SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO IMPACTO DO VENTO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE AERONAVES

Mateus Esteves da Silva
Instituto de Ciências Exatas e Informática, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Rua Walter Ianni, 255 - São Gabriel, Belo Horizonte - MG, 31980-110
mateus.esteves@sga.pucminas.br

Prof. Dr. Sandro Jerônimo de Almeida
Instituto de Ciências Exatas e Informática, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Rua Walter Ianni, 255 - São Gabriel, Belo Horizonte - MG, 31980-110
sandro.j@pucminas.br

Prof. Dr. Ricardo Poley Martins Ferreira
Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901
poley@demec.ufmg.br

RESUMO

Uma grande parcela das despesas operacionais de uma empresa aérea é destinada a compra de combustível para aeronaves, representando mais de 30% das despesas em algumas empresas. Tendo em vista esse cenário e o aumento na demanda por serviços de aviação civil, este trabalho propõe simular e analisar uma estratégia para diminuição do consumo de combustível de aeronaves. Considerando que o desempenho de um voo pode ser influenciada pelo vento, um sistema multiagente foi utilizado para reproduzir voos e simular condições de operações a partir de uma base de dados climáticos. Implementou-se no sistema uma estratégia de mudança de altitude dos voos para um ponto onde as condições climáticas (vento) fossem mais favoráveis ao consumo de combustível das aeronaves. A reprodução de 249 voos e simulação da estratégia de variação de altitude mostrou uma possibilidade de redução média de 0,5% no consumo de combustível por aeronave em um cenário hipotético.

PALAVRAS CHAVE. Sistemas Multiagentes, BADA, Aviação Civil.

ABSTRACT

A large portion of an airline's operating costs is destined to the acquisition of fuel, accounting for more than 30% of total expenditures in some companies. Considering this scenario and the recent increase in demand for civil aviation services, this work proposes to simulate a strategy that seeks to reduce the fuel consumption of airplanes. Based on the assumption that the performance of a flight can be influenced by the wind, a multi-agent system was utilized to reproduce flights and simulate operation conditions with data from a weather database. For this study, it was implemented on the simulator a strategy to change the altitude of a flight to where the climate conditions (wind) will result in a lower fuel consumption. The reproduction of 249 flights using this strategy showed the possibility of an average reduction of 0.5% in the fuel consumption per aircraft in a hypothetic scenario.

KEYWORDS. Multiagent Systems. BADA. Civil Aviation.

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

1. Introdução

A demanda por serviços de aviação vem crescendo desde 2015. Segundo a [IATA, 2017] na primeira metade de 2016 a quantidade de passageiros transportados por quilometro, subiu cerca de 7,1% no mundo todo, em comparação ao mesmo período de 2015. Na segunda metade deste mesmo ano, a indústria de aviação civil teve um crescimento maior, chegando a 9%.

Aliado ao crescimento de demanda, crescem também os gastos operacionais das empresas aéreas, que devem manter a qualidade do serviço, mesmo para um número maior de passageiros. Uma parte do orçamento destinado aos gastos operacionais acaba sendo direcionado à aquisição de combustível para as aeronaves, que mesmo apresentando uma queda em seu preço com relação aos anos anteriores [EIA, 2016], ainda representa uma grande parcela nos gastos das companhias.

A Tabela 1 mostra os gastos com combustível, referentes ao ano de 2014, das três companhias aéreas com o maior número de passageiros transportados por quilometro no mundo. [IATA, 2016].

	Gasto total (Em milhões de dólares)	Porcentagem dos custos operacionais
American Airlines	US$ 10,592	33%
Delta Air Lines	US$ 13,512	35%
United Airlines	US$ 11,675	32%

Fontes: [American Airlines Group Inc., 2015], [Delta Air Lines, Inc., 2015] e [United Continental Holdings, Inc., 2016]

Fatores climáticos podem interferir na segurança e desempenho de um avião, como por exemplo: tempestades, turbulências, visibilidade reduzida, ventos e até mesmo cinzas vulcânicas podem prejudicar o voo de uma aeronave [Kulesa, 2009].

Atualmente existem várias bases de dados com informações sobre esses fatores climáticos, bases como o *Integrated Surface Database* (ISD) e o *Global Forecast System* (GFS) do órgão federal norte-americano *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) fornecem uma grande quantidade de dados históricos e previsões sobre o clima, incluindo as condições do vento. Mesmo com tantos dados disponíveis ainda há uma carência de estudos sobre os impactos do vento no desempenho dos aviões, e sobre como utilizar esses dados climáticos para voar de forma mais eficiente.

Diante disso, este trabalho se propõe a analisar, através de simulações computadorizadas, uma estratégia baseada na mudança da altitude do voo em termos de consumo de combustivel. A estratégia analisada utiliza dados de velocidade e direção de vento em diferentes altitudes para ajustar a rota de aeronaves visando economizar combustível. Saber previamente as condições climáticas na rota de um voo pode ser utilizado para fazer planos de voo mais eficientes e que consumam menos combustível. É importante ressaltar que neste estudo os voos foram simulados em ambientes controlados que diferem da realidade, onde muitas limitações devem ser levadas em consideração no momento de se conceber um plano de voo, mas apesar disso, o presente trabalho traz parâmetros indicativos da potêncial economia que a estratégia proposta poderia trazer para uma companhia aérea em condições ideais.

Escolheu-se a base de dados climáticos *Global Forecast System* [National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017] para obtenção de dados de ventos para este estudo (altitude, direção e velocidade). Os dados foram então carregados no banco de dados do sistema IFMAS (*Intelligent Flight Multiagent System*) [de Almeida, 2017], um simulador que possui uma base de dados de trajetórias de milhares de voos realizados no mundo.

2. Trabalhos Relacionados

Segundo o estudo de [Mair e Birdsall, 1996] o desempenho das aeronaves pode ser especificado em termos quantitativos, como o custo operacional direto, limite máximo para carga

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

útil e combustível, velocidade de cruzeiro e distancias requeridas para pousos e decolagens. Normalmente, as técnicas que se propõe a melhorar esse desempenho se baseiam no ajuste de alguns parâmetros que influenciam o comportamento dessas variáveis, para se obter os resultados desejados [de Almeida, 2017].

Muitos estudos se voltam para a busca de uma redução no consumo de combustível, seja através da otimização das trajetórias dos voos como em [Ng et al., 2012] e em [Jensen et al., 2015] – sendo que este último nos aponta que é possível reduzir o combustível consumido pela aeronave em até 2% e o tempo de voo em até 5%, ou através de um projeto de aeronaves que têm como objetivo a construção de aviões mais eficientes [Mair e Birdsall, 1996]. Podemos ver também em [Dalmau e Prats, 2015] uma análise da redução no consumo de combustível caso a velocidade e altitude do voo em fase de cruzeiro fossem otimizadas, que indica um potencial de redução média de 1,96% para otimização de altitude, e 1,93% para otimização da velocidade em voos realizados no espaço aéreo doméstico dos EUA.

Além dos gastos com combustível, um outro problema que afeta as companhias aéreas é o atraso nos voos, que também pode custar caro à essas companhias. Segundo o estudo de [Ball et al., 2010], nos Estados Unidos em 2007, os voos atrasados custaram às linhas aéreas US$ 8,3 bilhões, e a soma dos prejuízos que esses atrasos causaram aos passageiros chega a US$ 16,7 bilhões [Ball et al., 2010]. Também existem tentativas de melhorar esse cenário, com é o caso do *Ground Delay Program* (GDP), que tem por objetivo auxiliar no controle de tráfego em aeroportos que cuja demanda esteja próxima de exceder a capacidade do mesmo [Federal Aviation Administration, 2005].

A Eurocontrol, entidade responsável na Europa pela segurança e gerenciamento do trágefo aéreo vem proponho projetos e iniciativas visando otimizar o uso e controle do espaço aéreo. Uma dessas ações é o programa SESAR, que buscar trazer uma inovação tecnológicas para as operações de aeroportos, companhias aéreas e aeronaves. Destaca-se como projeto importante da Eucontrol e vinculado ao SESAR [Move, 2015], o *Base of Aircraft Data* (BADA) que é uma base de dados e um modelo matemático de desempenho para aeronaves desenvolvido e mantido por esta organização, com o objetivo de possibilitar geração de trajetórias de aeronaves e estimativa de consumo de combustível [EUROCONTROL, 2014].

O uso do BADA pode ser visto em [Cavcar e Cavcar, 2004] onde os autores o utilizam para calcular o consumo de combustível de uma aeronave, com o objetivo de demonstrar que em um ambiente de tráfego aéreo, a diferença na performance das aeronaves pode impactar no consumo de combustível das mesmas.

Em [Miyoshi e Mason, 2009], podemos observar o BADA sendo utilizado para dar suporte a uma metodologia para o cálculo das emissões de gás carbônico feitas pelas aeronaves, onde o modelo da EUROCONTROL é utilizado novamente para calcular o consumo de combustível, que por sua vez está diretamente relacionado com as emissões de CO_2.

2.1. Simulação baseada em agentes de rotas aéreas

O Simulador IFMAS também utiliza o modelos de consumo de combustível baseado no BADA. Esse simulador é um exemplo que sistema multiagente. Em termos conceitos, um agente pode ser definido como uma entidade computacional capaz de perceber e agir sobre o ambiente no qual está inserido [Weiss, 1999]. Ainda segundo Weiss, um sistema multiagente é um sistema onde vários agentes inteligentes interagem entre si para realizarem um conjunto de tarefas, ou atingir objetivos específicos.

Desenvolvido por [de Almeida, 2017], o IFMAS tem como objetivo permitir a reprodução de voos reais e/ou a simulação de novos voos com diferentes estratégias. O IFMAS possui três módulos principais, onde cada módulo tem uma responsabilidade específica dentro do sistema:

- O módulo Simulador cuida da criação e da interação dos agentes, e se conecta com a base de dados de forma a obter as informações necessárias para executar as simulações;

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

- O módulo Analisador é capaz de transformar os dados resultantes de uma simulação em gráficos, permitindo ao usuário visualizar os dados de uma forma mais compreensível;

- A base de dados é responsável por armazenar os dados do simulador, importados de fontes externas, ou gerados pela simulação de novos voos.

A base de dados do simulador foi populada inicialmente com dados de 36.190 voos reais realizados no mês de setembro de 2013. Os dados foram fornecidos pela empresa *Planefinder.net* [Planefinder, 2017]. Esses dados foram obtidos por meio do sistema ADS-B [Theunissen et al., 2011]. Os dados no padrão ADS-B não possuem a massa das aeronaves e consumo de combustível. Em função disso, foi necessário utilizar os parâmetros e equações do BADA para fazer uma estimativa de consumo de combustível dessas aeronaves para medição de desempenho operacional.

Os dados obtidos da *Planefinder* foram organizados em uma estrutura de *waypoints*, que contém um conjunto de dados relativos à aeronave para cada instante do voo, dentre estes dados devemos destacar a presença da data e hora de coleta, latitude, longitude e altitude, que servem para identificar unicamente cada *waypoint*. Esta estrutura de *waypoints* também é utilizada para realizar a reprodução simulado do deslocamento das aeronaves no espaço aéreo [de Almeida, 2017]. Os dados obtidos do *Global Forecast System* foram acoplados ao IFMAS para permitir a simualação de estratégias que utilizem o dados de ventos. Na seção a seguir esses procedimentos são detalhados.

3. Metodologia

Para a realização deste trabalho foram pesquisadas várias bases de dados que poderiam servir como fontes para extração das informações sobre o vento e incoporadas aos sistema IFMAS. Após a obtenção dos dados meteorológicos, os mesmos foram submetidos a um processo ETL (Extração, transformação e carga), para torná-los úteis ao propósito deste estudo. As atividades realizadas durante esta fase são ilustradas pela Figura 1, e detalhadas nas subseções seguintes.

Figura 1: Atividades principais do processamento dos dados.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1. Obtenção de Dados Meteorológicos

Foram analisadas algumas bases de dados meteorológicos para uso nas simulações. A base de dados que se mostrou mais adequada a *Global Forecast System* (GFS), mantida pelo órgão americano *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). A decisão de utilizar essa base foi tomada pois a mesma contém as informações que seriam necessárias para este estudo, além de ser disponibilizada de forma totalmente gratuita. O GFS foi também utilizado em [Beccario, 2014b], [Viégas e Wattenberg, 2012] e [Beccario, 2014a], para geração de mapas com as direções do vento em Tóquio, nos Estados Unidos e no planeta inteiro, respectivamente.

Os dados interessados a este trabalho são relacionado aos ventos (direção, velocidade e altitude). Esses dados são estimados pelo NOAA por meio de modelos computacionais e são atualizados a cada três horas. Buscou-se a compatibilização dos dados vento com o período dos dados de voos (trajetórias) dos sistema IFMAS, que aconteceram em setembro de 2013. Os arquivos obtivos junto ao NOAA totalizaram 63 GB de dados.

3.2. Extração dos dados

Inicialmente, os arquivos fornecidos pelo NOAA estavam no formato GRIB2, que é um formato padrão para troca de dados organizados em estrutura de *grid*, estabelecido pela *World Meteorological Organization* [World Meteorological Organization, 1994]. Devido à esse fato, foi necessário fazer uma conversão destes dados iniciais para um formato mais fácil de ser manipulado posteriormente.

A conversão dos dados iniciais foi feita de forma automática, utilizando o software *DeGRIB* [National oceanic and Atmospheric Administration, 2017], fornecido pelo NOAA, em conjunto com arquivos *Batch* elaborados pelo autor. Os dados extraídos foram as componentes vertical e horizontal do vetor do vento, a altitude relativa à cada registro, o restante das variáveis contidas em cada arquivo não foi considerada.

3.3. Transformação dos Dados

Após o processo de extração, foi necessário aplicar algumas transformações aos dados originais, para que os mesmos pudessem ser utilizados posteriormente pelo simulador. As operações realizadas foram a conversão da altitude de Pa para metros e o cálculo da velocidade e direção do vento utilizando as componentes do seu vetor. Todas essas modificações estão detalhadas a seguir.

3.3.1. Transformação da altitude

Para garantir a compatibilidade com o simulador, foi necessário calcular a altitude em metros, com base na pressão atmosférica registrada nos dados, conforme a seguinte equação apresentada em [CSGNetwork, 1999].

$$H = \left(1 - \left(\frac{(P/100)}{1013,25}\right)^{0,190284} \times 145366,45\right) \times 0,3048 \tag{1}$$

Onde: H é a altitude em metros, e P a pressão atmosférica em Pa obtida nos arquivos do GFS.

3.3.2. Cálculo da velocidade e direção dos ventos

Duas últimas operações foram necessárias para que os dados se tornassem úteis para este trabalho: calcular a velocidade e a direção do vento. Para este propósito foram utilizadas as fórmulas apresentadas abaixo, que são a combinação de outras equações descritas em [Earth Observing Laboratory, 1999], [dos Santos, 2013] e [RapidTable, 1999].

$$W_s = \sqrt{(U^2 + V^2) \times 3,6} \tag{2}$$

$$W_d = 270 - \left(\left(\arctan\left(\frac{V}{U}\right)\right) \times 180/\pi\right) \tag{3}$$

Onde:

- W_s representa a velocidade em km/h;
- W_d representa a direção do vento em graus com relação ao norte;
- U representa a componente horizontal do vetor do vento;
- V representa a componente vertical do vetor do vento.

Devido ao grande volume de dados, e da complexidade das operações que foram realizadas sobre os dados originais foi necessário automatizar este processo, e para isso foi construído o *GFS-CSVReader*, uma aplicação escrita em *Java*, capaz de processar todos os arquivos gerados anteriormente, coletando as informações necessárias e aplicando todas as transformações descritas acima.

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

3.4. Ajuste da Velocidade

Os dados fornecidos pela *Planefinder.net* contém a velocidade real do avião em relação ao solo (*ground speed*) em determinado momento do voo. Porém, para calcular o consumo de combustível das aeronaves, é necessário considerar a *true airspeed*, que representa com mais exatidão a real velocidade obtida pelos motores da aeronave. O simulador IFMAS proposto em [de Almeida, 2017] calcula a *true airspeed* a partir dos dados de vento (velocidade e direção) descritos na seção anterior. Por exemplo, se em determinado ponto a aeronave está com uma velocidade em relação ao solo de 900 km/h (ground speed), e existe uma corrente de vento no mesmo sentido da aeronave a 200 km/h, então a velocidade utilizada no cálculo de consumo de combustível será de 700 km/h.

O modelo de cálculo da *true airspeed* implementado no simulador *IFMAS* é dado por:

$$V_{TAS} = \sqrt{\upsilon^2 + \nu^2} \tag{4}$$

$$\upsilon = G_S \times \sin\phi - W_S \times \sin\lambda \tag{5}$$

$$\nu = G_S \times \cos\phi - W_S \times \cos\lambda \tag{6}$$

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).

Considerando que a base de dados obtida (*Global Forecast System* - GFS) possui dados estimados para o vento, o valor calculado para a *true airspeed* pode ser irreal. Em algumas situações, a *true airspeed* poderia ser muito baixo ou alta, o que fisicamente é inconsistente. Por exemplo, se a velocidade em relação ao solo (*ground speed*) obtida de uma aeronave Boing 737 em fase cruzeiro for 700 km/h e a estimativa de vento for 300 km/h em sentido oposto ao da aeronave, isso implicaria que a aeronave estaria a 400km/h em fase faze cruzeiro, o que tende a ser inconsistente para esse modelo de aeronave.

Para contornar esse problema utilizou-se limites inferiores e superiores de velocidades para garantir que a *true airspeed* esteja em uma faixa de valores plausível. Foi adotada a seguinte equação, que garante que a velocidade atual da aeronave não ultrapassará os limites estabelecidos:

$$V_f = max\left(V_s, min\left(V_{TAS}, V_{max}\right)\right) \tag{7}$$

Onde V_f seria a velocidade do avião naquele ponto utilizada como base para o cálculo de consumo de combustível, V_s representa a *scheduling speed* calculada para aquele modelo de aeronave naquela altitude, V_{TAS} é a *true airspeed* calculada para aquela posição, e V_{max} é a velocidade máxima para o modelo de aeronave utilizado, definido pelo BADA. Com isso, a velocidade do avião utilizada como base da estimativa do consumo de combustível somente será definida como a *true airspeed* caso ela esteja entre a *scheduling speed* e o limite de velocidade máximo do BADA.

A *scheduling speed* é uma velocidade estimada a partir de modelo matemático especificado em [EUROCONTROL, 2014]. Trata-se de uma velocidade de referência que considera a fase do voo, altitude da aeronave e tipo de motor (*Jet, Turboprop* e *Piston*). Os cálculos foram implementados comforme descritos no BADA, e podem ser encontrados em [EUROCONTROL, 2014].

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

4. Experimentos Computacionais

Dos 36.190 voos dispinibilizados na base de dados do simulador IFMAS, foram selecionadas duas amostrar para avaliação da estratégia de mudança de altitude das aeronaves: a primeira, com uma amostra de 20 voos, e a segunda com uma amostra maior, de 229 voos. Em ambos os casos, os voos foram escolhidos de forma aleatória, tendo em comum apenas o fato de que foram voos realizados dentro do continente Europeu, pois haviam mais informações sobre os voos realizados neste continente.

Para cada voo nas amostras foram realizadas cinco simulações: uma onde o voo estava em sua altura real, duas onde o voo foi configurado para voar 1.000 e 2.000 pés acima de sua altitude real, e mais duas onde foi configurado para voar 1.000 e 2.000 pés abaixo de sua altitude inicial.

A decisão de variar a altitude em 1.000 pés foi tomada com base no fato de que os *flight levels* são separados verticalmente por essa distância [Federal Aviation Administration, 2015].

Tabela 1: Consumo de combustível e economia por voo

Voo	Consumo no Melhor Caso (kg)	Consumo Real (kg)	Consumo no Pior Caso (kg)	Economia no Melhor Caso (%)	Distância percorrida (km)
Voo 01	3912	3913	3914	0,03	1.424,00
Voo 02	2212	2229	2230	0,77	598,25
Voo 03	3314	3320	3347	0,18	1.117,26
Voo 04	3035	3048	3050	0,45	835,76
Voo 05	2669	2673	2675	0,14	835,35
Voo 06	2659	2664	2666	0,19	806,70
Voo 07	2405	2419	2563	0,60	518,03
Voo 08	1832	1832	1840	0,00	509,86
Voo 09	2067	2079	2089	0,55	527,92
Voo 10	1837	1867	1904	1,62	312,88
Voo 11	2537	2547	2564	0,38	691,28
Voo 12	2767	2773	2776	0,21	783,94
Voo 13	2292	2294	2295	0,08	664,68
Voo 14	2167	2167	2169	0,00	598,25
Voo 15	3068	3072	3072	0,12	796,64
Voo 16	2813	2821	2833	0,29	806,70
Voo 17	3370	3396	3419	0,77	703,80
Voo 18	2685	2687	2693	0,08	664,68
Voo 19	2411	2419	2426	0,32	664,68
Voo 20	1941	1959	1980	0,92	551,18

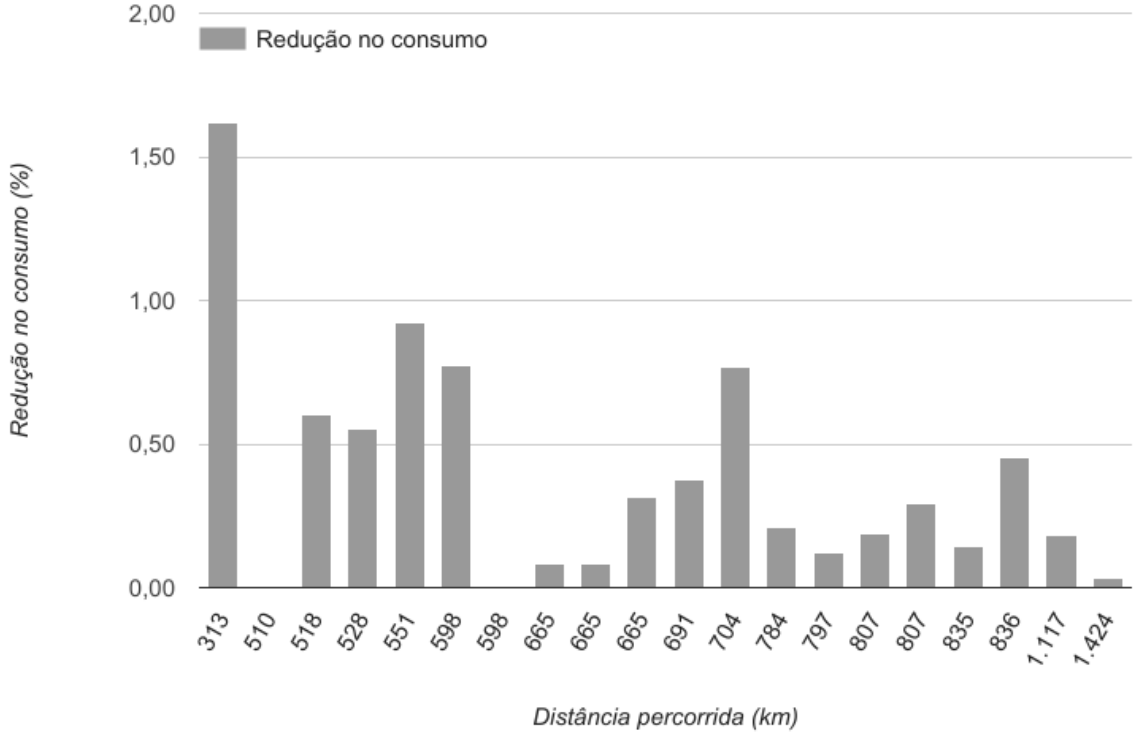
Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 1 mostra o consumo de cada voo na altitute real (consumo real), na altitude mais favorável (consumo no melhor caso), e na altitude mais desfavorável (consumo no pior caso) para sua operação. Pode-se perceber que em alguns casos, a economia de se voar em uma altitude favorável, pode chegar a mais de 5% com relação ao voo em uma altitude que as condições do vento não estejam boas para a operação eficiente da aeronave.

Na Figura 2 é ilustrada a relação entre a distância percorrida e o percentual de redução, onde é possível perceber que os maiores picos de economia estão nos voos que percorreram as menores distâncias, enquanto os voos que realizaram viagens mais longas apresentaram uma tendência a economizar menos. Uma hipótese levantada para tentar explicar esta tendência é a de que os aviões que voam por um percurso mais longo já utilizaram algum tipo de informação sobre a direção e intensidade do vento no momento de planejamento da sua rota.

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

Figura 2: Percentual de economia por distância percorrida



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 2 resume a economia que se teria para as duas amostras (20 e 229 voos) caso se adotasse a estratégia de voar na altitude mais favorável. Pode-se observar que a tendência da economia total é ligeiramente maior que a economia média. Possivelmente por existem alguns voos individuais com valores mais acentuados de economia de combustível. De forma geral, observa-se uma economia modesta de 0,5% de combustível ao considerar o vento como informação para definição da altitude de aeronaves. Esse número pode-se considerar expressivo para a realidade de uma companhia aérea tendo em vista que o combustível tem grande representatividade na estrutura de custos das empresas (entre 30 e 40%). O desvio padrão relacionado à economia de combustível é alto (0,4 e 0,59) em função dos voos terem selecionados alatoriamente, em diferentes rotas. Uma análise focada em voos de uma única rota poderá ser realizada futuramente visando complementar o entendimento sobre a estratégia de consumo estudada.

Tabela 2: Simulaçóes

	20 Voos	229 Voos
Consumo total em altitude real (kg)	52.189,86	466.786,00
Consumo utilizando a estratégia proposta (kg)	52.003,02	464.140,64
Economia utilizando a estratégia proposta (%)	0,36	0,57
Média de economia por voo (%)	0,25	0,51
Desvio padrão (%)	0,40	0,59

5. Comentários e Conclusões

Esse estudo teve como seu principal objetivo simular o impacto da ação do vento no consumo de combustível das aeronaves. Para observar esse impacto, foi desenvolvida uma estratégia, na qual os aviões deveriam mudar sua altitude, e consequentemente experimentariam uma mudança na velocidade e na direção do vento. Foram simulados voos na altitude real dos aviões e em mais

quatro altitudes diferentes para que se comparassem os resultados. Após a análise dos dados obtidos da simulação conclui-se que o uso desta estratégia pode auxiliar na redução do consumo de combustível de uma forma modesta (entre 0,36% e 0,57%). Esse tipo de estratégia mostra-se potencialmente útil em cenários futuros onde as aeronaves terão maior autonomia para realização de voos livre [Theunissen et al., 2011]. Os resultados obtidos podem ainda servir como parâmetros indicativos de limites superiores de economia que uma companhia aérea pode obter com seus voos.

A estratégia proposta para economia de combustível ainda requer estudos de viabilidade mais aprofundados devido às muitas condições adversas que podem ser enfrentadas em um cenário real e que não puderam ser completamente reproduzidas nas simulações. Alguns trabalhos futuros, que podem ser sugeridos para complementar este estudo englobam a análise do consumo dos voos em uma rota específica. Um outro complemento seria estudar voos de uma empresa específica, para verificar se ela poderia ser mais econômica caso fizesse ajustes em seus planos de voo. Uma terceira possibilidade seria a análise da economia que seria obtida caso o piloto fosse informado de uma previsão das condições do vento que indique uma condição favorável e a partir disso decidisse atrasar em alguns minutos a partida do voo.

Referências

American Airlines Group Inc. (2015). 2014 annual report of the american airlines group. URL http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=117098&p=irol-reportsannual. Acesso em: 3 dez. 2016.

Ball, M., Barnhart, C., Dresner, M., Hansen, M., Neels, K., Odoni, A., Peterson, E., Sherry, L., Trani, A., e Zou, B. (2010). Total delay impact study. p. 89.

Beccario, C. (2014a). Earth: a global map of wind, weather, and ocean conditions. URL https://earth.nullschool.net/. Acesso em: 5 mai. 2017.

Beccario, C. (2014b). Tōkyō fūsoku. URL https://air.nullschool.net/. Acesso em: 5 mai. 2017.

Cavcar, A. e Cavcar, M. (2004). Impact of aircraft performance differences on fuel consumption of aircraft in air traffic management environment. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 76(5):502–515. URL http://dx.doi.org/10.1108/00022660410555176. Acesso em: 22 mai. 2017.

CSGNetwork (1999). Pressure altitude calculator. URL http://www.csgnetwork.com/pressurealtcalc.html. Acesso em: 4 dez. 2016.

Dalmau, R. e Prats, X. (2015). How much fuel and time can be saved in a perfect flight trajectory? continuous cruise climbs vs. conventional operations. URL http://www.icrat.org/icrat/seminarContent/Author/RamonCodina737/FINAL-602-cfp-Codina.pdf. Acesso em: 10 jun. 2018.

de Almeida, S. J. (2017). *Análise e Simulação Baseada em Agentes de Rotas Aéreas*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG.

Delta Air Lines, Inc. (2015). 2014 annual report of the delta air lines. URL http://s1.q4cdn.com/231238688/files/Annual%20Meeting/2015/2014-DAL-10-K_v001_j37ksn.PDF. Acesso em: 3 dez. 2016.

dos Santos, L. S. F. (2013). 3,6. URL http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/index.php/publicacoes/artigos/479-3-6. Acesso em: 4 dez. 2016.

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

Earth Observing Laboratory (1999). Wind direction quick reference. URL https://www.eol.ucar.edu/content/wind-direction-quick-reference. Acesso em: 4 dez. 2016.

EIA (2016). U.s. gulf coast kerosene-type jet fuel spot price fob. URL https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=eer_epjk_pf4_rgc_dpg&f=m. Acesso em: 3 dez. 2016.

EUROCONTROL. *User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) revision 3.12*. EUROCONTROL, Brétigny-sur-Orge, 3 edition, 8 2014.

Federal Aviation Administration (2005). Ground delay program. URL http://www.fly.faa.gov/Products/AIS_ORIGINAL/shortmessage.html. Acesso em: 5 mai. 2017.

Federal Aviation Administration (2015). FAA Order JO 7110.65W. URL https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/ATC.pdf. Acesso em: 5 mai. 2017.

IATA (2016). Summary of passenger and freight traffic. URL http://www.iata.org/docx/WATS_2016-infographic.pdf. Acesso em: 3 dez. 2016.

IATA (2017). Iata annual review 2017. URL http://www.iata.org/publications/Documents/iata-annual-review-2017.pdf. Acesso em: 3 dez. 2016.

Jensen, L. L., Tran, H., e Hansman, R. J. (2015). Cruise fuel reduction potential from altitude and speed optimization in global airline operations. URL http://atmseminar.org/seminarContent/seminar11/papers/481-Jensen_0126150437-Final-Paper-5-7-15.pdf. Acesso em: 10 jun. 2018.

Kulesa, G. (2009). Weather and aviation: How does weather affect the safety and operations of airports and aviation, and how does faa work to manage weather-related effects? *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation*, p. 10.

Mair, W. A. e Birdsall, D. L. (1996). *Aircraft Performance (Cambridge Aerospace Series)*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 978-0521568364.

Miyoshi, C. e Mason, K. (2009). The carbon emissions of selected airlines and aircraft types in three geographic markets. *Journal of Air Transport Management*, 15(3):138 – 147. ISSN 0969-6997. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699708001579. Papers of the 11th Annual Hamburg Aviation Conference.

Move, D. G. (2015). European Performance Scheme. (February).

National Oceanic and Atmospheric Administration (2017). Global forecast system (gfs). URL https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs.

National oceanic and Atmospheric Administration (2017). Ndfd grib2 decoder. URL https://www.weather.gov/mdl/degrib_home. Acesso em: 5 mai. 2017.

Ng, H. K., Sridhar, B., e Grabbe, S. (2012). A practical approach for optimizing aircraft trajectories in winds. Master's thesis.

Planefinder (2017). A flight data tracking company. URL https://planefinder.net.

RapidTable (1999). Radians to degrees conversion. URL http://www.rapidtables.com/convert/number/radians-to-degrees.htm. Acesso em: 4 dez. 2016.

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br

Theunissen, E., Rademaker, R. M., e Lambregts, A. A. (2011). Navigation system autonomy and integration in NextGen: Challenges and solutions. In *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2011 IEEE/AIAA 30th*, p. 6C5–1–6C5–12.

United Continental Holdings, Inc. (2016). 2015 annual report of the united continental holdings. URL http://api40.10kwizard.com/cgi/convert/pdf/UAL-20160218-10K-20151231.pdf?ipage=10756082&xml=1&quest=1&rid=23&section=1&sequence=-1&pdf=1&dn=1. Acesso em: 3 dez. 2016.

Viégas, F. e Wattenberg, M. (2012). Wind map. URL http://hint.fm/wind/. Acesso em: 5 mai. 2017.

Weiss, G., editor (1999). *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, Cambridge, MA. ISBN 978-0-262-23203-6.

World Meteorological Organization (1994). A guide to the code form fm 92-ix ext. grib. URL https://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-2.html. Acesso em: 5 mai. 2017.

https://proceedings.science/p/85422?lang=pt-br