

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Rafael Bonin Pinto

**Estudo da viabilização do voo em formação com aeronaves de
transporte**

**São Carlos
2021**

Rafael Bonin Pinto

**Estudo da viabilização do voo em formação com aeronaves de
transporte**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Aeronáutica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Aeronáutico.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Martins Abdalla

**São Carlos
2021**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P659e Pinto, Rafael
 Estudo da viabilização do voo em formação com
 aeronaves de transporte / Rafael Pinto; orientador
 Alvaro Martins Abdalla. São Carlos, 2021.

Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2021.

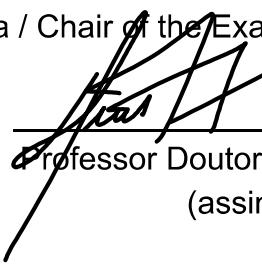
1. Voo em formação. 2. Aeronáutica Civil. 3.
Economia de combustível. 4. Aeronaves comerciais. 5.
Blockchain. 6. Homologação. 7. Normas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO
Approval sheet

Candidato / Student: Rafael Bonin Pinto
Título do TCC / Title: Estudo da viabilização do voo em formação com aeronaves de transporte
Data de defesa / Date: 16/12/2021

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / result
Professor Doutor Hernan Dario Ceron Muñoz	<i>APROVADO</i>
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Professor Titular Fernando Martini Catalano	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee:


Professor Doutor Hernan Dario Ceron Muñoz
(assinatura / signature)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus; pois Ele possibilitou a minha capacitação e chegar até aqui. Dedico este trabalho, também, aos meus pais, por terem me apoiado durante toda a minha jornada no curso de Engenharia Aeronáutica. Por último, dedico este trabalho à minha companheira e amada, que sempre esteve ao meu lado durante os tempos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida e por sempre ter estado ao meu lado em todos os momentos, oferecendo conhecimento e proteção. Através Dele foi possível que eu pudesse trilhar minha jornada até aqui, e através dele, caminho para o futuro.

Agradeço aos meus pais, por todo o apoio durante minha educação, desde o primário, até o fim deste curso. Agradeço-os por todo o amor que sempre tem comigo.

Agradeço à minha companheira, por também sempre ter estado ao meu lado durante os tempos bons, e principalmente, nos tempos difíceis. Agradeço-a também por sempre ter me apoiado e incentivado em tudo, mesmo quando tudo mostrava-se contrário.

Agradeço aos meus amigos, que sempre proporcionaram momentos de alegria e felicidade, e que sempre me incentivaram a me aperfeiçoar na área profissional e acadêmica.

Agradeço, finalmente, à todos que já foram meus professores, desde o primário até aqui, pela dedicação em seu trabalho e pelo importante papel que desempenham na formação da sociedade Brasileira.

“A single lifetime, even though entirely devoted to the sky, would not be enough for the study of so vast a subject. A time will come when our descendants will be amazed that we did not know things that are so plain to them.”

Seneca

RESUMO

PINTO, RAFAEL BONIN. **Estudo da viabilidade de voo em formação para aeronaves civis para economia de combustível em voo e apresentação de um modelo inicial.** 2021. 51p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Neste trabalho, foram investigado os motivos pelo quais o voo em formação ainda não é aplicado na área civil, e também, a viabilidade de sua implantação com a estimativa dos potenciais benefícios gerados. Para explicar tal fenômeno, foram identificados os pontos ausentes à esse mercado, sendo esses a presença de homologação para a área civil, e, a ausência de uma plataforma para uso inter-empresarial para realização desse tipo de voo. Dos pontos identificados, foram propostas soluções iniciais, ou seja, um modelo de homologação e um modelo de plataforma a serem seguidos. Esses, por sua vez, foram testados em uma simulação estatística aos quais mostram uma mínima economia monetária média percebida de 1.8% para a fase de voo a qual as aeronaves voam em formação.

Palavras-chave: Voo em formação. Aeronáutica Civil. Economia de combustível. Aeronaves comerciais. Blockchain. Homologação. Normas.

ABSTRACT

PINTO, RAFAEL BONIN. **Study of the viability of formation flight in Civil Aviation, and proposal of a initial model.** 2021. 51p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

In this work, we investigated the motives behind which the civil aviation does not broadly use the technology of formation flight. We also estimated the implementation viability of this technology by the potential generated benefits. To explain why such phenomenon takes place, two main points of absence were identified; the lack of homologation of this technology on civilian aviation, and the lack of a inter-organizational platform to allow these types of flights. Some solutions were proposed based on the identified points, which were the proposal of a initial homologation scheme, and a platform model to enable inter-organizational formation flight. These solutions were simulated via a statistical simulation, which yielded a minimal perceived mean monetary economy of 1.8% relative to the formation flight phase.

Keywords: Formation flight. Civil aviation. Fuel saving. Commercial Aircraft. Blockchain. Homologation. Norms.

LISTA DE FIGURAS

1	Representação dos pontos de estagnação em um escoamento potencial de um aerofólio	23
2	Representação dos pontos de estagnação em um escoamento potencial de um aerofólio com a aplicação da condição de <i>Kutta</i>	23
3	Representação do modelo vórtice ferradura	24
4	Representação do modelo de um vórtice realístico	25
5	Representação do modelo lifting-line	25
6	Velocidades verticais induzidas pelos vórtices	27
7	Esquema de formação do vórtice de ponta de asa	27
8	Formação do arrasto induzido como consequência do <i>downwash</i>	28
9	Geometria do problema de um vórtice semi-infinito	29
10	Diagrama esquemático do FFMA	33
11	Tipos de formações em voo	37
12	Estrutura de uma <i>blockchain</i>	40
13	Grafo ilustrativo do esquema de certificação utilizado na simulação realizada . .	42
14	Esquema da trajetória fictícia de voo	43
15	Quantidade economizada pelo preço da moeda	45
16	Quantidade economizada pelas empresas simuladas	45
17	Quantidade FFC ao longo do tempo	46

LISTA DE TABELAS

1	Dados transmitidos pelo FFMA	34
2	Índices dos <i>status</i> de acoplamento	35
3	Dados transmitidos antes da consolidação da formação	35
4	Manobras de desacoplamento	38
5	Dados utilizados na simulação	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ICAO</i>	Organização da Aviação Civil Internacional
<i>TCAS</i>	Sistema Anticolisão de Tráfego
<i>FFMA</i>	Formation Flight Module Avionic
<i>FL</i>	Flight Level
<i>QC</i>	Quantidade de circulação
<i>FFC</i>	Formation Flight Coin
<i>POW</i>	Proof of Work
FC_c	Taxa de consumo de combustível em cruzeiro
Γ	Circulação
L	Sustentação
V_∞	Velocidade relativa ao ar
V_c	Velocidade de cruzeiro
W_i	Peso inicial
W_f	Peso final
t_i	Tempo inicial
t_f	Tempo final
Δt	Diferença entre tempo inicial e final
ρ	Densidade do ar
μ	Média
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Geração de sustentação em um aerofólio bidimensional	22
2.2	Geração de sustentação em uma asa tridimensional	23
2.2.1	Vórtice Ferradura	24
2.2.2	Lifting-Line	25
2.3	Vórtice de ponta de asa e voo em formação	26
2.4	Tecnologias do voo em formação	29
2.5	<i>Ledgers</i> Distribuídos e Descentralizados	31
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	Infraestrutura base	32
3.2	Homologação do voo em formação em aeronaves civis	35
3.2.1	Homologação de Aeronaves	36
3.2.2	Diretrizes de voo	37
3.3	Plataforma para voo em formação entre diferentes companhias	39
4	SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO	42
4.1	Parâmetros da simulação	42
4.2	Resultados da simulação	44
4.3	Discussão	46
5	CONCLUSÃO	48

1 INTRODUÇÃO

O assunto de voo em formação, na indústria aeronáutica, vem sendo estudada há tempos, e tem sua base no voo em formação de pássaros, de modo a viabilizar a economia de energia em longas trajetórias, permitindo um maior alcance do grupo em relação ao ponto de partida. Essa tecnologia vem sendo empregada na área militar há tempos, porém, de maneira dissonante da aplicada na área civil, a fomentação para voo em formação para a classe comercial de aeronaves é recente, e ainda se encontra em desenvolvimento.

Com o intuito de entender como o voo em formação aplica-se na área civil, elaborou-se esse linha de pesquisa. Além disso, planeja-se também, construir-se, a partir das pesquisas já feitas, uma possível trajetória para que o voo em formação possa se tornar uma realidade e viabilize uma maior possibilidade de lucro.

A fim de se cumprir o papel designado neste trabalho, estudou-se as pesquisas da área, e foram levantados dois principais pontos de enfoque à serem cumpridos para que este tipo de voo possa ser viabilizado em escala comercial. O primeiro ponto se refere à homologação de aeronaves deste tipo de voo, sendo esses requisitos essenciais para que possa existir um voo eficiente e com segurança para a tecnologia em questão. O segundo ponto se refere a elaboração de um sistema, ou plataforma, aos quais, operadores aeronáuticos possam realizar voos em formações com benefícios mensuráveis entre si, e intercambiáveis em formato de uma 'moeda' virtual.

Assim sendo, este trabalho viabiliza um possível panorama, para que o ecossistema aeronáutico possa fabricar aeronaves elegíveis a voo em formação civil, e para que operadores aeronáuticos possam realizar esse tipo de voo com diversas classes de aeronaves sem serem prejudicados, através da utilização da plataforma desenvolvida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O voo em formação, é um assunto que acompanha a humanidade desde tempos antigos, e as questões a cerca desse assunto surgiram de forma similar ao voo propriamente dito, ou seja, através da observação do voo de pássaros. Juntamente com a dúvida por trás dos mecanismos de voo das aves, surgiu-se a dúvida do porque aves, geralmente migratórias, realizavam voo em um formato de "V".

A fim de responder-se a ultima pergunta, diversos cientistas realizaram observações desses animais, causando o surgimento de diversas linhas de pesquisa, assim como as presentes nos artigos [Lissaman e Shollenberger 1970] e [Weimerskirch et al. 2001]. Em termos gerais, entendeu-se que o motivo por trás da formação encontrada no voo de aves, deve-se pelo amento do alcance do grupo como um todo. Observou-se que um grupo composto por 25 aves, poderia ter um aumento de alcance de até 70%, concluindo-se assim, que esse fenômeno proporciona uma grande economia de energia para as aves envolvidas.

Na área aeronáutica, este fenômeno também pode ser observado e utilizado de modo benéficial, assim como já abordado pelos objetivos apresentados na seção 1. Assim, afim de abordar as atuais linhas de pesquisa em relação ao voo em formação, e a explicação do mesmo através do fenômeno do voo, foi estabelecida esta seção do trabalho, divida em algumas sub-seções, com o intuito da fundamentação das diferentes frontes abordadas neste documento.

2.1 Geração de sustentação em um aerofólio bidimensional

A fim de explicar-se o fenômeno do voo em formação das aves, e aplica-lo em aeronaves, devemos antes entender os processos fundamentais por trás deste, ou seja, deve-se ter a compreensão de todo o processo de voo, desde a geração de sustentação em um aerofólio bidimensional à formação dos vórtices de ponta de asa em uma asa tridimensional. Assim, iniciou-se esta abordagem através da explicação da geração de sustentação em um aerofólio bidimensional, abordado nesta seção.

Um aerofólio, ao atravessar um fluído com a imposição de uma certa velocidade v , e um certo angulo de ataque α , gera uma força para cima chamada de sustentação, ou *Lift*. Para explicarmos a ocorrência desse fenômeno, inciaremos por modelar o mesmo através da imposição de um escoamento potencial no aerofólio de modo a respeitar certas condições, abordadas mais abaixo.

Ao realizar a modelagem do aerofólio com o escoamento potencial, veremos que há o acúmulo de dois pontos de estagnação no aerofólio, posicionados respectivamente no bordo de ataque, e pouco acima do bordo de fuga, figura 1, resultando na geração de uma sustentação nula.

Figura 1: Representação dos pontos de estagnação em um escoamento potencial de um aerofólio



Fonte: Wikipédia ¹, 2022.

Contudo, ao observarmos o comportamento real de um aerofólio pode-se perceber que no mesmo, ao acelerar o mesmo através do fluido, há a formação de um vórtice adjacente ao bordo de fuga, que, com o tempo, desloca-se até ficar posicionado exatamente no bordo de fuga. A este vórtice damos o nome do vórtice de partida. Com a formação do vórtice de partida, observa-se que ambos os pontos de estagnação são movidos, figura 2. Fazendo, assim, com que o aerofólio respeite uma condição chamada de condição de *Kutta* [Crighton 1985].

Figura 2: Representação dos pontos de estagnação em um escoamento potencial de um aerofólio com a aplicação da condição de *Kutta*



Fonte: Wikipédia ², 2022.

A razão por trás da migração dos pontos de estagnação, deve-se a formação de uma circulação no aerofólio, em resposta ao vórtice de partida formado. Esta circulação tem um papel essencial, pois, através dela, e da utilização do teorema de *Kutta-Joukowski* [Anderson], podemos estimar a sustentação por unidade de envergadura em um aerofólio através da equação 1.

$$L' = \rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma \quad (1)$$

$$\Gamma = \oint_C V \cdot ds = \oint_C V \cos(\theta) ds \quad (2)$$

2.2 Geração de sustentação em uma asa tridimensional

Uma asa, contudo, não é bi-dimensiona. E, assim sendo, deve-se expandir as observações e explicações da seção anterior para o espaço tridimensional. Há, contudo, várias semelhanças

¹https://images.slideplayer.com/19/5916316/slides/slide_46.jpg

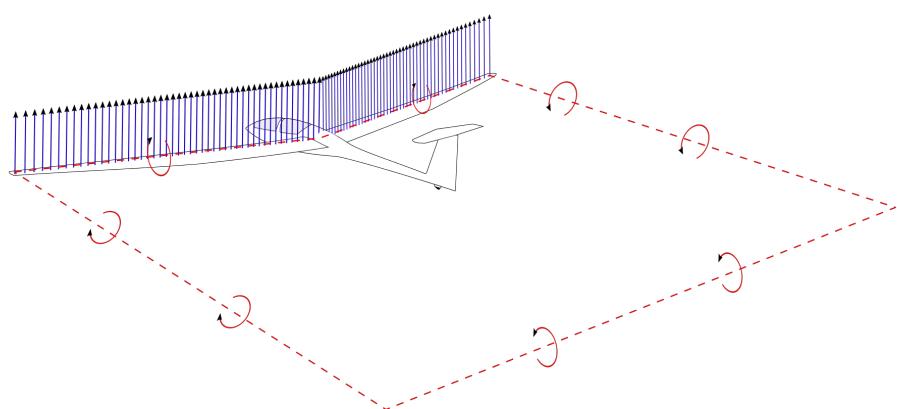
²https://images.slideplayer.com/19/5916316/slides/slide_46.jpg

entre uma asa e um aerofólio no que tange a questão do princípio de geração de sustentação. Assim, para a estimativa de sustentação em uma asa, diversas metodologias sugeriram a partir da observação do caso bidimensional, ao qual abordaremos aqui, duas delas.

2.2.1 Vórtice Ferradura

Uma asa, pode ser modelada através da geração de uma circulação constante ao redor de toda a envergadura da mesma. E, através da atribuição desta, pode-se utilizar o teorema de *Helmholtz* [Helmholtz 1858] de forma a obter o modelo do vórtice ferradura ao redor de uma asa, sendo esse ilustrado na figura 3.

Figura 3: Representação do modelo vórtice ferradura



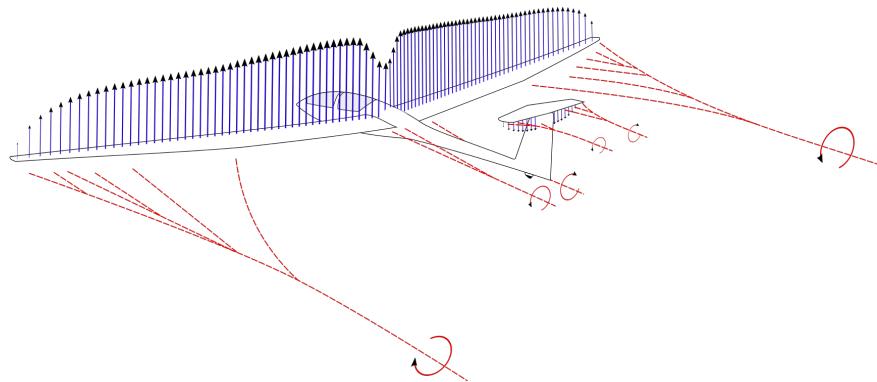
Fonte: Wikipédia³, 2022.

Esse modelo é obtido ao considerarmos, além da circulação única e constante, que a força de um filamento de vórtice é constante ao entorno de toda sua extensão; que um vórtice não pode terminar em um fluído, sendo necessário sua extensão ao infinito, ou, a formação de um circuito fechado, como o abordado no modelo; e, que na absência de forças rotativas externas, fluidos inicialmente irrotacionais, permanecem irrotacionais.

A modelagem de acordo com o vórtice ferradura é o incio de uma abordagem mais completa, mas este modelo por si é ingênuo, pois ao observamos a distribuição de vorticidade em uma asa real, figura 4, vemos que o mesmo é incompatível. Para isso, uma melhor aproximação pode ser realizada ao considerarmos o modelo conhecido como *Lifting-Line*.

³[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aircraft_wing_lift_distribution_showing_trailing_vortices_\(1\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aircraft_wing_lift_distribution_showing_trailing_vortices_(1).svg)

Figura 4: Representação do modelo de um vórtice realístico

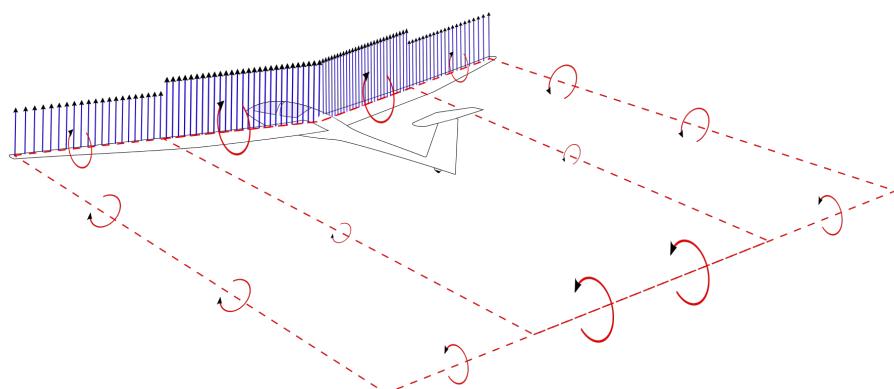


Fonte: Wikipédia⁴, 2022.

2.2.2 *Lifting-Line*

O modelo conhecido como *Lifting-line theory* [Rasmussen e Smith 1999], foi desenvolvido por *Frederick W. Lanchester* e *Ludwig Prandtl*, e surgiu como uma tentativa de correção do modelo de vórtice ferradura apresentado anteriormente. Neste, ao invés de uma circulação constante em toda a extensão da asa, a mesma é dividida em espaços discretos, de forma a termos inúmeras circulações ao decorrer da envergadura, assim como o representado na figura 5.

Figura 5: Representação do modelo lifting-line



Fonte: Wikipédia⁵, 2022.

Para este modelo, cada divisão contendo uma circulação, tem uma influência na circulação de suas vizinhas. Assim, nos possibilitando o cálculo da sustentação de acordo com a equação 3. E do coeficiente de sustentação, de acordo com a equação 4

⁴[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aircraft_wing_lift_distribution_showing_trailing_vortices_\(2\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aircraft_wing_lift_distribution_showing_trailing_vortices_(2).svg)

⁵[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aircraft_wing_lift_distribution_showing_trailing_vortices_\(3\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aircraft_wing_lift_distribution_showing_trailing_vortices_(3).svg)

$$L = \rho V_\infty \int_{-s}^s \Gamma(y) dy \quad (3)$$

$$C_L = \pi A R A_1 \quad (4)$$

Onde A_1 é o primeiro termo da solução das equações simultâneas geradas pela equação 5.

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta) \left(\sin(\theta) + \frac{n C_l \alpha c}{8s} \right) = \frac{C_l \alpha c}{8s} \sin(\theta) (\alpha_\infty + \alpha_{geo} - \alpha_0) \quad (5)$$

Através desse modelo, também podemos estimar o arrasto induzido de uma asa através da equação 6.

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi A Re} \quad (6)$$

Onde o fator de eficiência da asa é dado pela equação 7.

$$e = \frac{1}{1 + \delta} \quad (7)$$

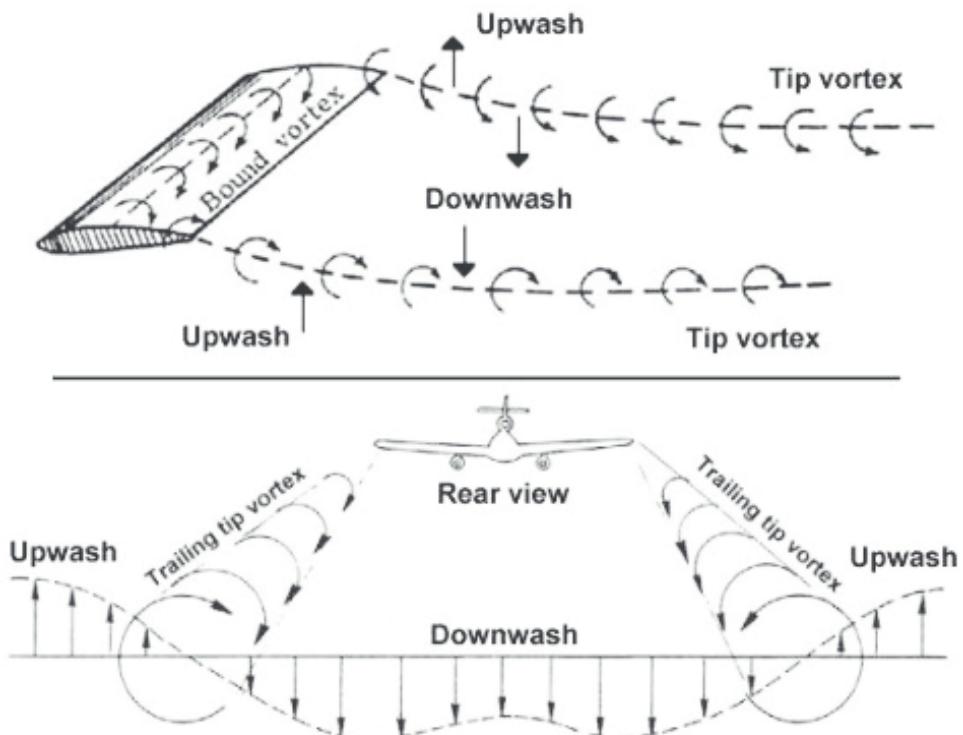
E, onde δ é estimado através dos termos da solução das equações simultâneas.

$$\delta = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} n A_n^2}{A_1^2} \quad (8)$$

2.3 Vórtice de ponta de asa e voo em formação

O ultimo ponto a entender-se para que possamos entender o voo em formação, são os vórtices de ponta de asa. Esses vórtices são observáveis, por exemplo, no momento em que uma aeronave realiza voo através de nuvens, nas quais é observável a formação de dois pares de vórtices contra-rotativos, que geram um *downwash* no espaço entre os vórtices, e um *upwash* no espaços exteriores adjacentes aos vórtices, assim como mostrado na figura 6.

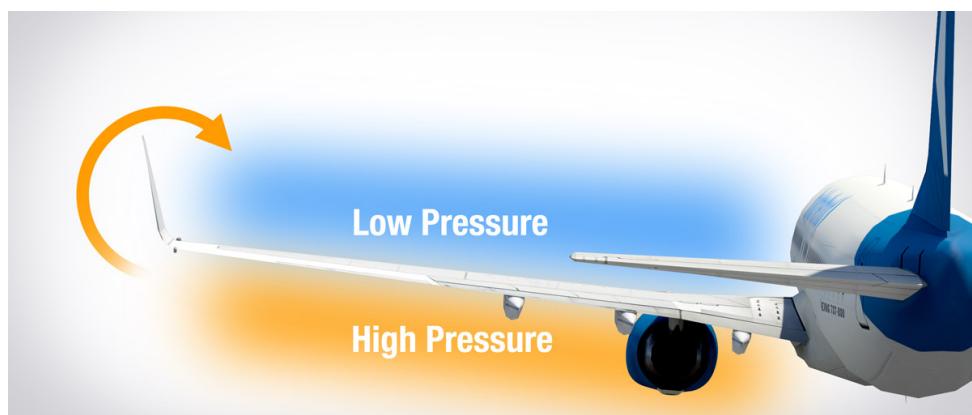
Figura 6: Velocidades verticais induzidas pelos vórtices



Fonte: Encontrado via Google Images⁶, 2022.

A formação desses vórtices podem ser explicada ao observarmos que, nas pontas das asas, há a mistura da área de alta pressão, localizada no intra-dorso, com a área de baixa pressão, localizada no extra-dorso, fazendo com que haja um fluxo rotativo na ponta, de baixo para cima, assim como o ilustrado na figura 7; podendo ser modelado de acordo com as circulações presentes na figura 4.

Figura 7: Esquema de formação do vórtice de ponta de asa



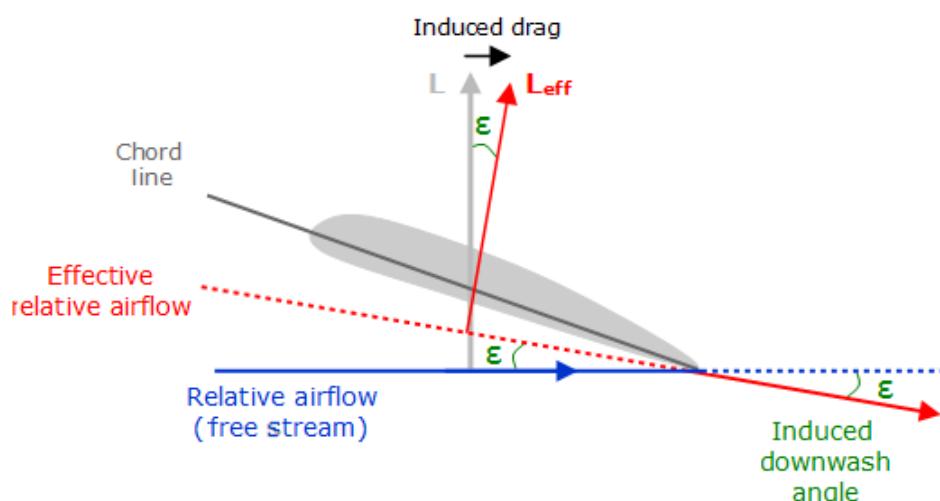
Fonte: Encontrado via Google Images⁷, 2022.

⁶<https://history.nasa.gov/SP-367/fig53.jpg>

⁷<https://cdn.boldmethod.com/images/learn-to-fly/aerodynamics/winglets-and-wingtip-vortices/1-vortex.jpg>

Os vórtices de ponta de asa são um fenômeno indesejável em toda a indústria aeronáutica, pois os mesmos encontram-se relacionados ao arrasto induzido da aeronave. Por ter a característica de geração de uma zona de *downwash*, estes vórtices acabam por induzir um ângulo efetivo menor na asa da aeronave, do que o ângulo α que esta voa, fazendo com que haja uma diminuição no valor da sustentação total, e a adição de uma componente de arrasto, assim como ilustrado na figura 8. Esta componente é indesejável, pois quando comparado à uma aeronave voando na condição ideal, na qual a componente extra não se encontra presente, a aeronave com *downwash*, tem um aumento na potência requerida para se manter em uma mesma condição, aumentando assim o consumo de combustível da mesma.

Figura 8: Formação do arrasto induzido como consequência do *downwash*



Fonte: Wikipédia⁸, 2022.

A fim de reduzir-se a formação desses vórtices, e, por consequência, o módulo do arrasto induzido e o consumo de combustível, foram criados os dispositivos de ponta de asa como *endplates* e *winglets*, que possuem a função de retardar o fluxo da zona de alta pressão para a zona de baixa pressão, criando assim, um maior alongamento efetivo da asa, que, ao olharmos para a equação 6, diminui o arrasto induzido da aeronave.

Além da utilização dos dispositivos de ponta de asa, podemos porém, reduzir o consumo de combustível de uma aeronave via redução do arrasto induzido ao utilizar-se mais de uma aeronave, imitando o fenômeno observado nas aves migratórias. É possível que uma aeronave utilize o vórtice de ponta de asa de uma outra aeronave, fazendo aproveitamento da zona de *upwash* deixada, para reduzir o arrasto induzido por meio da redução do ângulo de *downwash*, e, consequentemente, o ângulo de ataque da aeronave para se manter na mesma condição.

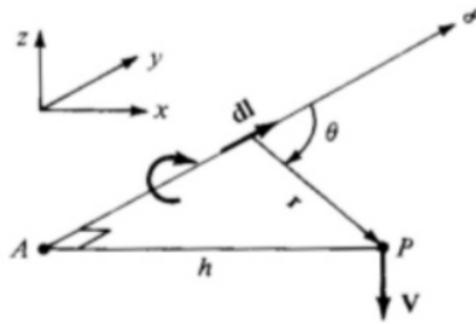
Esse tipo de voo pode ser descrito, por exemplo, ao considerarmos uma linha de vórtice em um escoamento inviscídeo e incompressível, e aplicarmos a lei de *Biot-Savart*, equação 9, para um ponto na região de *upwash*.

⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Lift-induced_drag#/media/File:Induce_drag_downwash.png

$$dV = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{dl \times r}{|r^3|} \quad (9)$$

Considerando um filamento semi-infinito originando em um ponto A localizado na ponta da asa, temos a geometria descrita pela figura 9.

Figura 9: Geometria do problema de um vórtice semi-infinito



Fonte: Google Images, 2021.

Para qual, ao aplicarmos a lei de *Biot-Savart*, podemos calcular a velocidade induzida pela vorticidade Γ , em um ponto P qualquer.

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi h} \quad (10)$$

Assim, podemos realizar o cômputo de *upwash* para qualquer ponto da asa de uma aeronave que voe atrás de outra, pela superposição das velocidades impostados por todos os vórtices do modelo adotado em um ponto P.

A partir do cálculo da velocidade de *upwash*, pode-se também calcular o ângulo de *upwash* gerado pela composição da velocidade de *upwash* com o fluxo relativo à asa, e, a partir desse, a redução do arrasto induzido que uma aeronave voando em voo em formação poderá desfrutar.

2.4 Tecnologias do voo em formação

Com a revisão dos princípios que regem o fenômeno do voo em formação, passa-se então agora, a uma revisão bibliográfica a respeito das tecnologias que permitem a realização desse tipo de voo em aeronaves civis.

Ao observarmos as diversas linhas de pesquisas que tentam simular os potenciais ganhos devido ao voo em formação, assim como a disponível em [Xu et al. 2014], encontramos diversos dados a respeito dos potenciais benefício da economia de combustível e sobre os benefícios financeiros para empresas por meio da utilização desse tipo de voo. Segundo os pesquisadores, com base em resultados obtidos através de simulações de missões de domínio contínuo e de uma integração que selecionava a melhor combinação de missões para voo em formação, seria

⁸https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS2T9sEWojFzkBDMMOqheVCq-OIbA_Zer4lKi6gk5is8lWN91DQAKu46fsPP6dVcBoJCQ&usqp=CAU

possível uma economia de combustível de 5.8% de combustível queimado durante todo o de-correr de uma missão, ou, 2.0% no custo total de operação para missões realizadas dentro de continentes. Os autores também citam que, dado uma missão internacional, a economia sobe para 7.7% em termos de combustível, ou 2.6% em termos de custo operacional. Sendo assim, observa-se que há aqui uma oportunidade para empresas para um aumento de lucro, contudo, essas ainda não aplicam o voo em formação em suas missões, levantando a pergunta sobre o motivo da não aplicação para os tópicos de segurança dessas missões devido ao controle das aeronaves para manutenção desse tipo de estrutura em voo.

De caráter altamente regulado, e com vários artigos referentes à design de sistemas de controladores para aplicações na indústria, a realização de controle do voo em aeronaves através de sistemas embarcados, também é um velho tópico no meio da indústria aeronáutica. Contudo, a realização desse controle, em referência a um grupo de aeronaves, é um assunto menos pre-sente no contexto acadêmico desta área. Presente em [Proud, Pachter e D’Azzo 1999], vemos o desenvolvimento de uma das diversas linhas de pesquisa que respondem a pergunta sobre a realização do controle da estrutura do voo em formação levantada no parágrafo anterior. Através do artigo, os autores demonstram que é possível o desenvolvimento de um sistema de controle para o voo em formação fechada, considerando os efeitos de acoplamento cinemático e de vórtice da aeronave '*leading*' nas aeronaves '*wingman*'. Pelo utilização de um sistema de con-trole para voo em formação em larga escala, e ajuste de alguns parâmetros, os autores atingiram um voo em formação fechado com uma tolerância de 10% em relação aos erros para a posição *y* e *z* da aeronave, e erros de velocidade de +/- 50 ft/s e erros de altitude de +/- 400ft.

Ainda no tópico de controle de voo em formação, há um problema não abordado no trabalho apresentado em [Proud, Pachter e D’Azzo 1999] que, caso desejássemos aplicar o conceito de voo em formação para a classe de aeronaves civis, é de extrema importância. Esse problema diz respeito a segurança do sistema como um todo, sendo ele a manutenção da estrutura do esquadrão em caso de falha de um nó por falha de comunicação ou de outros possíveis causa-dores. Essa pergunta encontra-se respondida no artigo [Giulietti, Pollini e Innocenti 2000], nos quais os autores instigam o desenvolvimento de um sistema de controle, considerando a trans-ferência de dados entre os nós de uma estrutura, que possa atuar também para os casos de falhas supracitadas. Através de uma abordagem descentralizada com a utilização de um algorítimo de Dijkstra, os autores conseguiram desenvolver um sistema no qual o algorítimo providencia um caminho sequencial ótimo de informação para o caso nominal, bem como, redundâncias em caso de falha de transmissão de dados.

Por último, abordou-se o artigo [Hartjes, Hubar e Visser 2019], no qual é observada a criação de uma ferramenta de otimização de trajetórias que pode ser utilizado por várias empresas a fim de, a partir de uma escala, conseguir-se maximizar os benefícios desse tipo de voo.

2.5 *Ledgers Distribuídos e Descentralizados*

É também do intuito deste trabalho, a proposição de um modelo do qual se faça possível os registros mensuráveis da economia de combustível gerada de uma empresa com relação a outra em formato de transação com uma moeda virtual. Precisaremos que essa transação possa ser feita de maneira descentralizada, imutável e confiável.

Uma questão similar, no contexto de transações monetárias puras, também foi proposto e respondido por [Nakamoto 2008]. Em seu trabalho, Satoshi propõe a criação de uma entidade chamada *blockchain*, que permitiria transações imutáveis, descentralizadas e sem fraude. Junto da *blockchain*, Satoshi também propôs uma moeda virtual para que essas realizações fossem feitas, originando a moeda *Bitcoin*.

Este trabalho não se interessa diretamente pela moeda criada por Satoshi, mas pelo trabalho realizado com a criação da *blockchain*, e pelas linhas de pesquisa decorrente das mesmas, como a disponível em resumo em [Christidis e Devetsikiotis 2016]. Nessa linha de pesquisa, há a abstração da moeda e da *blockchain* como um *smart contract*, o qual é um contrato autoexecutável, que não pode ser perdido, nem adulterado. Assim sendo possível o transacionamento de qualquer entidade 'virtual' por contratos via uma *blockchain*.

3 DESENVOLVIMENTO

Após a revisão bibliográfica, é notável que o voo em formação em aeronaves da categoria civil, é possível, e traria benefícios, tanto a empresas, quanto ao mundo aeronáutico. Contudo, mesmo com o desenvolvimento da tecnologia que possibilitaria este tipo de voo, esse ainda não se encontra em aplicação no mundo empresarial da aeronáutica civil.

Foram identificados dois grandes motivadores, que ainda não tiveram linhas de pesquisa contribuintes, que impossibilitam o avanço desse tipo de voo em direção a aplicação concreta. Esses foram a barreira da homologação, detalhada na seção 3.2, e a barreira econômica entre duas empresas que desejam realizar esse tipo de voo, detalhado na seção 3.3. Dividiu-se então, este trabalho em três grandes pontos que abordam os motivadores identificados.

O primeiro ponto refere-se ao estabelecimento da infraestrutura básica necessária para que voos em formação entre aeronaves do setor comercial possam ser realizado e regulamentados através de normas.

O segundo ponto refere-se à todo o processo que uma aeronave deveria ser submetida, para que o voo em formação possa ser realizado com outra determinada aeronave, de maneira a reduzir ao máximo os riscos de acidentes; e, o processo regulamentário de implantação do voo em formação em si no mundo aeronáutico.

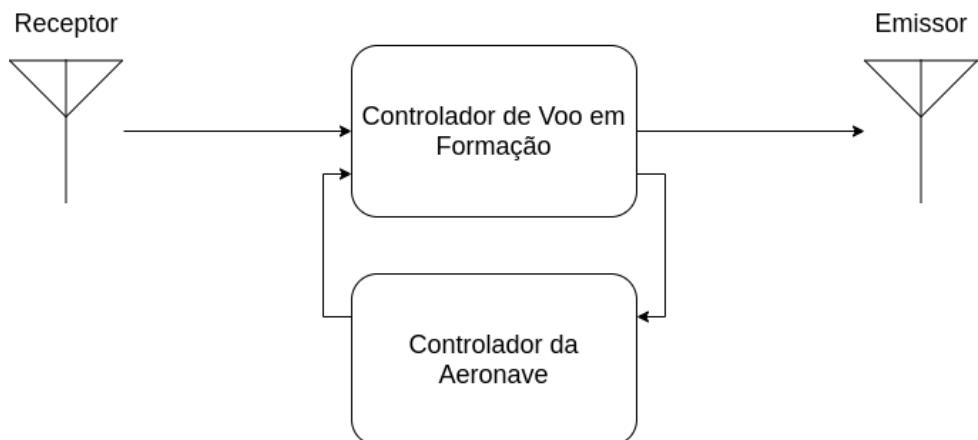
O terceiro ponto refere-se à resposta para a pergunta de como duas empresas, com tipos diferentes de aeronaves cada uma, poderiam voar em formação de maneira justa, com os benefícios mútuos, neste caso a economia de combustível, mensurados de maneira objetiva e concreta.

3.1 Infraestrutura base

A fim de estabelecermos uma comunicação em comum para todas a aeronaves que desejam realizar o voo em formação, fora proposta a criação de uma tecnologia a qual denominaremos de *FFMA* (Formation Flight Module Avionic).

Essa tecnologia deverá ser composta de um emissor de rádio, um receptor de rádio, ambos com um alcance de no mínimo 10km e um módulo de controlador em voo acoplável, segundo o esquema da figura 10. A comunicação deverá ser estabelecida em um intervalo de frequência pre-determinado pelo *ICAO* e deverá ser do tipo pergunta-resposta, sendo a pergunta, a transmissão de dados, e a resposta, a confirmação de recebimento.

Figura 10: Diagrama esquemático do FFMA



Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Estipularemos um controlador básico que deverá ocupar o módulo de controlador de voo em formação, como sendo o desenvolvido em [Giulietti, Pollini e Innocenti 2000]. Contudo, esse poderá ser modificado, mediante a análise da autoridade certificadora, e substituído por outro caso apresente uma melhor controlabilidade ou desempenho à aeronave. Esse controlador deverá ser responsável por pegar os dados de entrada e transformá-los em comandos de voo para aeronave utilizando este sistema, a fim da manutenção da formação em voo.

As aeronaves deverão transmitir entre si os dados presentes e descritos na tabela 1, e armazená-los com seus respectivos *timestamps*.

Tabela 1: Dados transmitidos pelo FFMA

Dado	Descrição
Dados Posicionais	Dados que descrevem o vetor de posição da aeronave, utilizado pelo controlador modular, deverá ter o referencial global.
Dados de Velocidade	Dados que descrevem o vetor de velocidade da aeronave, utilizado pelo controlador modular, deverá ter o referencial em solo.
Dados de Atitude	Dados que descrevem o vetor de atitude da aeronave, utilizado pelo controlador modular, deverá ter o referencial global.
Identificador da posição no esquadrão	Número da posição que aeronave ocupa na estrutura da formação, utilizado pelo controlador modular e para prevenir falhas.
Identificador do ID do esquadrão	Número único do esquadrão em voo, utilizado para prevenção de falhas e interferências.
Status	Status em relação ao acoplamento da aeronave ao esquadrão, esse poderá ter os valores de índice disponíveis na tabela 2.

Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Os dados referentes à posição da aeronave no espaço, a velocidade da aeronave, e a atitude da aeronave, deverão conter um vetor tridimensional com as medidas em cada dimensão dos mesmos.

Abaixo também encontra-se a tabela 2, referente aos *status* que uma aeronave pode assumir em condições normais, em relação ao esquadrão.

Tabela 2: Índices dos *status* de acoplamento

Índice	Significado
1	A aeronave encontra-se desacoplada da formação
2	A aeronave encontra-se acoplada na formação
3	A aeronave encontra-se em acoplamento à formação
4	A aeronave encontra-se em desacoplamento da formação

Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Também, estabeleceremos a transferência prévia de alguns dados entre as aeronaves. Esses dados terão o objetivo de identificar a posição de voo pretendida na formação, e informar o intervalo de distância de voo pretendido entre as aeronaves, segundo a tabela 3. Esses dados servirão para orientar o controlador de formação a respeito do objetivo de voo.

Tabela 3: Dados transmitidos antes da consolidação da formação

Variável	Descrição
Posição pretendida	Posição de voo pretendida na formação
Tipo de formação	Tipo de formação pretendida
Distância Máxima	Distância máxima em metros em que a aeronave <i>wingman</i> é certificada à voar.
Distância Mínima	Distância mínima em metros em que a aeronave <i>wingman</i> é certificada à voar.

Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Para a variável de identificados da posição no esquadrão, utilizaremos o padrão estabelecido na seção 3.2.2. Sendo estabelecido algumas diretrizes em 3.2 para casos conflitantes.

Para a variável de identificador do esquadrão, esta é necessária como uma contra medida no caso de recepção de sinais aos quais não fazem parte do esquadrão de voo em questão, sendo possível ignorá-los, além da filtragem de frequência, eletronicamente.

3.2 Homologação do voo em formação em aeronaves civis

Ao longo da história da aeronáutica, houveram diversos acidentes causados pelo cruzamento de uma aeronave através do vórtice residual de outra aeronave. Esses acidentes, seja pela falta de controlabilidade, ou por fenômenos aeroelásticos que causam a falha estrutural, resultaram na realização de alguns estudos, como o presente em [Gerz, Holzapfel e Darracq 2002], e a proposição de normas em [U.S. 2014] para evitar a interação entre uma aeronave e o vórtice residual de outra.

Estabeleceremos então, algumas diretrizes base às quais levariam ao desenvolvimento de uma norma oficial a fim de possibilitar a realização do voo em formação pela utilização desses mesmos vórtices de maneira segura.

3.2.1 Homologação de Aeronaves

Apresentaremos algumas diretrizes para elaboração de requisitos que contemplem aeronaves que desejam certificar-se na posição de *leading* ou na posição de *wingman* no voo em formação.

O certificado emitido deverá ser um certificado de tipo, emitido pelo fabricante da aeronave.

Posição leading

Para que uma aeronave seja certificável na posição de *leading*, estabeleceremos que essa deverá conter em seu sistema embarcado, um sistema de *FFMA*, de modo a que essa possa receber ordens de comando de controlabilidade, bem como transmitir e receber dados referentes ao esquadrão.

Estabeleceremos também que a aeronave deverá ter seu sistema de colisão, como por exemplo o *TCAS*, de modo que o mesmo derogue a responsabilidade de colisão com aeronaves da mesma formação, para o sistema de *FFMA*.

Por último, a aeronave deve ser capaz de reagir seguindo as diretrizes de voo estabelecidas para o voo em formação. Neste caso, utilizaremos as estabelecidas na seção 3.2.2.

Posição wingman

Para que uma aeronave seja certificável na posição de *wingman*, ela deverá primeiro cumprir os requisitos listados para a posição *leading*. Ela também emitirá um certificado informando quais aeronaves ela poderá voar acoplada, na posição de *wingman*, e, o respectivo intervalo de distância de voo entre a aeronave *leading* e a aeronave *wingman*, cumprindo os pontos listados abaixo para todas as fases de acoplamento de voo em formação informadas na seção 3.1, tabela 2.

- Deverá demonstrar a controlabilidade da aeronave e que esta não entrará em condições de voo adversas para o intervalo de distância de voo pretendida.
- Deverá demonstrar que a aeronave tem a capacidade de se manter dentro do intervalo de distância de voo pretendida.
- Deverá demonstrar que a aeronave manterá sua integridade estrutural sobre os efeitos aeroelásticos do vórtice de ponta emitido pela aeronave *leading* em questão.

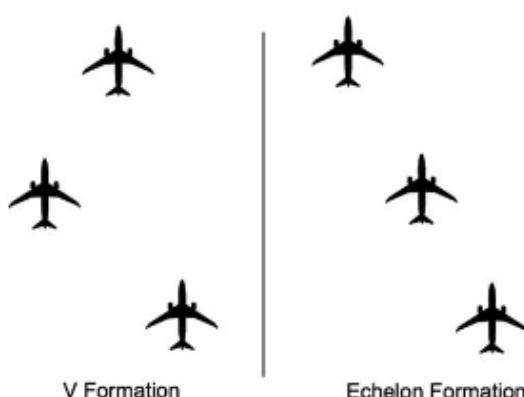
3.2.2 Diretrizes de voo

Estabeleceremos aqui algumas diretrizes em relação ao voo em formação, a fim da elaboração de uma norma futura, abordando cada fase do voo em formação.

Sugerimos a implantação do voo em formação onde a aeronave *wingman* esteja atrelada somente a uma aeronave *leading*. Sendo também sugerida a implantação gradual com normalizações a respeito das possíveis formações a serem adotadas.

Neste trabalho, abordaremos as formações em *echelon*, para duas aeronaves, e a formação em V, para três aeronaves, disponíveis na figura 11.

Figura 11: Tipos de formações em voo



Fonte: Encontrada via google images⁹, 2021.

Referente a figura, para a aeronave mais dianteira, adotaremos a posição de número 1, para a intermediária, a posição número 2 e para a mais traseira, a posição de número 3.

Formação de um esquadrão

Para que ocorra o voo em formação, e a constituição de um esquadrão, esse, deve ter sua rota calculada pelos operadores de voo das aeronaves pretendidas de maneira à que o esquadrão realize um voo retilíneo em um FL pre-estabelecido. Evitando-se ao máximo manobras verticais ou curvas.

Fase de acoplamento

Para que uma aeronave adentre uma formação, essa deverá ter sua trajetória previamente calculada a fim de que, com o esquadrão, realize um voo retilíneo até o ponto de desengajamento.

⁹https://images.slideplayer.com/19/5916316/slides/slide_46.jpg

Previamente ao adentramento à formação, a uma distância segura, a aeronave pretendente envia seus dados à formação conforme a tabela 3. Esses, são então checados com os dados presentes nas outras aeronaves, e, então, caso aprovado, a aeronave fará uma manobra de acoplamento orientada pelo controlador do FFMA. Caso seja negada, ela realizará o desacoplamento da formação.

Durante o acoplamento, a aeronave passará para o *status* de 'em acoplamento' e depois, para o *status* de 'acoplada'.

Fase de desacoplamento

Para que ocorra o desacoplamento seguro, iremos estabelecer manobras a serem seguidas pelas aeronaves em suas respectivas posições. Essas manobras se encontram na tabela 4, com a especificação de para quais FL as aeronaves deverão migrar, em caso de falha em alguma posição.

Tabela 4: Manobras de desacoplamento

Posição	Condição Normal	Falha em 1	Falha em 2	Falha em 3
1	Mesmo FL	FL inferior	Mesmo FL	Mesmo FL
2	FL inferior	FL superior	FL inferior	Mesmo FL
3	FL superior	Mesmo FL	FL superior	FL inferior

Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

A tabela 4 é utilizável para ambas as formações abordadas, e exclusivamente para o caso de falha em 3, é aceitável a transição da formação em V para a formação *Echelon* com o desacoplamento da aeronave 3. Para o restante dos casos, toda a formação deverá também atualizar o *status* para 'em desacoplamento', e, após o desacoplamento, para 'desacoplado'.

Falha em transmissão de dados

Através do mecanismo de pergunta-resposta estabelecido pelo FFMA, é possível determinar-se qual aeronave perdeu contato com as demais caso ela:

- Não obtenha uma pergunta de outra aeronave dado o determinado intervalo de transmissão do FFMA
- Não obtenha uma resposta de outra aeronave dado o determinado intervalo de transmissão do FFMA

Para este caso, a aeronave na qual fora identificada a falha de comunicação, passará para o *status* de 'em fase de desacoplamento', e a formação realizará o movimento de desacoplamento.

Condições adversas

Caso as aeronaves ultrapassem os limites de distância preestabelecidos, ou, caso alguma entre em uma condição adversa de voo, a aeronave na qual fora identificada a condição, passará para o *status* de 'em fase de desacoplamento', e a formação realizará o movimento de desacoplamento.

3.3 Plataforma para voo em formação entre diferentes companhias

Neste trabalho, também identificamos a falta de um sistema na qual empresas pudessem voar em formação de maneira a ter registrados os benefícios desse tipo de voo.

Supondo que duas empresas, A e B, com duas aeronaves cada uma, A1, A2 e B1 e B2; e, que a aeronaves com o sufixo 1 são aeronaves de médio porte, e as de sufixo 2, de grande porte. Supondo também que a empresa A, tem a aeronave A1 certificada para voar na posição de *wingman* com a aeronave B1, e, a aeronave B2 tem a certificação para voar em *wingman* a A2, e que todas as aeronaves podem voar na posição de *leading*. Iremos responder como a empresa A e a empresa B podem voar em formação de forma a que ambas desfrutem de uma mesma quantidade percebida de benefícios.

Será coberto também, o caso da inserção de uma nova empresa C, que possua aeronaves C1 e C2, a qual as aeronaves A1, B1 e B2, A2 são certificadas para voar na posição de *wingman* respectivamente. Nota-se que neste caso, a empresa C, possui somente aeronaves que possam voar na posição de *leading*.

Mensurando Benefícios

A fim de estimar a quantidade de benefício potencial que uma aeronave na posição de *leading* gera à uma aeronave na posição *wingman*, necessitamos de um estimador que considere o tempo em que as aeronaves realizam voam na condição acoplada, e considere também a intensidade do vórtice gerado pela aeronave na posição de *leading*.

Através da revisão bibliográfica da seção 2, observamos que os vórtices de ponta gerados são diretamente proporcionais à quantidade de sustentação gerada por uma aeronave, e, consequentemente, à quantidade de circulação de uma aeronave.

Temos, também, o tempo em que uma aeronave se encontra no *status* de 'acoplada' em formação com outra, registrado pelo sistema FFMA citado anteriormente.

Assim, com acesso aos dados necessários para o cálculo da circulação de uma aeronave em um determinado espaço de tempo, e, com o acesso ao tempo de duração do voo em formação, podemos criar uma variável, a qual denominaremos, *QC* ditada pela equação 11, em SI.

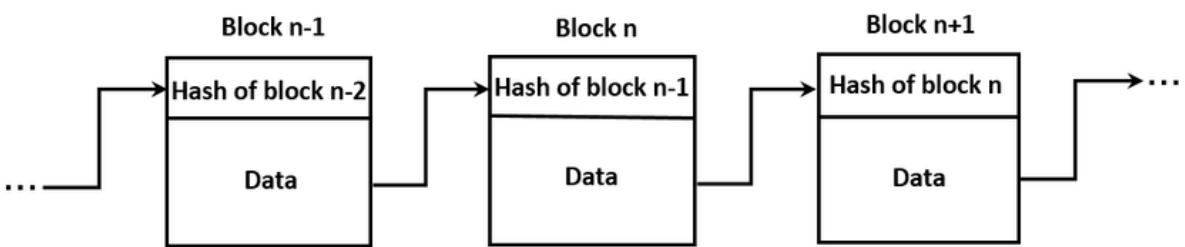
$$QC = \int_{t_i}^{t_f} \int_{-s}^s \Gamma(y, t) dy dt \quad (11)$$

Através da variável QC , podemos ter uma medida concreta da quantidade potencial de benefícios que uma aeronave gera à outra quando na posição de *leading*, considerando o porte da aeronave, a velocidade, e também o tempo de voo.

Criação de um registro de voo

Para a criação de um registro de voo em formato de transações invioláveis, utilizaremos o conceito de *blockchain*. Estabeleceremos uma *blockchain*, onde serão transacionados moedas chamadas FFC (*Formation Flight Coin*) entre dois participantes. A estrutura de *blockchain* a ser utilizada, encontra-se esquematizada na figura 12.

Figura 12: Estrutura de uma *blockchain*



Fonte: Encontrada via google images¹⁰, 2021.

Assim como observado na figura 12, é possível a inserção de dados no qual podemos manter os dados necessários para realizarmos uma transação entre parceiros. Como dados de uma transação, faremos registro da quantidade de FFC, que estão sendo transacionadas, e, também o tipo de transação que será realizada, sendo essa, identificada como uma transação de 'compra' ou uma transação de 'voo'.

A fim de garantirmos apenas a participação de entidades a para quais esse modelo de sistema é destinado, e, para evitar a entrada de participantes não relacionados ao mercado. Iremos delegar a entrada de participantes na *blockchain*, como uma *whitelist* que poderá ser regulada e alterada somente pelas autoridades aeronáuticas de cada país. Sendo assim, para que uma empresa possa adentrar ao contrato da *blockchain* como participante, essa deverá solicitar sua entrada a autoridade, e, caso aprovada, receberá seu acesso à *blockchain*.

No momento em que uma entidade ingressar no contrato como uma participante, essa, terá um saldo inicial de 50 FFC, necessário para a realização das primeiras transações, visto que, não será estipulado *holders* iniciais de moedas, nem um *cap* de mercado. Assim, para que ocorra a entrada de novas moedas nessa *blockchain*, é necessária a entrada de novos participantes no mercado, ou, a realização do processo de consolidação de uma transação descrita nos parágrafos abaixo.

¹⁰<https://bit.ly/3BYOjje>

Para que uma transação seja consolidada, devemos apresentar um *POW*, em formato da geração de uma *hash*, com características específicas, tal quais as descritas em [Nakamoto 2008]. Estabeleceremos aqui uma *hash* com tempo estimado de solução de 30 minutos, considerando o número de participantes que estão realizando o processo de *POW* para as transações.

A fim de incentivar a participação no processo de *POW* das transações, geraremos um valor de 0.05% em FFC, sobre o valor transacionado, como prêmio ao vencedor do *POW*. Esse valor de prêmio, assim como na moeda *Bitcoin*, será reduzido pela metade à cada 210,000 blocos.

Uma FFC poderá ser transacionado em duas condições; uma compra direta por outra empresa, sendo essa uma troca literal por dinheiro, ou algum outro acordo combinado entre as entidades. Ou, a realização de um voo em formação entre duas aeronaves de duas empresas diferentes.

Para o caso de transações realizadas através do voo de duas aeronaves, a empresa que voou na posição de *leading* irá realizar uma cobrança para a empresa que voou na posição de *wingman* de uma quantidade de FFC equivalente à $1.00e^{+08}$ *QC* por FFC. Esta, então, deverá realizar a transação na *blockchain*, relativa à um voo, com a quantidade de *QC* estabelecida. Após isso, a transação ficará pendente até que o *POW* seja calculado, e, após isso, estará completa e consolidada.

Como haverá poucos participantes realizando os cálculos de *POW*, há uma possível discussão a cerca da segurança em relação à fraude caso uma companhia realize um processo de falsificação dos blocos da *blockchain* através da utilização de *clusters*. Contudo, como os participantes da *blockchain* serão conhecidos, esses podem facilmente ser rastreados e putáveis por lei caso esse ocorra.

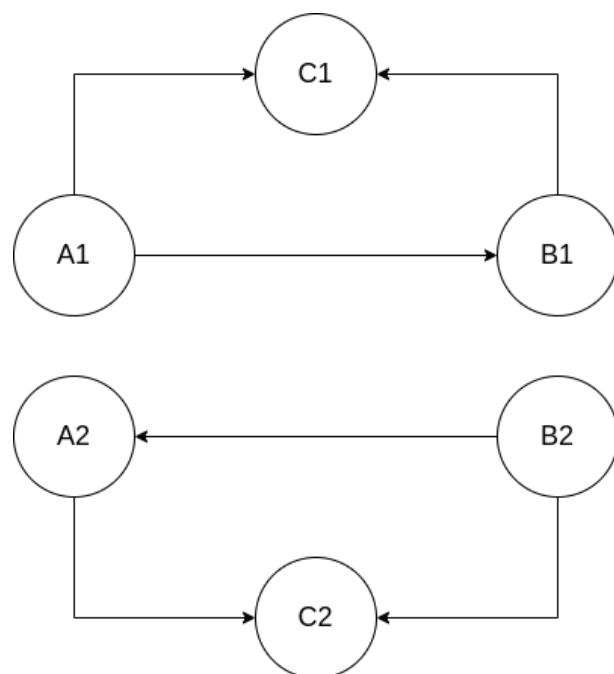
4 SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros da simulação

Realizaremos aqui uma simulação estatística simples utilizando o modelo proposto a fim de demonstrar o funcionamento do sistema quando aplicado à uma situação real. Vale a pena ressaltar, que a simulação tem caráter simplista apenas por razões demonstrativas da funcionalidade do modelo desenvolvido, visto que o intuito deste trabalho não é a simulação fiel de sistemas reais.

Para a realização desta simulação, consideraremos uma proposta similar a enunciada na seção 3.3. No qual teremos três empresas; A, B e C, que utilizaremos como prefixo dos nomes de aeronaves, que possuirão aeronaves formadas pela união do prefixo da empresa, junto de um número natural. Essas empresas terão suas aeronaves certificadas para voar em na posição de *wingman* com outra aeronave, como é mostrado no grafo da figura 13.

Figura 13: Grafo ilustrativo do esquema de certificação utilizado na simulação realizada



Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Como um exemplo, vemos pela figura 13, que a aeronave A1 é certificada para voar na posição de *wingman* com a aeronave B1 e C1.

Para estimar a circulação para uma determinada aeronave, utilizaremos a expressão em 12, como uma circulação média e constante no tempo. Temos também, os de dados de aeronaves fictícias que utilizaremos para a simulação, disponíveis na tabela 5. Para as simulações, fora

adotado um FL em que $\rho = 0.25 \text{ kg/m}^3$ em comum para todas as aeronaves.

$$\int_{-s}^s \Gamma(y) dy \approx \frac{L}{\rho V_\infty} \approx \frac{W}{\rho V_\infty} \quad (12)$$

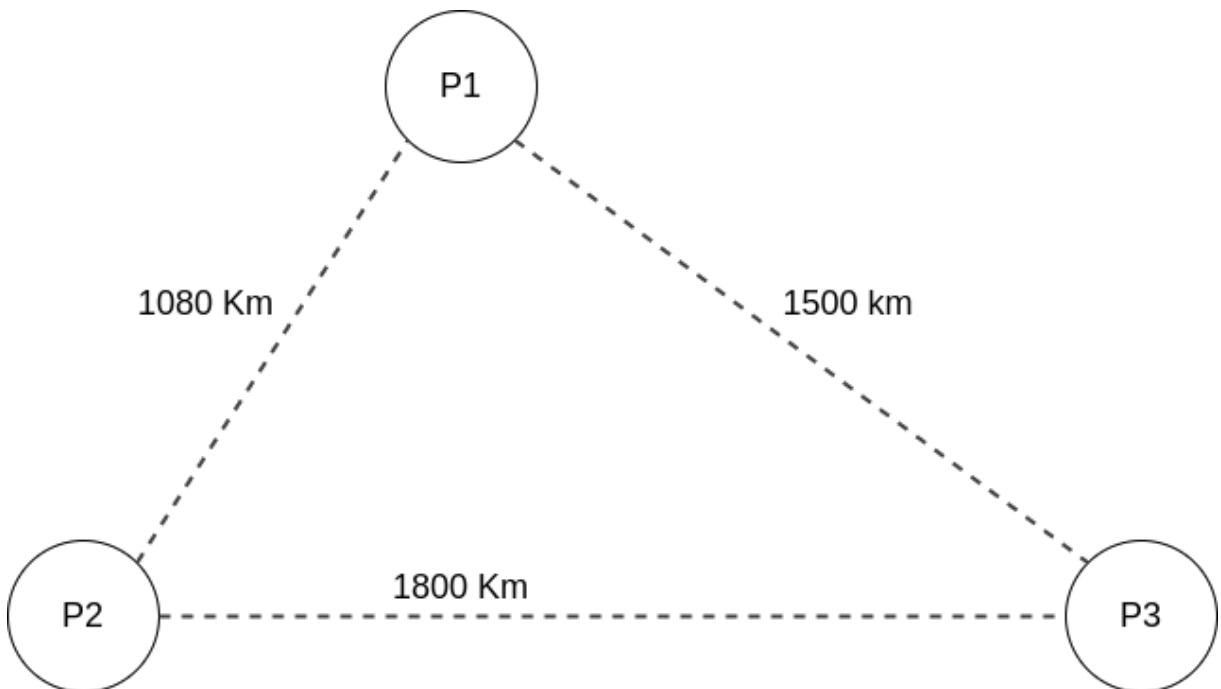
Tabela 5: Dados utilizados na simulação

Aeronave	$W_i [\text{kg}]$	$\bar{V}_c [\text{km/h}]$	$\bar{FC}_c [\text{Kg/h}]$
A1	333390	893	10510
A2	247200	905	6804
B1	384431	871	11150
B2	293017	992	7657
C1	345839	847	9360
C2	252944	923	6968

Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Utilizaremos também, uma trajetória de voo fixa de 3 pontos, esquematizada na figura 14, analisando somente a fase de voo em cruzeiro em formação, a fim de obter-se uma simulação mais simples, com a economia de consumo de combustível relativo a esse voo, dado por uma distribuição normal com $\mu = 11\%$ e $\sigma = 0.5\%$. Esse valor foi encontrado, considerando os dados em [Xu et al. 2014], onde uma aeronave passaria 54% do tempo voando em formação, economizaria 5.8% de combustível relativo a toda a missão.

Figura 14: Esquema da trajetória fictícia de voo



Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Para a simulação, empresas realizarão voos em formação sempre que possível, escolhendo aleatoriamente uma outra empresa com qual o voo nesta condição possa ser realizado para o mesmo destino, os voos serão realizados sempre na pior condição, ou seja, na formação *Echelon*, de duas aeronaves, para que possamos ter uma base sólida de resultados para este caso. O destino, por sua vez, será escolhido por passageiro aleatório entre os pontos.

Definiremos um preço padrão para o combustível a fim de computar a economia financeira das empresas para o caso proposto. Nesta simulação, também estudaremos a variação do preço por FFC a fim de entender seus impactos no modelo criado para a compra e venda e moedas entre empresas, caso uma fique com uma quantia de FFC baixa.

A quantidade de QC gerada no tempo será aproximada pela expressão 13, e, para duas aeronaves voando em formação, a velocidade de cruzeiro mínima entre ambas será adotada.

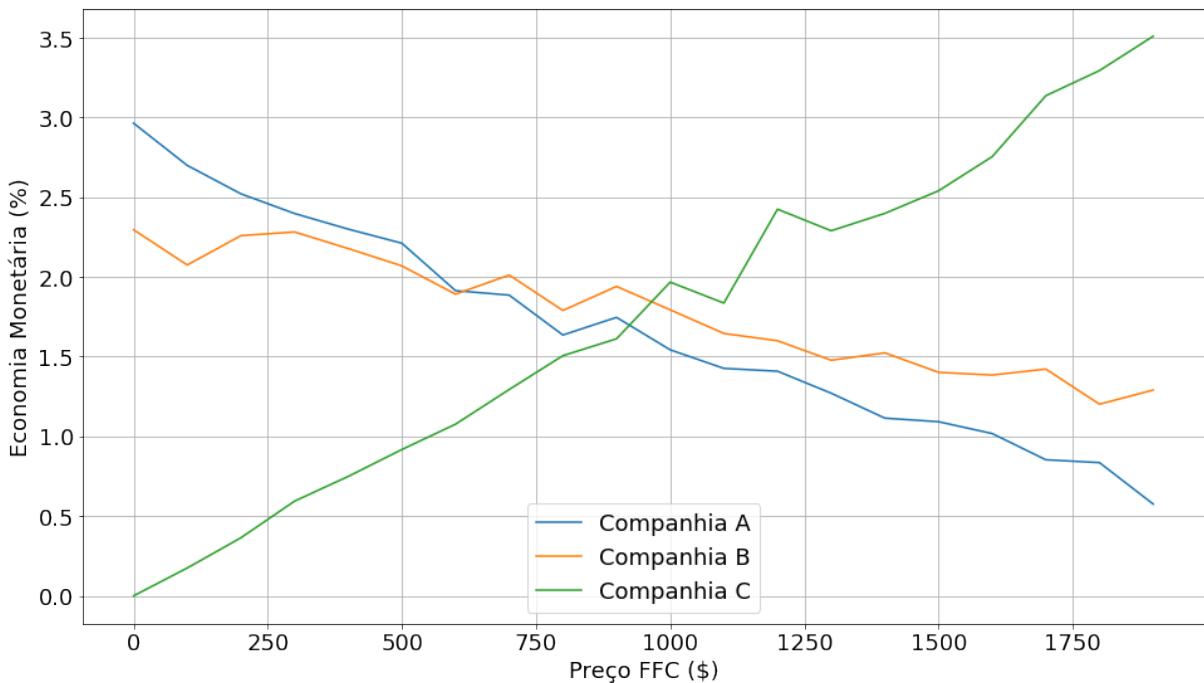
$$QC \approx \int_{t_i}^{t_f} \frac{W}{\rho V_\infty} dt \approx \frac{W_f + W_i}{2 \rho V_\infty} \Delta t \quad (13)$$

Por fim, para a simulação, além da variação de preço do FFC, mantemos um histórico da quantidade de FFC médio em cada empresa, e da quantidade de dinheiro que uma empresa economizaria com combustível sem a utilização desse sistema, e com a utilização do mesmo.

4.2 Resultados da simulação

Mantendo um registro da quantidade economizada pelas empresas e variando o preço da moeda, através do gráfico 15, podemos ver um ponto ótimo em que as empresas, tanto voando na posição apenas de *leading*, quanto aquelas que voam na posição de *wingman*, podem ter uma economia de cerca de 1.5% à 1.8% com combustível na fase de voo em formação.

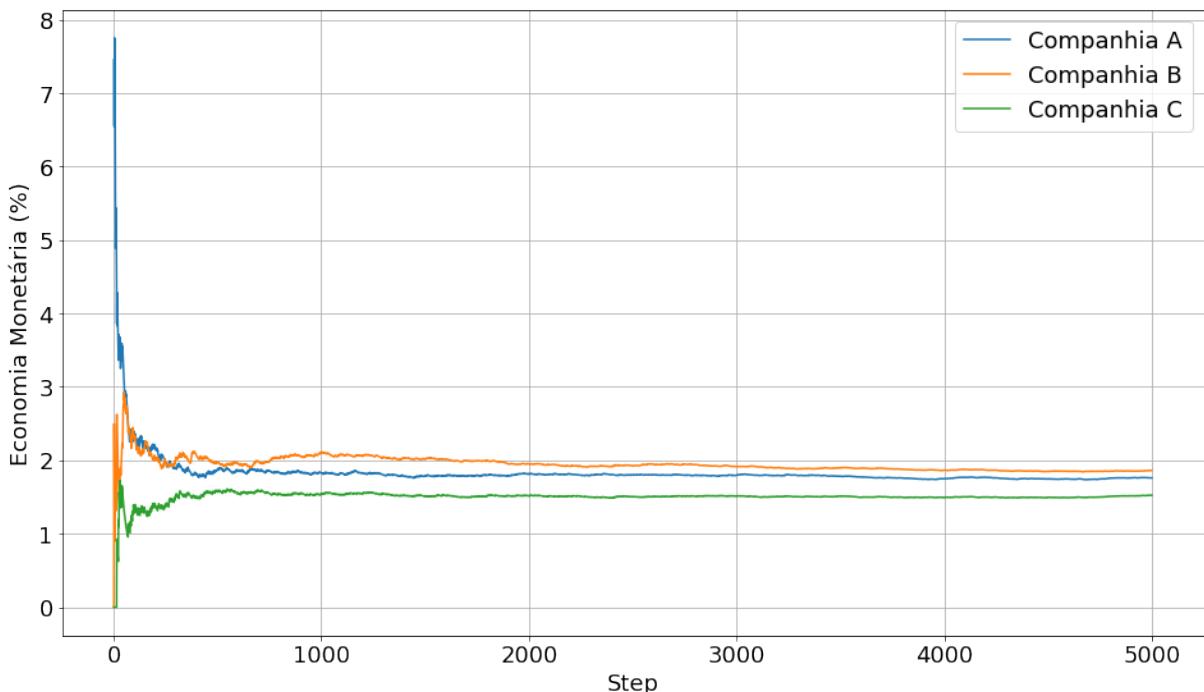
Figura 15: Quantidade economizada pelo preço da moeda



Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

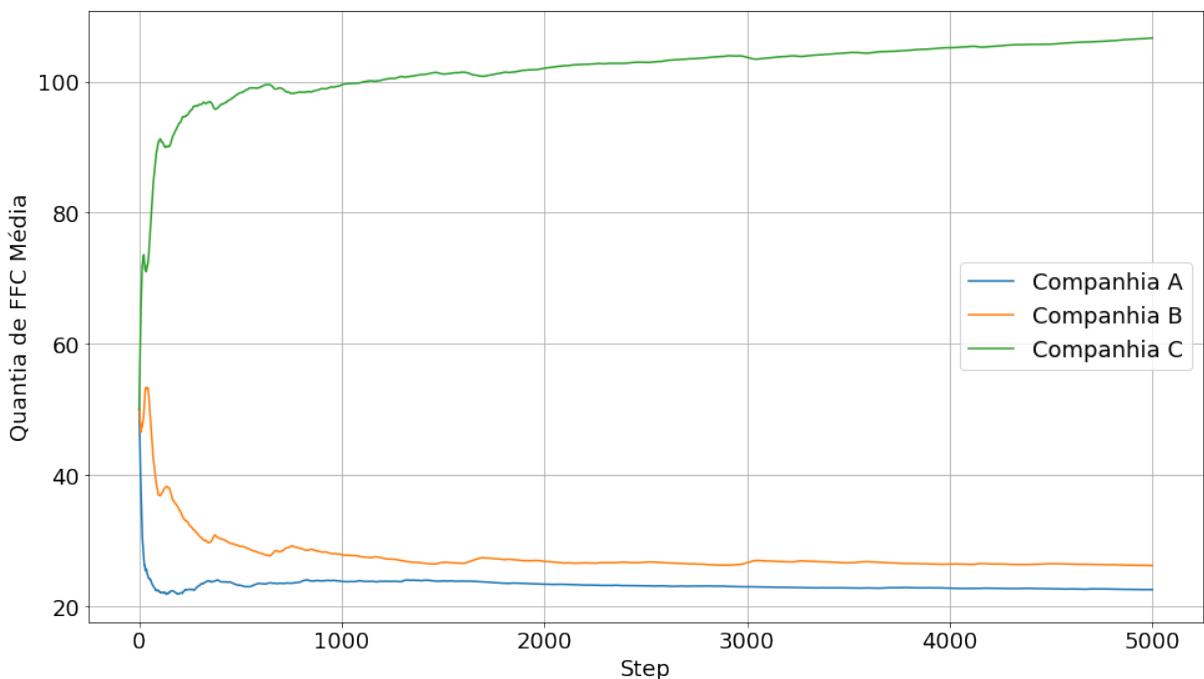
Adotando um preço fixo para a moeda de \$800, simulamos também a evolução da quantidade média economizada pelas empresas ao longo do tempo, figura 16, bem como, a quantidade de FFC média detida pelas mesmas entidades ao longo do tempo 17.

Figura 16: Quantidade economizada pelas empresas simuladas



Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Figura 17: Quantidade FFC ao longo do tempo



Fonte: Gerada pelo autor, 2021.

Podemos observar que a empresa que apenas realiza voos na posição de *leading* é a que mais detém FFC, pois não transfere à outros a não ser em casos de venda. E, que a quantia média economizada ao longo do tempo da figura 16 coopera com os valores encontrados na figura 15, que será a principal utilizada nas discussões.

4.3 Discussão

Podemos observar que a economia das empresas, varia com o preço da moeda, pelo efeito das transições de compra necessárias para manter a estabilidade do mercado. Caso analisemos o ponto em que todas as empresas tem uma economia monetária parecida, observamos um valor de economia de cerca de 1.8% para todas as empresas, durante a fase de voo em formação.

A menor quantidade de economia financeira observada em relação aos estudos prévios, tem sua causa enraizada à natureza da simulação proposta. Na simulação, tentou-se criar voos que fossem em formação sem *bias* através do passeio aleatório nas trajetórias apresentadas, pois, em condições reais, nem todo o voo realizado por empresas seria realizados em formação.

Deve-se manter em mente também que a simulação abordou somente o estágio de voo em cruzeiro, no qual ocorreria os voos em formação. Se utilizarmos a proporção de economia de combustível e custo operacional total encontrado em [Xu et al. 2014], podemos estimar uma economia de custo de operação total de cerca de 0.8% à 1.0% apenas. Esse valor fora encontrado, considerando o pior caso para a simulação realizada, e, será utilizado como o mínimo valor de economia monetária possível.

Caso as empresas realizem o planejamento de rota a fim de otimizar ao máximo esse tipo de voo, já que a escala de voos reais não é dada por um passeio aleatório, seria possível a observação de um crescimento da porcentagem calculada, contudo, este dificilmente atingiria os valores idealizados em [Xu et al. 2014].

O caso do voo em formação para uma mesma empresa não foi abordado nesta simulação, contudo, é possível a percepção de um cenário parecido com o observado para o caso interempresarial na condição de um preço nulo para o FFC com a média economizada pelas empresas A, B e C. Novamente, caso a empresa utilize o desenvolvido em [Xu et al. 2014], teríamos uma valor mais próximo ao descrito no artigo, ou seja, 2.0% de economia em relação a toda a operação.

Como um ultimo ponto, nota-se também que, com o modelo proposto, uma aeronave certificada apenas para a posição de *leading*, poderia realizar voos em formações com benefícios econômicos mensuráveis. Caso que não seria possível apenas com a simples realização desse tipo de voo, pois o mesmo é inherentemente beneficial apenas para a aeronave na posição de *wingman*.

Sendo assim, pode-se concluir que o voo em formação em aeronaves civis é possível caso tenha parâmetros estabelecidos assim como neste trabalho, contudo, sua viabilidade é baixa, para o caso inter-empresarial, graças ao baixo retorno encontrado.

5 CONCLUSÃO

Com este trabalho, pode-se identificar os fatores impeditivos para o voo em formação na categoria de aeronaves civis, sendo esses a falta de homologação e a falta de uma plataforma para a realização desses voos de forma mensurável.

Ao longo do trabalho, foram propostas diretrizes e um modelo a ser seguido para possibilitar a realização desses voos, cobrindo a lacuna identificada na área.

Foram realizadas algumas simulações estatísticas, a fim de avaliar se esse tipo de voo traria benefícios significativos para a aeronáutica civil, e foi constatado que, ao realizar este tipo de voo, seria possível uma economia média monetária de 1.5% à 1.8% nas empresas, para o voo em cruzeiro em formação, representando aproximadamente, uma economia de 0.8% à 1.0% em valor monetário sobre toda a operação.

Com isso, concluiu-se que o voo em formação na categoria da aeronáutica civil, em um contexto inter-empresarial, é possível e realizável, contudo, dado o baixo retorno de capital financeiro, e grande esforço para que a sua realização, se torna inviável. Pois, além dos esforços de certificação, haveria também a necessidade de agendamento, já que, caso uma companhia deseje ter uma economia maior que a apontada neste trabalho, essa deverá realizar voos com mais de duas aeronaves em formações, e, deverá alterar sua escala a fim de optimizar esse tipo de voo.

Como uma proposta para futuros trabalhos, sugere-se o descrito no parágrafo anterior, ou seja, o estabelecimento de um modelo parecido, para voos com múltiplas aeronaves com agendamentos à maximizar o número de voos em formação, de modo que, esse tipo de voo tenha uma porcentagem total de economia monetária mais elevada no contexto inter-empresarial. Tornando à pesquisa e avanços nesta área, uma realidade viável.

Referências

- [Anderson]ANDERSON, J. D. *Introduction To Flight*. 3. ed. [S.l.: s.n.].
- [Christidis e Devetsikiotis 2016]CHRISTIDIS, K.; DEVETSIKIOTIS, M. Blockchains and smart contracts for the internet of things. *Ieee Access*, Ieee, v. 4, p. 2292–2303, 2016.
- [Crighton 1985]CRIGHTON, D. G. The kutta condition in unsteady flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 17, n. 1, p. 411–445, 1985.
- [Gerz, Holzäpfel e Darracq 2002]GERZ, T.; HOLZÄPFEL, F.; DARRACQ, D. Commercial aircraft wake vortices. *Progress in Aerospace Sciences*, Elsevier, v. 38, n. 3, p. 181–208, 2002.
- [Giulietti, Pollini e Innocenti 2000]GIULIETTI, F.; POLLINI, L.; INNOCENTI, M. Autonomous formation flight. *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, v. 20, n. 6, p. 34–44, 2000.
- [Hartjes, Hubar e Visser 2019]HARTJES, S.; HUBAR, M. E. van H.; VISSER, H. G. Multiple-phase trajectory optimization for formation flight in civil aviation. *CEAS Aeronautical Journal*, Springer, v. 10, n. 2, p. 453–462, 2019.
- [Helmholtz 1858]HELMHOLTZ, H. Über integrale der hydrodynamischen gleichungen, welche den wirbelbewegungen entsprechen. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, v. 55, p. 25–55, 1858. Disponível em: <<http://eudml.org/doc/147720>>.
- [Lissaman e Shollenberger 1970]LISSAMAN, P. B.; SHOLLENBERGER, C. A. Formation flight of birds. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 168, n. 3934, p. 1003–1005, 1970.
- [Nakamoto 2008]NAKAMOTO, S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, p. 21260, 2008.
- [Proud, Pachter e D’Azzo 1999]PROUD, A.; PACTER, M.; D’AZZO, J. Close formation flight control. In: *Guidance, navigation, and control conference and exhibit*. [S.l.: s.n.], 1999. p. 4207.
- [Rasmussen e Smith 1999]RASMUSSEN, M.; SMITH, D. Lifting-line theory for arbitrarily shaped wings. *Journal of Aircraft*, v. 36, n. 2, p. 340–348, 1999.
- [U.S. 2014]U.S., D. of T. AC 90-23 Aircraft Wake Turbulence. [S.l.], 2014.

[Weimerskirch et al. 2001] WEIMERSKIRCH, H. et al. Energy saving in flight formation. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 413, n. 6857, p. 697–698, 2001.

[Xu et al. 2014] XU, J. et al. Aircraft route optimization for formation flight. *Journal of Aircraft*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 51, n. 2, p. 490–501, 2014.

