

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Filipe Rolim Vieira Nogueira

ANÁLISE DE RISCO DE COLISÃO PARA AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS EM PROXIMIDADES DO
AEROPORTO DE CONGONHAS

Trabalho de Graduação
2019

Curso de Engenharia Civil Aeronáutica

Filipe Rolim Vieira Nogueira

ANÁLISE DE RISCO DE COLISÃO PARA AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS EM PROXIMIDADES DO
AEROPORTO DE CONGONHAS

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres (ITA)

ENGENHARIA CIVIL AERONÁUTICA

São José dos Campos
instituto tecnológico de aeronáutica

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

Nogueira, Filipe Rolim Vieira
ANÁLISE DE RISCO DE COLISÃO PARA AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS
EM PROXIMIDADES DO AEROPORTO DE CONGONHAS / Filipe Rolim Vieira Nogueira.
São José dos Campos, 2019.
45f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil Aeronáutica– Instituto Tecnológico de
Aeronáutica, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres.

1. RPA. 2. Colisão. 3. Aeronave. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NOGUEIRA, Filipe Rolim Vieira. ANÁLISE DE RISCO DE COLISÃO PARA
AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM PROXIMIDADES DO
AEROPORTO DE CONGONHAS. 2019. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso
(Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

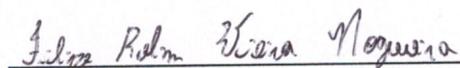
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Filipe Rolim Vieira Nogueira

TÍTULO DO TRABALHO: ANÁLISE DE RISCO DE COLISÃO PARA AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS EM PROXIMIDADES DO AEROPORTO DE
CONGONHAS.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2019

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias
deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos
acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte
deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



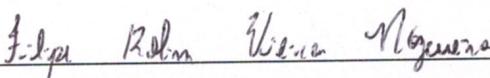
Filipe Rolim Vieira Nogueira

Rua H8 B, 228

12.228-461 – São José dos Campos–SP

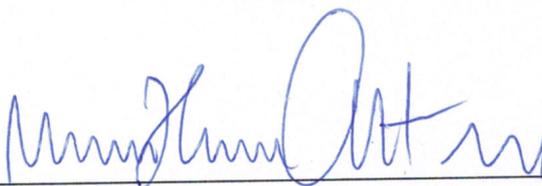
ANÁLISE DE RISCO DE COLISÃO PARA AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM PROXIMIDADES DO AEROPORTO DE CONGONHAS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Filipe Rolim Vieira Nogueira

Autor



Marcelo Xavier Guterres (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena
Coordenador do Curso de Engenharia Civil Aeronáutica

São José dos Campos, 22 de novembro de 2019.

Agradecimentos

Agradeço à minha família antes de tudo. Foram anos de suporte durante essa jornada de faculdade. Em especial, aos meus pais e minhas irmãs, com quem eu sempre pude contar nas horas mais difíceis em que eu morei longe deles. Agradeço também aos meus professores, que sem seus ensinamentos eu não teria conseguido concluir o curso, em especial ao professor Guterres e a professora Mayara que contribuíram para o desenvolvimento do presente trabalho. Aos meus amigos da Turma 18, em especial ao Igor, meu colega de quarto, que durante 3 anos foi a pessoa mais próxima de mim. Ele esteve presente em vários momentos difíceis, como trabalhos em grupo e viradões para provas, mas também esteve em quase todos os bons momentos, sempre servindo de suporte e tornando a vida no H8 mais fácil e divertida. Agradecimentos especiais, também, ao Ney Feitosa, Luan Torres, Humberto, Carlos, Eduardo, Rafael, Lucas Rodrigues, Lucas Augusto, Leonardo Gadelha, Lucas Pacheco, Pedro Victor, Fernando Frota, Matheus Cavalcante, Roberto Cavalcante, João Cassemiro, Daniel Studart, Davi Brasil, Rebeca Lopes, José Ivan, Giancarlo, Gabriel Gama, Levi Medeiros, Rahyan Azin, Pedro Mota, Matheus Furstenberger e Leonardo Araújo, além de muitos outros que se tornaram parte da minha família nesses anos de curso.

Resumo

No Brasil, o setor aeroportuário tem crescido constantemente e com isso, o número de operações nos aeródromos também. Dessa forma, o risco de colisões entre aeronaves remotamente pilotadas (RPA) e demais aeronaves tripuladas aumenta, e com isso surge uma necessidade de análise desse perigo.

Muitas aeronaves utilizam sistemas de monitoramento de posição, velocidade, altitude e com isso é possível evitar possíveis colisões. O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise de possíveis pontos de colisão entre aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) e aeronaves tripuladas em proximidades do aeródromo de Congonhas, com grande número de pousos e decolagens. Assim, de posse de tais informações, os operadores de RPAs podem, previamente, conhecer as áreas mais seguras para suas operações e locais onde há riscos maiores de colisão com outras aeronaves, sempre levando em consideração a legislação brasileira no que diz respeito à operação de RPAs. Nesse trabalho é utilizado um programa desenvolvido em Python para simulação de um modelo, com o objetivo de mapear possíveis pontos de colisão levando em conta a posição, horário e quantidade de encontros. Os dados das aeronaves tripuladas são reais obtidos via flightradar. É mostrado via análise gráfica e comparado com a legislação vigente para reflexão sobre a segurança estabelecida hoje.

Abstract

Many aircraft use position, speed, altitude monitoring systems and thus avoid possible collisions. This paper aims to analyze possible collision points between remotely piloted aircraft (RPAs) and manned aircraft in Congonhas aerodrome tests, with a large number of arrivals and takeoffs.

Thus, having such information, RPA operators can, at the outset, know the safest areas for their operations and places where there is a greater risk of collision with other aircraft, always taking into consideration Brazilian legislation regarding the operation of RPAs. In this work, a program developed in Python is used to simulate a model, in order to map possible collision points, taking into account a position, time and amount of encounters. Manned aircraft data is actually selected via flightradar. It is shown via graphical analysis and showed with current legislation for reflection on reduced safety today.

Lista de Figuras

FIGURA 3.1 – Exemplo de RPA Classe 1	23
FIGURA 3.2 – Exemplo de RPA Classe 2	24
FIGURA 3.3 – Exemplo de RPA Classe 3 com peso superior a 250 g	25
FIGURA 3.4 – Exemplo de RPA Classe 3 com peso menor que 250 g	26
FIGURA 3.5 – Número de pessoas cadastradas para pilotar	27
FIGURA 3.6 – Quantidade de RPAs cadastradas	28
FIGURA 3.7 – Número de voos realizados no Brasil	29
FIGURA 3.8 – Os 20 principais aeroportos em número de operações no Brasil	29
FIGURA 4.1 – Coordenadas Esféricas	36
FIGURA 5.1 – Heatmap para 5 operações por hora de RPAs	42
FIGURA 5.2 – Heatmap para 17 operações por hora de RPAs	42
FIGURA 5.3 – Heatmap para 30 operações por hora de RPAs	43

Lista de Tabelas

TABELA 5.1 – Resumo dos dados obtidos	41
TABELA 5.2 – Resumo dos dados para colisão exata com aeronave	41

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CGH	Aeroporto de Congonhas (Código IATA)
CAA	Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ICAO	Organização da Aviação Civil Internacional
RPA	Remotely piloted aircraft
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

Lista de Símbolos

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Motivação	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.3.3	Estrutura do Trabalho	15
2	Revisão de Literatura	16
2.1	Acidentes em solo	16
2.2	Regulamentação e o fator humano	17
2.3	Uso de RPAs em Operações Aeroportuárias	18
2.3.1	Vigilância de Perímetros	18
2.3.2	Proteção Biológica	19
2.3.3	Inspeção da Superfície das Áreas de Movimento	20
2.4	Análise de Colisões por simulação	20
3	Análise do Setor	22
3.1	Classificação de RPA	22
3.1.1	Classe 1	22
3.1.2	Classe 2	23
3.1.3	Classe 3	24
3.2	Legislação	26
3.2.1	Piloto	26

3.2.2	Regras de Voo	27
3.3	Registro de RPAs	27
3.4	Voos no Brasil	28
3.5	Casos de Acidentes e Incidentes	30
3.5.1	Brasil	30
3.5.2	Exterior	30
3.5.3	Riscos em uma colisão	31
4	Metodologia e Análises	33
4.1	Dados	33
4.2	Introdução ao Modelo	34
4.2.1	Principais Problemas	34
4.2.2	Hipóteses e suas Limitações	34
4.2.3	Dimensões	38
4.3	Colisão	38
4.4	Tráfego de Aeronaves	38
4.5	Aplicação do Método	39
5	Resultados e Discussões	41
5.1	Resultados	41
5.2	Visão geográfica	42
5.3	Conclusão	43
	Referências	45

1 Introdução

1.1 Contextualização

Nos últimos anos a tecnologia vem avançando cada vez mais rápido em diversos setores, principalmente em novas formas de transporte. Porém, muitas vezes esse enorme crescimento não é devidamente controlado, sem devida avaliação dos seus riscos em diferentes áreas.

Um exemplo de avanço tecnológico são os conhecidos popularmente como Drones. Hoje em dia, são inventados diferentes tipos de drones para diferentes usos e muito mais eficientes, dessa forma seu uso e suas vendas acompanham essa modernização. Os usos mais comuns hoje em dia são na segurança, monitoramento de áreas remotas, irrigação, transporte de objetos, e no lazer.

De acordo com o seu uso, são classificados e regulamentados de formas diferentes, nesse trabalho nos restringiremos ao VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), mais especificamente RPA.

No Brasil, segundo a legislação pertinente (Circular de Informações Aéreas AIC N 21/10), caracteriza-se como VANT toda aeronave projetada para operar sem piloto a bordo. Esta, porém, há de ser de caráter não recreativo e possuir carga útil embarcada. Em outras palavras, nem todo Drone pode ser considerado um VANT, já que um Veículo Aéreo Não Tripulado utilizado como hobby ou esporte enquadra-se, por definição legal, na legislação pertinente aos aeromodelos e não a de um VANT.

- RPA (Remotely-Piloted Aircraft / em português, Aeronave Remotamente Pilotada);
 - O piloto não está a bordo, mas controla aeronave remotamente de uma interface qualquer (computador, simulador, dispositivo digital, controle remoto, etc.)
- Aeronave Autônoma;
 - O piloto não está a bordo, porém uma vez programada a aeronave, não permite intervenção externa durante a realização do voo.

Como no Brasil a Aeronave Autônoma tem o seu uso proibido, tratemos a partir daqui apenas das RPAs. A chamada RPA, enfim, é a terminologia correta quando nos referimos a aeronaves remotamente pilotadas de caráter não recreativo.

Um dos riscos que deve ser avaliado no uso dessa tecnologia, é o seu uso em regiões próximas a aeródromos onde há um enorme tráfego de aeronaves, tanto em pousos como em decolagens. Assim como o uso das RPAs vem aumentando, a aviação também. O número de vôos nos principais aeroportos aumentam a cada ano, o congestionamento de aeronaves nessa região também devido ao número de operações e esses fatores contribuem para um risco de colisão de uma aeronave tripulada com uma RPA.

Para evitar este tipo de problema, a ICAO (International Civil Aviation Organization —Organização de Aviação Civil Internacional) desenvolveu o conceito CNT/ATM (Communications, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management —Comunicação, Navegação, Vigilância / Gerenciamento de Tráfego Aéreo), o qual visa substituir gradativamente os meios atuais de comunicação, navegação, vigilância e gerenciamento do tráfego aéreo baseados em radar e estações no solo por novas tecnologias, como uso de satélites (TEIXEIRA, 2009)

Uma das tecnologias de navegação e vigilância via satélite propostas pelo conceito CNS/ATM é o ADS-B (Automatic Dependent Surveillance —Broadcast —Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão), o qual utiliza satélites para obter informações como latitude, longitude, altitude, velocidade etc. Transmissões a cada 500 ms torna-o mais apropriado para utilização em sistemas de vigilância primários em áreas de alta densidade de tráfego. Segundo (TEIXEIRA, 2009), esta tecnologia fornece informações mais precisas do que o sistema atual baseado em radares, otimizando os espaços aéreos e a segurança nas operações.

1.2 Motivação

Assim como as aves que já causaram diferentes problemas em voos, as RPAs que possuem dimensões semelhantes apresentam também um grande potencial de dano as aeronaves. Apesar das regulamentações criadas para seu uso e monitoramento desses equipamentos através de GPS (Global Positioning System —Sistema de Posicionamento Global) foram registrados diversos incidentes, aeroportos já foram fechados temporariamente, voos desviados e até mesmo colisões.

Segundo a agência de aviação civil dos Estados Unidos, o números de casos de RPAs em rotas de aviões tem crescido consideravelmente seguindo a popularização desse tipo de aeronave. Felizmente, até hoje não houve nenhum caso com mortes de acidente entre um avião e uma RPA.

Uma equipe do Instituto de Pesquisa da Universidade de Dayton, nos Estados Unidos, simulou as condições de uma colisão em pleno ar entre um drone e um avião de transporte comercial viajando a 383 km/h. O modelo de drone usado foi o quadricóptero DJI Phantom 2, disparado na direção da asa de um avião Mooney M20. Embora a tendência seja pensar que um drone será completamente destruído e não prejudicará o avião, inúmeras vezes maior, o teste mostra que o objeto realmente perfura a asa do meio de transporte. Segundo os pesquisadores, acabou prejudicando a longarina principal, elemento estrutural primário da asa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é analisar o risco de possíveis colisões entre RPA e aviões em regiões definidas próximas a aeródromos, levando em consideração as dimensões dos aviões de forma aproximada, observando as posições de impacto. Além disso, estudar o impacto desse risco atualmente e projetar essa situação para o futuro. No final, fornecer soluções para diminuir este risco apresentado.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Verificar os possíveis pontos de colisão entre RPAs e aeronaves tripuladas, frequência de encontros, horários e impacto.
- Apresentar uma comparação com a região dos impactos e a regulamentação gerando uma análise sobre a segurança do sistema atual.
- Realizar uma análise estatística dos dados de colisões obtidas com base no crescimento do uso de RPAs e projetar situação em relação a esse risco.
- Sugerir melhorias de segurança na aviação nacional sobre o uso de RPAs. Sobre a ótica dos controladores de tráfego aéreo e a regulamentação utilizada como também dos fabricantes desses equipamentos que tem uma parcela de responsabilidade sobre seu uso

1.3.3 Estrutura do Trabalho

Aqui será apresentado como o trabalho foi dividido explicando resumidamente o papel de cada capítulo a seguir. Será escrito posteriormente.

2 Revisão de Literatura

2.1 Acidentes em solo

Muitos trabalhos envolvendo RPAs foram desenvolvidos na literatura, em diversos aspectos. Por se tratar de uma tecnologia relativamente nova e que está em constante crescimento, com diversas oportunidades para uso, cada vez mais aparecem estudos na literatura relacionados.

Segundo (ROCHA¹; BOURGUIGNON, 2019), ele possui motivações semelhantes ao nosso para realização desse estudo, crescimento do número desse tipo de aeronaves aumentando o risco do seu uso, incertezas regulamentares quanto ao uso, e isso inibe o crescimento e investimento nesse setor. Ele elabora uma metodologia que substancia a análise do risco de fatalidades no solo por uso dessa aeronave, mas para isso é necessário levar em conta diversos fatores como superfície analisada, densidade demográfica na região, configuração do acidente, probabilidade de acidente nessa configuração, entre outros. Ao final, é mostrado a relação do nível de risco do uso desse tipo de aeronave pela densidade populacional máxima, e com isso definido um fator de segurança que seria um critério de aceitabilidade.

Apesar do trabalho dele envolver apenas RPAs, o objetivo principal é bem semelhante se realizarmos algumas trocas, por exemplo: Se no lugar de superfície analisada, fixarmos ela em nosso aeródromo de estudo, realizar uma troca em densidade populacional por tráfego de aeronaves (associando aos pousos e decolagens naquele aeródromo), nosso trabalho começa a se assemelhar mais ao dele. Porém, um dos grandes diferenciais desse trabalho seria analisar como se daria essa colisão. Em nosso caso, temos muitas variáveis e também temos diferentes tipos possíveis de colisões, com relação a posição, frontal, lateral, diferentes aeronaves tripuladas, diferentes RPAs, e com isso diferentes velocidades. Para chegarmos a uma metodologia, será preciso fazer uma série de suposições caso a caso para alcançarmos o propósito do nosso modelo.

2.2 Regulamentação e o fator humano

Uma das formas de poder controlar e mitigar o risco de colisões de VANTs com aeronaves tripuladas é ter uma regulamentação bem estruturada. É de grande ajuda tanto para a questão de segurança, controlar o espaço aéreo, o uso desse tipo de aeronave e sua interação com as demais, quanto para questão de investimentos no setor, uma vez que temos um setor bem regulamentado, estruturado e seguro, investidores se sentem mais confortáveis e propícios a investir. Quanto a questão da segurança, um dos fatores mais importantes e difíceis de mensurar é o fator humano, uma vez que não existe um padrão, é uma incógnita difícil de conseguir prever, cada ser humano pode se comportar de determinada maneira. Uma solução para tornar isto um pouco mais previsível é através de regras de uso, manuais e regulamentações rígidas sobre quebra de segurança em sua utilização.

Segundo (FONTAINE et al., 2016), Veículos Aéreos Não tripulados (VANTs) são um novo componente do sistema de aviação, que a Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO), os Estados e a indústria aeroespacial estão trabalhando para compreender, definir e, finalmente, integrar. A integração segura de VANTs no espaço aéreo não segregado será um processo complexo, uma atividade de longo prazo que requer o conhecimento de muitas partes interessadas. Atualmente, os regulamentos, políticas e leis das RPAS estão sendo criados, alterados e implementados em diferentes níveis por vários órgãos. Na Europa, as autoridades nacionais da aviação civil (CAA) são atualmente responsáveis pelas operações com RPAS, com peso inferior a 150 kg, o que leva a regras divergentes de estado para estado, portanto, necessitando de uma resposta a nível europeu. Em março de 2015, o primeiro passo para a unificação em toda a UE foi realizado pela Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA), apresentando sua abordagem regulamentar antecipada e conceito de operações para o RPAS.

Quase todos os países estão preocupados com o aumento das operações do RPAS em seu Sistema Nacional de Espaço Aéreo. Esta situação requer uma integração dos regulamentos atuais, a fim de alcançar, no mínimo, um nível de segurança equivalente ao da aviação tripulada. A segurança é definida em termos de risco para a vida humana, embora potenciais danos colaterais à propriedade também possam ser levados em consideração. As taxas críticas de lesões e mortes no trabalho, típicas de alguns setores da indústria, precisam ser enfrentadas técnicas adequadas de análise de risco e, obviamente, a disponibilidade de dados de entrada confiáveis extraído de acidentes é essencial para o desenvolvimento de uma Análise e Gerenciamento de Riscos exaustivos na abordagem proativa de prevenção, a fim de incluir o fator humano na equação. O erro humano, em geral, é definido como a falha na execução de uma tarefa específica. Isso pode levar à interrupção da operação programada ou resultar em danos ao ativo imobilizado. Hoje em

dia, o ser humano constitui a maior causa de acidentes no setor de transporte e, embora seja quase impossível eliminar completamente o erro humano, o primeiro objetivo deve ser minimizar erros humanos, prevenindo falhas e restaurando sistemas com falhas efetivamente com risco mínimo de acidente. Nesse contexto, o crescente reconhecimento da necessidade de estabelecer iniciativas de comunicação e treinamento e acordos avançados entre os do setor de segurança da aviação, reguladores, policiais e judiciários, a fim de evitar interferências desnecessárias e gerar confiança mútua e compreensão da relevância de suas respectivas atividades e responsabilidades.

O conceito de uma cultura justa representa o reconhecimento fundamental de que tanto a segurança da aviação quanto administração da justiça se beneficiaria de um equilíbrio cuidadosamente estabelecido, afastando-se dos temores de criminalização. Chegou a hora de questionar seriamente o valor agregado de esforços intermináveis e geralmente mal sucedidos em nível internacional para "proteger" controladores e pilotos contra ações legais, criando normas, regulamentos e leis que devem protegê-los de intervenção do sistema de justiça. Está se tornando obrigatório fornecer aos futuros pilotos do RPAS conhecimento e treinamento adequados, a fim de garantir uma profunda compreensão e percepção dos possíveis situações perigosas relacionadas ao compartilhamento do espaço aéreo entre aeronaves e veículos não tripulados e minimizar a probabilidade de erros humanos.

2.3 Uso de RPAs em Operações Aeroportuárias

Muitas fontes citam RPAs como possíveis causadores de acidentes em proximidades dos aeroportos, e de fato, esse risco existe, porém precisa ser analisado, avaliado e controlado. Afinal, existem muitas vantagens no uso desse tipo de aeronaves, algumas delas citadas na introdução deste trabalho, sendo uma delas o possível uso em operações do aeroporto.

O trabalho (LÍKAŘ et al., 2016) cita algumas vantagens de uso de RPAs em operações aeroportuárias, algumas delas já sendo usadas em alguns aeroportos do mundo.

2.3.1 Vigilância de Perímetros

O processo de vigilância de perímetro é realizado por uma segurança de aeroporto. Inclui patrulhas móveis ao longo da cerca e monitoramento do espaço aeroportuário por sistema de vigilância. A vigilância do sistema consiste em uma câmera óptica colorida para uso diurno e uma câmera infravermelha para monitorar a área pela noite e com pouca visibilidade. Além disso, um radar de vigilância em terra é instalado para a detecção de movimento. Esse processo funciona muito bem em sua forma atual. No entanto, foi selecionado como um exemplo de processo mais interessante, a implementação de

aeronaves não tripuladas pelo próprio aeroporto de Praga. Um dos benefícios poderia ser especialmente o aumento da frequência regular de patrulhas e cobertura de locais fora do alcance do sistema existente. Equipamento tecnológico para a vigilância de objetos usando RPAS está prontamente disponível no mercado. Durante o dia opera com uma câmera óptica com alta resolução. A imagem da câmera seria transmitida em tempo real através de uma rede sem fio segura diretamente da câmera na tela do operador. À noite e com pouca visibilidade, câmeras infravermelhas seriam usadas. Eles permitem não apenas detectar uma pessoa tentando perturbar o perímetro, mas também a vida selvagem. RPAS são capazes de transportar os dois tipos de câmera ao mesmo tempo, para que um operador possa sempre ver as duas saídas e poderia escolher o adequado de acordo com a situação.

A operação do RPAS realizando patrulhas ao longo da cerca ocorreria fora da área de movimento, o que reduziria o risco de conflito com aviões comerciais. Ainda assim, seria necessário coordenar a operação com o Controle de Tráfego Aéreo. As atividades de patrulhamento poderiam ser realizadas em modo de voo manual ou automático. Embora o modo manual represente um método de operação mais seguro em termos da legislação e maneira mais fácil de obter todas as permissões necessárias, o modo automático permitiria pleno potencial de tecnologias não tripuladas e para reduzir o número de funcionários necessários. O modo automático permitiria que os voos regulares do RPAS ao longo da cerca fossem realizados sem a necessidade de intervenção do operador. O operador pode estar presente na sala de controle, onde supervisiona o voo e avalia imagens das câmeras a bordo. Se necessário, ele pode interferir na rota do voo predefinido ou realizar um pouso controlado da aeronave.

2.3.2 Proteção Biológica

Para a proteção da aeronave contra colisões com pássaros e animais selvagens, é responsável o departamento de proteção biológica aeroportuário. Sua equipe monitora continuamente o espaço do aeroporto a partir do nascer ao pôr do sol e em caso de ocorrência de animais silvestres perto da pista ativa, eles começam a assustar. Scaring é um método para assustar esses animais que é realizado de várias maneiras. Uma delas, representa uma ave de rapina treinada por falcoeiros, natural predador para muitas aves e espécies de pequenos animais. Também armas de caça são usadas não apenas para assustar, mas também para caçar. Animais no terreno são posteriormente procurados por um cão. Para alcançar uma proteção biológica eficaz, é necessário combinar todas essas atividades de maneira eficaz. Uma das coisas que os funcionários estão perdendo é uma ferramenta para monitorar a presença de aves e animais dentro do perímetro e áreas adjacentes para poder escolher a maneira mais apropriada de controlar.

Além das câmeras, o RPAS também pode transportar um equipamento acústico para assustar os pássaros. Esta instalação seria tecnicamente idêntica ao equipamento estático de assustador acústico que toca sons de predadores ou sinais de angústia de pássaros pequenos. A principal vantagem desse uso seria a possibilidade de colocar o equipamento acústico próximo a um bando e em uma direção para que os pássaros voem para longe do aeroporto. O veículo aéreo não tripulado usado para as necessidades de proteção biológica do aeroporto seria sempre implantado diretamente na área de destino, um operador o transportaria para a área de destino de carro. Para eliminar voos sobre a área de movimentação de aeroportos e reduzir o risco de colisão com aviões de passageiros. A operação com as RPAs ocorreria no modo manual e sempre em coordenação com o Controle de Tráfego Aéreo.

2.3.3 Inspeção da Superfície das Áreas de Movimento

O estado das áreas de movimentação de superfície nos aeroportos é verificado regularmente por um controlador do departamento de Controle de Operações. O objetivo das inspeções é impedir a ocorrência de objetos soltos que podem causar danos a uma aeronave. Eles monitoram principalmente a condição da superfície área, a condição dos sinais de trânsito e a presença de objetos estranhos na área de movimentação.

Existem duas opções para melhorar o processo: Aumentando a frequência das verificações ou aumentando a confiabilidade da detecção de objetos. A velocidade da aeronave não tripulada não pode ser equiparada ao veículo terrestre. Então a frequência das verificações de rotina não puderam ser aumentadas. No entanto, o RPAS pode transportar o equipamento de bordo que garante a detecção confiável de objetos estranhos na superfície. Um exemplo pode ser o radar a bordo transmitindo ondas milimétricas. Essa tecnologia já é usada por radares estáticos que continuamente monitoram a superfície da pista em alguns aeroportos. Esse meio de utilização do RPAS é seguro do ponto de vista operacional, pois os voos individuais são realizados somente na área fechada para todo o tráfego. Além disso, o operador controla o equipamento não tripulado manualmente e está em linha de visão direta durante todo o voo. O risco de colisão com outro tráfego é, portanto, mínimo.

2.4 Análise de Colisões por simulação

Semelhante ao proposto neste trabalho, o trabalho de (MATSUMOTO, 2016) realiza uma análise de possíveis colisões utilizando simuladores de voos para o uso de trajetórias de aeronaves tripuladas, com o auxílio de um software iniciando um voo em piloto automático, ele consegue realizar uma análise. Porém, nosso objetivo é realizar uma análise mais

próxima da realidade, utilizar dados de voos reais que aconteceram em algum momento e além disso, incorporar o tráfego de aeronaves existentes realizando várias simulações, isso traz um caráter mais realístico em uma análise de risco de colisões.

Uma análise válida realizada no trabalho de (MATSUMOTO, 2016) é o comportamento de um VANT em modelo de aprendizado, ou seja, ele realiza operações baseado no espaço aéreo em que está inserido para definir eventuais manobras em sua trajetória. A ideia é que as RPAs sejam capazes de fazer isso, por não ser uma aeronave autônoma, depende do fator humano que possui suas limitações, mas pode ser um sistema que diminua esse risco e a análise necessária para o risco de colisão ter que considerar essa característica.

3 Análise do Setor

3.1 Classificação de RPA

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) é uma agência reguladora federal cuja responsabilidade é normatizar e supervisionar a atividade de aviação civil no Brasil, tanto no que toca seus aspectos econômicos quanto no que diz respeito à segurança técnica do setor. A ANAC criou uma classificação para as RPAs e normas de acordo com essa classificação que devem ser seguidas.

3.1.1 Classe 1

RPA com peso máximo de decolagem maior que 150 kg. Para operar esse tipo de aeronave precisa-se

- Ter no mínimo 18 anos de idade para pilotar ou auxiliar a operação como observador.
- Possuir seguro com cobertura de danos a terceiros.
- Fazer uma avaliação de risco operacional (IS-ANAC nº E94-003).
- Operar apenas em áreas distantes de terceiros (no mínimo 30 metros horizontais).
- Operar apenas um único sistema de RPA por vez.
- As operações só poderão ser iniciadas se houver autonomia suficiente da aeronave para realizar o voo e pousar em segurança no local previsto, levando-se em conta as condições meteorológicas conhecidas.
- Possuir e portar licença e habilitação emitidos pela ANAC, bem como Certificado Médico Aeronáutico (CMA) de 1ª, 2ª ou 5ª classe concedidos pela ANAC ou de 3ª classe expedido pelo Comando da Aeronáutica.
- Obter registro junto à ANAC e portar um Certificado de Aeronavegabilidade padrão ou restrito.

- Executar uma Inspeção Anual de Manutenção (IAM) no sistema de RPA a cada 12 meses.



FIGURA 3.1 – Exemplo de RPA Classe 1

3.1.2 Classe 2

RPA com peso máximo de decolagem maior que 25 kg e até 150 kg. Para operar esse tipo de aeronave precisa-se

- Ter no mínimo 18 anos de idade para pilotar ou auxiliar a operação como observador.
- Possuir seguro com cobertura de danos a terceiros.
- Fazer uma avaliação de risco operacional (IS-ANAC n° E94-003).
- Operar apenas um único sistema de RPA por vez.
- Operar apenas em áreas distantes de terceiros (no mínimo 30 metros horizontais).
- Iniciar operações remotas apenas se houver autonomia suficiente da aeronave para realizar o voo e pousar em segurança no local previsto, levando-se em conta as condições meteorológicas conhecidas.
- Possuir e portar licença e habilitação emitidos pela ANAC, bem como Certificado Médico Aeronáutico (CMA) de 1ª, 2ª ou 5ª classe concedidos pela ANAC ou de 3ª classe expedido pelo Comando da Aeronáutica.
- Obter registro junto à ANAC e portar um Certificado de Aeronavegabilidade padrão ou restrito.
- Realizar todos os procedimentos específicos recomendados pelo fabricante no manual de manutenção e registrá-los em cadernetas apropriadas.



FIGURA 3.2 – Exemplo de RPA Classe 2

3.1.3 Classe 3

Para essa classe, ela é subdividida em dois casos

3.1.3.1 RPA com peso máximo de decolagem maior que 250g e até 25 kg

Nesse caso, as regras são semelhantes as das classes acima, porém menos rigorosas. Para essas características de aeronave, precisa-se

- Ter no mínimo 18 anos de idade para pilotar ou auxiliar a operação como observador.
- Possuir seguro com cobertura de danos a terceiros.
- Fazer uma avaliação de risco operacional (IS-ANAC nº E94-003).
- Operar apenas um único sistema de RPA por vez.
- Operar apenas em áreas distantes de terceiros (no mínimo 30 metros horizontais).
- As operações só poderão ser iniciadas se houver autonomia suficiente da aeronave para realizar o voo e para pousar em segurança no local previsto, levando-se em conta as condições meteorológicas conhecidas.
- Cadastrar cada equipamento no Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) da ANAC.
- Fixar a identificação (número obtido no processo de cadastramento) do equipamento em local visível na aeronave e com material não inflamável.
- Portar o comprovante do cadastro junto à ANAC, do seguro e da avaliação de risco e o manual de voo do equipamento.



FIGURA 3.3 – Exemplo de RPA Classe 3 com peso superior a 250 g

3.1.3.2 RPA com peso máximo de decolagem de até 250 g

Nesse caso, esse tipo de aeronave tem muito menos impacto que as demais, ainda mais quando se fala de colisões com aeronaves tripuladas. Dessa forma, suas regras de uso são bem menos rígidas mas será mostrado adiante como existe um impacto e risco significativo com aeronaves desse peso. Para esse tipo de aeronave, a ANAC diz que

- Os equipamentos não precisam ser cadastrados na ANAC.
- Está dispensada a avaliação de risco da operação, mas deve-se verificar as condições da aeronave quanto à segurança de voo, ter ciência de todas as informações necessárias ao planejamento do voo antes de iniciá-lo e atuar em todas as fases do voo durante a operação.
- A idade mínima é de 18 anos para operar RPA.
- Pilotos não precisam de documento emitido pela ANAC e são considerados devidamente licenciados.
- Só é permitido operar um único sistema de RPA por vez.
- Não é obrigatório possuir seguro com cobertura de danos a terceiros.
- Não é necessário registrar os voos.

Perceba que para esse tipo de aeronave o controle é muito menor, sem registros sobre o piloto e sobre a aeronave, apesar de ser uma categoria de peso muito baixo e com pouco potencial de dano, em colisões com grandes aeronaves esse risco não pode ser ignorado.



FIGURA 3.4 – Exemplo de RPA Classe 3 com peso menor que 250 g

3.2 Legislação

Aqui, vamos ressaltar os principais pontos colocados pela legislação brasileira vigente que consideramos relevantes para nosso estudo. Alguns deles já foram citados na seção anterior. Além disso, vale ressaltar que não temos uma legislação totalmente completa no que tange este assunto, temos uma legislação que ainda precisa evoluir muito, ser criticada, melhorada, ter como base algumas análises dessa tecnologia. Este Regulamento Especial se aplica a aeronaves não tripuladas de uso civil capazes de sustentar-se e/ou circular no espaço aéreo mediante reações aerodinâmicas.

3.2.1 Piloto

Quanto ao piloto, controlador da aeronave, é colocado alguns controles e requisitos.

- O piloto remoto em comando de uma aeronave não tripulada é diretamente responsável pela condução segura da aeronave, pelas consequências advindas, e tem a autoridade final por sua operação.
- Todos os pilotos remotos que atuarem em operações acima de 400 pés acima do nível do solo devem possuir licença e habilitação emitida ou validada pela ANAC.
- O piloto remoto em comando de uma aeronave não tripulada é responsável pela verificação de suas condições quanto à segurança do voo. Ele deve descontinuar o voo, assim que possível, quando ocorrerem problemas mecânicos, elétricos ou estruturais que comprometam a segurança da operação.

3.2.2 Regras de Voo

Quanto ao voo realizado pela RPA, é preciso ter alguns cuidados e seguir determinados normas impostas a favor da segurança

- É proibido o transporte de pessoas, animais, ou carga proibida por autoridade competente, em aeronaves não tripuladas.
- É proibida a operação autônoma de aeronaves não tripuladas.
- A operação de aeronaves não tripuladas até 250 gramas de peso máximo de decolagem é permitida pela ANAC, sob total responsabilidade do seu operador, conforme permitido o uso do espaço aéreo pelo DECEA.

3.3 Registro de RPAs

Como mencionado anteriormente, o número de RPAs ao longo do tempo vem crescendo e com isso surge cada vez mais a necessidade de analisar seus riscos de colisões, principalmente com outras aeronaves tripuladas. Para exemplificar, foi obtido os dados do cadastro dessas aeronaves e de pessoas habilitadas para pilota-las. Vale lembrar que conforme apresentado no item anterior, RPAs com peso inferior a 250 g não necessita de cadastro de pessoa para pilotar e nem da aeronave em si, logo, os números a seguir não contemplam essa categoria.



FIGURA 3.5 – Número de pessoas cadastradas para pilotar

Abaixo, temos a quantidade de RPAs cadastradas no Brasil comparando com a quantidade de São Paulo. Veja que o estado de São Paulo é responsável por cerca de um terço

do número de RPAs e além disso é o estado com maior tráfego de aeronaves, devido aos aeroportos de Guarulhos (maior do Brasil), Congonhas e Viracopos. Em seções seguintes serão apresentados um pouco sobre dados desse tráfego, o que evidencia um cuidado maior com o risco de colisões nessa região, afinal de contas, quanto maior o tráfego desses dois tipos de aeronaves (Aeronaves comerciais tripuladas e RPAs), maior a chance de acidentes e incidentes.

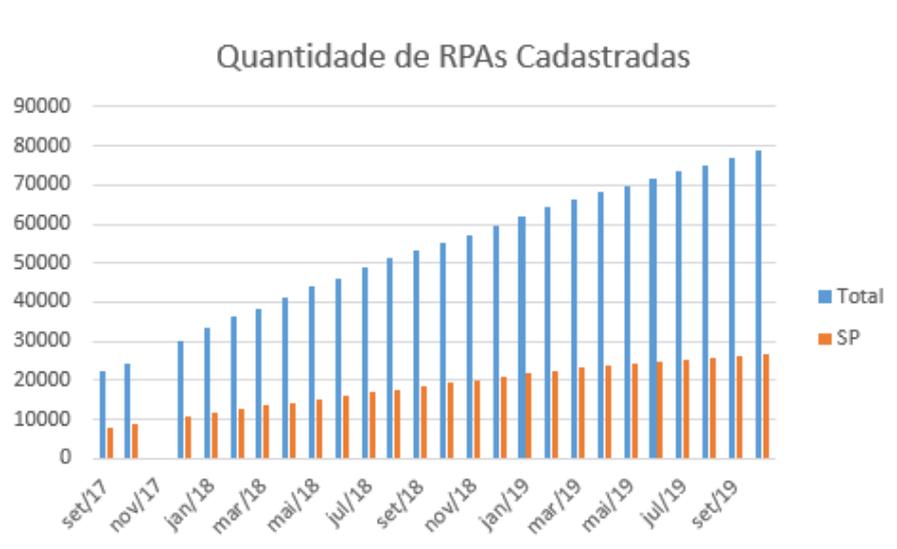


FIGURA 3.6 – Quantidade de RPAs cadastradas

3.4 Voos no Brasil

É evidente que o número de voos no Brasil vem crescendo com o passar dos anos, apesar de existir oscilações quanto a esse número, no geral, a tendência se mostra de crescimento. Oscilações muitas vezes causadas pela situação econômica do país, afinal, o setor de aviação civil é altamente dependente da economia, poder de compra da população, custo de infraestrutura, preço do combustível, valor da moeda e entre outros diretamente ou indiretamente relacionado. Existe a influência dos fatores tecnológicos, que indicam o nível de desenvolvimento tecnológico de um setor ou da sociedade em sua totalidade. Questões relacionadas a programas de incentivo à inovação, pesquisa e desenvolvimento e normas de qualidade estão intimamente relacionadas ao avanço do setor de transporte aéreo, principalmente quando se fala de aeronaves não tripuladas. Para mostrar esse crescimento, basta pensarmos no aumento dos aeroportos e surgimento de novos aeroportos para suprir essa necessidade. Abaixo, temos os dados do setor disponibilizados pela ANAC de quantidade de voos ao longo dos anos, percebe-se que existem oscilações, e a diminuição dessa quantidade muito se atribui a crise econômica enfrentada pelo país que afeta fortemente a demanda do setor



FIGURA 3.7 – Número de voos realizados no Brasil

No gráfico abaixo, mostra a contribuição dos 20 principais aeroportos do Brasil em número de operações. Perceba que os 3 aeroportos do estado de São Paulo citados anteriormente são responsáveis por cerca de 29% das operações. Isso vai de encontro com o número de RPAs registradas no estado de SP, cerca de 30% do número do Brasil, apresentado na seção anterior. Isso nos evidencia uma possível forte correlação entre o crescimento de RPAs com o tráfego aéreo naquela região de crescimento, o que faz sentido, afinal, RPAs são aeronaves e fazem parte do setor de aviação, os motivos que levam ao seu crescimento são semelhantes aos motivos que impulsionam o setor de aviação civil comercial.

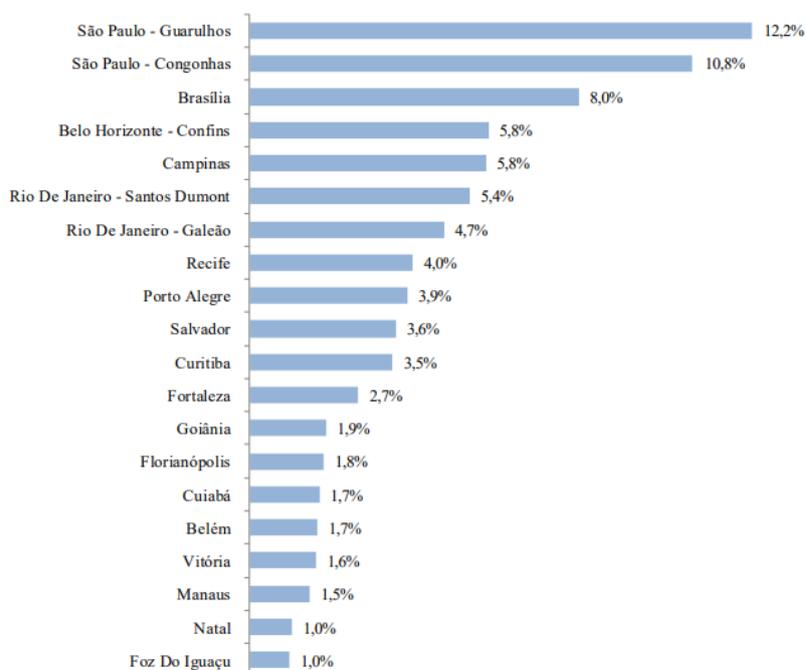


FIGURA 3.8 – Os 20 principais aeroportos em número de operações no Brasil

3.5 Casos de Acidentes e Incidentes

Devido aos crescimentos tanto do tráfego aéreo quanto das operações de RPAs como apresentado em seções anteriores, aumentaram também os incidentes e até mesmo eventuais acidentes envolvendo RPAs nas áreas operacionais dos aeroportos do mundo inteiro, ocasionando suspensão dos pousos e decolagens, desvios de aeronaves para aeroportos alternativos, além de pôr em perigo tanto pessoas a bordo das aeronaves quanto no solo, apesar de já haver legislação proibindo a operação de RPAs nas proximidades de aeroportos.

3.5.1 Brasil

No ano de 2017, mais precisamente em 12/11/2017, de acordo com o portal de notícias R7, uma RPA sobrevoou a cabeceira de uma das pistas do Aeroporto Internacional de Congonhas, provocando o fechamento do aeroporto por duas horas, impedindo a decolagem de 49 aeronaves e o pouso de outras duas, causando prejuízo de mais de R\$ 1 milhão. Ainda de acordo com o referido portal, em 19/03/2018, duas RPAs provocaram o fechamento do aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre (RS) por cerca de uma hora. No mesmo dia, outra RPA já havia prejudicado as operações do aeroporto Santa Genoveva, em Goiânia (GO). Em 23/09/2018, o aeroporto de Confins, na região metropolitana de Belo Horizonte (MG), foi fechado por 20 minutos durante o sobrevoo uma RPA sobre a área operacional, impactando três voos. Em 08/01/2019, segundo o portal de notícias G1, uma RPA nas proximidades do aeroporto de Congonhas causou o fechamento do mesmo por 20 minutos para pousos e decolagens, ocasionando o atraso de 16 voos

3.5.2 Exterior

Conforme apresentado em (FONTAINE et al., 2016), em 4 de março de 2013, o piloto de um voo AZ608 da Alitalia Boeing 777 que voava de Roma para Nova York informou que ele viu uma aeronave pequena e não tripulada enquanto se aproximava do pouso no aeroporto internacional JFK, a cerca de 1 quilômetro do ponto de aterrissagem da pista 31R a uma altitude de aproximadamente 400 metros. A pequena aeronave não tripulada que chegava a menos de 50 metros da aeronave eram de quatro hélices, de cor preta com aproximadamente 1 metro de diâmetro. A tentativa do governo federal de investigar para localizar a aeronave e seu operador não tiveram êxito. Em maio de 2014, o copiloto de um AT72 acreditava ter visto um quadricóptero próximo à ponta da asa direita quando a aeronave estava em aproximação no aeroporto de Southend, cerca de 35 quilômetros a leste de Londres. Ele relatou que a aeronave não tripulada tinha chegado tão perto da aeronave comercial quando se aproximava da aeronave do lado direito antes de fazer

uma curva e voar na direção oposta a cerca de 25 metros de distância e no mesmo nível. O dispositivo controlado remotamente estava tão perto para a aeronave que o co-piloto avaliou como alto o risco de colisão. O controle de tráfego aéreo relatou o informado pelo co-piloto à polícia que entrou em contato com dois modelos de clubes voadores que estavam operando na área. Nem a RPA e nem o piloto remoto foram localizados.

Outra quase colisão no ar entre um avião comercial e uma RPA no aeroporto de Heathrow em Londres ocorreu em 22 de julho de 2014 quando o piloto de um Airbus A320 com 180 passageiros a bordo informou que quando a aeronave estava chegando a 175 metros, ele avistou um RPA que foi descrito como um pequeno helicóptero modelo. O dispositivo não apareceu no radar de controle de tráfego aéreo. O piloto pousou a aeronave sem nenhuma ocorrência adicional, mas indicou que ver o dispositivo nessa fase crítica do voo era uma distração para ele. O organismo de investigação de acidentes do Reino Unido declarou que os perigos associados a pilotar esse modelo próximo a uma aeronave comercial de transporte aéreo nos estágios finais do pouso, foi motivo de preocupação considerável. O seguinte incidente ocorreu na Austrália. Ocorreu uma quase colisão entre um objeto voador desconhecido e uma aeronave identificada como Havilland DHC-8 em 19 de março de 2014. A aeronave estava se aproximando do Aeroporto de Perth quando a tripulação notou uma luz brilhante descrita como um objeto cinza, de forma cilíndrica, voando diretamente em direção ao avião. O piloto imediatamente tomou uma ação evasiva e evitou uma quase colisão. O desconhecido objeto continuou a passar a cerca de 20 metros na horizontal e a 25 metros na vertical da aeronave. O Australian Transport Safety Board investigou outros dois incidentes com RPAs operando próximo a aeroportos, um onde um suspeito pilotando uma RPA quase colidiu com um helicóptero e outro onde uma RPA estava operando próximo ao aeródromo sem fazer chamadas de rádio.

3.5.3 Riscos em uma colisão

De acordo com as quase colisões relatadas e apesar do fato de que em muitos desses incidentes as RPAs serem pequenos aparelhos, geralmente com apenas 1 metro de diâmetro e pesando menos de 5 kg, não há dúvida que eles podem causar tremendos danos, desde danos ou destruição de propriedades, ferimentos graves em pessoas e até a morte em caso de incidente ou acidente grave. Colidir com outra aeronave pode resultar, entre outras coisas, no seguinte:

- A RPA pode ser sugada para um dos motores da aeronave que pode resultar em perda ou redução de empuxo e até um incêndio no motor;
- Pode impactar com a asa de uma aeronave que, dependendo da extensão do dano, pode resultar em parte da asa se desfazendo ou os detritos danificam algumas das

superfícies de controle, causando instabilidade ou incapacidade de mover os ailerons;

- O dispositivo pode até impactar com o cockpit, resultando possivelmente em um para-brisa danificado ou destruído gerando detritos, ou colidindo com outra parte da estrutura, danificando sensores, antenas e outros equipamentos essenciais;
- A tripulação do avião tripulado se distrai de ter que ficar vigiando continuamente, resultando em uma diminuição no monitoramento dos instrumentos da aeronave

Para tentar simular possíveis impactos e danos que podem ser causados, pesquisadores da Universidade de Dayton, nos EUA, realizaram simulações para mostrar os efeitos que resultariam desse acidente. Para a simulação de choque, foi utilizado um DJI Phantom 2, drone que pesa cerca de 1 kg já contando com a bateria, e uma asa de um avião comercial Mooney M20 se deslocando a 383 km/h. Apesar de ser um drone pequeno e extremamente leve se chocando contra um avião em velocidade bastante inferior à rapidez que aviões voam normalmente, os efeitos são assustadores.

O estrago causado pelo drone, que entra dentro da estrutura danificada da asa, pode afetar seriamente a estabilidade do avião atingido, causando acidentes. O impacto foi suficiente para danificar a longarina, uma importante peça da estrutura interna da asa. As colisões com pássaros durante o voo costumam causar estragos menos perigosos.

4 Metodologia e Análises

Um modelo numérico, nada mais é que uma representação simplificada da realidade, ou pelo menos uma tentativa, sustentada por uma estrutura de conceitos e hipóteses. Um modelo apresenta apenas uma visão ou cenário de um fragmento do todo. Normalmente, para estudar um determinado fenômeno complexo, criam-se vários modelos. Nesse trabalho, nós apresentamos apenas um modelo que tenta mensurar o risco de colisão entre uma RPA e um avião em proximidades do aeroporto, porém existem várias possibilidades para tentar chegar a esse resultado.

4.1 Dados

Para obtenção dos dados de aeronaves comerciais, utilizou-se o flightradar que mapeia a trajetória de aeronaves. Foram obtidos dados de voos com decolagens e pousos no aeroporto de Congonhas (CGH) pelo período completo de 1 dia, referentes ao dia 18 de Novembro de 2019. Esse mapeamento foi realizado em um espaço pré-definido que é o mesmo espaço utilizado como análise no modelo. São os voos que estão a uma distância entre 3 e 40 milhas náuticas da pista de pouso. Os dados foram armazenados em arquivo csv, no qual são lidos e utilizados como input no modelo apresentado posteriormente. As informações de voo utilizadas foram:

- `indicat` - Número que identifica o voo.
- `unix` - O tempo em segundos referente a posição capturada.
- `lat` - Latitude em coordenadas elipsoidais (WGS-84) e em graus.
- `lon` - Longitude em coordenadas elipsoidais (WGS-84) e em graus.
- `speed` - Velocidade da aeronave.
- `alt` - Altitude geométrica.

4.2 Introdução ao Modelo

Para toda colisão entre quaisquer dois objetos, temos um fato bem óbvio que é o que inicia toda a complexidade do nosso modelo, os dois objetos precisam estar na mesma posição ao mesmo tempo, isso é o que caracteriza uma colisão. Porém, saber essas informações, posição em todo instante de tempo, para ambos objetos estudados, avião tripulado e RPA, não é uma tarefa simples. Existem vários problemas que não nos fazem ter essa informação pronta, e isso que faz a necessidade da criação do nosso modelo, caso existisse, seria um simples problema. Para isso, são criadas hipóteses que contornam esses problemas e nos ajudam a obter essas informações de forma aproximada e eficiente para análise.

4.2.1 Principais Problemas

Abaixo, listamos os principais problemas encontrados para análise de risco dessa colisão

- Os dados obtidos com as posições e tempos da aeronave tripuladas são discretos, ou seja, temos alguns pontos. Existem instantes de tempos que sabemos com 100% de exatidão a posição da aeronave e existem instantes que não conseguimos afirmar.
- Não sabemos a posição inicial da RPA, quando a aeronave entra na região de possível colisão, não sabemos onde a RPA está.
- Não sabemos como varia o vetor velocidade, tanto em direção, como em módulo. Esse vetor que define a trajetória da RPA.
- Não sabemos qual a região do espaço

4.2.2 Hipóteses e suas Limitações

Aqui, definimos uma série de hipóteses para nosso modelo ser aplicado, ou seja, ser possível obter as informações que não conseguimos de forma mais realista possível, sem comprometer sua assertividade. Separamos as hipóteses em três visões: Espaço de Análise, Avião Tripulado, RPA e Dimensões.

4.2.2.1 Espaço de Análise

Precisamos saber qual região do espaço será analisado a colisão entre a RPA virtual e o avião tripulado. Para isso, primeiro definimos uma altura em que seria possível e consideravelmente provável da RPA estar. Com base no site <http://www.fab.mil.br/copa/meios>,

utilizando como referencia o modelo HERMES 900 que pode chegar até 9,144 km, consideramos uma altura de 10 km.

Além disso, como mencionado anteriormente, as trajetórias obtidas foram para uma região entre 3 e 40 milhas náuticas, ou seja, o espaço definido é a região entre dois cilindros de raio 3 e 40 milhas náuticas, centro na pista do aeroporto de Congonhas e altura 10 km.

4.2.2.2 Avião Tripulado

Para contornar o problema da discretização e sua baixa quantidade de pontos, a solução utilizada é a interpolação linear. Conforme mencionado anteriormente, a trajetória do avião nos instantes iniciais de pouso e decolagem se aproximam de uma reta, assim, essa interpolação não causam muitas distorções em sua trajetória real, além de serem corrigidas pelos pontos reais obtidos. Essa interpolação é feita dividindo em tempos iguais e aceleração constante, ou seja, calculando a velocidade média como sendo a média aritmética, e a posição do novo ponto dado por:

$$P_m = P_1 + \frac{3V_1 + V_2}{V_1 + V_2} \cdot \frac{P_2 - P_1}{4} \quad (4.1)$$

Onde P_1 e P_2 são os pontos consecutivos e P_m é o ponto gerado.

4.2.2.3 RPA

Com respeito a RPA, é necessário realizarmos várias considerações pois não temos nenhuma informação precisa, o que temos de mais concreto que nos aproxima da realidade são as limitações físicas de uma RPA.

Para determinar a posição inicial de forma aleatória, tem-se as dimensões do espaço de análise que é intervalo de latitudes, intervalo de longitudes e altitude de 0 a 10 km. As 3 dimensões foram divididas em 100.000 partes, gerando 100.000 opções para cada coordenada. Assim, randomicamente é escolhido um número de 0 a 100.000 três vezes e atribuído cada um a uma divisão de coordenada, ao final, temos nossas 3 coordenadas que definem a posição inicial da RPA. Após gerar os 3 valores entre 0 e 100.000 (N_1 , N_2 e N_3), podem ser substituídos nas seguintes equações para cálculo da posição inicial:

$$latitude = latitude_{min} + N_1 \cdot \frac{latitude_{max} - latitude_{min}}{100000} \quad (4.2)$$

$$longitude = longitude_{min} + N_2 \cdot \frac{longitude_{max} - longitude_{min}}{100000} \quad (4.3)$$

$$altitude = N_3 \cdot \frac{10000}{100000} \text{ metros} \quad (4.4)$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \{N_1, N_2, N_3\} \leq 100000 \quad (4.5)$$

Outra consideração que é feita em nosso modelo, é considerar a velocidade da RPA constante em módulo e igual a sua velocidade máxima de uso, no caso do modelo usado como referência, HERMES 900, utilizamos igual a 220 quilômetros por hora. Para definirmos o sentido do nosso vetor e poder calcular o próximo ponto, primeiro definimos a primeira direção de velocidade. Utilizando coordenadas esféricas, basta definir dois ângulos, o ângulo θ que é o ângulo que a projeção do vetor velocidade no plano do solo (latitude x longitude) faz com o eixo das longitudes, e o ângulo φ que é o ângulo que o vetor velocidade faz com o eixo correspondente a altitude.

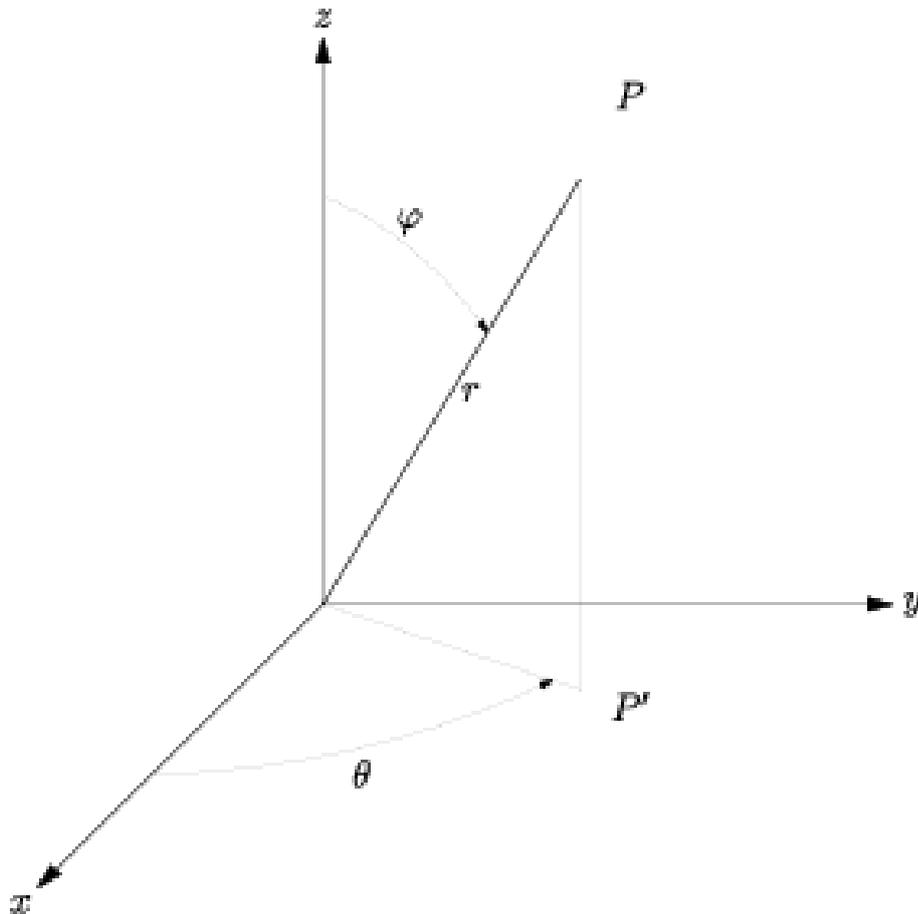


FIGURA 4.1 – Coordenadas Esféricas

Para determinar a direção inicial, discretiza ambos os ângulos em 100000 partes e define aleatoriamente os dois primeiros ângulos, semelhante a posição inicial, defini-se

N_4, N_5 aleatórios, conforme mostre as equações abaixo:

$$\theta_{inicial} = N_4 \text{ graus} \quad (4.6)$$

$$\varphi_{inicial} = N_5 \text{ graus} \quad (4.7)$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \{N_4, N_5\} \leq 100000 \quad (4.8)$$

Após definir a posição inicial e velocidade inicial, podemos calcular a posição da RPA no instante seguinte, basta utilizar equações de cinemática simples como mostrado abaixo:

$$\textit{latitude} = \textit{latitude}_i + \frac{\textit{velocidade} \cdot \textit{sen}\varphi_i \cdot \textit{cos}\theta_i \cdot \Delta t}{R_t} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.9)$$

$$\textit{longitude} = \textit{longitude}_i + \frac{\textit{velocidade} \cdot \textit{sen}\varphi_i \cdot \textit{sen}\theta_i \cdot \Delta t}{R_t} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.10)$$

$$\textit{altitude} = \textit{altitude}_i + \textit{velocidade} \cdot \textit{cos}\varphi_i \cdot \Delta t \quad (4.11)$$

Onde R_t é o raio da Terra, igual a 6371 km, e Δt é o intervalo de tempo entre dois pontos, depende da discretização dos pontos gerados na interpolação do avião, afinal, a quantidade de pontos gerados para a RPA é de acordo com os pontos do avião tripulado. Coloca-se como condição a RPA não sair da região de análise.

Com a nova posição da RPA, precisa-se calcular os novos ângulos que definem o sentido do vetor velocidade, responsável por definir a trajetória da RPA. Afinal, o vetor velocidade é constante apenas em módulo. Para isso, optou-se em repetir procedimento semelhante ao primeiro par de ângulos gerados, porém, no intuito de suavizar sua trajetória sem variações muito bruscas, limitou-se mudanças de no máximo 90 graus entre dois ângulos consecutivos, assim, podemos obter dois números aleatório entre 0 e 180 e equacionar nossos ângulos da seguinte forma:

$$\theta_{seguinte} = \theta_{anterior} + N_6 - 90 \text{ graus} \quad (4.12)$$

$$\varphi_{seguinte} = \varphi_{anterior} + N_7 - 90 \text{ graus} \quad (4.13)$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \{N_6, N_7\} \leq 180 \quad (4.14)$$

4.2.3 Dimensões

Para analisarmos a colisão entre a RPA e a aeronave tripulada, é preciso levar em conta suas dimensões em nosso modelo. Dessa forma, consideramos a RPA como sendo um objeto pontual se comparado com o avião e as dimensões do avião, e para o avião, consideramos uma aproximação de 1000 pés em altitude e 3 milhas náuticas no plano. Que é considerado uma região de perigo de colisão entre as aeronaves.

Com os dados, definimos nossa região como colisão o cilindro de altura igual a 2000 pés, raio de 3 milhas náuticas com seu eixo coincidindo com o eixo Z (altitude) e centro no ponto obtido pelos das aeronaves. Essa é a região o qual caso a RPA virtual entre, seja considerado colisão.

4.3 Colisão

Como citado anteriormente, a colisão acontece quando os dois objetos encontram-se na mesma posição ao mesmo tempo, mas isso caso os dois fossem considerados pontuais. Devido as dimensões do avião, basta a RPA está dentro da região ocupada pelo avião. Assim, podemos equacionar que caso as seguintes inequações sejam satisfeitas para o mesmo instante de tempo, uma colisão ocorreu:

$$R_t \cdot \sqrt{(\textit{latitude}_{\textit{avião}} - \textit{latitude}_{RPA})^2 + (\textit{longitude}_{\textit{avião}} - \textit{longitude}_{RPA})^2} \cdot \frac{\pi}{180} \leq 5,556km \quad (4.15)$$

$$| \textit{altitude}_{\textit{avião}} - \textit{altitude}_{RPA} | \leq 304,8\textit{metros} \quad (4.16)$$

Assim, essas inequações são verificadas para todo intervalo de tempo, analisando todos os pontos que foram obtidos, do avião obtido via flightradar e interpolação, e RPA obtido pelo método criado e mencionado anteriormente.

4.4 Tráfego de Aeronaves

Para simular a condição de tráfego aéreo, são selecionados 15 voos de decolagem e 15 voos de de aterrissagem para um período de 1 hora de forma aleatória em nossa base, pois o aeroporto de Congonhas apresenta uma média de 30 operações por hora. Esses voos são intercalados igualmente, ou seja, de 2 em 2 min. Já para o caso de RPAs, foi realizado uma estimativa com base nos estudos de (WIELAND et al., 2013) e (BALAKRISHNAN; CHANDRAN, 2017), onde apresentou uma estimativa de 30000 operações com RPA por dia em 2030 nos EUA. Como mostrado na seção anterior, o aeroporto de

congonghas concentra cerca de 10% do tráfego do Brasil. Foi definido então 3 casos de tráfego de RPAs, 30 RPAs por hora para o caso alto, 17 para o caso intermediário e 5 para o caso baixo.

4.5 Aplicação do Método

Aqui, apresenta-se resumidamente os procedimentos explicados anteriormente e o passo a passo para aplicação do método.

1. Para cada avião tripulado selecionado de forma aleatória na base, que está no espaço de análise, próximo ao aeroporto de congonghas, suas informações foram obtidas.
2. Em seguida, são gerados mais pontos através da interpolação (dividindo em tempos iguais), pois a quantidade de pontos fornecida pelo flightradar é pouca e muito espaçada. O método para cálculo desses pontos é apresentado na seção anterior.
3. Agora, para RPA é definido sua posição inicial de forma aleatória dividindo a região de análise em cada eixo em 100 mil partes como apresentado anteriormente.
4. Após definir a posição inicial, é definido seu vetor velocidade, módulo é pré-definido em 220 km/k e direção de forma aleatório discretizando em intervalos de 100 mil pares como mostrado na seção anterior. Precisa-se da velocidade para calcular o próximo ponto
5. Calcula-se a posição seguinte para a RPA de acordo com o intervalo de tempo usado para os pontos do avião. Lembrando que as RPAs são espaçadas em intervalos de tempo iguais de acordo com o tráfego estabelecido, foi dividido em 3 casos.
6. Em seguida, calcula-se os novos ângulos do vetor velocidade, lembrando que existe a limitação deles variarem no máximo 90 graus. E com isso, novamente calculado a posição do ponto seguinte. Isso se torna um processo iterativo no qual é calculado toda a trajetória da RPA, ou seja, tem-se os pares de pontos avião tripulado e RPA para vários instantes de tempo
7. Com as posições de ambos nos mesmos instantes de tempo, é possível calcular a distância entre eles e se a RPA encontra-se dentro da região de colisão, ou seja, se segundo o nosso modelo ocorreu uma colisão.

Esse método foi apresentado para um número de operações em um espaço de uma hora, tanto para aviões tripulados quanto para as RPAs. Porém, esse processo é realizado várias

vezes para analisar o possível espaço amostral de tráfego e obter valores médios próximos da realidade. Só assim, é possível calcular a probabilidade na qual é dada por

$$Probabilidade = \frac{\textit{Numero de Colisoes}}{\textit{Numero de iteracoes} \cdot \textit{Numero de RPAs criadas}} \quad (4.17)$$

5 Resultados e Discussões

5.1 Resultados

Foi realizado os cálculos do método proposto no capítulo anterior. Os dados obtidos foram interpolando os dados dos aviões duas vezes, onde 2 pontos consecutivos obtidos originam mais 3 pontos entre eles. Além disso, foi analisado para os 3 casos de tráfego de RPA.

Abaixo, tem-se uma visão mais geral dos resultados obtidos

TABELA 5.1 – Resumo dos dados obtidos

Tráfego Avião (Operações/Hora)	Tráfego RPA (Operações/Hora)	Número de Colisões	Probabilidade
30	5	236	0,0472
30	17	380	0,0224
30	30	926	0,0309

Além disso, foi analisado o número de colisões exata, diminuindo o espaço de colisão. Considerou-se um diâmetro de 120 metros (com base na maior envergadura de aeronave tripulada) e diferença de altura de 30 metros. Assim, foi obtido o número de colisões para os casos operações por hora das RPAs, obtivemos o seguinte resultado

TABELA 5.2 – Resumo dos dados para colisão exata com aeronave

Tráfego Avião (Operações/Hora)	Tráfego RPA (Operações/Hora)	Número de Colisões	Probabilidade
30	5	1	2,00E-04
30	17	2	1,18E-04
30	30	5	1,67E-04

Para o cálculo de probabilidade, é somado o número de colisões e dividido pelo número de RPAs e número de iterações realizadas, ou seja, cenários simulados. Conforme equação

apresentado no capítulo anterior.

Foi realizado esses cálculos para diferentes cenários pensando na possível evolução desse tráfego ao longo do tempo, principalmente de RPAs já que o aeroporto de Congonhas se encontra em suas limitações de tráfego de aeronaves sem possibilidade de expansão. Devido a isso, fixou o tráfego de aviões como sendo o seu valor médio atualmente.

5.2 Visão geográfica

Para uma melhor visualização das colisões no espaço, foi gerado gráficos de calor com os valores de latitude e longitude e o número de colisões nesse espaço.

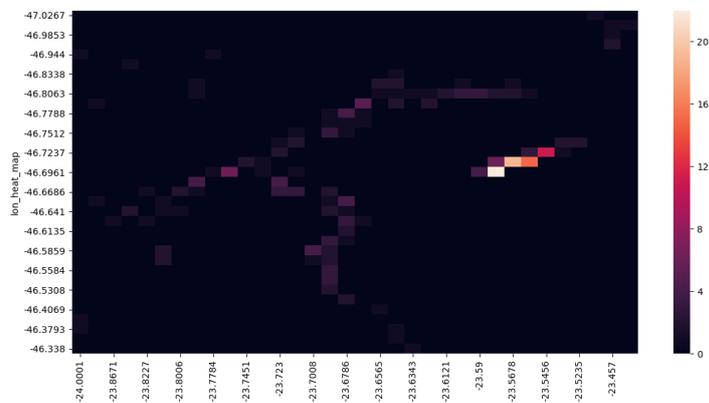


FIGURA 5.1 – Heatmap para 5 operações por hora de RPAs

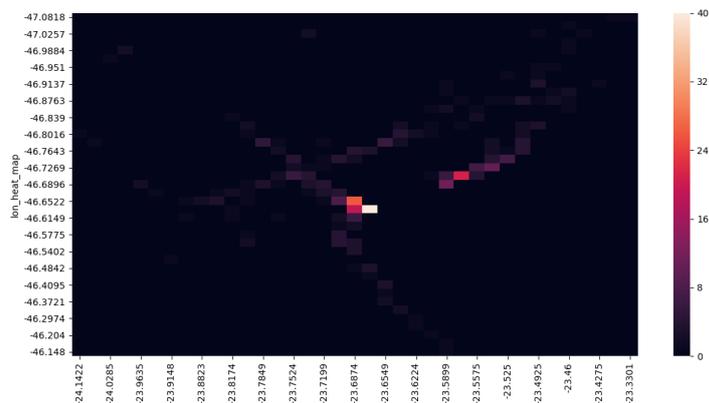


FIGURA 5.2 – Heatmap para 17 operações por hora de RPAs

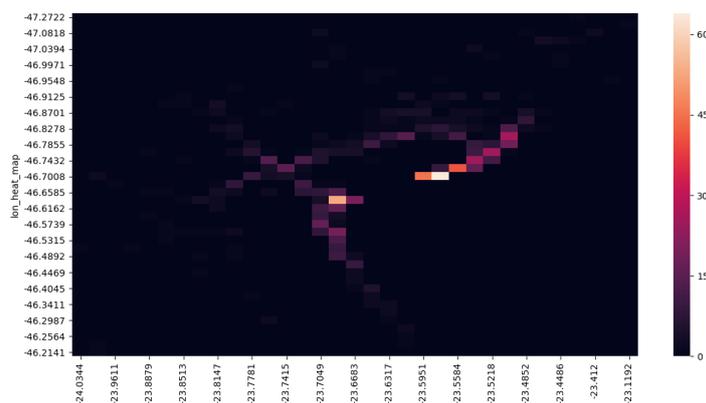


FIGURA 5.3 – Heatmap para 30 operações por hora de RPAs

5.3 Conclusão

Perceba que o número calculado para a probabilidade é um número relativamente considerável, o que faz sentido dado o imenso tráfego em regiões próximas ao aeroporto, pouquíssimos casos de colisões são encontrados na literatura, até porque é um espaço que vem sendo cada vez mais controlado e o tráfego de RPAs e seu uso em operações próximas ao aeroporto está em evolução, além disso, o uso de RPAs mais potentes que consigam alcançar alturas consideráveis, comparando com as de aeronaves tripuladas, ainda é bem baixo na realidade brasileira.

Segundo notícias da ANAC, diante das ocorrências com drones nas cercanias de aeroportos, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) aumentou as restrições de voo ao redor do aeroporto de Congonhas, aeródromo que foi alvo de três ocorrências, uma no ano de 2017, outra em 2018 e mais uma em 2019. A restrição atinge um raio de 5,4 km – o que equivale a três milhas náuticas (3 NM) acima de 30 metros de altura - ao redor do aeroporto e impede que operações de quaisquer naturezas sejam realizadas.

São medidas como essas que devem ser analisadas baseados em análises como mostrado em nosso problema, talvez seja uma medida extremamente segura, como foi possível ver no gráfico, nem todas as regiões possuem um alto risco de colisão, perceba que a maioria das colisões acontecem regiões de aproximação, próximo a direção da pista, talvez seja possível permitir operações um pouco mais próximas nas laterais da pista, onde o tráfego de aviões é bem inferior. Definindo uma região não circular mas talvez particionada, assim como as zonas de proteção para edificações, em que são definidas de acordo com a orientação da pista.

Em nossa análise e método de cálculo houveram diversas considerações e variáveis de modelo que podem ser alterados impactando o resultado, como o nível de discretização dos

ângulos da velocidade da RPA, os pontos obtidos do avião via flightradar, região de análise para definição da posição inicial, quantidade de RPAs criadas, número de voos e limitações de mudança de trajetória da RPA. Todos esses fatores podem ser facilmente modificados sem muito questionamento, afinal, são parâmetros que tiveram que ser escolhidos baseado na precisão da análise e bom senso sobre possíveis situações reais, é válido realizar diversas outras análises mudando esses parâmetros sempre comparando entre si os resultados e o tanto que cada parâmetro desse pode influenciar, seria uma análise mais detalhada e precisa desse movimento que não foi apresentado neste presente trabalho

Referências

BALAKRISHNAN, H.; CHANDRAN, B. A distributed framework for traffic flow management in the presence of unmanned aircraft. In: ATM SEMINAR. [S.l.], 2017.

FONTAINE, O.; MARTINETTI, A.; MATEOU, S. M. Remote pilot aircraft system (rpas): just culture, human factors and learnt lessons. Chemical engineering transactions, v. 53, p. 205–210, 2016.

LÍKAŘ, P.; HLEK, D.; LALIŠ, A. Use of remotely piloted aircraft systems in airport operations. Acta Avionica, v. 18, n. 2, 2016.

MATSUMOTO, T. T. Modelagem e simulação de veículo aéreo não tripulado autônomo para avaliação de risco de colisão com outras aeronaves. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

ROCHA¹, G. C.; BOURGUIGNON, V. H. O. Método de prescrição de navegação baseada em risco para rpa. 2019.

TEIXEIRA, A. B. CNS/ATM: Conceitos e Tecnologias. 2009. Disponível em: <http://www.dcabr.org.br/download/cursos-eventos/eventos/eventos-realizados/2009-/seminario-hst-22-09-2009/2_CNS-ATM_Baganha.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019.

WIELAND, F.; SHARMA, R.; WATULAK, D. Predicting future unmanned aerial system flights. In: 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. [S.l.: s.n.], 2013. p. 4364.

