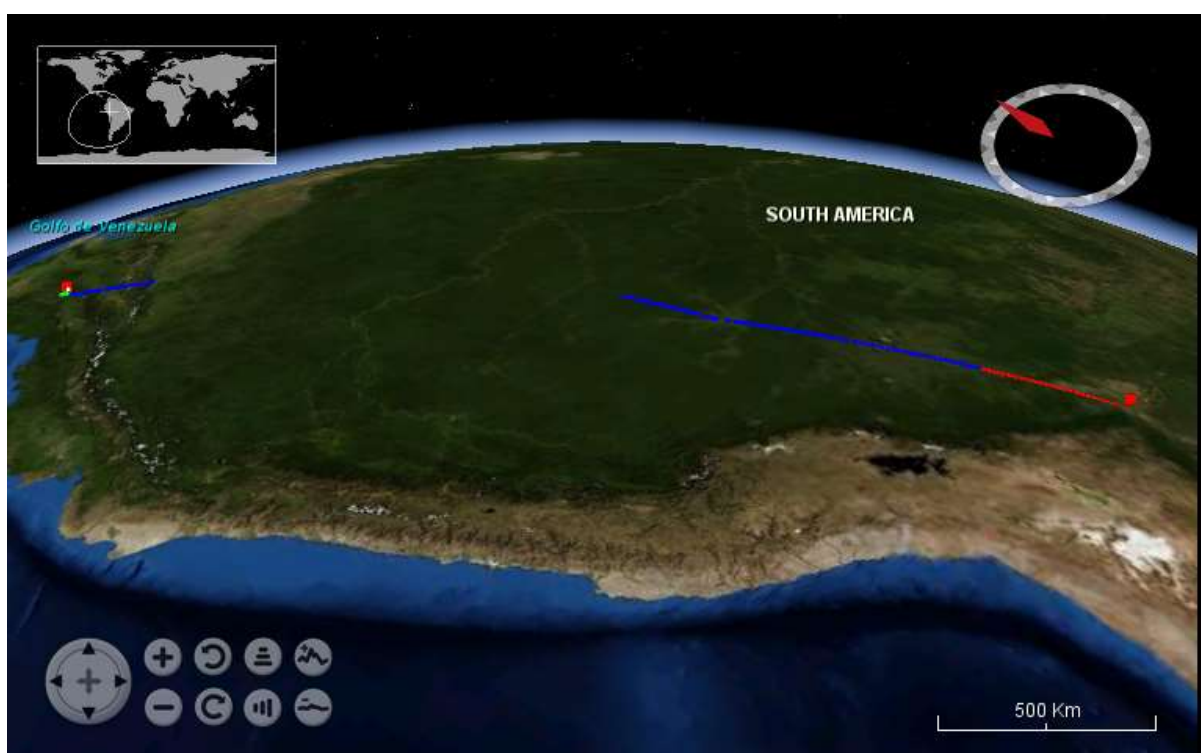


Figura 4.12: Voo *LMI2933*: dados ADS-B obtidos da trajetória

Os dados obtidos na plataforma *The Aviation Herald* foram comparadas com as métricas computadas pelo simulador multiagentes, sendo apresentados na Tabela 4.1.

Os resultados apresentados indicam que as variações nas métricas medidas foram inferiores a 1%. Isso sugere, de forma preliminar, que o simulador multiagente, juntamente com seus modelos, apresentam consistência na estimativa/computação de consumo de combustível, distância voada e tempo de voo, para o voo reproduzido. A obtenção de dados junto a companhias aéreas e fabricantes é uma tarefa que pode ajudar futuramente na complementação das validações dos modelos aqui propostos.

Métrica	Relatório <i>Aviation Herald</i>	Simulador Multiagente
Distância voada (km)	3.039	3.034 (-0,02%)
Consumo de combustível (kg)	9.362	9.447 (+1%)
Tempo de voo	277 minutos (4h37 min)	276 minutos (4h36 min)

Tabela 4.1: Voo *LMI2933*: avaliação de métricas de desempenho

4.3 Resultados

Foram realizados dois estudos de caso buscando analisar políticas de operações de voo. Os estudos tem por objetivo identificar empiricamente limites em termos de melhorias operacionais que companhias aéreas possam alcançar.

4.3.1 Estratégias de substituição de aeronaves e trajetórias

O primeiro estudo de caso buscou analisar duas estratégias simples:

A) Substituição de trajetórias: dado um conjunto de voos operados por um mesmo modelo de aeronave em uma rota, a proposta da estratégia é fazer as aeronaves seguirem os *waypoints* do voo mais econômico no conjunto. Essa estratégia emula um cenário onde fosse possível fazer todas as aeronaves voarem pela trajetória mais eficiente.

B) Substituição de trajetórias e modelos de aeronaves: essa segunda estratégia considera a possibilidade de mudar o modelo de aeronave em uma determinada rota. A nova aeronave voa pela melhor trajetória feita por esse modelo de aeronave na rota em análise.

O conceito de “assentos necessários” foi definido como o número total de assentos em todas as aeronaves originais na rota. Quando uma aeronave é substituída por outra, o número total de voos na rota é recalculado para satisfazer o número de assentos necessários.

As estratégias (A) e (B) foram aplicadas aos 36.190 voos disponíveis. Os voos foram agrupados por rota e modelo de aeronave na estratégia (B), enquanto na estratégia (A) foram agrupados apenas por rota. Foi computado o consumo de combustível e disponibilidade de assentos. Análises complementares, as quais agruparam os voos também por companhia aérea (ao invés de rota e modelo de aeronave) não trouxeram diferenças significativas nos resultados (<0,5%).

A Tabela 4.2 resume o desempenho das estratégias A e B em termos de economia de combustível, aumento da disponibilidade de assentos, e mudanças em rotas e modelos de

aeronaves.

Impacto (%)	Estratégia	
	(A) Substituição de trajetória	(B) Substituição de trajetória e modelo de aeronave
Economia de combustível	9,5 %	14,7 %
Aumento de assento	--	13,6 %
Redefinição de trajetórias	96,8 %	96,8 %
Redefinição de modelos de aeronaves	--	44 %

Tabela 4.2: Modelo de escolha de modelos de aeronaves

Os resultados mostram que as estratégias podem levar a uma economia de combustível de até 14,7% e aumentar a disponibilidade de assento em até 13,6%, se forem alteradas as trajetórias e modelos de aeronave. Isso requer as companhias aéreas mudarem até 44% dos seus modelos de aeronave, e 96,8% dos voos deveriam voar por diferentes trajetórias.

Na prática, mudar o modelo de aeronave na maioria dos casos é inviável, pois as companhias aéreas não possuem muitos modelos disponíveis, e a aquisição de aeronaves tende a considerar não somente aspectos técnicos, mas também aspectos logísticos, comerciais e estratégias de negócio. Além disso, algumas companhias aéreas tem interesse em adquirir aeronaves que sejam compatíveis com o restante da sua frota, visando melhor aproveitamento de sua tripulação e estrutura de manutenção. É importante que essas companhias operem com homogeneidade em seus modelos de aeronave.

A análise que considerou manter o mesmo modelo de aeronave e mudar apenas as trajetórias de voo, levou as companhias aéreas a economizarem até 9,5% de combustível. Existem limites que dificultam pilotos e companhias aéreas escolherem diferentes trajetórias para um determinado voo. Em algumas regiões existem restrições impostas pelas autoridades de controle de tráfego aéreo (ATC)⁵(Wikipedia, 2016), que impedem as companhias aéreas a mudarem suas trajetórias. Em outras regiões/países companhias aéreas são convidadas a colaborar com o ATC. Condições temporárias (ex. clima) também podem motivar companhias aéreas a buscarem melhores rotas. Este estudo é mais útil para aquelas companhias que têm liberdade para mudar as trajetórias de seus voos.

Os resultados apresentados podem servir como um parâmetro para companhias aéreas em seus estudos e busca pela eficiência operacional. Os resultados sugerem que uma companhia aérea irá melhorar o consumo de combustível em valores inferiores aos parâmetros

⁵Do inglês: Air Traffic Control

apresentados (14,7% e 9,5%), adotando as estratégias estudadas.

4.3.2 Estratégia para diminuição de atrasos em voo

O segundo estudo de caso buscou analisar o impacto da estratégia de aumento da velocidade de aeronaves visando diminuir tempo dos voos atrasados em uma companhia aérea. Para isso, os seguintes passos foram realizados:

1. Seleção de dados de voos;
2. Construção de uma companhia aérea fictícia;
3. Simulação de atrasos em voos;
4. Análise da estratégia de aumento de velocidade.

Seleção de dados de voos

Foram selecionados voos históricos para compor o cenário a ser simulado. Optou-se por selecionar voos da companhia aérea europeia easyJet, obtidos junto a empresa Planefinder.net (setembro 2013). A escolha dessa companhia se deu pelo fato de ser a empresa com o maior número de voos na base de dados obtida. A easyJet possui no conjunto de dados obtidos 6.734 voos, sendo operados por 137 aeronaves do modelo A319 e 54 do modelo A320. Os voos ocorreram em 216 rotas (108 pares) com origem e destino em 48 aeroportos europeus. O consumo estimado de todos esses voos é de $14,12 \times 10^6$ kg de combustível. O mapa com esses voos pode ser visualizado na Figura 4.13.

Companhia aérea *Laboss Airlines*

Uma companhia aérea fictícia, denominada *Laboss Airlines*, foi construída virtualmente visando analisar o impacto de estratégias sobre suas operações. Os voos dessa companhia advém dos voos da empresa easyJet.

Um algoritmo para seleção de voos foi proposto. Esse algoritmo seleciona sequências de voos que atendam aos seguintes critérios:

- i) Os voos da sequência devem ser de uma mesma aeronave, identificada por seu número de registro (disponível nos dados ADS-B).
- ii) A sequência deve ter pelo menos 12 voos realizados em um período máximo de 2 dias.
- iii) O início e término da sequência de voos deve acontecer em um mesmo aeroporto.

Com a aplicação do algoritmo, a companhia aérea fictícia foi estabelecida como tendo 229 voos, sendo operados por 15 aeronaves do modelos A319 e 2 aeronaves do modelo

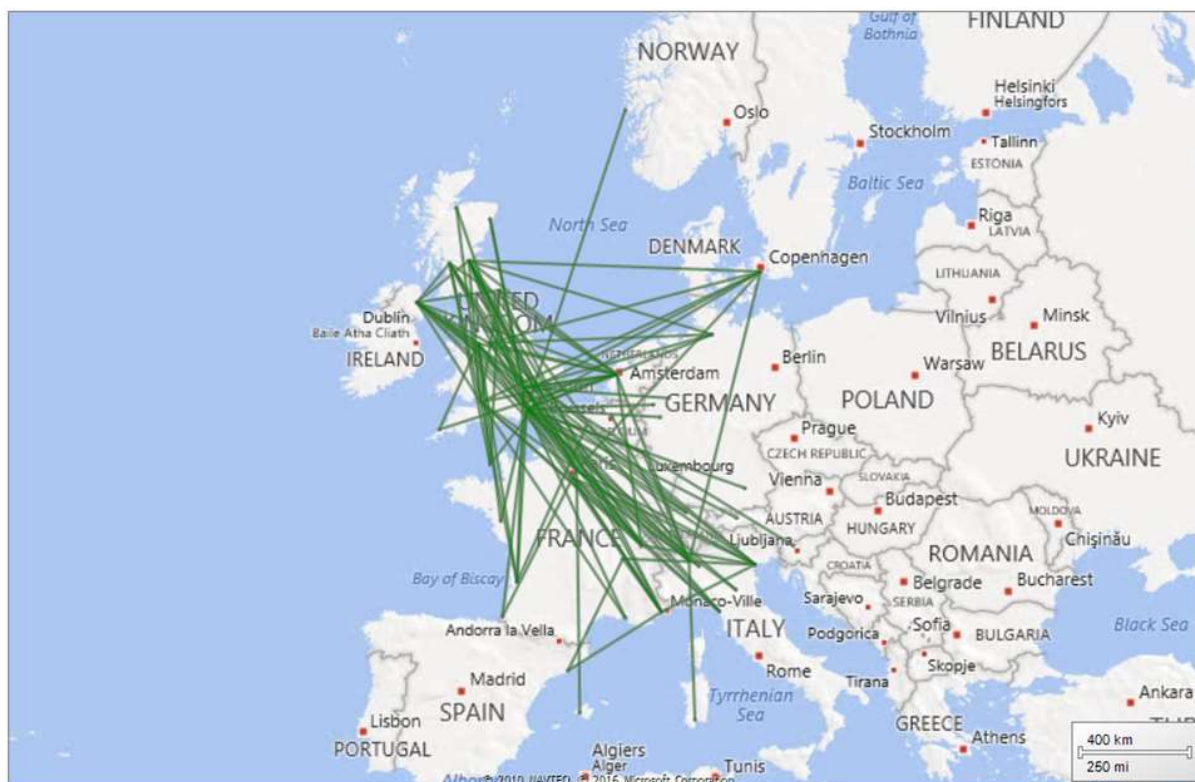


Figura 4.13: Distribuição dos voos da companhia aérea easyJet

A320. O consumo total de combustível para esses voos é estimado em 435.691 kg, enquanto que o tempo total dos voos é de 11.204 minutos, que correspondem a 11 dias, 18 horas e 43 minutos.

A Tabela 4.3 apresenta os voos extraídos por aeronave, dia do mês e da semana.

A partir do momento em que os voos são selecionados, é possível criar o chamado *tail assignment* da companhia aérea. A construção do *tail assignment* de uma companhia aérea é tipicamente um complexo processo de otimização, no qual a partir da lista de aeronaves/recursos, tripulação, *slots* de horários, aeroportos e rotas disponíveis, cria-se uma escala de horário de mínimo custo, visando reduzir o deslocamento de aeronaves e ociosidade, e atender a demandas de transportes em suas rotas. Neste trabalho o processo de criação do *tail assignment* da companhia aérea se deu de forma invertida, ou seja, a partir dos voos já existentes da companhia aérea easyJet, selecionados anteriormente, estabeleceu-se o quadro de horário dos voos da companhia aérea fictícia.

Aeronave		D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S
Modelo	Registro	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A319	G-EZAC																													5	10
A319	G-EZAD	6	8																												
A319	G-EZBA														6	6															
A319	G-EZBZ																		8	6											
A319	G-EZDU								6	10																					
A319	G-EZEV											8	4																		
A319	G-EZFE													8	6																
A319	G-EZGE																											8	4		
A319	G-EZIJ															6	6														
A319	G-EZIL	6	6																												
A319	G-EZIV																										8	10			
A319	G-EZIW	6	6																												
A319	G-EZIX																									8	6				
A319	G-EZIY																		9	6											
A319	G-EZIZ					4	9																								
A320	G-EZTA			6	6																										
A320	G-EZUX																		6	6											
		D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S
A319		18	20	0	0	4	9	0	6	10	0	8	4	8	6	12	12	0	17	12	0	0	0	0	0	8	14	18	4	5	10
A320		0	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		18	20	6	6	4	9	0	6	10	0	8	4	8	6	12	12	0	23	18	0	0	0	0	0	8	14	18	4	5	10

Tabela 4.3: Distribuição de voos selecionados por aeronave e dia do mês

Simulação de atraso em voos

Atrasos foram adicionados aos voos da companhia *Laboss Airlines*, distribuídos aleatoriamente de acordo com dados disponíveis no relatório *Airlines and Airports On-time Performance Report*, compilado pela empresa Flightstats [FlightStats, 2017]. A distribuição de atrasos em relação aos voos da companhia aérea easyJet - explorada no relatório - é apresentada na Tabela 4.4.

Atraso (minutos)	% Voos
< 15	89,72
15-29	4,94
30-44	2,07
>44	3,26

Tabela 4.4: Distribuição de atrasos de voos da empresa easyJet (Setembro de 2013)

Foram realizadas 100 simulações com distribuição de atrasos nos voos. Consideraram-se neste caso, os atrasos apresentados na Tabela 4.4, com valores superiores a 15 e inferiores a 60 minutos. Em outras palavras, em cada uma das simulações, adicionou-se aleatoriamente atraso entre 15 a 29 minutos a 4,94% dos voos, 30 a 40 minutos de atraso a 2,07% dos voos, e 40 a 60 minutos de atraso a 3,26% dos voos. Com isso, obtiveram-se os seguintes valores médios referentes aos atrasos adicionados nas simulações:

- (i) Média de voos atrasados: 23 (10,22%).
- (ii) Atraso médio adicionado: 801 minutos (7,15% do tempo total dos voos).
- (iii) Atraso médio adicionado por voo: 34 minutos.

Análise da estratégia de aumento de velocidade

A estratégia de aumento de velocidade foi aplicada aos voos atrasados visando recuperar tempo. Neste caso, acelerou-se a aeronave na fase de cruzeiro para a máxima velocidade que a aeronave pode atingir nessa fase, de acordo com parâmetros do BADA. Esta estratégia foi avaliada em termos: economia de combustível (kg) e tempo recuperado (minutos).

Apenas para ilustrar, uma aeronave do modelo A319 voo 1.520 km de Edinburgo (Reino Unido) para Milano (Itália). Originalmente a aeronave consumiu 4,039 kg de combustível e a duração do voo foi de 146 minutos. Ao configurar a velocidade de cruzeiro da aeronave para assumir o maior valor possível estabelecido pelo BADA, o consumo de combustível aumentou para 4,293 kg (6,2% a mais), enquanto a duração do voo foi reduzida a 122 minutos (17% a menos).

No gráfico da Figura 4.14 observa-se um panorama da distribuição média dos atrasos de voos, antes e depois da aplicação da estratégia de aceleração de aeronaves atrasadas. Observa-se que os atrasos iniciais eram superiores a 15 minutos, distribuídos em faixas de atraso similar a apresentada na Tabela 4.4. Após a aceleração das aeronaves, alguns voos atrasados diminuíram o tempo de voo, passando a ocuparem faixas de atraso inferiores a 15 minutos.

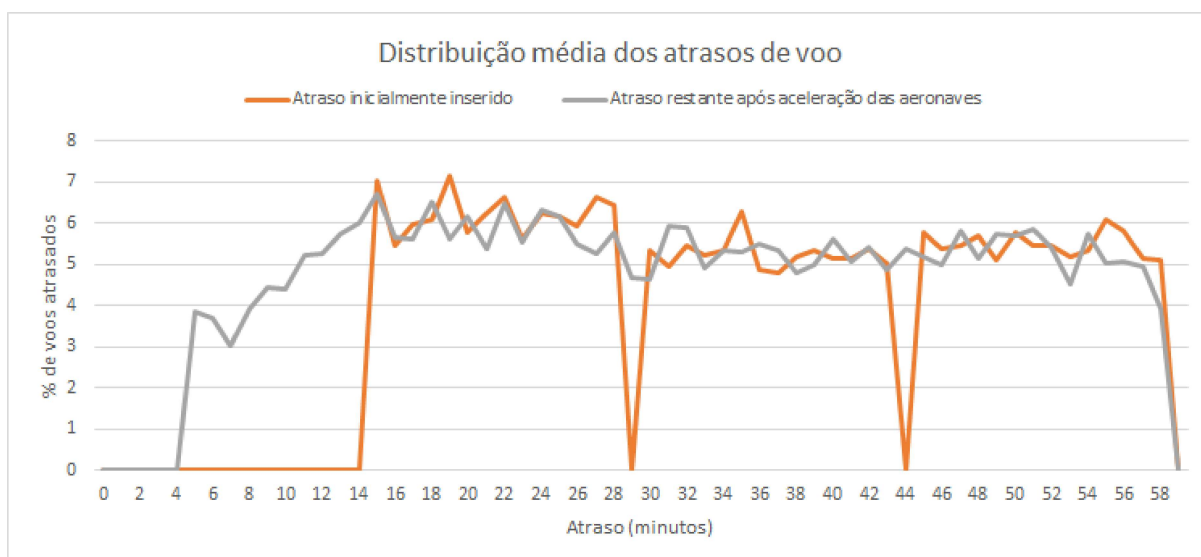


Figura 4.14: Distribuição média dos atrasos: antes e depois

A Figura 4.15 ilustra um conjunto de 200 voos selecionados aleatoriamente com diferentes atrasos inicialmente definidos de acordo com a tendência apresentada na Tabela 4.4. É possível observar a relação entre o atraso reduzido nesses voos e consumo de combustível extra resultantes da aplicação da estratégia de aceleração de aeronaves. De uma forma geral, os dados mostraram tendência de aumento do consumo de combustível extra a medida que a redução do atraso de voo se torna mais acentuada. Cerca de 81% dos voos conseguem obter redução de atraso em até quatro minutos.

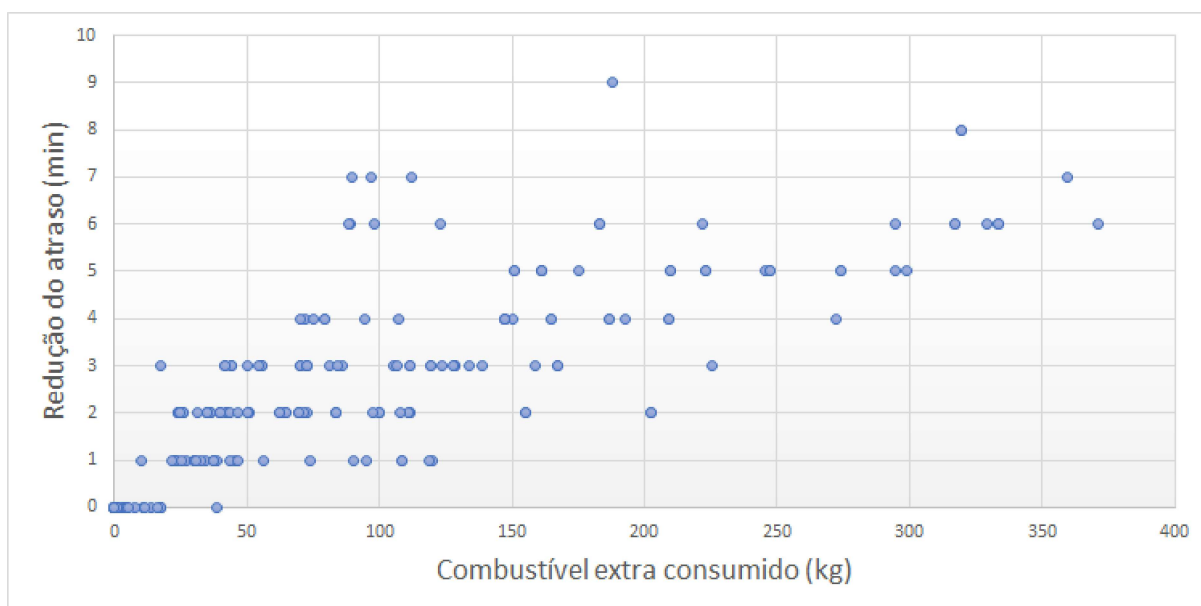


Figura 4.15: Redução de atraso vs. aumento do consumo de combustível

A Tabela 4.5 apresenta de forma resumida os principais resultados referentes a estratégia de aceleração de aeronaves, aplicada nos voos atrasados da companhia aérea *Laboss Airlines*. Observa-se que os 23 voos atrasados reduziram em média 62 minutos (7,78%) em seu tempo total de voo. Isso equivale a uma redução de 2,66 minutos por voo. Essa estratégia levaria a empresa a gastar 2.327 kg extra de combustível (aproximadamente 100 kg por voo).

Considerando que a variação entre a redução de atraso e o aumento do consumo de combustível mostrou grande (Figura 4.15), o mais provável é que a estratégia seja interessante em alguns casos, em que a redução de atraso seja grande e cada minuto de atraso tenha um custo elevado, como por exemplo, casos em que um grande número de passageiros da aeronave tenham pouco tempo para fazer conexão no aeroporto. Nesse caso, se os passageiros perdem a conexão, a companhia aérea terá ônus para realocar os passageiros em outros voos. O atraso representaria um custo muito maior para a empresa do que o consumo de combustível.

Em uma visão mais global sobre a companhia aérea em relação a estratégia de aceleração de aeronaves, o tempo médio economizado corresponde a 0,56% de tempo total de voo, enquanto o consumo de combustível extra, corresponde a 0,53% de todo o combustível gasto pela companhia *laboss Airlines*. Esses baixos números (< 1%) reforçam a ideia de que estratégia avaliada tem pouco impacto em termos globais, fazendo mais sentido ser aplicada em casos isolados.

Redução média do atraso	%	7,78
	(min/voo)	2,66
	(minutos)	62
Consumo médio extra de combustível	%	5,23
	Kg	2327,23
Tempo médio global economizado	%	0,56
Consumo médio extra global de combustível	%	0,53

Tabela 4.5: Impacto da aceleração de aeronaves no tempo e consumo de combustível de voos

A decisão entre priorizar a recuperação de atraso ou economizar combustível deveria ser analisada sob aspectos mais amplos. Por exemplo, uma pesquisa de satisfação realizada pela empresa easyJet [easyJet, 2013] indica que usuários do setor aéreo tem diferentes interesses quando escolhem uma companhia aérea para voar. A Figura 4.16 mostra o resultado dessa pesquisa, que perguntou aos usuários de diferentes países, quais dos seguintes elementos são mais importante para eles: preço/proposta de valor, segurança, pontualidade, qualidade do serviço de bordo, conforto, etc.

Pelo que pode ser visto nas discussões dos resultados, uma abordagem mais ampla, que combine, por exemplo, a análise de interesse dos passageiros com a avaliação de desempenho de estratégias operacionais, reforça a hipótese de que esse tipo de combinação pode ser mais eficiente para uma companhia aérea. Por outro lado, uma abordagem mais pontual, que analise isoladamente uma estratégia se mostra limitada a ganhos pontuais. O simulador desenvolvido proporciona a possibilidade da realização de tais análises. A combinação de uma ou mais estratégias pode ser realizada com essa ferramenta e seus resultados analisados, aumentando assim as chances da obtenção de melhores resultados para as companhias aéreas.

When asked directly most people state price/value for money, safety and punctuality as their primary drivers of choice



Figura 4.16: Pesquisa sobre a preferência/prioridade dos passageiros Europeus [easyJet, 2013]

Capítulo 5

Comentários e Conclusões

Este trabalho teve por objetivo o estudo e o desenvolvimento de tecnologias que permitam às companhias aéreas melhorarem a eficiência operacional, por meio de duas abordagens: a análise de dados de voos e simulação multiagentes.

Análise de dados

A primeira abordagem, a análise de dados, buscou analisar um conjunto de dados de voos a fim de identificar padrões e métricas em dados operacionais de voos de companhias aéreas. Os principais resultados alcançados nessa abordagem podem ser resumidos em:

1) Sistematização de um processo e implementação de ferramenta computacional escalável para obtenção, extração, transformação, limpeza, enriquecimento, tratamento de inconsistências, processamento, visualização de grandes volumes dados de voos e descoberta de padrões.

Um sistema WEB para a visualização de dados de voos foi desenvolvido e disponibilizado online ¹. Nesse sistema, o usuário tem a possibilidade de selecionar um conjunto de voos (por aeroporto, companhia aérea ou modelo de aeronave) e analisar métricas operacionais desses voos.

2) Identificação de padrões e métricas em dados operacionais de voos de companhias aéreas. A combinação de dados de voos, parâmetros de desempenho de aeronaves (BADA) e métricas geradas pelo sistema multiagente proposto permite chegar aos seguintes grupos de resultados:

2.1) O primeiro grupo de resultados contém a análise de distâncias voadas e a eficiência de uso de combustível.

2.2) O segundo grupo de resultados é relacionado à descoberta de padrões na operação dos voos. Algoritmos de mineração de dados extraíram modelos de regras de associação

¹Acesso online pela URL: <http://ifmas.azurewebsites.net>

e árvore de decisão dos dados históricos. Esses modelos descrevem a relação entre a distância de voos, número de assentos e os tipos de aeronaves adotados pelas companhias aéreas para a realização de determinada missão.

Utilizando-se de técnicas de visualização e mineração de dados, combinadas com simulação multiagentes, foram analisados 36.190 voos realizados em diferentes regiões do mundo. A reprodução/simulação desses voos trouxe a oportunidade de compreender como aeronaves, na média, voam e consomem combustível em diferentes fases.

Análises das distâncias de voos confirmaram que as trajetórias de voos possuem desvios mais significativos nas etapas de subida e descida - aproximadamente 13% e 28% - comparada com a etapa de cruzeiro que tende a ser mais previsível. Uma análise de voos operados em aeroportos europeus e norte-americanos mostrou que voos que decolaram dos aeroportos representados pelos códigos *IATA* EDI, FRA, LGW, ORY, BOS, JFK, MIA, e SNA, tiveram uma tendência a se desviarem mais na fase de subida (>19% and >26%). As aeronaves dos modelos E190 e B735 desviam mais na fase de subida, enquanto as aeronaves do modelo RJ1H tende a desviar mais na descida.

No caso de voos inferiores a 500 NM, os resultados mostram também que a distância voada e combustível gasto por fase não são lineares em relação a distância total e consumo total de combustível do voo. Nessa faixa de distância, o combustível gasto na fase de subida é superior ao gasto na fase de cruzeiro.

Em termos de eficiência de combustível por companhias aéreas - medida como combustível gasto pelo número de assentos e distância voada - a companhia europeia mais eficiente é 28% mais eficiente que a décima companhia aérea europeia e 24% mais eficiente que a média. A companhia aérea mais eficiente dos EUA é 20% mais eficiente que a companhia menos eficiente e 11% mais eficiente do que a média de eficiência das companhias norte-americanas estudadas.

Algoritmos de mineração de dados extraíram regras de associação e modelo de árvore de decisão que descrevem como companhias aéreas escolhem modelos de aeronave baseando-se no número de assentos da viagem e distância. Essa análise, assim como as anteriores, são potencialmente úteis para que as companhias aéreas possam ter parâmetros sobre operações locais e globais de voos e com isso identificarem potenciais gargalos e oportunidades para operarem de forma mais eficiente.

Uma hipótese também foi verificada com o desenvolvimento deste trabalho: o uso de um sistema multiagente para reprodução e processamento de grande volume de dados se mostrou adequado e eficiente.

Simulação multiagente

A segunda abordagem que este trabalho seguiu é a simulação multiagente, cuja sua

aplicação se dá de forma conjunta com a vertente de análise de dados. O primeiro ponto de conexão entre essas vertentes se dá na etapa de processamento “multiagente” de dados de voos obtidos. Um simulador multiagente criado permitiu a reprodução de voos e processamento de suas métricas operacionais. Esse simulador, integrado a ferramenta de visualização de dados criada, formam o sistema IFMAS. Os resultados desse processamento foram salvos no banco de dados do sistema IFMAS, e então minerados e explorados visualmente por meio de ferramenta criada para esse fim.

Os principais resultados alcançados nessa abordagem podem ser resumidos em:

1) Construção de um sistema multiagente para simulação de cenários hipotéticos e/ou reprodução de voos baseados em dados reais.

2) Simulação de cenários e análise de estratégias hipotéticas. Foram realizados alguns estudos buscando analisar algumas políticas de operações de voos, como segue:

2.1) Simulação de mudança de trajetória de voos e tipo de aeronaves: um cenário onde estratégias operacionais hipotéticas, que consistiam em substituir aeronaves e trajetórias foi avaliado.

2.2) Simulação de atraso de voo: um estudo de caso baseado nos voos de uma companhia aérea fictícia (*Laboss Airlines*) foi realizado visando avaliar políticas de aceleração de aeronaves como alternativa para diminuição de atrasos em voos. A relação de custo benefício entre o consumo de combustível e potencial custo de atraso foi avaliada.

O simulador foi desenvolvido utilizando linguagem de programação orientada a objetos *Java*, sistema de banco de dados relacional *Microsoft SQL Server 2014* e framework de simulação multiagentes *Repast Symphony*. O simulador permite a simulação de cenários hipotéticos, por meio de configuração em interface gráfica (painel de parâmetros), configuração nos dados armazenados (ex. criar dados de voos fictícios), ou mesmo configuração direta no código-fonte da aplicação. As simulações podem ser distribuídas em diversos computadores ou núcleos de processadores, minimizando o tempo total de processamento.

Foram incorporados ao simulador modelos físicos de deslocamento de aeronaves, computação de vento e modelo de consumo de combustível baseado em equações e parâmetros aerodinâmicos do modelo BADA. O simulador e seus modelos foram preliminarmente validados por meio de um estudo que comparou métricas de desempenho de um voo simulado com dados de um voo real. O voo escolhido é popularmente conhecido como o voo da *Chapecoense*. Os resultados comparativos indicam que as variações nas métricas medidas foram inferiores a 1%.

Estudos de casos foram conduzidos visando analisar políticas de operações de voo, e empiricamente identificar limites em termos de melhorias operacionais que companhias aéreas possam alcançar.

No primeiro estudo, observou-se que companhias aéreas poderiam economizar até 9% de combustível ao fazerem suas aeronaves voarem pelas trajetórias históricas mais eficientes. Se a companhia aérea também considerar a alternativa de trocar os modelos de aeronaves como estratégia, a economia de combustível poderia aumentar para 14,7% e a disponibilidade de assentos pode aumentar em 13,6%. Nesse último cenário, a mudança de modelo de aeronaves aconteceria em 44% dos voos.

Na prática, trocar o modelo de aeronave é inviável para a maioria das companhias aéreas, principalmente por razões econômicas e de logística. Mudar a trajetória dos voos também pode ser difícil para a maioria das empresas, em função de restrições impostas por autoridades de controle aéreo. Entretanto, este estudo buscou encontrar e mostrar limites para cenários ideais, que podem servir como parâmetros para que essas companhias aéreas possam levar em consideração em suas análises operacionais.

No segundo estudo de caso, analisou-se a estratégia de aceleração de aeronaves em suas fases de cruzeiro visando diminuir atrasos nos voos. Uma companhia aérea fictícia com 229 voos foi construída (*Laboss Airlines*). Parte de seus voos foram atrasados, conforme distribuição de atrasos em voo baseada em dados reais (aproximadamente 10% dos voos). Na estratégia estudada mostrou-se que em média os voos tiveram redução de 2,66 minutos, dos seus 34 minutos médios de atraso inicial. O custo dessa estratégia foi de um aumento extra de combustível em torno de 100kg por voo. No entanto, houve grande variação em torno da média da redução de atraso e aumento de consumo de combustível, conforme pode ser visto na Figura 4.15.

Em função da grande variação de resultados, conclui-se que a estratégia em questão não deve ser aplicada amplamente em todas as situações, tendo em vista que em muitos casos o seu benefício será baixo ou o custo será alto. O recomendado é que a estratégia seja avaliada em situações específicas e aplicada onde se encontre uma boa relação entre a redução de atraso e gasto extra de consumo de combustível.

Esse tipo de análise de estratégia e seus resultados, evidenciam o ganho de uma abordagem mais ampla, que combine por exemplo, a análise de interesse dos passageiros com a avaliação de desempenho de estratégias operacionais. Isso reforça a hipótese de que esse tipo de combinação pode ser mais eficiente para uma companhia aérea, comparado a uma abordagem mais pontual, que analise isoladamente uma estratégia que se mostra limitada a ganhos pontuais.

O simulador desenvolvido proporciona a possibilidade da realização de tais análises. A combinação de uma ou mais estratégias pode ser realizada com a ajuda dessa ferramenta e seus resultados analisados, aumentando assim as chances da obtenção de melhores resultados para as companhias aéreas.

5.1 Limitações e trabalhos futuros

Em termos de trabalhos futuros, este estudo poderá ser melhorado e ampliado considerando as seguintes recomendações:

1. A análise de dados realizada neste trabalho envolveu voos globais, com ênfase em voos da Europa e Estados Unidos, principalmente pelo fato de serem regiões com maior cobertura do sistema de antenas ADS-B. Futuramente, a análise poderia abordar voos realizados no espaço aéreo brasileiro. Parcerias com autoridades do setor aéreo e companhias brasileiras favoreceriam o desenvolvimento de estudos acerca de voos nacionais.
2. Uma tarefa futura seria o (re)processamento dos dados de voos obtidos considerando dados de vento (direção e velocidade) e modelo apresentado na seção 4.2.3. Embora acredite-se que globalmente isso não influencie os resultados obtidos, em situações específicas essa informação poderá ter influência significativa. A realização de estudos de casos utilizando informação do vento, pode também ser útil na avaliação de trajetórias e re-configuração de horários de voos. Se a companhia aérea e pilotos conhecem a condição climática previamente, estratégias envolvendo a mudança de trajetórias e horários de voos poderiam ser avaliadas.
3. A estimativa de massa inicial das aeronaves poderia ser melhorada. Uma alternativa seria considerar simular diversas combinações de massas iniciais e escolher aquela que apresente uma massa final proporcional ao volume de combustível compatível com a distância voada e regras do sistema aéreo (ex. definição combustível reversa), e número de passageiros médios por aeronave.
4. Um algoritmo para completar rotas incompletas foi proposto e aplicado em um conjunto de voos. Um próximo passo em relação a esse algoritmo, seria implementá-lo no simulador multiagente. Isso poderia permitir, por exemplo, uma maior utilização de dados de trajetória obtidos. Para fins de comparação, dos um milhão de voos obtidos da empresa Planefinder.net, menos de 4% (36.190) desses voos foram utilizados, devido a sua incompletude. Voos com mais de 1.000 NM também seriam contemplados com essa estratégia, já que a maioria dos voos nessa faixa de distância são incompletos devido a limitação de cobertura do sistema de antenas ADS-B.
5. O acesso a dados reais de consumo de combustível de voos realizados poderia apoiar a etapa de validação dos métodos/algoritmos criados, incorporados (ex. modelo de consumo BADA) e propostos para trabalhos futuros.

6. Uma das limitações deste trabalho é relacionada a impossibilidade de comparação do desempenho de diferentes modelos de aeronaves, em termos de consumo de combustível. O contrato para acesso ao BADA e seus dados impede tal tipo de comparação. Na prática, isso impede por exemplo, avaliar o modelo de aeronave que mais ou menos consome combustível por aeroporto ou companhia aérea.
7. O simulador desenvolvido possui uma abordagem baseada em agentes, que permite, de forma modular, adicionar novos agentes a medida que se deseje simular e avaliar novas estratégias. Nesse sentido, o simulador poderia ser ampliado, para permitir, por exemplo, a simulação de passageiros entre aeroportos. Com isso, seria possível avaliar estratégias considerando a origem e destino dos passageiros, e tantas outras estratégias a medida que novos agentes sejam implementados no simulador.
8. A medida que novos elementos forem inseridos no simulador, a computação de métricas mais sofisticadas se torna mais plausível de ser realizada. A ampliação do modelo de custos operacionais da companhia aérea para além do consumo de combustível é uma tarefa importante no futuro do simulador.
9. Recursos do tipo *user friendly* para construção de cenário de simulação são interessantes para que usuários sem conhecimento de programação possam interagir com o simulador. Nesse sentido, propõe-se como trabalho futuro adicionar mais recursos visuais ao simulador para minimizar a dependência de alterações diretas em código-fonte e banco de dados do simulador.
10. A preparação dos softwares desenvolvidos para ambiente de produção em empresas do setor aéreo é um trabalho futuro relevante sob o viés de transferência tecnológica e uso de produto inovador no contexto corporativo.

Bibliografia

- [Abdelghany et al., 2005] Abdelghany, K., Abdelghany, A., and Raina, S. (2005). A model for the airlines’ fuel management strategies. *Journal of Air Transport Management*, 11(4):199 – 206.
- [Abramson and Ali, 2012] Abramson, M. and Ali, K. (2012). *Integrating the Base of Aircraft Data (BADA) in CTAS trajectory synthesizer*. NASA technical memorandum.
- [Aggarwal and Yu, 1999] Aggarwal, C. C. and Yu, P. S. (1999). Data Mining Techniques for Associations, Clustering and Classification. In *Proceedings of the Third Pacific-Asia Conference on Methodologies for Knowledge Discovery and Data Mining, PAKDD ’99*, pages 13–23, London, UK, UK. Springer-Verlag.
- [Anderson, 1978] Anderson, Jr., J. D. (1978). *Introduction to Flight*.
- [Ball, 2010] Ball, M. (2010). Total Delay Impact Study: A Comprehensive Assessment of the Costs and Impacts of Flight Delay in the United States. Technical report, University of Maryland (United States).
- [Belle and Sherry, 2013] Belle, A. and Sherry, L. (2013). Estimated Fuel Burn Performance for {MDW} Arrivals. In *2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics ({AIAA}).
- [Bellifemine et al., 1999] Bellifemine, F., Poggi, A., and Rimassa, G. (1999). JADE — A FIPA-compliant agent framework. In *Proceedings of the 4th International Conference on the Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAM-99)*, pages 97–108, London, UK. The Practical Application Company Ltd.
- [Bertsekas, 1988] Bertsekas, D. P. (1988). The auction algorithm: A distributed relaxation method for the assignment problem. *Annals of Operations Research*, 14(“LIDS Report P-1653”):105–123.

- [Bertsekas, 1991] Bertsekas, D. P. (1991). An auction algorithm for shortest paths. *j-SIAM-J-OPT*, 1(4):425–447.
- [Bertsekas, 1992] Bertsekas, D. P. (1992). Auction algorithms. *Annals of Operations Research*, 1:23–31.
- [Bertsekas and Catañon, 1989] Bertsekas, D. P. and Catañon, D. A. (1989). The auction algorithm for transportation problems. *Annals of Operations Research*, 20:67–96.
- [Bertsekas and Catañon, 1991] Bertsekas, D. P. and Catañon, D. A. (1991). A generic auction algorithm for the minimum cost network flow problem. *Alphatech Report*, 1:7–66.
- [Bertsimas et al., 2011] Bertsimas, D., Frankovich, M., and Odoni, A. (2011). Optimal selection of airport runway configurations. *Operations research*, 59(6):1407–1419.
- [Bhadra and Kee, 2008] Bhadra, D. and Kee, J. (2008). Structure and dynamics of the core {US} air travel markets: A basic empirical analysis of domestic passenger demand. *Journal of Air Transport Management*, 14(1):27 – 39.
- [Bilimoria, 2001] Bilimoria, K. (2001). Facet: Future atm concepts evaluation tool. *Air Traffic Control Quarterly*, 9-1:1–20.
- [Bolaños and Murphy, 2013] Bolaños, M. E. and Murphy, D. (2013). How much delay does new york inject into the national airspace system? a graph theory analysis. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1(11):179–189.
- [Chatterji, 2011] Chatterji, G. (2011). Fuel Burn Estimation Using Real Track Data. *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, (September):1–17.
- [Chung, 2003] Chung, C. A. (2003). *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*. CRC Press.
- [Collier, 2000] Collier, N. (2000). Repast: An extensible framework for agent simulation. Technical report, Social Science Research Computing, University of Chicago, Chicago, Illinois.
- [Collins, 1982] Collins, B. P. (1982). Estimation of aircraft fuel consumption. *Journal of Aircraft*, 19(11):969–975.

- [D. Poles, 2009] D. Poles (2009). Base Of Aircraft Data (BADA) Aircraft Performance Modelling Report. (March):54.
- [Dornelles, 2012] Dornelles, M. A. S. (2012). Avaliação qualitativa e quantitativa da condição de energia de aeronaves a jato durante a fase de descida e aproximação para pouso. Master thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG - Brazil.
- [Duan and Rankin, 2010] Duan, P. and Rankin, J. (2010). ADS-B feasibility study for commercial space flight operations. In *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2010 IEEE/AIAA 29th*, pages 3.A.1–1–3.A.1–11.
- [easyJet, 2013] easyJet (2013). Driving returns and profitable growth in European aviation. Technical report.
- [Eduardo Gallo, 2006] Eduardo Gallo, Francisco A. Navarro, A. N. M. I. (2006). Advanced aircraft performance modeling for atm: Bada 4.0 results. *25th Digital Avionics Systems Conference - IEEE/AIAA*.
- [Eurocontrol, 1996] Eurocontrol (1996). MODEL ACCURACY REPORT FOR THE BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) REVISION 2.5. Technical report.
- [Eurocontrol, 2013] Eurocontrol (2013). Standard Inputs for EUROCONTROL Cost Benefit Analyses. Technical report, Eurocontrol.
- [Eurocontrol, 2014] Eurocontrol (2014). User Manual for the base of aircraft data (BADA) - revision 3.12. Technical report.
- [Eurocontrol, 2015] Eurocontrol (2015). EUROCONTROL Seven-Year Forecast February 2015.
- [EUROCONTROL, 2015] EUROCONTROL (2015). Standard Inputs for EUROCONTROL Cost-Benefit Analyses.
- [Eurocontrol, 2017] Eurocontrol (2017). Base of aircraft data. <http://www.eurocontrol.int> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [European Aviation Safety Agency, 2010] European Aviation Safety Agency (2010). Study on aviation and economic modelling (save) - final report. Technical report.

- [Faraco, 1998] Faraco, R. A. (1998). Uma arquitetura de agentes para negociação no domínio do comércio eletrônico. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [Fayyad et al., 1996] Fayyad, U. M., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P., and Uthurusamy, R., editors (1996). *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. American Association for Artificial Intelligence, Menlo Park, CA, USA.
- [Federal Aviation Administration, 2015] Federal Aviation Administration (2015). FAA Aerospace Forecast: Fiscal Years 2015-2035. Technical report, Administration Federal Aviation.
- [Fernandes, 2005] Fernandes, A. M. R. (2005). *Inteligência artificial: noções gerais*. Visual Books, Florianópolis - SC, 1 edition.
- [FIPA, 1996] FIPA (1996). Foundation for intelligent physical agents. <http://fipa.org> . Acesso em: 15 ago. 2007.
- [FlightAware, 2017a] FlightAware (2017a). FlightAware ADS-B Coverage Map. <http://flightaware.com/adsb/coverage> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [FlightAware, 2017b] FlightAware (2017b). Live Flight Tracking. <https://flightaware.com/> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [FlightStats, 2017] FlightStats (2017). Airline and Airport On-time Performance Report: Summary of Airline Arrivals and Airport Departures for the period September 1, 2013 through September 30, 2013. Technical report.
- [Franklin and Graesser, 1996] Franklin, S. and Graesser, A. (1996). Is this an agent or just a program? a taxonomy for autonomous agents. In *Proceedings of the third international workshop on agents, theories, architectures, and languages*. Springer-Verlag, New York.
- [Freeman, 2006] Freeman, D. (2006). *Modification and Improvement to the Breguet Range Equation*. University of New Orleans.
- [General Electric, 2014] General Electric (2014). Ge flight quest challenge - flight plan efficiency. <http://www.gequest.com/c/flight2-main> . Acesso em: 15 jan. 2014.
- [Hamy, 2016] Hamy, A., M.-M. A. B. R. (2016). Flight trajectory optimization to reduce fuel burn and polluting emissions using a performance database and ant colony optimization algorithm. *AEGATS - 16th Advanced Aircraft Efficiency in a Global Air Transport System, Paris, France, 12-14 avril*.

- [Hicok and Lee, 1998] Hicok, D. S. and Lee, D. (1998). Application of ADS-B for airport surface surveillance. In *Digital Avionics Systems Conference, 1998. Proceedings., 17th DASC. The AIAA/IEEE/SAE*, volume 2, pages F34/1–F34/8 vol.2.
- [Hill et al., 2005a] Hill, J. C., Archibald, J. K., Stirling, W. C., and Frost, R. L. (2005a). A multi-agent system architecture for distributed air traffic control. In *in AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, pages 2005–6049.
- [Hill et al., 2005b] Hill, J. C., Johnson, F. R., Archibald, J. K., Frost, R. L., and Stirling, W. C. (2005b). A cooperative multi-agent approach to free flight. In *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS '05*, pages 1083–1090, New York, NY, USA. ACM.
- [Jeppesen, 2015] Jeppesen (2015). TOTAL AIRSPACE AND AIRPORT MODELLER (TAAM) - Product Profile.
- [Jeppesen, 2017] Jeppesen (2017). TOTAL AIRSPACE AND AIRPORT MODELLER (TAAM). <http://ww1.jeppesen.com/industry-solutions/aviation/government/total-airspace-airport-modeler.jsp> . Accesso em: 29 mar. 2017.
- [Jixin Liu and Han, 2017] Jixin Liu, Kaijian Li, M. Y. X. Z. and Han, K. (2017). Optimizing Key Parameters of Ground Delay Program with Uncertain Airport Capacity,. *Journal of Advanced Transportation*, 2017.
- [Johnson et al., 2010] Johnson, L., Levine, A., Smith, R., and Stone, S. (2010). The 2010 horizon report. *The New Media Consortium*.
- [Jones et al., 2005] Jones, T., Rustenburg, J. W., Skinn, D. A., Tipps, D. O., and DeFio, T. (2005). Statistical data for the boeing-747-400 aircraft in commercial operations. *Technical Report - Federal Aviation Administration*.
- [Joslyn and Rocha, 2000] Joslyn, C. and Rocha, L. M. (2000). Towards semiotic agent-based models of socio-technical organizations. In *in: Proc. AI and Simulation 2000, ed. HS Sarjoughian et al*, pages 70–79.
- [Kim et al., 2007] Kim, B. Y., Fleming, G. G., Lee, J. J., Waitz, I. A., Clarke, J.-P., Balasubramanian, S., Malwitz, A., Klima, K., Locke, M., Holsclaw, C. A., Maurice, L. Q., and Gupta, M. L. (2007). System for assessing Aviation’s Global Emissions (SAGE), Part 1: Model description and inventory results. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(5):325–346.

- [Kuchar and Yang, 2000] Kuchar, J. and Yang, L. (2000). A review of conflict detection and resolution modeling methods. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 1(4):179–189.
- [Lee and Balakrishnan, 2008] Lee, H. and Balakrishnan, H. (2008). Fuel cost, delay and throughput tradeoffs in runway scheduling. In *American Control Conference, 2008*, pages 2449–2454.
- [Levine and Roos, 2002] Levine, J. H. and Roos, T. B. (2002). Introduction to data analysis: Rules of evidence.
- [Lufthansa Airline, 2014] Lufthansa Airline (2014). Lufthansa systems. <https://www.lhsystems.com/> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Luke et al., 2005] Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K., and Balan, G. (2005). Mason: A multiagent simulation environment. *Simulation*, 81(7):517–527.
- [Macal and North, 2009] Macal, C. and North, M. (2009). Agent-based modeling and simulation. In *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter*, pages 86–98.
- [merlot.aero, 2014] merlot.aero (2014). Airline operations management system. <http://merlot.aero/> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Microsoft, 2017] Microsoft (2017). Microsoft dreamspark. <https://www.dreamspark.com/> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Microsoft Corporation, 2017a] Microsoft Corporation (2017a). Analysis Services. [https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/bb522607\(v=sql.120\).aspx](https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/bb522607(v=sql.120).aspx) . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Microsoft Corporation, 2017b] Microsoft Corporation (2017b). Microsoft Decision Trees Algorithm Technical Reference. <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc645868.aspx> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Microsoft Corporation, 2017c] Microsoft Corporation (2017c). SQL Server 2014. [https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/ff929050\(v=sql.10\).aspx](https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/ff929050(v=sql.10).aspx) . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Microsoft Corporation, 2017d] Microsoft Corporation (2017d). SQL Server Integration Services. <https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/ms141026> . Acesso em: 03 mar. 2017.

- [Minar et al., 1996] Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., and Askenazi, M. (1996). The swarm simulation system, a toolkit for building multi-agent simulations.
- [NASA, 2010] NASA (2010). Facet - future atm concepts evaluation tool. <http://www.aviationsystemsdivision.arc.nasa.gov/research/modeling/facet.shtml> . Acesso em: 15 jan. 2014.
- [NetLogo, 2007] NetLogo (2007). NetLogo Home Page. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo> . Acesso em: 15 ago. 2007.
- [Newman, 2002] Newman, D. (2002). *Interactive aerospace engineering and design*. Aeronautical and Aerospace Engineering Series. McGraw-Hill.
- [Nikoleris et al., 2012] Nikoleris, T., Chatterji, G., and Coppenbarger, R. (2012). Comparison of fuel consumption of descent trajectories under arrival metering. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*.
- [North et al., 2006] North, M. J., Collier, N. T., and Vos, J. R. (2006). Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 16(1):1–25.
- [North and Macal, 2005] North, M. J. and Macal, C. M. (2005). *Artificial Life Models in Software*, chapter Escaping the accidents of history: an overview of artificial life modeling with Repast. Springer London, Dordrecht, Netherlands.
- [Oaks et al., 2010] Oaks, R. D., Ryan, H. F., and Paglione, M. (2010). Prototype Implementation and Concept Validation of a 4-D Trajectory Fuel Burn Model Application EUROCONTROL Base of Aircraft Data (BADA) Comparison of fuel consumption rate with known data. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, pages 1–17.
- [O’Kelly, 2012] O’Kelly, M. (2012). Fuel burn and environmental implications of airline hub networks. *Transportation Research Part D and Environment*, 17:555–567.
- [O’Kelly, 2014] O’Kelly, M. E. (2014). Air freight hubs in the FedEx system: Analysis of fuel use. *Journal of Air Transport Management*, 36:1–12.
- [Oracle Technologies, 2007] Oracle Technologies (2007). Java technology. <http://www.java.com/> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [PACE Company, 2014] PACE Company (2014). Pace - aircraft performance. <http://www.pace.de/products/aircraft-performance.html> . Acesso em: 20 jan. 2014.

- [Park and O’Kelly, 2014] Park, Y. and O’Kelly, M. E. (2014). Fuel burn rates of commercial passenger aircraft: variations by seat configuration and stage distance. *Journal of Transport Geography*, 41:137–147.
- [Peck, 2004] Peck, S. L. (2004). Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. *Trends in Ecology and Evolution*.
- [Planefinder, 2017] Planefinder (2017). A flight data tracking company. <https://planefinder.net/>. Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Railsback et al., 2006] Railsback, S. F., Lytinen, S. L., and Jackson, S. K. (2006). Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations. *Simulation*, 82(9):609–623.
- [Repast, 2017] Repast (2017). Repast simphony. <http://repast.sourceforge.net>. Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Rich and Knight, 1991] Rich, E. and Knight, S. (1991). *Artificial Intelligence*. McGraw Hill, 2 edition.
- [Roberson, 2007] Roberson, B. (2007). Fuel conservation strategies: Cost index explained. In *Boeing, Aero Quarterly - Q2*, Seattle, USA.
- [Ross and Fahroo, 2002] Ross, I. M. and Fahroo, F. (2002). A perspective on methods for trajectory optimization. *Proceedings of the AIAAAS Astrodynamics*, (AIAA 2002-4727).
- [Rumbaugh et al., 2005] Rumbaugh, J., Jacobson, I., and Booch, G. (2005). *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Addison-Wesley, Boston, MA, 2 edition.
- [Russell and Norvig, 2003] Russell, S. and Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, second edition.
- [Scorza, 2010] Scorza, P. R. (2010). Análise dos eventos de aceleração dos motores de dissipação de energia na fase de descida das aeronaves boeing 737ng e vrg linhas aéreas. Master thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS - Brazil.
- [Sichman, 2003] Sichman, J. S. (2003). *Raciocínio social e organizacional em sistemas multiagentes: avanços e perspectivas*. Tese para obtenção do Título de Professor Livre Docente. PhD thesis, Universidade de São Paulo.

- [Singh and Sharma, 2015] Singh, V. and Sharma, S. K. (2015). Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. *European Transport Research Review*, 7(2):12.
- [Sislak et al., 2008] Sislak, D., Pechoucek, M., Volf, P., Pavlicek, D., Samek, J., Marik, V., and Losiewicz, P. (2008). Agentfly: Towards multi-agent technology in free flight air traffic control.
- [Sislak et al., 2012] Sislak, D., Volf, P., Pavlicek, D., and Pechoucek, M. (2012). Agentfly: Multi-agent simulation of air-traffic management.
- [Sriram and Haghani, 2003] Sriram, C. and Haghani, A. (2003). An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(1):29–48.
- [Stark et al., 2013] Stark, B., Stevenson, B., and Chen, Y. (2013). ADS-B for small Unmanned Aerial Systems: Case study and regulatory practices. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on*, pages 152–159.
- [Strohmeier et al., 2014] Strohmeier, M., Schafer, M., Lenders, V., and Martinovic, I. (2014). Realities and challenges of nextgen air traffic management: the case of ADS-B. *IEEE Communications Magazine*, 52(5):111–118.
- [Swan, 2002] Swan, W. M. (2002). Airline route developments: a review of history. *Journal of Air Transport Management*, 8(5):349–353.
- [Swarm Development Group, 2004] Swarm Development Group (2004). Swarm Development Group:Swarm 2.2. <http://wiki.swarm.org> . Acesso em: 24 jul. 2007.
- [The Aviation Herald, 2017] The Aviation Herald (2017). Crash: Lamia bolivia rj85 near medellin on nov 28th 2016, electrical problems, no fuel, impact with terrain. <https://avherald.com/h?article=4a16583c> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [The Eclipse Foundation, 2017] The Eclipse Foundation (2017). Eclipse.org home. <http://www.eclipse.org/> . Acesso em: 03 mar. 2017.
- [Trani et al., 2004] Trani, A. A., Schilling, G., Baik, H., and Seshadri, A. (2004). A Neural Network Model to Estimate Aircraft Fuel Consumption. *AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO)*, (September):1–24.

- [Tu et al., 2005] Tu, Y., Ball, M., and Jank, W. (2005). Estimating flight departure delay distributions a statistical approach with long-term trend and short-term pattern. Technical report.
- [Umang, 2010] Umang, N. (2010). Evaluating passenger delays in the us domestic air transportation system. Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge - USA.
- [Vassiliadis et al., 2002] Vassiliadis, P., Simitsis, A., and Skiadopoulos, S. (2002). Conceptual Modeling for ETL Processes. In *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Data Warehousing and OLAP*, DOLAP '02, pages 14–21, New York, NY, USA. ACM.
- [Vlassis, 2003] Vlassis, N. (2003). A concise introduction to multiagent systems and distributed AI. Informatics Institute, University of Amsterdam.
- [Wahbah, 1987] Wahbah, Magdy M.; Berning, M. J. C. T. S. (1987). Simulation of airplane and rocket trajectories. Technical report, NASA - Johnson Space Center, Houston, USA.
- [Want et al., 2015] Want, R., Schilit, B. N., and Jenson, S. (2015). Enabling the Internet of Things. *Computer*, 48(1):28–35.
- [Wikipedia, 2017] Wikipedia (2017). Haversine formula. https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula . Accesso em: 03 mar. 2017.
- [Wooldridge, 2002] Wooldridge, M. (2002). *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley, Chichester.
- [Wooldridge and Jennings, 1994] Wooldridge, M. and Jennings, N. R. (1994). Intelligent agents: Theory and practice. Available by FTP. Submitted to The Knowledge Engineering Review, 1995.
- [Yan and Tseng, 2002] Yan, S. and Tseng, C.-H. (2002). A passenger demand model for airline flight scheduling and fleet routing. *Computers & Operations Research*, 29(11):1559–1581.
- [Zaki and Sobh, 2005] Zaki, M. and Sobh, T. S. (2005). Attack abstraction using a multiagent system for intrusion detection. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 16(2):141–150.
- [Zhu and Huang, 2012] Zhu, Y. and Huang, C. (2012). An Improved Median Filtering Algorithm for Image Noise Reduction. *Physics Procedia*, 25:609–616.