



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

# SISTEMA EMBARCADO PARA TESTE DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS EM AMBIENTES CONTROLADOS

VIVIANO DE SOUSA MEDEIROS

JOÃO PESSOA-PB  
Janeiro-2017

Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Informática  
Programa de Pós-Graduação em Informática

Sistema Embarcado para Teste de Veículos Aéreos não  
Tripulados em Ambientes Controlados

Viviano de Sousa Medeiros

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Informática.

Área de Concentração: Ciência da Computação  
Linha de Pesquisa: Sinais, Sistemas Digitais e Gráficos

Alisson Vasconcelos de Brito  
(Orientador)

João Pessoa, Paraíba, Brasil

© Viviano de Sousa Medeiros, 21 de Janeiro de 2017

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

M488s Medeiros, Viviano de Sousa.

Sistema embarcado para teste de veículos aéreos não tripulados em ambientes controlados / Viviano de Sousa Medeiros. - João Pessoa, 2017.

124 f. : il.

Orientação: Alisson Vasconcelos de Brito.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CI.

1. Informática. 2. Sistemas Embarcados. 3. Padrões de Comportamento - Estabilidade. I. Brito, Alisson Vasconcelos de. II. Título.

UFPB/BC



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA



Ata da Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado de VIVIANO DE SOUSA MEDEIROS, candidato ao título de Mestre em Informática na Área de Sistemas de Computação, realizada em 27 de janeiro de 2017.

1 Aos vinte e sete dias do mês de janeiro, do ano de dois mil e dezessete, às quatorze horas,  
2 no Centro de Informática da Universidade Federal da Paraíba, em Mangabeira, reuniram-se  
3 os membros da Banca Examinadora constituída para julgar o Trabalho Final do Sr. Viviano  
4 de Sousa Medeiros, vinculado a esta Universidade sob a matrícula nº 2015103367,  
5 candidato ao grau de Mestre em Informática, na área de "Sistemas de Computação", na linha  
6 de pesquisa "Sinais, sistemas digitais e gráficos", do Programa de Pós-Graduação em  
7 Informática, da Universidade Federal da Paraíba. A comissão examinadora foi composta  
8 pelos professores: Alisson Vasconcelos de Brito (PPGI-UFPB), Orientador e Presidente da  
9 Banca, Tiago Pereira do Nascimento (PPGI-UFPB), Examinador Interno ao Programa,  
10 Marcelo Augusto Costa Fernandes (UFRN), Examinador Externo ao Programa. Dando início  
11 aos trabalhos, o Presidente da Banca, cumprimentou os presentes, comunicou aos mesmos  
12 a finalidade da reunião e passou a palavra ao candidato para que o mesmo fizesse a  
13 exposição oral do trabalho de dissertação intitulado "Sistema embarcado para teste de  
14 veículos aéreos não tripulados em ambientes controlados". Concluída a exposição, o  
15 candidato foi arguido pela Banca Examinadora que emitiu o seguinte parecer: "aprovado".  
16 Do ocorrido, eu, Clauriton de Albuquerque Siebra, Coordenador do Programa de Pós-  
17 Graduação em Informática, lavrei a presente ata que vai assinada por mim e pelos  
18 membros da banca examinadora. João Pessoa, 27 de janeiro de 2017.

Prof. Dr. Clauriton de Albuquerque Siebra

Prof. ALISSON VASCONCELOS DE BRITO  
Orientador (PPGI-UFPB)

Prof. TIAGO PEREIRA DO NASCIMENTO  
Examinador interno ao Programa (PPGI-UFPB)

Prof. MARCELO AUGUSTO COSTA FERNANDES  
Examinador externo ao Programa (UFRN)

## Resumo

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema embarcado compatível com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) controlados remotamente por rádio, capaz de controlar um VANT para a realização de um voo autônomo em ambiente controlado. Por outro lado, o sistema também monitora e armazena todos os dados de voo para posterior recuperação e análise. Isto permite identificar padrões de comportamento estável de um veículo, identificar e quantificar ocorrências de instabilidade e mensurar a estabilidade de voo de um VANT por meio do monitoramento e análise das suas informações do estado, pois permitem verificar se um veículo apresenta comportamento compatível ou não com esse padrão de comportamento estável. A solução proposta permite a replicação de experimentos para realizar a caracterização de VANTs. Nas experiências realizadas, o veículo foi controlado utilizando os canais de rádio e todos os dados de voo foram armazenados. Os distúrbios foram adicionados ao veículo durante os testes e o sistema foi capaz de detectá-los. Os resultados obtidos na presente pesquisa confirmam que é possível identificar esse padrão de comportamento, bem como avaliar a ocorrência de distúrbios em voos que resultaram fugas a esse padrão, e diante de acidentes envolvendo VANTs, os dados armazenados do estado do veículo podem ser usados para ajudar a elucidar as causas.

**Palavras-chave:** Veículos Aéreos Não Tripulados, Controle, Sistemas Embarcados, Padrões de Comportamento de Estabilidade

## **Abstract**

This work proposes the development of an embedded system compatible with any Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remotely controlled by radio, which is able to perform the control of an UAV enabling an autonomous flight in a controlled environment, and monitor and store all flight data for later retrieval and analysis. This allows the identification of patterns of stability behavior of a vehicle, identify and quantify the instabilities occurred in the flight. Measure the flight stability of a UAV by means of monitoring and analysis of its state informations. This informations for allows to verify if the vehicle presents compatible behavior or not with this stable behavior pattern. The proposed solution allows the replication of experiments in order to perform the characterization of UAVs. In the presented experiments, the vehicle was controlled using remote radio control channels and all flight data was stored. Disturbances were added to the vehicle during testings and the system was able to detect them. The obtained results in this work confirme that is possible to identify this behavior pattern, as well evaluate the occurrence of disturbances in flights that culminates in pattern leaks, and aid the discovery of the causes of accidents involving UAVs using the stored vehicle data.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicle, Control, Embedded system, behavior pattern of stability

## Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela vida, pela oportunidade de estudar no curso de mestrado, agradeço pela sabedoria divina que me levou a concluir com êxito essa etapa da minha carreira acadêmica. Agradeço também pela minha família estar sempre presente em minha vida, pelos meus pais Silvanio e Ivaneide, que em condição humildade e simplicidade tanto se esforçaram para que eu estudasse, avançasse e permanecesse estudando até os dias atuais. Agradeço a todos da minha família: irmãos, tios, Famílias Sousa, Medeiros e Santana, na pessoa de José Medeiros (Dedé) e Diulinda agradeço imensamente a todos da minha família e louvo a Deus pela vida de cada um deles. E como família agradeço à minha noiva Monisy, sua mãe Dona Mônica e as pessoas dessa nova família que passei a fazer parte.

Agradeço à CAPES pelo financiamento da minha pesquisa, à UFPB pelo suporte e estruturas que me permitiram desenvolver meus conhecimentos. Aos meus professores, em especial ao professor Alisson Brito (Orientador) que tanto se dedicou ao meu trabalho em todas as dimensões possíveis. Aos meus outros professores da UFPB que na pessoa do Prof. Tiago Nascimento quero cumprimentar e agradecer a todos, bem como a todos os funcionários do Campus V da UFPB.

Ao Laboratório de Sistemas Embarcados e Robótica (LaSER) da UFPB que foi tão importante durante todo o mestrado. As meus colegas do LaSER que em tantos momentos trabalharam junto comigo: Tiago Werley, Ramon Medeiros, Renno Vale, José Barros, Luis Felipe, André, Carlos Eduardo (Novinho), Leonardo, Gabriel Basso, Felipe Cunha, Yuri Gouveia, Welton Tiago, Túlio, Tiago Bezerra, Abraão Alisson, Frank, Maelso, Renato, Zaqueu, Moisés, Hálamo, Daniel, Diego, Sarah, Augusto, Claudio do LAVID e tantos outros.

Agradeço a algumas pessoas ligadas ao meu curso de graduação que muito me apoiaram no início do curso de mestrado: em primeiro lugar agradeço a Francisco Genemes, primeiro incentivador, em segundo lugar agradeço à Professora Maria José Alves e ao Professor Francisco Daladier Jr. ambos do IFPB-Campus Cajazeiras, na pessoa deles quero agradecer aos outros professores e colegas do IFPB. Enfim, esse trabalho não é somente meu, mas de todos aqueles que direta ou indiretamente, de alguma maneira contribuíram para que eu obtivesse êxito. Meu muito obrigado a todos, Deus ilumine a cada um de vocês.

# Conteúdo

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivação . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Objetivos . . . . .   | 3         |
| 1.2.1    | Objetivos Específicos . . . . .   | 3         |
| 1.3      | Metodologia . . . . .   | 4         |
| 1.4      | Organização do Trabalho . . . . .   | 5         |
| <b>2</b> | <b>Veículos Aéreos Não Tripulados</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1      | Controle de VANTs . . . . .   | 9         |
| 2.2      | Controladoras de Voo . . . . .  | 10        |
| 2.3      | Monitoramento do estado de VANTs . . . . .  | 13        |
| <b>3</b> | <b>Trabalhos Relacionados</b>   | <b>15</b> |
| <b>4</b> | <b>Sistema Embarcado para Teste de Veículos Aéreos não Tripulados em Ambientes Controlados</b>                        | <b>21</b> |
| 4.1      | Arquitetura . . . . .   | 21        |
| <b>5</b> | <b>Experimentos e Resultados</b>  | <b>26</b> |
| 5.1      | Organização dos Experimentos . . . . .  | 26        |
| 5.1.1    | Experimento utilizando Raspberry Pi no sistema de controle externo e monitoramento via API Dronekit . . . . .         | 27        |
| 5.1.2    | Experimento utilizando Arduino Mega no sistema de controle externo e monitoramento via sensoramento externo . . . . . | 41        |
| 5.1.3    | Conclusão do Experimento . . . . .  | 51        |



---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.1.4    | Experimento usando Intel Genuino 101 no sistema de Controle e Monitoramento com sensoriamento externo . . . . . | 51         |
| <b>6</b> | <b>Considerações Finais e Trabalhos Futuros</b>   | <b>102</b> |
| 6.0.1    | Trabalhos Futuros . . . . .   | 103        |
|          | Referências Bibliográficas . . . . .  | 113        |

# **Lista de Símbolos**

# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Posicionamento do VANT nos eixos X, Y e Z . . . . .   | 11 |
| 4.1  | Arquitetura do Sistema Embarcado . . . . .  | 22 |
| 5.1  | Arquitetura do sistema proposto para este experimento . . . . .   | 33 |
| 5.2  | Esquema de montagem do VANT . . . . .   | 34 |
| 5.3  | Dados de voo com hélices de fibra de carbono . . . . .  | 36 |
| 5.4  | Dados de voo com hélices de nylon . . . . .   | 37 |
| 5.5  | Dados de voo relativos à inclinação frontal . . . . .   | 38 |
| 5.6  | Dados de voo com relativos à inclinação lateral . . . . .   | 39 |
| 5.7  | Dados de média e desvio padrão de inclinação lateral e frontal de todos os voos                         | 40 |
| 5.8  | Arquitetura do sistema usando Arduino Mega . . . . .  | 44 |
| 5.9  | Esquema de conexões entre o Sistema Embarcado e o VANT . . . . .  | 46 |
| 5.10 | Voo realizado durante experimento em laboratório. . . . .   | 47 |
| 5.11 | Monitoramento da Aceleração nos eixos X, Y e Z durante um voo . . . . .                                 | 49 |
| 5.12 | Média Móvel por 10 da aceleração no eixo X . . . . .  | 50 |
| 5.13 | Arquitetura do sistema embarcado . . . . .  | 55 |
| 5.14 | Esquema de conexões do sistema . . . . .  | 56 |
| 5.15 | Aceleração resultante em X, Y e Z . . . . .   | 70 |
| 5.16 | Aceleração resultante em X, Y e Z utilizando o Filtro de Kalman . . . . .                               | 71 |
| 5.17 | Média das acelerações resultantes dos voos estáveis . . . . .   | 73 |
| 5.18 | Comparação entre os voos instáveis e a média das acelerações resultantes<br>dos voos estáveis . . . . . | 74 |
| 5.19 | Desvio padrão de todos os voos em relação à aceleração resultante em X, Y<br>e Z . . . . .              | 75 |

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.20 | Aceleração em X . . . . .   | 77 |
| 5.21 | Aceleração em Y . . . . .   | 78 |
| 5.22 | Aceleração em Z . . . . .   | 80 |
| 5.23 | Aceleração em X utilizando o Filtro de Kalman . . . . .                           | 81 |
| 5.24 | Aceleração em Y utilizando o Filtro de Kalman . . . . .                           | 82 |
| 5.25 | Aceleração em Z utilizando o Filtro de Kalman . . . . .                           | 84 |
| 5.26 | Velocidade angular em X . . . . .   | 87 |
| 5.27 | Velocidade angular em Y . . . . .   | 89 |
| 5.28 | Velocidade angular em Z . . . . .   | 90 |
| 5.29 | Velocidade angular em X utilizando o Filtro de Kalman . . . . .                   | 92 |
| 5.30 | Velocidade angular em Y utilizando o Filtro de Kalman . . . . .                   | 94 |
| 5.31 | Velocidade angular em Z utilizando o Filtro de Kalman . . . . .                   | 96 |
| 5.32 | Velocidade angular resultante em X, Y e Z . . . . .                               | 98 |
| 5.33 | Velocidade angular resultante em X, Y e Z utilizando o Filtro de Kalman . . . . . | 99 |

# Lista de Tabelas

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.1  | Atributos do veículo fornecidos pela API Dronekit . . . . .                 | 29 |
| 5.2  | Dados armazenados pelo sistema de controle externo na caixa preta . . . . . | 31 |
| 5.3  | Especificações do VANT . . . . .  | 35 |
| 5.4  | Média e Desvio Padrão dos dados de inclinação lateral e frontal . . . . .   | 60 |
| 5.5  | Dados de voo do sensoramento . . . . .                                      | 61 |
| 5.6  | Commands e estados armazenados na Caixa Preta . . . . .                     | 61 |
| 5.7  | Especificação dos periféricos adicionados ao VANT . . . . .                 | 62 |
| 5.8  | Especificação do VANT . . . . .   | 63 |
| 5.9  | Instruções PWM enviadas para a Controladora de Voo . . . . .                | 64 |
| 5.10 | Parâmetros de voo do VANT . . . . .   | 64 |
| 5.11 | Dados de voo do sensoramento . . . . .                                      | 65 |
| 5.12 | Especificação dos periféricos adicionados ao VANT . . . . .                 | 65 |
| 5.13 | Commands e estados armazenados na Caixa Preta . . . . .                     | 66 |
| 5.14 | Funções executadas pelo controle externo . . . . .                          | 67 |
| 5.15 | Parâmetros de voo do VANT . . . . .   | 68 |
| 5.16 | Especificação do VANT . . . . .   | 68 |
| 5.17 | Análise dos voos . . . . .  | 69 |

# **Lista de Códigos Fonte**

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), também chamados Aeronaves Não Tripuladas, ou simplesmente Drones, estão cada vez mais inseridos no contexto do mundo atual, se fazendo presente em diversas áreas da ciência, tanto no contexto militar, quanto civil, desempenhando as mais variadas funções.

Diante dos crescentes riscos à segurança das pessoas em terra e a bordo de aviões convencionais, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) lançou uma resolução denominada ICA 100-40/2015 intitulada “Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”, com regras para a regulamentação de VANTs para uso integrado no espaço aéreo nacional no âmbito civil. Cada nação possui suas próprias regras de aviação, o Brasil está definindo as suas regras, assim como os Estados Unidos possui suas próprias leis de aviação civil, porém existe uma Convenção sobre Aviação Civil Internacional de dezembro de 1944 (Documento 7300 da Organização de Aviação Civil Internacional - OACI) que serve de base para as leis de aviação nos Estados Signatários, como é o caso do Brasil [DECEA 2015].

Esse documento define a nomenclatura oficial a ser considerada para VANTs, que deixa de ser chamado "veículo" para ser denominado "aeronave", determina uma classificação dessas aeronaves quanto ao seu peso, define também as regras de utilização do espaço aéreo para fins que envolvam VANTs. No documento ficam expressas as regras de solicitação de autorização para pilotar VANTs, bem como questões de segurança operacional e questões

legais que envolvam o uso dos drones. Um dos pontos mais importantes regulamentados diz respeito às condições de operações dos VANTs a baixas altitudes, determinando limites máximos para altitude e velocidade de deslocamento para as diversas classificações de VANTs, bem como as distâncias mínimas em relação a aglomerações de pessoas, edifícios, casas, construções, veículos etc. Define também a distância mínima exigida entre o espaço para a realização de voos com VANT e aeródromos e rotas de aeronaves conhecidas. Os detalhes de cada implementação podem ser visualizadas em [DECEA 2015].

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) estão incorporados em um ambiente operacional complexo com muitas variáveis a considerar quando entram em operação. O simples fato de ser um veículo aéreo exige daqueles que o projetam e dos sistemas que os operam uma preocupação justificada pelo fato de que uma pequena falha ser capaz de causar sérios danos ao equipamento e às pessoas ao seu redor. Assim, vários pesquisadores estão investigando maneiras de projetar VANTs cada vez mais seguros, por exemplo, [?] [Dawei e Baoan 2014] [Uhlig, Bhamidipati e Neogi 2006] [Barry, Majumdar e Tedrake 2012] [Uhlig, Bhamidipati e Neogi 2006].

Segurança pode ser definida como um estado ou lugar no qual você está seguro e não enfrenta perigo ou risco. No caso de VANTs, um veículo pode ser definido como seguro se estiver em um estado em que não pode causar ou sofrer qualquer perigo ou risco à integridade de pessoas e bens em torno dele, ou a ele próprio. Muitos sistemas de controle de VANTs são limitados por seus pilotos, que reagem de acordo com o contato visual com o veículo [Barry, Majumdar e Tedrake 2012]. No entanto, esta dependência de contato visual resulta em vulnerabilidades, exigindo um sistema de monitoramento das condições de voo para diagnóstico, prevenção de acidentes e análise de dados para elucidar causas de acidentes após terem ocorrido.

O Conselho de Ciência do Departamento de Defesa dos EUA (DoD) conduziu uma pesquisa que levou a um relatório em 2004, mostrando que a taxa aceitável de acidentes com VANTs é de cerca de 32 por 100.000 horas de voo, em comparação com 1 por 100.000 horas de voo para veículo pequenos tripulados e cerca de 0,01 por 100.000 horas de voo para grandes aeronaves [Loh, Bian e Roe 2006]. Isto significa que a taxa aceitável de acidentes para VANTs é aproximadamente 3.200 vezes maior do que para aviões grandes. Apesar da maior tolerância para os VANTs, a taxa aceitável é bastante baixa, reforçando a necessidade



de buscar soluções que ajudem a minimizar acidentes e esclarecer suas causas.

Ao contrário dos aviões de passageiros e de outros aviões tripulados, os VANTs não oferecem qualquer risco para as pessoas a bordo, mas os acidentes envolvendo-os também são perigosos porque podem danificar outras aeronaves no ar e as pessoas e propriedades em uma área próxima [Uhlig, Bhamidipati e Neogi 2006]. Apesar de oferecer menos riscos, a frequência de acidentes é alta neste tipo de veículo, o que torna necessário o uso de tecnologias e estratégias que ajudem a reduzir a ocorrência de acidentes e ajudem a elucidar suas causas, semelhante ao que ocorre com aeronaves tripuladas, tornando-se VANTs seguros.

Diante do atual contexto de segurança envolvendo VANTs o presente trabalho vem a contribuir com a apresentação de uma abordagem de teste e análise de VANTs em ambientes controlados, por meio do desenvolvimento de um sistema embarcado para a execução de repetidas rotinas de voo para monitoramento e a avaliação do comportamento do veículo através da análise dos dados coletados. Uma outra contribuição do presente trabalho é a coleta e o armazenamento dos dados de voo do veículo, assemelhando-se ao sistema de caixa preta dos aviões convencionais, pois a análise dos dados de um voo que sofreu um acidente pode ajudar a elucidar as causa do acidente ocorrido. Assim, os testes podem tornar os veículos mais seguros a partir da avaliação de seu desempenho, bem como as causa de acidentes podem ser elucidadas a partir da análise dos dados armazenados na caixa preta.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é propor uma abordagem de teste e análise de VANTs em ambientes fechados e controlados, que possibilite a detecção de comportamentos que possam levar a situações não seguras.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, são listados:

- O desenvolvimento de um sistema embarcado para a execução de repetidas rotinas de voo para monitoramento e a avaliação do comportamento do veículo através da coleta e análise de dados coletados.

- Desenvolver um componente eletrônico que possa ser acoplado a qualquer VANT que armazene os dados para análises posteriores ao voo (Caixa Preta).
- Propor um método analítico de identificar comportamentos anormais no drone a partir dos dados coletados.

## 1.3 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos foram desenvolvidas etapas que envolvem conhecer algumas características relativas aos VANTs, como seu sistema de alimentação, controle de alto nível, além das possibilidades e estratégias de comunicação entre a controladora de voo e dispositivos externos. De posse dessas informações é possível definir como o sistema embarcado para o veículo poderá ser alimentado, bem como a estratégia e protocolos de comunicação entre o sistema embarcado e a controladora de voo.

Uma vez estabelecidas as estratégias de alimentação e comunicação, o sistema embarcado para controle do VANT pode ser desenvolvido. Daí, na próxima etapa, o veículo passa a ser pilotado pelo sistema embarcado, o que possibilita autonomia para o sistema que não depende mais de um piloto humano para conduzir missões de experimento. Assim, um experimento pode ser exatamente repetido diversas vezes, sem que exista nenhum comando diferente entre os dois experimentos idênticos. Com a alimentação, a comunicação e o controle do sistema estabelecidos, faz-se necessário verificar o posicionamento físico do sistema embarcado no veículo, para que isso não afete significativamente a sua aerodinâmica, o que comprometeria o experimento.

Nessa etapa, o sistema embarcado já pode operar sobre o veículo, restando apenas desenvolver o sistema de coleta de dados do veículo e efetivamente colocá-lo em operação com os sensores em funcionamento para coletar os dados de estado do VANT, e assim poder testar o desempenho do veículo. A realização de voos experimentais para a coleta de dados e posterior análise consiste na última etapa do desenvolvimento desse trabalho.

Podemos resumir as etapas do desenvolvimento desse trabalho da seguinte forma:

- Modelagem do funcionamento do VANT a ser testado e analisado;

- Definição das estratégias de alimentação e comunicação entre o sistema embarcado e o VANT;
- Desenvolvimento da parte do sistema embarcado responsável pelo controle do VANT;
- Realizar o acoplamento do sistema embarcado ao veículo;
- Desenvolvimento da parte do sistema embarcado responsável pela coleta de dados do VANT;
- Acoplamento de sensores e teste de funcionamento do sistema em completo;
- Realização de voos experimentais para coleta de dados de voo reais.

## **1.4 Organização do Trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O capítulo 1 apresentou o contexto geral deste trabalho, bem como os objetivos e metodologia. O capítulo 2 consiste em uma fundamentação teórica sobre os conteúdos principais necessários para o entendimento deste trabalho. O capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados à presente pesquisa. O capítulo 4 descreve detalhadamente o sistema embarcado desenvolvido. O capítulo 5 aborda as três etapas do processo de experimentação, bem como os resultados obtidos. O capítulo 6 apresenta as considerações finais e os trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Veículos Aéreos Não Tripulados

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), é uma nomenclatura oriunda do termo em inglês *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* utilizada para definir veículos aéreos com capacidade de desempenhar missões de voo sem a presença de um piloto a bordo controlando o veículo. Esses veículos também são chamados de Drone (do inglês Zangão), uma denominação informal amplamente utilizada por órgãos de imprensa. De acordo com uma resolução do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) [DECEA 2015] essas denominações estão obsoletas, considerando como oficial o termo Aeronaves Não Tripuladas.

Diversas são as aplicações para esse tipo de aeronave, e crescente o interesse de instituições, corporações e pessoas tanto no âmbito civil, quando militar, estando presentes desde as frentes de batalha em conflitos armados modernos atuando como equipamento de informação no monitoramento de áreas fronteiriças, monitoramento de movimentos de tropas e até no suporte aéreo em missões de bombardeio. Em áreas atingidas por catástrofes naturais os VANTs estão sendo utilizados como equipamento de suporte em buscas e salvamento, até para o mapeamento de áreas degradadas [He, Chan e Guizani 2016] [Li et al. 2016]. No contexto civil, as aeronaves não tripuladas são utilizadas no monitoramento de áreas agrícolas, registros fotográficos, oceanografia, vigilância e uma infinidade de outras aplicações [Kim e Choi 2016] [Furtado et al. 2008] [Erdos, Erdos e Watkins 2013].

Esse tipo de veículo ou aeronave geralmente opera de maneira radiocontrolada, ou seja, a maioria dos VANTs realizam suas missões sob o controle de um piloto em solo. Porém é crescente o número de pesquisas que envolvem abordagens de VANTs inteligentes, com capacidades cada vez maiores de tomar decisões e realizar missões sem o auxílio de pilotos,

---

são os veículos não tripulados autônomos, aeronaves que apresentam parâmetros, comportamento e perfil de voo previamente programados, sem a existência de intervenção humana na condução do voo [Jardine e Givigi 2016] [Hassan, Ikram e Shah 2016].

As aeronaves não tripuladas podem ser classificadas em diversos tipos, de acordo com as características físicas de sua estrutura que são desenvolvidas para suprir necessidades específicas de voo, por exemplo, existem situações, como o monitoramento de tropas inimigas e o monitoramento de fronteiras, em que o VANT necessita estar a elevadas altitudes para que monitore uma área de dimensões expressivas sem ser percebido por contato visual, nesse tipo de missão, assim como no monitoramento de rios e áreas agrícolas, o veículo ideal deve possuir adequada capacidade para voar a elevadas altitudes e por longos períodos de tempo, em suma, existe um tipo de veículo para missões com um conjunto exigências específicas [Mora et al. 2015].

As aeronaves de asa fixa possuem características que atendem a essas necessidades, por apresentarem perfis de aeronaves planadoras, demandam baixo consumo de energia em voos longos e a elevadas altitudes, porém esse tipo de VANT possui limitações que os impedem de realizar tarefas que envolvam precisão, por exemplo, visitar um ponto muito específico em uma rota, voar a mínimas altitudes ou realizar voo pairado, além de não ser possível realizar pousos ou decolagens verticais com esse tipo de aeronave, dificultando o seu uso em ambientes urbanos e impedindo sua operação em espaços internos, características que lembram as limitações enfrentadas por aviões no contexto da aviação convencional [Mora et al. 2015] [Rangel, Kienitz e Brandão 2011].

As limitações das aeronaves de asa fixa são, justamente, as principais características dos VANTs de asa rotativa. Assemelhando-se mais a helicópteros da aviação tripulada convencional, esses veículos são capazes de realizar voos precisos, pairados e a altitudes muito pouco elevadas, além de realizarem nativamente operações decolagem e pouso verticais [Chen, Peng e Zhang 2014]. Por outro lado, possuem limitada autonomia de voo em comparação com os VANTs de asa fixa, seu tempo de voo é expressivamente mais curto, voam a altitudes mais baixas e por não terem a capacidade de planar, o consumo de energia desses veículos os impede de realizar missões de voo a longas distâncias ou por longos intervalos de tempo [Lu et al. 2016]. Porém, sua precisão e características de voo os possibilitam voar em ambientes internos, sendo o seu grande diferencial de uso é a capacidade de realizar voos pairados, o

---

que torna possível programar um VANT de asa rotativa para permanecer imóvel, suspenso no ar, em uma determinada coordenada geográfica e a uma altitude específica por um determinado tempo, algo impossível de ser realizado utilizando uma aeronave de asa fixa [Wang, Ke e Chen 2016].

Os VANTs de asa rotativa também são chamados multi-rotor ou multi-cópteros, essa denominação faz referência ao número de motores utilizados por esses veículos, que podem variar desde veículos que possuem dois motores, podendo existir veículos com oito ou mais motores. Nesse contexto, os quadróptero, veículos impulsionados por quatro motores, são o modelo mais comum entre os VANTs de asa rotativa, mas existem também os VANTs modelo helicóptero, com um motor principal e outro secundário que atua no controle de direção do veículo. Além desses existem o tricóptero com três motores, o hexacóptero com seis e o octacóptero com oito motores, diversas outras configurações podem existir, com outras quantidades de motores, porém, os modelos citados são os mais comuns [Saied et al. 2015].

A quantidade de motores encontrada nos VANTs de asa rotativa está associada à capacidade carga, à velocidade e à precisão de movimento de cada veículo, pois uma maior quantidade de motores reflete diretamente na capacidade de manobrabilidade do veículo, ou seja, um veículo com seis motores realiza manobras mais precisas que um veículo com três ou quatro motores. Isso ocorre porque o número de direções possíveis para o deslocamento de um multi-cóptero determinado pela medida em graus existente entre os motores da estrutura, ou seja, um veículo de quatro motores pode se deslocar em direções a cada 90 graus ( $360/4=90$ ). Já um veículo com 6 motores equidistantes pode se deslocar em direções a ângulos de 60 graus, enquanto um octacóptero é capaz de se deslocar em direções situadas a 45 graus. Além disso, um veículo com um número mais elevado de motores possui maior capacidade de carga e velocidade em relação ao um veículo com menos motores. O uso de um ou outro modelo de veículo multi-cóptero é determinados por características específicas da missão a ser realizada [Saied et al. 2015] [Haddadi, Zarafshan e Niroumand 2015] [Jiang e Voyles 2013].

No contexto da nossa pesquisa é utilizado um VANT de asa rotativa modelo quadróptero, um veículo de pequeno porte muito comumente utilizado em diversas aplicações no âmbito civil e militar. No campo científico é um modelo alvo de vários trabalhos de pesquisa ao

redor do mundo, principalmente no que diz respeito à sua estabilidade e capacidade de realizar voos pairados, tornando-se um modelo muito popular e o principal VANT escolhido em pesquisas robóticas, devido à sua facilidade de controle e baixo custo [Jiang e Voyles 2013]. As especificações do veículo utilizado em nossa pesquisa será descrito em detalhes no Capítulo 5.

## 2.1 Controle de VANTs

Como todos os veículos controlados remotamente, os VANTs pilotados por pessoas em solo recebem comandos via sinais de rádio. Os comandos principais são usados para mudar a intensidade da velocidade dos motores, resultando na movimentação do veículo, seja em deslocamento vertical, horizontal ou rotação. A comunicação entre o piloto em solo e o veículo em voo é estabelecida através de uma conexão de rádio. Os dados recebidos no VANT são enviados para a controladora de voo, que os recebe, interpreta e gerencia a velocidade dos motores de acordo com a ação desejada.

Referindo-se a VANTs multi-rotor, o tipo de veículo utilizado nessa pesquisa, o posicionamento do veículo se dá em uma perspectiva de três dimensões, X, Y e Z. Consideremos Z como o eixo vertical, no qual o veículo pode se movimentar em ações de subida ou descida, ou seja, o movimento do veículo em Z corresponde à sua altitude. O controle para que o veículo desempenhe um movimento vertical, em Z, é executado pela controladora de voo aplicando valores de aceleração simétricos para todos os motores. Em síntese, se o veículo está em voo pairado no ar a determinada altitude, e todos os motores são acelerados na mesma proporção, o veículo desloca-se para cima em movimento vertical. Da mesma forma, caso haja uma desaceleração de todos os motores em iguais proporções, o veículo desloca-se verticalmente para baixo [What is a MultiCopter and How Does it Work? 2016].

Caso as ações de aceleração e desaceleração dos motores ocorram em proporções distintas, a movimentação do veículo também acontece de forma diferente: quando dois motores vizinhos, posicionados a 90 graus um do outro, recebem acelerações iguais entre si e diferenciada em relação aos demais é gerada uma inclinação da estrutura do veículo e conseqüentemente ocorre movimento horizontal na direção a 45 graus entre os dois motores. O movimento horizontal é denominado nos eixos X e Y, respectivamente a direção lateral

e frontal do veículo. Assim, por exemplo, se o quadricóptero deve movimentar-se para a esquerda deve-se acelerar motores situados no lado direito do veículo e desacelerar os dois à esquerda. Da mesma forma, um movimento do veículo para a frente é realizado acelerando os dois motores traseiros e retardando os dois dianteiros e a velocidade de deslocamento do veículo é determinada pelo grau de inclinação do veículo na direção do movimento, geralmente quanto mais o veículo se inclina, mais rápido ele viaja [What is a MultiCopter and How Does it Work? 2016].

Por sua vez, a dinâmica do movimento de rotações do veículo em relação a ele próprio, ou seja, quando o VANT não altera seu posicionamento em nenhum dos três eixos, mas realiza apenas o movimento de rotação alterando a direção do seu "nariz", acontece de maneira diferente dos movimentos de deslocamento, sendo ativada alterando apenas os valores de aceleração de dois motores que estão rotacionando em um mesmo sentido, horário ou anti-horário. Consideremos que os motores posicionados a  $180^\circ$  um do outro rotacionam no mesmo sentido, já os seus vizinhos estão rotacionando no sentido inverso, essa estratégia causa equilíbrio entre as forças atuantes. Diante disso, aumentando-se igualmente a velocidade de dois motores localizados a  $180^\circ$  um do outro e que estão girando no mesmo sentido, o veículo realizará o movimento de rotação no sentido oposto ao desses motores [What is a MultiCopter and How Does it Work? 2016].

Na figura 2.1 é possível identificar os movimentos possíveis e os sensores normalmente utilizados para medir suas dimensões. Nesse contexto cada sensor é responsável por um tipo de captura: o acelerômetro detecta a inclinação do veículo em cada eixo, enquanto o giroscópio retorna a velocidade angular também em cada eixo, e a bússola fornece a orientação do veículo em relação ao norte. Todos esses valores são utilizados como entrada para o sistema de comando de voo, a fim de realizar movimentos mais precisos e mais seguros. Neste trabalho, o posicionamento do VANT nos eixos é utilizado para aumentar ainda mais a segurança da operação do veículo.

## 2.2 Controladoras de Voo

Um multicoptero é um veículo aéreo de asa rotativa mecanicamente simples, cujo movimento é controlado pela aceleração ou desaceleração coordenada dos seus motores que utilizam hé-



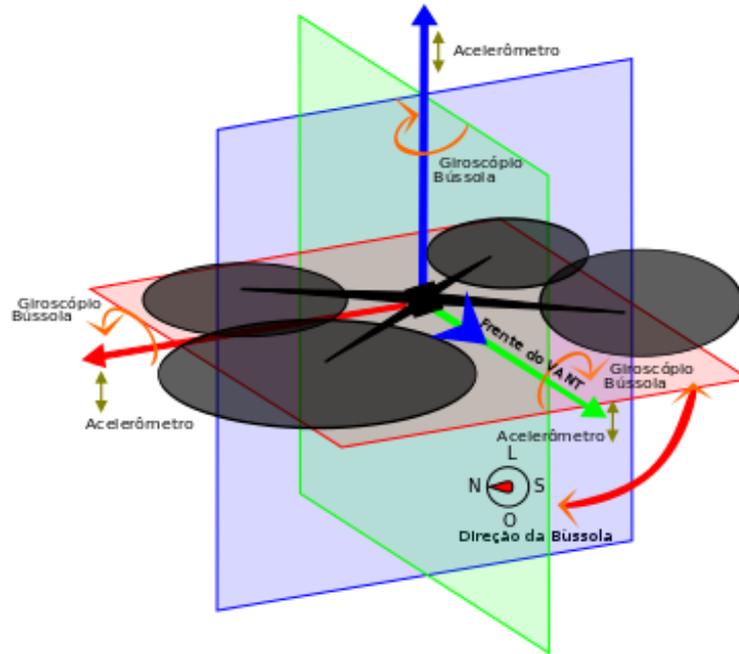


Figura 2.1: Posicionamento do VANT nos eixos X, Y e Z

lices de impulso para baixo. São considerados aerodinamicamente instáveis e exigem absolutamente um computador de bordo (também conhecido como controlador de voo) para que seja possível realizar missões de voo minimamente estável. Essa característica torna esses VANTs totalmente dependentes da sua controladora de voo e caso esta não esteja funcionando adequadamente, o veículo é impossibilitado de voar. A controladora de voo é capaz de estabilizar o sistema de um quadróptero porque combina dados de sensores de bordo, como giroscópios e acelerômetros para manter uma estimativa precisa de sua orientação e posição. [What is a MultiCopter and How Does it Work? 2016]

É importante não confundir controladora de voo com um sistema de controle que implementa estratégias de controle como controlador PD (Proporcional Derivativo) ou PID (Proporcional Integral Derivativo). As controladoras de voo são uma espécie de piloto automático para controlar aeronaves de asa fixa, helicópteros multi-rotor, entre outras. Esse piloto automático é embarcado em VANTs e atua na estabilização autônoma e navegação baseada em *waypoints*. Apenas as controladoras de voo (piloto automático) fazem parte do escopo do presente trabalho. [ArduPilot Mega - Home 2016]

A nossa pesquisa foi desenvolvida utilizando um VANT modelo quadróptero que faz uso de uma controladora de voo modelo APM baseada no sistema Ardupilot (descrita em

detalhes no Capítulo 5). ArduPilot é um sistema de piloto automático de código aberto que suporta multicópteros, helicópteros tradicionais, aviões de asa fixa e veículos aquáticos, subaquáticos e terrestres. Possui código fonte aberto que é desenvolvido por uma comunidade de profissionais e entusiastas. Como a plataforma Ardupilot suporta diversos tipos de veículos, vamos focar no tipo de controladora utilizada em nossa pesquisa, a Arducopter [ArduPilot 2016].

A controladora de voo APM arducopter consiste em um componente de hardware e software que atua no veículo na função de comando de voo, que além da função de estabilizar o comportamento do veículo, essa controladora confere ao VANT plena capacidade de voar através de modos de voo pré configurados que dão autonomia ao veículo para realizar determinadas operações com a mínima ou nenhuma intervenção humana, por exemplo, voar de maneira autônoma para uma determinada coordenada geográfica, transformando os veículos controlados em aeronaves com determinado grau de autonomia. [Copter Home 2016]

A controladora de voo Arducopter é capaz de adequar-se a uma gama de requisitos exigidos por diferentes perfis de missões de voo, como as missões de ritmo rápido como as corridas FPV (*First Person View*), uma espécie de corrida entre VANTs que envolve o desvio de obstáculos a elevadas velocidades, onde uma câmera de bordo transmite ao piloto a visão do veículo. As missões de ritmo suave e preciso utilizada para registros de fotografia aérea, e, até mesmo missões complexas com o veículo operando totalmente autônomo e capaz de transportar carga útil e funcionar adequadamente em condições adversas como incidência de vento forte [Copter Home 2016].

É constituída de um pequeno pacote formado por partes físicas e lógicas que pode ser acoplada a diversas abordagens de máquinas móveis que podem ser transformadas em robôs. Sua parte física é formada por um conjunto de sistemas embarcados e sensores periféricos que atuam como cérebro do veículo, seus olhos, seus ouvidos, etc. A parte lógica é formada pelo *Firmware*, o código que fornece "habilidades" ao componente que está portando o hardware. De acordo com o firmware é definido o comportamento para o veículo correspondente à sua missão: veículo planador, multicóptero, terrestre, subaquático, etc [ArduPilot Autopilot Suite 2016].

Como parte da plataforma de software ArduPilot mais ampla, Arducopter funciona perfeitamente com aplicações de estações de controle em solo *Ground Control Station*, que

podem monitorar a telemetria do veículo e realizar atividades de planejamento de missões. Ele também se beneficia de outras partes do ecossistema Ardupilot, incluindo simuladores, ferramentas de análise de log e APIs de nível superior para gerenciamento e controle de veículos.

Suas principais características incluem: Alta qualidade para controles de altitude e posicionamento automáticos, utilizando bússola de bordo para orientação veículo. Decolagem e aterrissagem automáticas, além de permitir o uso de modos de voo previamente programados que fazem o VANT executar sua missão de forma autônoma, por exemplo, voltando para casa e aterrissando sozinho quando termina de cumprir uma missão. Possui vários modos de voo inteligentes, como o modo de voo "Loiter", no qual o veículo mantém a sua posição utilizando os dados dos seus sensores de GPS e de altitude [Introducing Copter 2016].

Trata-se de uma plataforma projetada para ser segura e tolerante a falhas, com capacidade para detectar automaticamente quando o veículo perde o contato do piloto, ou quando está fora de uma georeferência definida, retornando-o ao ponto de lançamento autonomamente. O veículo com a controladora Arducopter também tentará aterrissar com segurança se forem detectadas falhas de hardware a qualquer momento no decorrer de uma missão [Introducing Copter 2016]. Uma observação importante é que para todos os casos de uso da controladora de voo sempre são realizados monitoramentos sobre os dados do estado do veículo, seja para melhorar o desempenho da estabilidade ou para identificar a ocorrência de falhas, tornando esse artifício indispensável à operação autônoma e segurança do VANT.

## 2.3 Monitoramento do estado de VANTs

Considerando que os VANTs autônomos podem apresentar problemas em suas missões de voo, por exemplo, falhas de hardware, de software, interferências externas, etc. Esses problemas necessitam ser detectados, identificados quanto à sua natureza e origem, além de ser necessário julgar o impacto desse problema para o desempenho da missão, ou simplesmente julgar autonomamente se o veículo necessita abortar a missão após a incidência de uma falha, ou se essa falha não afeta severamente a sua conclusão. Uma forma muito eficiente de detectar e esclarecer a ocorrência de falhas é através do monitoramento do estado do veículo por meio da coleta dos dados dos sensores. O monitoramento do estado do veículo também

torna possível a avaliação do desempenho e estabilidade de um veículo em diversas situações e missões de voo, permitindo inclusive a comparação do desempenho de veículos diferentes diante de uma mesma missão.

Diante da ocorrência de um acidente envolvendo um VANT autônomo ou remotamente pilotado, é necessário esclarecer as causas para o ocorrido: falha humana, problemas mecânicos, problemas na alimentação do veículo ou do sistema, falhas no sistema elétrico ou interferência externa. Um acidente ocorre devido a uma ação ou uma condição a qual o veículo foi submetido e quando ocorre precisa ser detectada e corrigida. Isso já acontece com as aeronaves normais no contexto da aviação tradicional e é realizada através da análise das caixas pretas, que são sistemas de monitoramento do estado da aeronave para posterior recuperação e análise.

Apesar de ser comum e de uso obrigatório em aeronaves convencionais, o sistema de caixa preta, tal como funciona na aviação tripulada, não é encontrado em VANTs. Nesse caso, as controladoras de voo limitam-se a registro de logs que retratam apenas falhas no sistema da controladora de voo, o que impossibilita o esclarecimento de acidentes causados por problemas em outros componentes. Diante dessa realidade, um sistema de caixa preta para VANTs poderia esclarecer com maior abrangência e precisão as causas de acidentes envolvendo VANTs.

# Capítulo 3

## Trabalhos Relacionados

Vários grupos de pesquisa procuram maneiras de testar e analisar VANTs. Por exemplo, o trabalho [Stojcsics e Molnar 2011] concentra-se em testar VANTs usando a simulação *Hardware-in-the-loop* (HIL) aplicada a métodos de navegação comparando os resultados dos voos. O trabalho apresentado em [Oosedo et al. 2013] desenvolve um sistema de controle de voo para VANTs. O mesmo que as pesquisas [Jun et al. 2013], [Dobrokhodov, Jones e Kaminer 2013], [Shixianjun, Jiakun e Hongxing 2006]. Alguns trabalhos analisam, testam e comparam o desempenho de veículos controlados por algoritmos elaborados através identificação de modelagem dinâmica e matemáticas de VANTs, por exemplo os trabalhos de [Patel e Barve 2014] e [Mou et al. 2016], enquanto outros usam algoritmos de controle comumente usados como os algoritmos PD e PID, por exemplo [Holtsov et al. 2016], [Denuelle et al. 2015] e [Ahmed, Pota e Garratt 2008].

Existem outros estudos que se concentram em áreas mais específicas, como [Coopmans, Stark e Coffin 2012], que propõe soluções para problemas associados ao processo de decolagem e o limite de carga que um VANT é capaz de transportar. Os trabalhos apresentados por [Emran et al. 2015], [Alothman, Jasim e Gu 2015] e [Goodarzi, Lee e Lee 2014] também lidam com a problemática da aplicação de carga adicional ao veículo, o primeiro propõe um método de controle para que o veículo se ajuste automaticamente a alterações na sua carga útil, enquanto o segundo e o terceiro trabalhos abordam a estabilidade do veículo quando decola transportando carga extra suspensa por cabo. Por outro lado, [Yanjun, Yang e Shenglin 2013] apresenta um trabalho que procura medir a precisão das informações de status das variáveis de voo de VANTs.

---

Alguns trabalhos visam identificar a ocorrência de falhas no veículo ou limitações no sistema de voo que interfiram no desempenho de VANTs, é o caso dos trabalhos de [Freeman et al. 2013] e [Ducard, Kulling e Geering 2007]. O primeiro estuda a detecção de anomalias na dinâmica do veículo e identificação de falhas internas através da análise dos dados de voo, fazendo uso de filtros para rejeitar distúrbios causados por condições externas, como a incidência de ventos. O segundo trabalho avalia a capacidade do sistema de voo para a detecção e isolamento falhas em componentes do veículo. Ambos avaliam a redução no desempenho da aeronave diante da ocorrência de falhas internas e são voltados à segurança de voo. Porém, o segundo trabalho verifica também o comportamento do sistema de voo diante de uma falha em algum componente, bem como as capacidades de reação e recuperação do sistema face às novas condições da aeronave acometida por uma falha.

A presente pesquisa e os trabalhos apresentados possuem algumas semelhanças no tocante à análise de dados, tendo em vista que monitoram o estado do veículo durante o voo e avaliam seu desempenho com base nos dados monitorados. No entanto, o nosso estudo não avalia a existência de anomalias dinâmicas ou falhas estruturais no veículo, bem como não avalia as capacidades do sistema de voo e a ocorrência de falhas em componentes físicos. Busca-se identificar ocorrências de distúrbios de natureza externa, como os causados pelo vento, distúrbios que são desprezados nos dois trabalhos apresentados. Este trabalho tem como objetivo a identificação de um padrão de comportamento para os voos estáveis a partir da análise dos dados do veículo, bem como fugas a esse padrão de estabilidade, partindo do princípio de que o veículo não possui anomalias dinâmicas.

Mais diretamente relacionados ao tema deste trabalho, as pesquisas de [Wang et al. 2015] mostram uma maneira de melhorar o desempenho de um veículo diante de distúrbios recorrentes ocorridos durante longos voos. No trabalho são utilizadas informações de voos antecedentes para informar ao veículo os lugares onde determinados distúrbios foram encontrados, por sua vez, o veículo pode reagir adequadamente diante da identificação de um distúrbio recorrente em um ponto específico de uma trajetória. Em nosso trabalho, estudamos a perturbação em uma granularidade mais fina, capturada pelos sensores em áreas internas e controladas, para desenvolver um sistema de diagnóstico e recuperação. No entanto, eles coletam dados da controladora de voo e não buscam armazenar esses dados em sistemas de caixa preta. Nossa solução é independente do fabricante e armazena todos os dados em uma

---

caixa preta, com foco na replicação dos experimentos e análise de dados.

Diante desse contexto de análise de dados e avaliação de desempenho de VANTs, são encontrados alguns trabalhos que utilizam simulação em tempo real utilizando a abordagem HIL como método para a verificação do desempenho geral do controle e da estabilidade dos VANTs antes de realizar testes de voo reais. Essa técnica é utilizada no trabalho de [Deng e Yuan 2015] para simulação de voo, submetendo o veículo a condições extremas para testar seu comportamento diante das excitações de entrada que caracterizam condições adversas. Isso é realizado a fim de garantir a segurança da aeronave. Diferentemente, em nossa pesquisa, é apresentada uma abordagem focada na realização de voos em condições livres de distúrbios, para a identificação de padrões de comportamento estável.

O trabalho apresentado por [Cai et al. 2008] também realiza testes utilizando essa técnica, com a execução de alguns movimentos de voo básicos para o VANT, como voar pairando no ar (Hover) e se movimentando para os lados, frente e trás. Assim como na nossa pesquisa, os testes realizados avaliam o desempenho de veículos autônomos, analisando a estabilidade do veículo, porém analisam também o desempenho dos algoritmos de controle para estas condições de voo, algo que não analisamos em nossa pesquisa. Uma outra semelhança entre os dois trabalhos é o procedimento do experimento, que inclui manter o veículo estável no ar e avaliar o desempenho da sua estabilidade nessas condições, porém nossa pesquisa é baseada apenas em dados de voos reais, enquanto os trabalhos apresentados baseiam-se em dados de simulação utilizando HIL.

O foco do trabalho desenvolvido por [Heredia et al. 2005] é a detecção de falhas nos sensores de VANTs autônomos. De maneira semelhante ao que acontece em nossa pesquisa, a detecção de falhas é realizada avaliando qualquer alteração significativa no comportamento do veículo em relação ao comportamento sem falhas. Essa avaliação do comportamento do veículo caracteriza a existência de um padrão de comportamento de estabilidade, revelando assim uma estreita relação entre o trabalho citado e a nossa pesquisa. Nesse contexto, ambos os trabalhos consideram o monitoramento do comportamento com padrão de estabilidade: em nossa pesquisa o padrão de comportamento torna-se uma medida para avaliação de desempenho, enquanto no trabalho de citado esse padrão de comportamento é utilizado para identificação de falhas nos sensores.

Alguns trabalhos também abordam a avaliação de desempenho, como é o caso de [Kang

---

et al. 2010], que utiliza HIL para realizar teste de solo com o propósito de avaliar o desempenho de todo o sistema de voo, incluindo controladora e sensores. Já o trabalho de [Sanca, Alsina e Cerqueira 2014] realiza análise de estabilidade de VANTs multirrotores, utilizando informações de posicionamento do veículo em X, Y e Z. Diferentemente da nossa pesquisa, os dois trabalhos citados não consideram um padrão de comportamento estável, porém utilizam os dados posicionamento e inclinação para avaliar o desempenho de voo de VANTs.

A avaliação de desempenho da estabilidade de um VANT é abordada nos trabalhos de [Nagarjuna e Suresh 2015], [Herisse et al. 2008] e [Herisse et al. 2010], que buscam uma solução para as dificuldades encontradas nas operações de aterrissagens verticais com estabilidade satisfatória, através do monitoramento da estabilidade do veículo. O primeiro trabalho projeta um mecanismo efetivo de aterrissagem para VANTs totalmente autônomos, nesse trabalho o procedimento de pouso é estabilizado pelo monitoramento do veículo utilizando apenas informações do estado do veículo capturadas por um giroscópio e um acelerômetro, sem interferência humana ou processamento de imagem. Por outro lado, o segundo e o terceiro trabalhos também buscam realizar as mesmas operações de aterrissagem, mas, além do uso do uso dos dados do estado do veículo, são utilizados dados de fluxo óptico, inserindo dados de câmeras no processo de estabilização. Diferentemente dos dois últimos trabalhos, a nossa pesquisa não utiliza dados de processamento de imagem para avaliar a estabilidade de um VANT, mas, assim como no primeiro trabalho, apenas os dados do posicionamento do veículo em X, Y e Z são levados em consideração.

Outros estudos investigam a análise de voos de VANTs, por exemplo, o trabalho de [Loh, Bian e Roe 2009], que propõe a análise de VANTs para gerar um certificado de segurança para uso no espaço aéreo civil, enquanto o trabalho de [How et al. 2008] propõe a construção de um ambiente controlado para testar VANTs autônomos em ambientes internos e em tempo real, algo semelhante ao ambiente de testes utilizado em nossa pesquisa durante o processo de experimentação. O trabalho de [Ahsan, Rafique e Ahmed 2013] propõe uma técnica para estabilizar automaticamente o VANT durante o voo com base em dados coletados dos sensores. Por sua vez os trabalhos de [Hui et al. 2013] e [Carrillo et al. 2015] visam a realização de tarefas autônomas de decolagem, pouso e estabilização de voo pairado no ar, baseando-se em dados processamento de imagem, que também são utilizados em conjunto com dados de



---

medição inercial (IMU) para realizar autoestabilização do veículo, enquanto os trabalhos de [Casau, Cabecinhas e Silvestre 2012] e [Pflimlin et al. 2007] realizam as mesmas operações, porém não utilizam dados visuais. Por fim, o trabalho de [Dittrich e Johnson 2002] busca desenvolver um sistemas de bordo que permita manter um posicionamento em X, Y e Z estável e seguir uma rota de voo desejada.

A análise do estado do veículo é utilizada nos mais diversos trabalhos com as mais variadas finalidades, a execução de um voo pairado é uma tarefa complexa de ser realizada autonomamente por VANTs, por essa razão essa problemática é abordada em muitas pesquisas, por exemplo [Azinheira e Moutinho 2008] e [Pounds e Dollar 2011]. Diversas técnicas são empregadas para solucionar esse problema: O trabalho de [Garcia-Carrillo et al. 2010] compara o desempenho de controladores não-lineares através de *feedback* visual, são utilizadas também medições inerciais para obter uma informação consistente do posicionamento do veículo em X, Y e Z, buscando encontrar a melhor estratégia de controle para estabilizar a posição de um quadrotor, enquanto [Sugimoto e Gouko 2016] lida com esse problema utilizando Q-learning, um método de aprendizagem de reforço comum pra melhorar o desempenho do veículo nessa operação.

Diversas abordagens para estabilização de VANTs de maneira autônoma são encontrados na literatura, a maioria delas aborda o desenvolvimento de técnicas e algoritmos de controle para promover a estabilização autônoma de um VANT, mas a técnica utilizada para analisar essa estabilidade, na maioria dos casos, é o controle de flutuação ou a realização de voos pairados. O trabalho de [Mustapa et al. 2014] discute o controle de estabilização de um veículo quadricóptero em aplicação em tempo real e propõe o desenvolvimento de um controlador PID, enquanto [Xu, Tian e Hu 2016] utiliza um controlador Fuzzy auto-ajustável para realizar uma operação semelhante. [Santana, Sarcinelli-Filho e Carelli 2013] propõe a estimação e controle da posição 3D de um quadrotor em ambientes internos, sua proposta adota o Filtro de Kalman Extendido - EKF - como estrutura para fundir as informações fornecidas pelos sensores disponíveis a bordo, e o desenvolvimento de um controlador PD. Enquanto [Kro-kowicz et al. 2010] tem proposto um sistema de controle de voo e de navegação para um VANTs quadrotor autônomo, com foco para aplicações em ambientes internos. Por fim, [Anwar et al. 2016] tenta resolver esse mesmo problema propondo um controle adaptativo do quadrotor que usa informações de estado da estabilidade do veículo para realimentar os

---

dados de entrada, buscando melhorar o desempenho de voo.

O monitoramento dos dados de voo e a análise da estabilidade do veículo podem ser abordados de diversas maneiras, mas um veículo capaz de realizar esse tipo de processamento sem o auxílio de computadores em solo pode ser considerado completamente autônomo, porém esses processamentos podem demandar elevado poder computacional, inviabilizando a solução no contexto de um VANT. O Trabalho de [Fowers et al. 2007] realiza estabilização de um VANT quadrotor por meio de processamento de imagem em tempo real, e para tal utiliza uma plataforma FPGA embarcada, eliminando a necessidade de suporte computacional em estações terrestres. Os trabalhos apresentados por [Kendoul et al. 2006] e [Escareno, Salazar-Cruz e Lozano 2006] também realizam o processamento dos seus dados de forma embarcada, usando sensores embutidos e controle a bordo, assim realizam voo autônomos em tempo real. A nossa pesquisa, assim como os três trabalhos citados, realiza o sensoriamento embutido e o processamento embarcado, sendo capaz de tomar decisões e realizar missões de forma totalmente autônoma.

O foco desta pesquisa não é desenvolver um novo controlador de voo, ou mesmo construir alguma aplicação para melhorar a estabilidade de voo de VANTs autônomos ou guiados, mas permitir o monitoramento de dados de voo para VANTs autônomos, independentes em sua estrutura de controle interno e fabricante. Visando isso, nossa solução baseia-se no envio de instruções PWM através das mesmas portas usadas para o receptor de rádio. O objetivo deste trabalho é construir um sistema que possa ser anexado facilmente a um VANT e monitorar o estado do veículo durante as missões de voo, usando dados de sensores para identificar e quantificar a estabilidade desse voo. De posse desses dados, buscamos estabelecer um padrão de comportamento para os voos estáveis e a partir desse padrão verificar o comportamento apresentado pelo veículo. Futuramente, esperamos tornar os VANTs suficientemente autônomos, ao ponto de serem capazes de tomar decisões durante o voo, julgando e corrigindo automaticamente a sua estabilidade, usando como base os dados do estado do próprio veículo coletados em tempo real.

## **Capítulo 4**

# **Sistema Embarcado para Teste de Veículos Aéreos não Tripulados em Ambientes Controlados**

### **4.1 Arquitetura**

Nossa solução consiste na implementação de um sistema embarcado para avaliar o desempenho de voo de VANTs através do monitoramento do estado do veículo, esse sistema exige um conjunto de elementos físicos e lógicos atuando de maneira interligada fornecendo e recebendo dados entre si. No contexto da presente pesquisa, cinco componentes atuam para realizar duas operações distintas, porém relacionadas: o monitoramento do estado do veículo e o comando de voo. O monitoramento do veículo está relacionado à coleta e armazenamento de dados que representam o estado do VANT a cada instante de tempo no decorrer de um voo, como os valores da aceleração e a velocidade angular em X, Y e Z. Por outro lado, o comando de voo está associado ao fato de testarmos e avaliarmos VANTs autônomos, que por não serem comandados por um piloto humano, necessitam de um sistema de comando a bordo para controlar o veículo, conduzindo-o durante a execução de uma missão.

Essas duas operações do sistema embarcado estão intimamente ligadas e envolvem mais de um componente e vários fluxos de dados, as duas manipulam os mesmos dados e fazem uso de informações fornecidas de uma para a outra. A operação de comando de voo envia instruções à controladora de voo para que o VANT seja pilotado e execute determinadas

ações, como decolar, acelerar, pousar, etc. Essas instruções são geradas por algoritmos que analisam o comportamento do veículo, levando em conta os dados oriundos da operação de monitoramento, que, por sua vez, é responsável por armazenar todo o estado do veículo, incluindo os dados de estabilidade e as instruções enviadas à controladora.

Os componentes que participam de cada uma das duas operações, bem como os fluxos de dados entre si podem se observados na Figura 4.1. Essa figura mostra que o monitoramento do estado do veículo é desempenhado pelo sensoriamento que fornece dados coletados por sensores para o componente de controle externo, que processa esses dados e forma o estado do veículo, que, juntamente com as informações dos comandos enviados à controladora de voo, é armazenado pelo sistema de caixa preta. Dessa maneira, todos os componentes da arquitetura são envolvidos na operação de monitoramento.

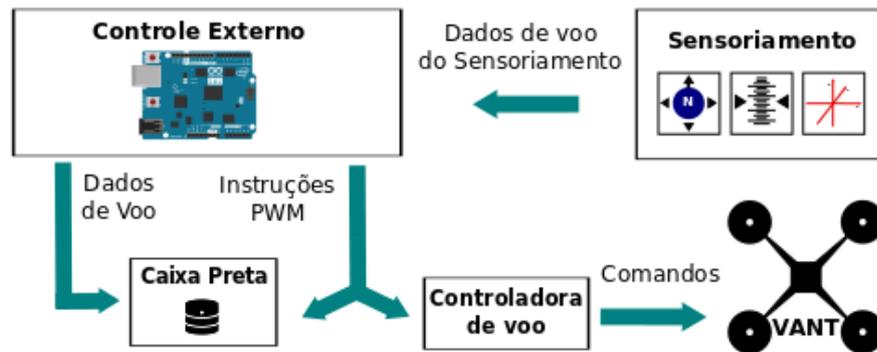


Figura 4.1: Arquitetura do Sistema Embarcado

A operação de comando de voo não envolve todos os componentes, pois é abstraído o componente caixa preta que tem seu funcionamento autônomo em relação ao controle do veículo, apesar de manipularem os mesmos dados, uma falha no funcionamento do sistema de caixa preta não interfere no funcionamento do comando do veículo e vice-versa. Essa operação inclui os dados do sensoriamento que são utilizados para guiar o processo de tomada de decisão do sistema de controle externo, pois é a partir desses dados que instruções como pouso, decolagem ou mudança na aceleração dos motores são geradas e enviadas à controladora de voo. A seguir será explicado detalhadamente o papel desempenhado por cada um desses componentes no contexto do sistema embarcado.

O componente VANT, apresentado na arquitetura, representa o veículo abordo do qual acontecem todas as operações do sistema embarcado. A operação de monitoramento do

estado do veículo inicia pela coleta de informações que refletem o comportamento de estabilidade desse componente, os dados coletados são monitorados e manipulados pelo Sistema de Controle Externo e retornam ao veículo na forma de instruções que são repassadas à controladora de voo.

O componente Sensoriamento realiza uma das funções mais importantes do sistema embarcado, é a partir desse componente que o estado do veículo pode ser monitorado, e sem os dados que ele fornece, todos os outros componentes do sistema têm seu funcionamento comprometido, tornando inviável o funcionamento do Sistema de Caixa Preta, que passa a não dispor das informações do estado do veículo para armazenar. Algo semelhante ocorre com o Sistema de Controle Externo, que perde a capacidade de perceber mudanças no posicionamento do veículo por não mais dispor das informações do seu estado.

O Módulo de Caixa Preta do sistema é um componente indispensável ao sistema embarcado, é responsável pelo armazenamento dos dados que formam o estado do veículo para posterior recuperação e análise. Esse componente recebe tanto o estado do veículo em relação ao seu posicionamento em X, Y e Z, quanto as instruções enviadas à controladora de voo para comandar o comportamento do veículo. Considerando o componente Controladora de Voo, sua função é atuar como ponte entre o Sistema de Controle Externo e o VANT, por ela são recebidas instruções para guiar o comportamento do veículo. No contexto do sistema embarcado, esse componente não sofreu nenhuma alteração em sua estrutura física ou lógica. A conexão entre a controladora e o sistema embarcado ocorre via canais de rádio disponíveis, o que torna o sistema embarcado compatível com a maioria dos modelos de veículos encontrados no mercado.

O Sistema de Controle Externo é o componente central no contexto do sistema embarcado, é ele o responsável por realizar todo o processamento de dados, analisando as características do estado do veículo percebidas a partir da observação dos dados de aceleração e velocidade angular. O sistema de controle externo também é responsável pelo comando de voo, enviando instruções para a controladora. Em suma, toda a lógica do sistema embarcado, de uma maneira geral, é executada pelo componente de controle externo, além de intermediar o fluxo de dados entre a maior parte dos componentes. A implementação desse componente, assim como os detalhes da implementação de todos os outros estão descritas no Capítulo 5, pois em cada etapa da experimentação ocorreram alterações na arquitetura ou

em alguns componentes.

Todos esses componentes apresentados fazem parte do contexto de um sistema embarcado, ou seja, todos operam a bordo de um VANT real em uma missão real de voo, e realizam suas funcionalidades em tempo real. Assim sendo, poderia ser questionado, por que não realizar o monitoramento do estado do veículo em uma abordagem de *Ground Station* (estação de solo)? Primeiramente, a ideia por trás do desenvolvimento de um sistema embarcado é tornar o veículo completamente autônomo, extinguindo qualquer dependência em relação a outros sistemas fisicamente distantes do contexto do voo. E como se pretende criar um sistema embarcado compatível com a maioria dos VANTs encontrados no mercado, uma solução baseada em estação de solo torna o VANT dependente das estratégias de comunicação para cada tipo de veículo, o fato de ser utilizado um sistema embarcado no veículo elimina essas dependências.

Outra vantagem da abordagem do sistema embarcado, acoplado ao veículo, é o fato de não precisar considerar condições de comunicação, como latência ou falhas na conexão entre o veículo e uma estação de solo, evitando a perda de dados. Outro fator importante é a tolerância a falhas, pois é proposto um sistema de caixa preta que deve estar operante mesmo em caso de ocorrência de acidente e/ou falha no sistema de comando. O sistema de monitoramento e caixa preta não é afetado por falhas no sistema de comando, afim de ajudar a elucidar as causas de acidentes a partir da análise dos dados de comportamento e de estado do veículo após a ocorrência de algum incidente.

O processo de acoplamento do sistema embarcado ao veículo é realizada por meio do uso dos canais de rádio disponíveis na controladora de voo, dessa maneira o controle de voo não sofre alterações e a solução torna-se compatível com a maior parte dos modelos de veículos disponíveis no mercado. As dimensões e o peso do sistema embarcado são muito pequenas, o que oferece a mínima interferência na estabilidade do veículo, o consumo de energia do sistema embarcado também é baixo e compatível com a alimentação padrão da maioria dos veículos disponíveis, que geralmente consiste no uso de baterias que fornecem tensões que geralmente são adequadas aos limites suportados pelo sistema embarcado. Os detalhes da forma de alimentação e conexões entre o sistema embarcado e o VANT são descritos em detalhes nas seções que tratam das três etapas de experimentação que são apresentadas no Capítulo 5.

Afim de testar diversas abordagens de monitoramento, bem como avaliar o desempenho de cada uma, o presente trabalho foi desenvolvido em três etapas distintas, o que proporcionou três experimentos diferentes. Em cada uma dessas etapas foi utilizada uma abordagem diferente para o sistema embarcado, com diferentes estruturas de hardware e componentes lógicos. Na primeira etapa foi utilizada uma arquitetura diferenciada das demais, porém nas etapas seguintes foi adotada a arquitetura apresentada nessa seção. As etapas de experimentação são explicadas detalhadamente no Capítulo 5.

Os dados do estado do veículo que refletem seu comportamento durante a realização de um voo são analisados após a realização dos experimentos, tornando possível comparar a performance do veículo em diversos voos, buscando identificar a existência de um padrão de comportamento estável que pode vir a ser utilizado como parâmetro para possibilitar o julgamento do desempenho do veículo durante um voo, e assim classificar esse voo como estável ou instável, dependendo de sua semelhança com o padrão de estabilidade.

# Capítulo 5

## Experimentos e Resultados

Este capítulo trata de experimentos realizados em laboratório monitorando um VANT real em um ambiente controlado para obter dados que permitam verificar a estabilidade desse veículo em valores reais. Inicialmente foi tratada a prova de conceito quanto ao funcionamento da solução proposta, em seguida foram apresentadas melhorias no sistema que permitiram ampliar as possibilidades de experimento e melhorar a qualidade dos resultados.

### 5.1 Organização dos Experimentos

O monitoramento do estado de um VANT em tempo de voo permite mensurar a estabilidade do veículo naquele voo a partir da análise de dados de aceleração e velocidade angular coletados durante o voo pelos sensores acelerômetro e giroscópio de 3 eixos a bordo. Esse monitoramento permite identificar a reação do veículo diante de comandos que venha a receber do piloto ou de algum sistema autônomo de controle do veículo.

Quando o veículo é pilotado por meio de intervenção humana é impossível repetir fielmente um exercício de voo, ou seja, não é possível um piloto realizar dois voos exatamente iguais, dando exatamente os mesmos comandos, nos mesmos instantes de tempo em dois voos diferente, sendo assim, é impossível enviar exatamente os mesmos comandos ao drone a partir de um rádiocontrole repetidas vezes. Por essa razão, foi desenvolvido um sistema embarcado para realizar a tarefa de pilotagem do veículo de maneira automatizada, possibilitando, portanto, a repetição de uma sequência exata de comandos e, coletando os dados do veículo, tornando possível analisar e até mesmo determinar o comportamento do veículo



diante de um determinado comando.

Os experimentos realizados no presente trabalho buscaram comprovar o funcionamento do sistema proposto: um sistema capaz de coletar dados do VANT em tempo real enquanto controla o veículo, sem interferir na execução da missão de voo. Nos experimentos iniciais o veículo foi programado para realizar diversos voos idênticos de curta duração, ou seja, com duração inferior a sessenta (60) segundos.

Durante o desenvolvimento do presente trabalho foram realizados 3 experimentos distintos: O primeiro experimento consistiu em uma prova de conceito de que o sistema proposto é capaz de promover a realização um voo autônomo e coletar os dados de voo (estado do veículo) em simultâneo, ou seja coletar os dados do veículo enquanto o voo acontece, sem que uma ação interfira na outra. Nesse experimento a os dados coletados são fornecidos pela controladora de voo, oriundos dos seus sensores internos.

O segundo experimento envolve outra possibilidade para coleta de dados: por meio de um um sistema embarcado para controle externo ao veículo, munido de sensores para a realização da leitura do estado do veículo em tempo de voo. Nesse contexto o sistema embarcado atua de maneira independente da da controladora de voo, porém, com uma conexão estabelecida entre os dois para o envio e recebimento de comandos de voo, porém os dados dos sensores internos da controladora não foram considerados.

O terceiro experimento trata-se de uma evolução do segundo, com a substituição de sensores externos e da plataforma do controle externo, por equipamentos mais eficientes, com redução no peso, tamanho e na quantidade de periféricos envolvidos. Nessa etapa também passou a ser usado um sistema de controle com maior poder computacional, aumentando as capacidades de atuação do veículo. Todas as etapas serão apresentadas em detalhes nas seções posteriores.

### **5.1.1 Experimento utilizando Raspberry Pi no sistema de controle externo e monitoramento via API Dronekit**

Esta é a primeira etapa de experimentação do presente trabalho, durante esta etapa foram realizados os primeiros voos e coletados os primeiros dados de voo. Nesta etapa ainda não eram consolidados quais dados coletados possuíam relevância para determinar ou quantificar

a estabilidade de um veículo durante um voo, sendo o principal objetivo dessa etapa de experimentação definir quais dados são mais relevantes para o julgamento da estabilidade de um voo.

Neste experimento foram analisados os dados fornecidos pela controladora de voo através da API Dronekit para descobrir quais exercem um papel de maior relevância no processo de identificação de um padrão de comportamento estável, por essa razão, foram analisados todos os dados fornecidos pela API, para a conforme apresentado na Tabela 5.1. Os dados apresentados na tabela formam o conjunto de atributos do veículo que é fornecido pela API Dronekit, na tabela esses dados são apresentados com uma breve descrição de seus significados e o tipo de dado de cada atributo.

Tabela 5.1: Atributos do veículo fornecidos pela API Dronekit

| Atributo        | Descrição   | Tipo de Retorno         |
|-----------------|---|-------------------------|
| airspeed        | Velocidade do ar atual em metros/segundo  | double                  |
| armed           | Obter/definir o estado de armado do veículo   | boolean                 |
| attitude        | Posição atual do veículo (Pitch, Yaw e Roll)  | Attitude                |
| battery         | Estado atual do sistema de bateria  | Battery                 |
| capabilities    | Capacidades do piloto automático  | Capabilities Object     |
| channels        | Valores de um canal de rádio  | Channels                |
| commands        | Obtém waypoints (Coordenadas GPS) e missão atual. Pode obter/criar/modificar uma missão       | CommandSequence         |
| ekf_ok          | Estado EKF (TRUE/FALSE - aceitável ou não)  | boolean                 |
| gimbal          | Controlar/obter o status do gimbal - Câmera   | Gimbal                  |
| gps_0           | Informações de posição GPS  | GPSInfo                 |
| groundspeed     | Velocidade de solo atual em metros/segundo  | double                  |
| heading         | Direção atual em graus - 0..360, onde Norte = 0   | int                     |
| home_location   | Localização definida como origem (geralmente onde o veículo recebe primeiro bloqueio GPS)     | LocationGlobal          |
| is_armable      | Verificações se o veículo está pronto p/ armar  | Boolean                 |
| last_heartbeat  | Tempo (seg) desde o último ping MAVLink   | double                  |
| location        | Localização do veículo em (global, global relative and local frame)                           | Locations               |
| message_factory | Retorna um objeto que pode ser usado para criar mensagens MAVLink personalizadas              | MAVLink Message Object  |
| mode            | Usado para obter/definir o modo de voo atual  | VehicleMode             |
| mount_status    | Posicionamento da câmara (DEPRECATED)   | Array[pitch, yaw, roll] |
| parameters      | Lista de parâmetros editáveis do veículo  | Parameters              |
| rangefinder     | Aplicado a sonares, fornece distância e tensão  | Rangefinder             |
| system_status   | Estado do sistema (UNINIT, BOOT, CALIBRATING, STANDBY, ACTIVE, CRITICAL, EMERGENCY, POWEROFF) | SystemStatus            |
| velocity        | Velocidade atual do veículo em metros/segundo   | Array[vx, vy, vz]       |
| version         | Versão piloto automático  | Version Object          |

---

Todos os dados coletados da controladora e armazenados pelo sistema de controle externo para posterior análise são apresentados na Tabela 5.2 que mostra cada informação coletada pela API Dronekit com uma breve descrição. Os dados de localização (GPS), são considerados nesta análise preliminar, porém como o objetivo desta pesquisa envolve trabalhar com VANTs em ambientes internos, foram encontradas dificuldades na utilização desses dados pois no tipo de ambiente analisados o sistema de GPS não funciona corretamente ou funciona com limitações.

Tabela 5.2: Dados armazenados pelo sistema de controle externo na caixa preta

| Dado                  | Descrição   |
|-----------------------|---|
| COMMAND               | Comando enviado à controladora de voo                         |
| ACTION                | Ação que o veículo deve realizar a partir do comando recebido |
| INSTANT               | Tempo em milissegundos  |
| GLOBAL LOCATION LAT   | LATITUDE relativo ao sistema de coordenadas geográficas       |
| GLOBAL LOCATION LON   | LONGITUDE relativo ao sistema de coordenadas geográficas      |
| GLOBAL LOCATION ALT   | ALTITUDE relativo ao nível do mar                             |
| RELATIVE LOCATION LAT | LATITUDE relativo ao sistema de coordenadas geográficas       |
| RELATIVE LOCATION LON | LONGITUDE relativo ao sistema de coordenadas geográficas      |
| RELATIVE LOCATION ALT | ALTITUDE relativo localização de início do voo                |
| LOCAL LOCATION NORTH  | POSIÇÃO ao Norte em metros relativo ao ponto inicial de voo   |
| LOCAL LOCATION EAST   | POSIÇÃO ao Leste em metros relativo ao ponto inicial de voo   |
| LOCAL LOCATION DOWN   | ALTITUDE em metros relativo ao ponto inicial de voo           |
| ATTITUDE PITCH        | INCLINAÇÃO frontal do veículo                                 |
| ATTITUDE YAW          | ROTAÇÃO do veículo  |
| ATTITUDE ROLL         | INCLINAÇÃO LATERAL do veículo                                 |
| VELOCITY              | VELOCIDADE do veículo nos eixos X, Y e Z em m/s               |
| GPS INFO FIX          | Informação de disponibilidade de comunicação com GPS          |
| GPS INFO SATS         | Quantidade de satélites GPS visíveis                          |
| BATTERY VOLTAGE       | Informação de tensão da bateria em millivolts                 |
| BATTERY CURRENT       | Informação de corrente da bateria em 10 * milliampères        |
| BATTERY LEVEL         | Informação de carga restante da bateria                       |
| EKF STATUS            | Informação de disponibilidade do Extended Kalman Filter       |
| LAST HEARTHBEAT       | Informação de conexão, exibindo o tempo da última conexão     |
| HEADING               | Posição da frente do veículo em relação ao norte em graus     |
| ARMABLE               | Informação se o veículo encontra-se apto para voo             |
| SYSTEM STATUS         | Estado do veículo   |
| GROUNDSPEED           | Velocidade de movimento em relação ao solo                    |
| AIRSPEED              | Velocidade de deslocamento no ar                              |
| MODE                  | Modo de voo ativo no momento                                  |
| ARMED                 | Informação se o veículo está armado para voo                  |

Os experimentos desta pesquisa consistiram em realizar voos de forma autônoma em ambientes internos utilizando a API Dronekit para controle do veículo e coleta de dados. Nesse contexto o objetivo dessa etapa da experimentação consiste em capturar os dados de voo fornecidos pela API Dronekit e, de posse dos dados, monitorar a variação de cada dado em todos os voos verificando a existência de algum padrão de comportamento para determinar os voos que ocorreram em condições estáveis e identificar a ocorrência de distúrbios no voo, como descompensamento de motores, influência de vento etc.

Para determinar um padrão de estabilidade é necessário que todos os voos realizados sigam um mesmo padrão, ou seja, recebam a mesma missão de voo e recebam os mesmos comandos, e assim, caso não sofram distúrbios externos apresentem comportamentos e dados idênticos. Por essa razão, todos os voos desse experimento ocorreram em condições idênticas: foi utilizado o mesmo veículo e o mesmo espaço físico (ambiente de voo) e a mesma missão foi executada que consiste em enviar comandos ao VANT para que este realize um voo simples em 4 passos:

1. Armar os motores
2. Decolar até atingir uma altura de 1 metro
3. Aguardar 3 segundos no ar
4. Pousar

Durante a execução de uma missão de voo, o sistema embarcado realiza também a coleta dos dados do veículo em ciclos de tempo a cada 500 milissegundos, essa coleta também é realizada todas as vezes que um comando é enviado para a controladora de voo. O processo de coleta de dados foi implementado de modo a persistir os dados de voo e o instante de tempo em que foram coletados, isso torna possível a análise dos dados de voo após a realização da missão de voo. A coleta de dados é realizada em intervalos regulares, e também no instante seguinte ao envio de um comando à controladora de voo, o trecho pseudocódigo a seguir mostra o processo de armar os motores e decolar o veículo e envolvido nos procedimentos de decolagem é possível identificar as coletas de dados acontecendo, a seguir apresenta o trecho de código real que é executado pelo sistema de controle externo.

---

```
1 funcao armar_e_decolar(altitude_alvo){
```

```

2  caixa_preta (estado_veiculo)
3  alterar_modos_de_voo(GUIDED)
4  caixa_preta (estado_veiculo)
5  armar_motores ()
6  caixa_preta (estado_veiculo)
7  enquanto(altitude_atual < altitude_alvo){
8      acelerar_veiculo_vertical ()
9      caixa_preta (estado_veiculo)
10 }

```

Para que esse experimento fosse realizado, foi necessário impedir que o veículo estivesse exposto a influências externas como chuva e rajadas de ventos comuns em ambientes externos, ao ar livre. Diante dessas condições, os experimentos foram realizados em um espaço de testes do Laboratório de Sistemas Embarcados e Robótica (LaSER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) com dimensões que superam os 12x8x5 metros de comprimento, largura e altura respectivamente. Esse ambiente foi completamente isolado para o experimento o que possibilitou a realização dos voos sem influência de ventos.

O experimento descrito nesta seção foi implementado seguindo a arquitetura definida na Figura 5.1, nessa arquitetura é possível visualizar quatro componentes e 4 fluxos de dados participando do sistema atuante nesse experimento. Os componentes são o veículo a ser controlado, sua controladora de voo, o sistema de controle externo com a caixa preta onde são armazenados todos os dados de voo coletados. Os fluxos de dados entre esses componentes ocorrem com a controladora de voo fornecendo os dados ao sistema de controle externo, que os processa e despacha para a caixa preta armazenar juntamente com os comandos enviados para a controladora de voo que determina quais ações o veículo deve realizar.

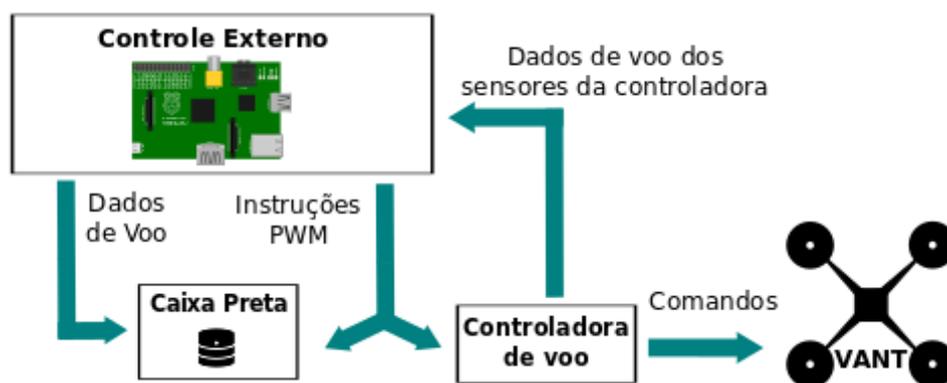


Figura 5.1: Arquitetura do sistema proposto para este experimento

Essa arquitetura foi implementada em um VANT do tipo quadróptero de pequeno porte que sofreu adaptações em sua estrutura para receber um sistema embarcado que passa a atuar no veículo como sistema de controle externo. O veículo recebeu alterações na parte central da sua estrutura onde foi empilhado sobre sua controladora de voo um suporte para fixação da placa de controle externo, no caso uma placa Raspberry Pi modelo B Rev. 2, todos os detalhes do veículo e do sistema podem ser observados na Tabela 5.3.

A conexão entre a controladora de voo e o sistema de controle externo se dá por meio de uma conexão serial entre as duas partes, que utiliza 4 pinos GPIO da placa Raspberry Pi (dois pinos de alimentação e dois de comunicação) conectados aos pinos de telemetria da controladora de voo conforme Figura 5.2 que apresenta a montagem do sistema. Essa comunicação ocorre via protocolo MAVLink com o envio e o recebimento de mensagens padronizadas pelo protocolo.

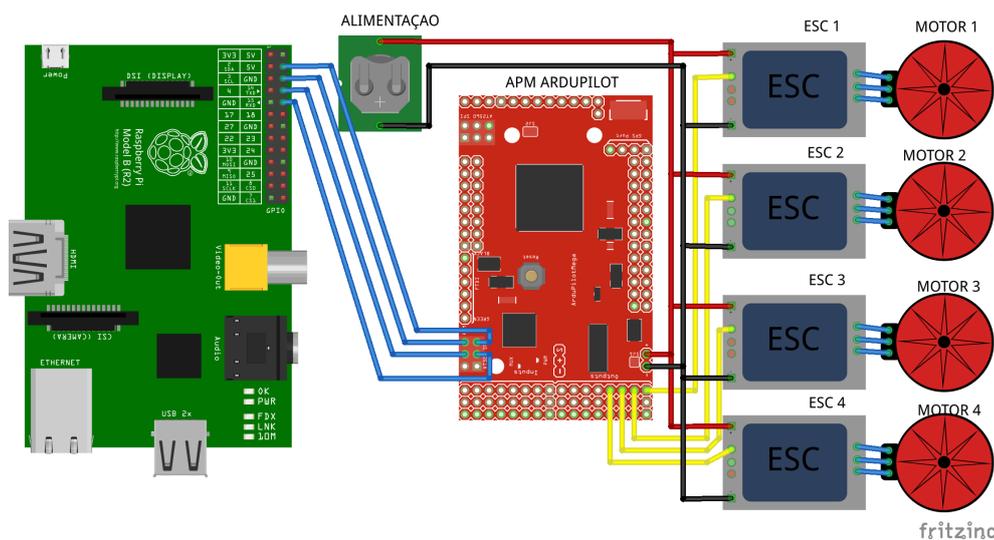


Figura 5.2: Esquema de montagem do VANT

Levando em consideração o presente trabalho foram analisadas todos os atributos fornecidos pela API Dronekit e dentre eles foram escolhidos aqueles que poderiam traduzir de alguma forma o comportamento do veículo, portanto, variáveis que forneciam informações sobre a altitude do veículo, bem como sua inclinação nos seus eixos e rotação, representados respectivamente pelos atributos `RELATIVE LOCATION ALT`, `ATTITUDE PITCH`, `ATTITUDE YAW`, `ATTITUDE ROLL` e `HEADING`.

Como foram utilizadas hélices de fibra de carbono e hélices de nylon nos experimentos,



Tabela 5.3: Especificações do VANT

| Especificação                  | Valor                                       |
|--------------------------------|---|
| Peso do VANT (sem periféricos) | 875g (com bateria: 1070g)                   |
| Peso da Bateria                | 195g (3s, 2200mAh, 25c, 11.1v)              |
| Peso do VANT (com periféricos) | 975g  |
| Peso dos periféricos           | 100g  |
| Comprimento diagonal do VANT   | 70cm com hélices / 50cm sem hélices         |
| Altura do VANT                 | 16cm sem periféricos / 21cm com periféricos |
| Modelo do Frame                | Frame Q450                                  |
| Modelo da Controladora         | Ardupilot APM 2.6                           |
| Modelo dos Motores             | Multistar 2212 de 920Kv                     |
| Modelo do ESC                  | EMAX [4 em 1] 25A Simonk                    |
| Hélices                        | Modelo 1045R (10x4.5 polegadas)             |

foram escolhidos dois voos realizados com cada tipo de hélice para análise de dados, um voo visivelmente instável e outro visivelmente mais estável, uma tentativa de identificar se essas variáveis expressavam claramente a diferença de comportamento do veículo nos voos. Esses dados são apresentados a seguir pelas figuras 5.3 e 5.4, nas quais os gráficos situados na coluna à esquerda apresentam dados de um voo estável nas duas figuras, enquanto a coluna da direita apresenta gráficos com dados de voos visivelmente instáveis.

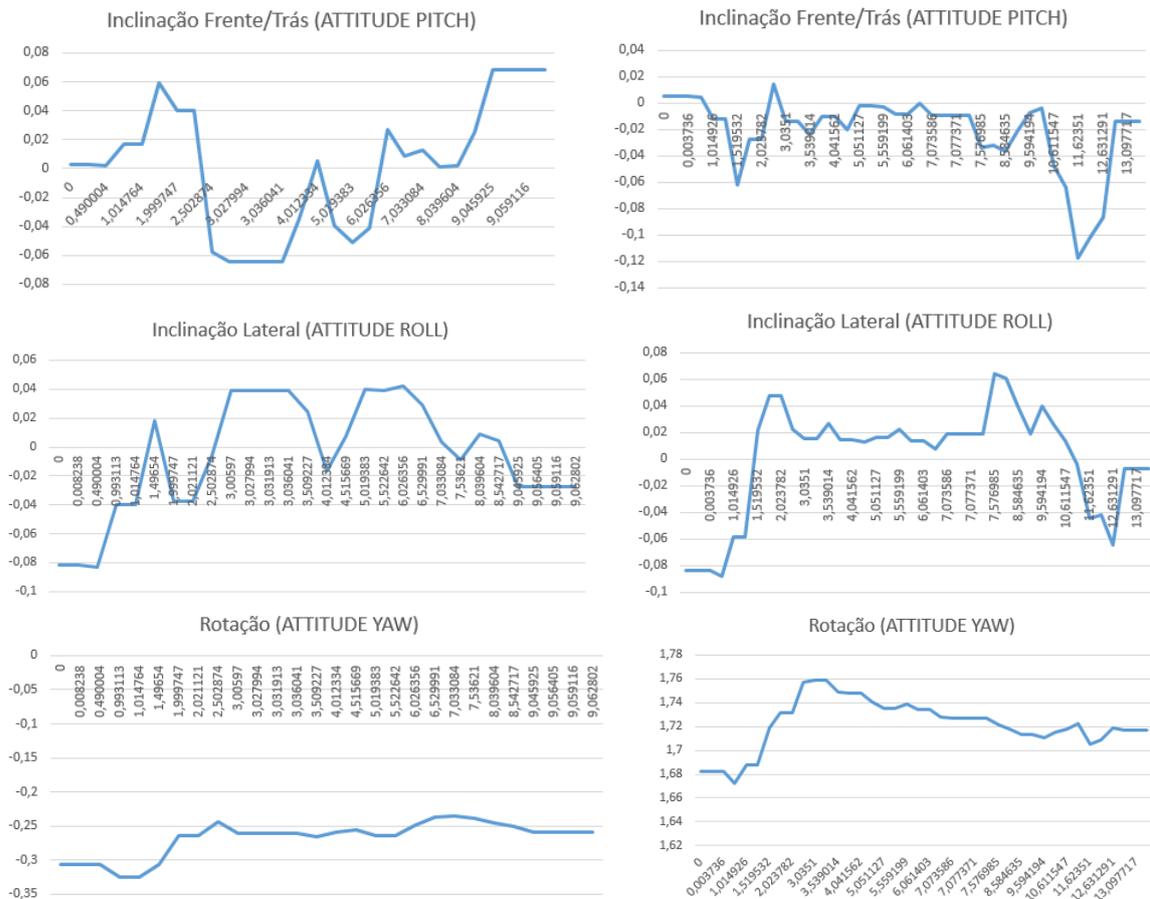


Figura 5.3: Dados de voo com hélices de fibra de carbono

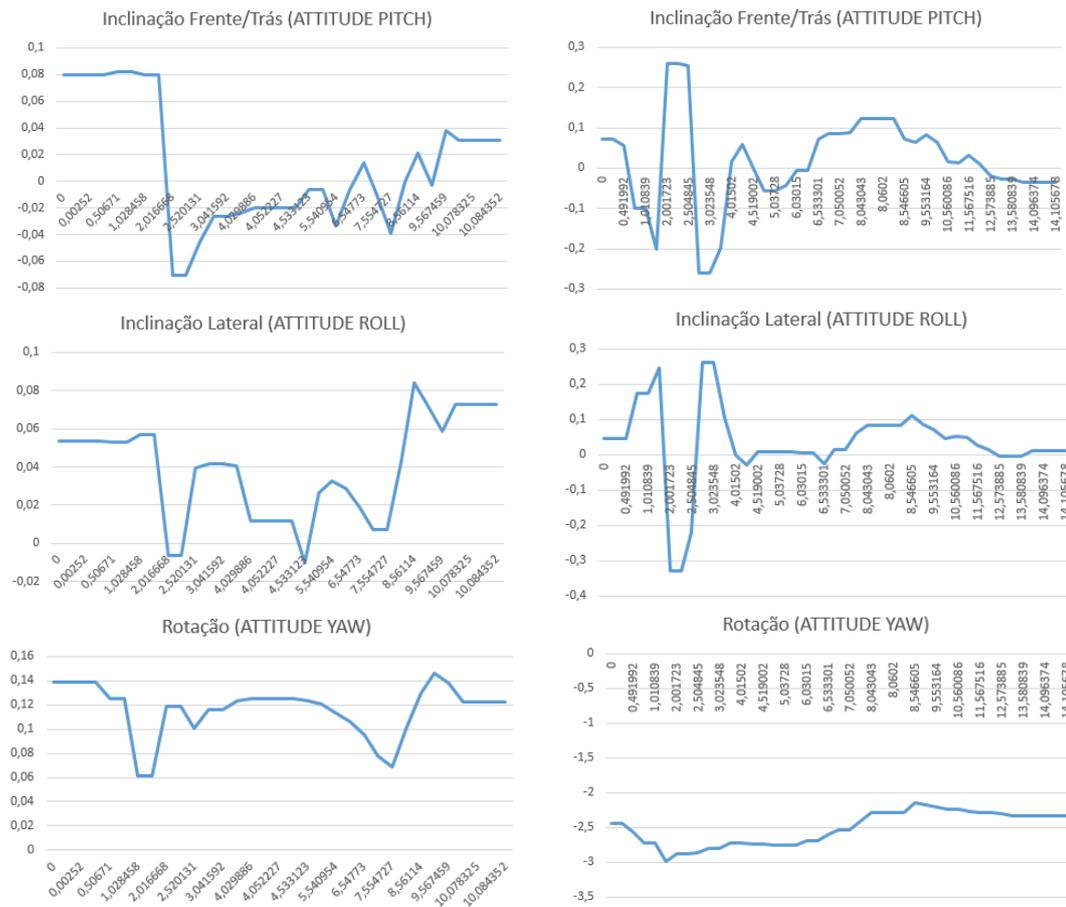


Figura 5.4: Dados de voo com hélices de nylon

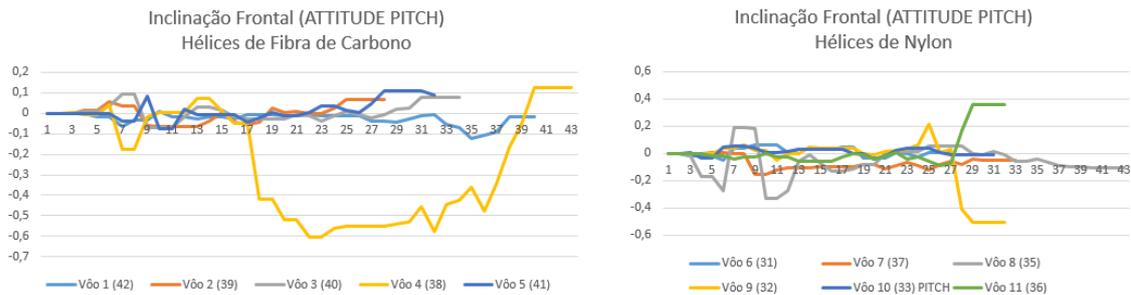


Figura 5.5: Dados de voo relativos à inclinação frontal

Observando os gráficos apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4 não é possível perceber diferenças significativas entre os dados dos voos estáveis em comparação com os dados dos voos instáveis, assim sendo, essa análise permite diferenciar um voo instável de um estável apenas baseando-se nos dados brutos dos atributos de voo. Apesar de não ser possível quantificar a estabilidade do veículo a partir da análise dos dados apresentados, foi a partir desses dados que foram identificadas quais variáveis possuem maiores e mais significativas variações em seus valores: as inclinações frontal e lateral.

### Análise de inclinação frontal e lateral

A inclinação frontal e lateral de um VANT são variáveis que, durante um voo em condições idênticas às descritas para este experimento, devem sofrer variações mínimas, uma vez que não existe um trajeto horizontal a ser percorrido, nem estão programadas mudanças no curso do voo que exijam que o veículo realize manobras que justifiquem as alterações nessas duas variáveis, pelo contrário, devem variar o mínimo possível.

Baseado nessa constatação, os dados de inclinação frontal e lateral de todos os voos com os dois tipos de hélices foram agrupados e os dados foram analisados a partir do momento da decolagem do veículo, até o comando para pouso ser acionado e realizado. Dessa forma foi percebido que os voos com a estabilidade comprometida possuem valores que variam positiva ou negativamente em relação a zero, conforme pode ser percebido nas figuras 5.5 e 5.6.

Os gráficos apresentados nas figuras 5.5 e 5.6 mostram o comportamento do veículo durante todos os voos realizados durante essa fase do experimento, com foco nas diferenças

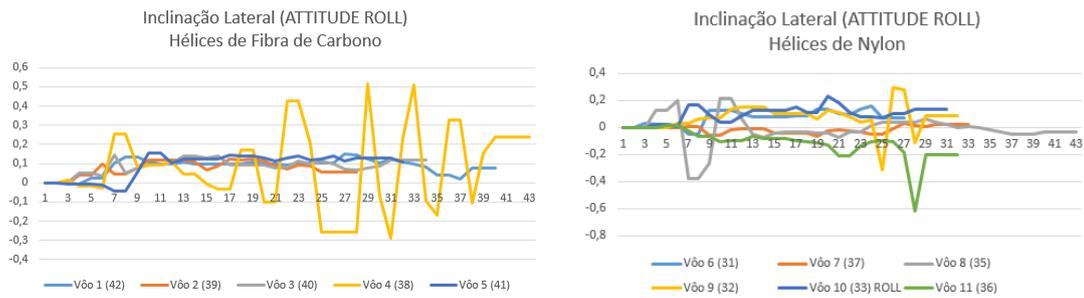


Figura 5.6: Dados de voo com relativos à inclinação lateral

entre o comportamento de cada um deles. Os gráficos colocados à direita apresentam os os dados obtidos nos voos realizados utilizando hélices de fibra de carbono, enquanto os gráficos à direita apresentam dados de voos realizados com hélices de nylon.

A partir desses gráficos é possível perceber que existem consideráveis variações em todos os voos, dentre todos os voos apenas o Voo 4 apresentou comportamento visivelmente diferente dos demais, porém a análise desses dados não permite identificar a existência de um padrão de comportamento de estabilidade, da mesma forma, ainda não é possível afirmar precisamente que um voo foi mais estável que outro baseando-se apenas nas informações analisadas, para isso se faz necessário realizar uma análise mais profunda verificando dados de média e desvio padrão desses mesmos voos.

### **Análise de Média e Desvio Padrão nos valores de inclinação lateral e frontal**

A análise dos dados dos voos realizados para este experimento mostrou que não é possível determinar de forma precisa quais voos ocorreram de maneira mais estável que outros, assim como não é possível quantificar a estabilidade de um determinado voo. A partir dessa constatação foram analisados os dados calculando a média e o desvio padrão de todos os voos. O resultado desses cálculos estão expressos na tabela 5.4.

Os dados apresentados na tabela 5.4 mostram com maior clareza diferenças numéricas entre os valores de média e desvio padrão para todos os voos, podendo-se afirmar que um voo ocorreu de maneira mais estável que outro considerando como base o valor do desvio padrão daquele voo. Isso é possível porque quanto mais elevado o valor do desvio padrão em um voo, mais instável foi o comportamento do veículo durante aquele voo. Até o momento,

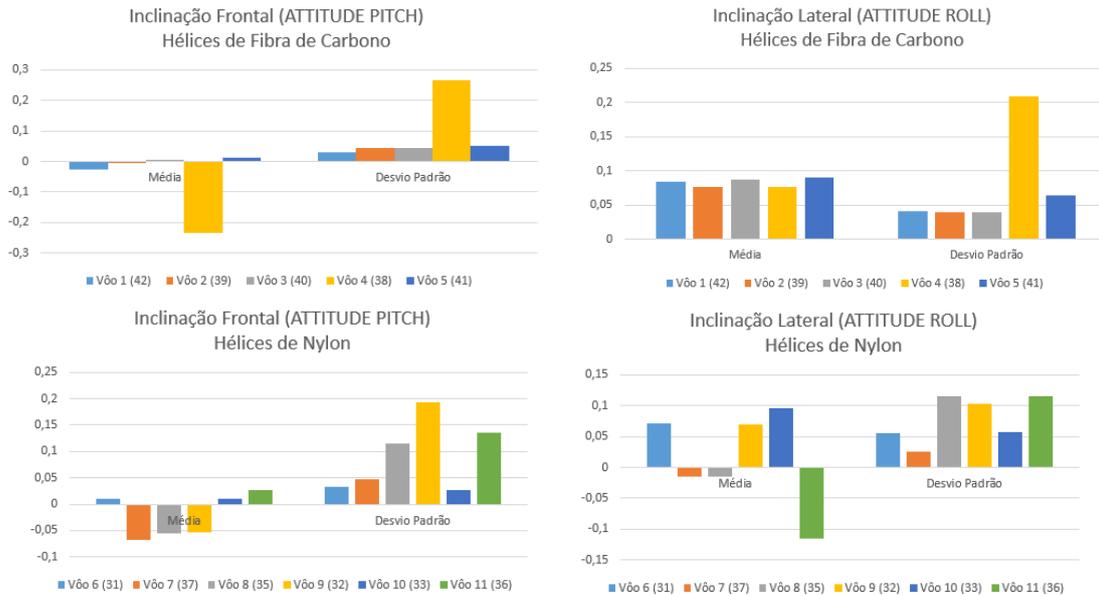


Figura 5.7: Dados de média e desvio padrão de inclinação lateral e frontal de todos os voos

o desvio padrão é um bom indicador de estabilidade dos voos, pois quanto mais próximo de zero, mais estável para os valores das inclinações lateral e frontal.

Para entender de forma mais clara a relação entre a média e desvio padrão e a estabilidade de um voo vamos analisar os gráficos expressos na Figura 5.7, que comparam essas informações de todos os voos com os dois tipos de hélices. Nos gráficos é possível perceber uma certa variação nas médias de um voo para o outro, porém o desvio padrão é o dado que destaca os voos que podem ser classificados como instáveis.

### Conclusões do experimento

A análise dos dados de inclinação lateral e frontal afirma que um voo mais estável em relação a outro é aquele que possui um valor para desvio padrão menor que outro para os valores das inclinações lateral e frontal, tornando possível que a partir de uma análise mais detalhada de um número maior de voos, estabelecer com maior precisão parâmetros para quantificar a estabilidade de um voo levando em consideração apenas um conjunto de dados, incluindo o desvio padrão.

Apesar da API Dronekit fornecer uma base para controle do veículo e fornecimento de dados de estado do VANT, apenas a segunda parte mostrou funcionamento prático satisfató-

rio, o controle do veículo apresentou desempenho prático inferior ao esperado, oferecendo risco ao veículo em suas missões de voo com sérias falhas que acarretaram alguns incidentes que comprometeram a realização do experimento. Por essa razão a API dronekit passa a ser substituída por outra estratégia de controle nas etapas seguintes da experimentação.

Apesar das constatações desta pesquisa até o momento, apenas com a realização de novos experimentos, com um número maior de amostras de voo em diferentes condições e ambientes é que será possível definir com clareza um padrão de comportamento para os voos estáveis, bem como diferenciar um voo de outro, julgando qual ocorreu em condições de estabilidade mais elevadas.

### **5.1.2 Experimento utilizando Arduino Mega no sistema de controle externo e monitoramento via sensoriamento externo**

A segunda etapa do processo de experimentação desse trabalho surge para preencher uma lacuna identificada na etapa de experimentos anteriores usando a API Dronekit: o controle do VANT. Quando os experimentos anteriores foram realizados, sérias deficiências no controle do veículo foram identificadas, o que levou à substituição da API Dronekit por outra estratégia de controle.

Os voos controlados pela API Dronekit sofriam fortes mudanças inesperadas no curso, sem que nenhum comando fosse gerado para essa ação, foi observado que dois voos realizados sob a mesma sequência de comandos, em condições idênticas apresentaram resultados diferentes, inclusive ocorreu de um voo ser bem sucedido e outro nas mesmas condições apresentar distúrbios fortes que chegaram a causar uma queda acidental do veículo. Além disso a API Dronekit é dependente do uso de GPS em suas missões de voo, o que é inviável no contexto de voos em ambientes internos, devido a graves falhas no funcionamento dos sistemas de GPS nesses locais.

Observando esse contexto, apresenta-se necessária a mudança da estratégia de controle do veículo e passa a ser considerada a retirada da API Dronekit do contexto do projeto devido às suas limitações. Como alternativa ao controle do veículo e coleta de dados do estado do veículo surge a possibilidade de usar Arduino nesse processo como estrutura de controle externo. Considerando que a controladora de voo recebe comandos via canais de

rádio quando o veículo é controlado por um piloto em solo, esses canais podem ser mapeados e emulados utilizando um Arduino para enviar comandos pelos mesmos canais, assim torna-se possível controlar o veículo através de um Arduino conectado à controladora de voo por meio dos canais de rádio. Dessa maneira a solução de controle torna-se genérica e compatível com qualquer veículo que possua esse tipo de comunicação, o que acontece com a grande maioria dos Veículos Aéreos Não Tripulados.

Nesta etapa do experimento já se conhece quais dados são relevantes para determinar a estabilidade de um VANT, porém, utilizar a API dronekit para realizar o controle tornou-se inviável, agora o controle externo do sistema passa a ser realizado por um arduino. Diante dessa situação surge um problema: os dados de voo que eram até então fornecidos pela controladora para o controle externo através da API Dronekit agora não estão mais disponíveis. A solução para este problema consiste na adição de sensoriamento externo, sensores conectados ao veículo que fornecerão ao controle externo os dados necessários para mensurar a estabilidade de um voo.

O objetivo central deste experimento está na identificação e quantificação de instabilidades ocorridas em um voo de um VANT, além de buscar identificar padrões de comportamento no voos em condições normais para esse tipo de veículo, usando como base as informações coletadas do sensoriamento. A realização desse experimento consiste de repetidos voos com um VANT executando exatamente o mesmo procedimento em todos os voos, em condições ambientais idênticas para que fosse possível obter aproximadamente os mesmos resultados. O procedimento desse experimento consiste em realizar um voo simples, de curta duração e com coleta de dados em intervalos muito curtos, ou seja, uma alta frequência de coleta de dados o que ocasiona em uma grande quantidade de amostras do estado do veículo durante o voo. A missão executada durante o experimento consiste de cinco etapas:

1. Armar os motores
2. Decolar até uma altura de 100 cm (1 metro)
3. Permanecer imóvel no ar, estabilizado em todos os eixos durante 10 segundos
4. Pousar no solo
5. Desarmar os motores



Essa mesma sequência de passos se sucedeu em todos os voos realizados nesta etapa da experimentação, portanto todos os voos que não sofreram nenhuma influência externa ou falha no sistema de controle devem apresentar um conjunto de dados com valores semelhantes. Para assegurar a ausência de influências externas, todos os voos foram realizados no mesmo ambiente com controle de influências ambientais sobre o veículo e conseqüentemente sobre o experimento. Os voos foram realizados no mesmo ambiente da etapa anterior, o espaço de testes de voo do Laboratório de Sistemas Embarcados e Robótica (LaSER) da UFPB com dimensões que superam os 12x8x5 metros de comprimento, largura e altura respectivamente, um ambiente completamente livre de influências de vento.

Tendo em vista que exatamente a mesma rotina de código foi executada nos diferentes voos e essa rotina é automatizada, ou seja, não sofre interferência humana, podendo ser repetida exatamente da mesma forma inúmeras vezes. Com a realização desse experimento busca-se permitir a identificação de um padrão de comportamento do veículo em seus repetidos voos. Para explicar o funcionamento das rotinas de voo automatizadas, um trecho do algoritmo utilizado pela função responsável pela decolagem do veículo, é apresentado a seguir com suas etapas e os procedimentos adotados.

---

```
1 funcao decolar(altitude_alvo){
2   caixa_preta (estado_veiculo)
3   alerta_sonoro(decolagem)
4   calcular (altitude_atual)
5   calcular (aceleracao_de_saida_do_solo)
6   definir x = 2
7   enquanto (altitude_atual < altitude_alvo){
8     se (aceleracao_atual < aceleracao_de_saida_do_solo){
9       aceleracao += 2
10    }senal se((2 - log(x)) > 0){
11      x+=0.03
12      aceleracao += (2 - log(x))
13    }
14  }
15  alerta_sonoro(altitude_alvo)
16 }
```

---

Nesse algoritmo é possível perceber que a função decolar envolve diversas operações como o envio de dados para a caixa preta, a emissão de alertas sonoros, calcula informações a partir de alguns dados, envia comandos etc. Assim é possível perceber que vários elementos atuam nesse algoritmo desempenhando diferentes papéis. As funcionalidades apresentadas

no algoritmo envolvem diferentes componentes da arquitetura do sistema, como o sensoriamento, a caixa preta e o sistema de controle externo, o conjunto desses componentes formam a arquitetura do sistema.

A arquitetura proposta para o sistema utilizado nessa etapa da experimentação é apresentada na Figura 5.8. Observando essa arquitetura é possível identificar quais são esses componentes e os fluxos de dados pelos quais acontecem as interações entre os componentes. Uma parte desse fluxo de dados é percebida quando os dados do sensoriamento são enviados ao controle externo que os armazena em uma outra estrutura: a caixa preta. O sistema de controle externo também realiza o processamento desses dados e a partir deles toma decisões e gera comandos PWM para a controladora de voo, esses comandos também são enviados à caixa preta para serem persistidos, dessa forma ocorrem o controle do veículo e o armazenamento dos dados do estado do veículo durante o voo para posterior recuperação.

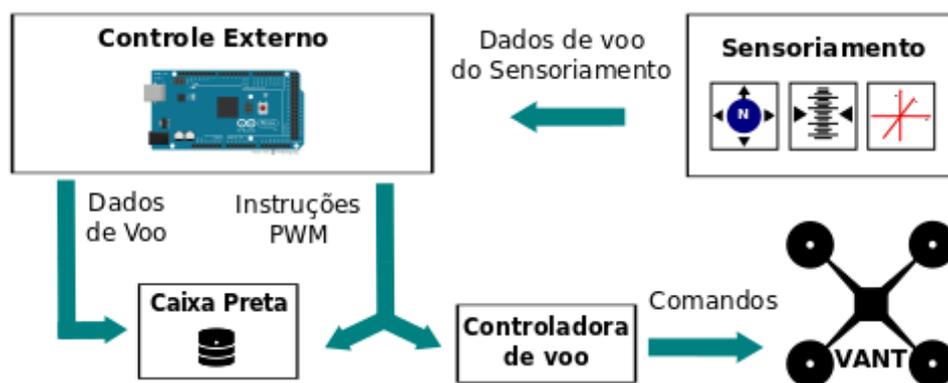


Figura 5.8: Arquitetura do sistema usando Arduino Mega

A arquitetura desse sistema está organizada de modo a possibilitar o controle do veículo com base nas informações do estado dele próprio durante o voo, ou seja, o processo de tomada de decisões de controle é baseado nas informações do sensoriamento do próprio veículo em tempo de voo. Todas essas informações são persistidas em memória não volátil para posterior recuperação e análise. Sendo assim, os dados coletados pelos sensores no sensoriamento desempenham um papel essencial no processo de comando das ações do veículo. Os dados que são coletados pelo sensoriamento, tão importantes para o funcionamento do sistema proposto podem ser visualizados na Tabela 5.5.

Um total de cinco sensores atuam no sensoriamento permitindo que sejam coletados dados que mostram o estado do veículo, com foco nos dados que mostram o posicionamento

do veículo em X, Y e Z, pois esses são os dados que melhor traduzem o estado do veículo quanto à estabilidade, uma vez que a ocorrência de inclinações em qualquer desses eixos pode indicar apenas duas coisas, movimento em alguma direção, pois o veículo inclina-se no plano para deslocar-se ou a ocorrência de instabilidades.

Buscando diferenciar a ocorrência de uma mudança inclinação do veículo direcionada a movimento, da ocorrência de uma inclinação que caracteriza uma instabilidade, torna-se necessário avaliar os comandos que são enviados à controladora, e assim perceber se a inclinação ocorrida é proveniente de um comando, ou seja, é uma ocorrência gerada pelo sistema, ou se trata-se de uma inclinação provocada por um fator externo e, portanto, um distúrbio. Por essa razão, todos os comandos enviados à controladora de voo são armazenados na caixa preta junto com o estado do veículo no mesmo instante de tempo, conforme pode ser visualizado na Tabela 5.6, que apresenta todos os comandos e estados armazenados pela Caixa Preta.

Os dados de comandos enviados à caixa preta incluem todos os valores PWM dos canais de rádio mapeados pela controladora de voo, ou seja, aceleração vertical, aceleração horizontal nos planos lateral e frontal, além da rotação do veículo em seu próprio eixo e a mudança de modos de voo. Por outro lado, quando o sistema prepara uma mudança no curso do veículo, uma decolagem, uma aceleração vertical ou horizontal, qualquer comando que seja dado possui uma indicação e uma descrição que também são armazenados juntamente com o instante de tempo que ocorreu o comando.

Todos esses dados precisam ser coletados em intervalos de tempo mais curtos possíveis para que seja possível o sistema perceber mais rapidamente as alterações, e por outro lado, quanto maior a quantidade de amostras do estado do veículo, maior a precisão na quantificação das instabilidades. No experimento atual, a taxa de coleta de amostras superior a 200 amostras por voo, sendo que cada voo possui duração estimada inferior a 30 segundos, o que torna-se um número ainda baixo de amostras, podendo ser ampliado e experimentos futuros.

A implementação dessa arquitetura do sistema é implementada em um sistema embarcado real com o sensoriamento sendo realizados por um conjunto de sensores, o sistema de controle externo implementado em um Arduino Mega e a caixa preta onde os dados são persistidos usa um Módulo de cartão SD e um cartão para armazenar as informações, conforme pode ser visto na Figura 5.9.

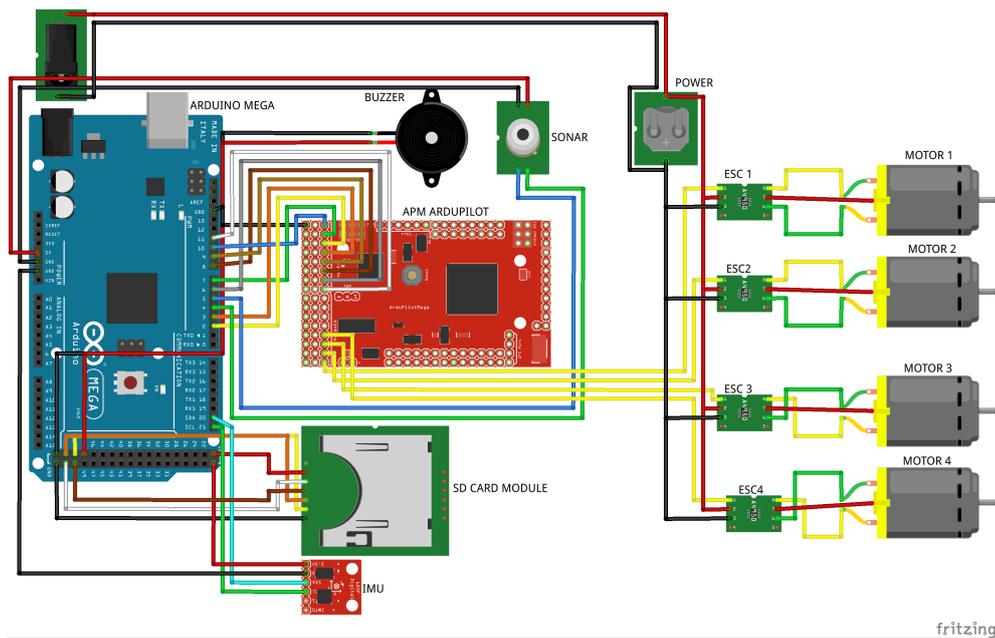


Figura 5.9: Esquema de conexões entre o Sistema Embarcado e o VANT

Observando o esquema da implementação do sistema embarcado é possível perceber que os sensores estão conectados ao sistema que é embarcado no VANT. Uma característica importante que pode ser visualizada na Figura 5.9 é o fato de a Controladora de Voo não receber diretamente os sensores, ou seja, ela é colocada nessa arquitetura como um terminal de controle dos motores, tendo sua capacidade de processamento dedicada para essa única função. Por outro lado, o sistema de controle externo é responsável pelo gerenciamento dos sensores e pela Caixa Preta que é implementada a partir do Arduino. Além disso, o Arduino realiza o trabalho do controle externo, enviando comandos à controladora de voo. A especificação de cada componente que faz parte do sistema é apresentada na Tabela 5.7.

Todos esses periféricos foram adicionados ao veículo no contexto do sistema embarcado, mas tudo isso gera um custo de peso que o VANT precisa carregar em suas missões de voo, sendo que isso pode interferir no seu desempenho caso esses componentes sejam mal colocados, caso haja folga no acoplamento dos componentes, ou se os componentes acoplados forem colocados de maneira que desequilibre o peso da estrutura, isso pode causar descompensamento nos motores e o veículo não conseguir, por exemplo permanecer estável. No caso desse experimento, o VANT utilizado possui as especificações apresentadas na Tabela 5.8.

Levando em consideração os dados apresentados na Tabela 5.8 é possível perceber o

efeito causado pelos componentes do sistema embarcado à estrutura. Por outro lado, uma alteração ocorreu em relação ao experimento anterior (API Dronekit), no novo experimento o veículo sofreu alteração no sistema de alimentação, deixando de existir uma bateria como alimentador e passando a ser alimentado por uma fonte conectada ao veículo por meio de extensos cabos. Analisando as alterações causadas pelo sistema embarcado e seus periféricos percebe-se que foram mínimas, onde a adição dos novos componentes ocasionou um aumento no peso avaliado em 185g, enquanto a altura do veículo foi aumentada em apenas 5cm. Por outro lado, a alteração no sistema de alimentação causou uma diminuição do peso em 195g com a retirada da bateria, porém o uso de cabos causa alteração no peso de acordo com o quão elevado o veículo encontra-se do solo, chegando a 925g quando o veículo suspende toda a extensão do fio, onde o peso adicionado é proporcional à extensão de fio suspensa.



Figura 5.10: Voo realizado durante experimento em laboratório.

Conhecendo a missão que o veículo deve executar, o sistema embarcado responsável pelo controle externo e seus componentes, para possibilitar que o veículo desempenhe as missões e realize testes automatizados é necessário conhecer uma parte importante da arquitetura proposta para essa etapa do experimento: as instruções PWM enviadas do sistema de controle externo para a controladora de voo apresentadas na Tabela 5.9. Essas instruções comandam a controladora de voo no sentido de indicar quais intensidades deve enviar aos motores e assim realizar um movimento em algum dos planos (X, Y, Z, rotação etc) por outro lado

essas instruções podem indicar mudanças no modo de voo ativo e qual voo deve ser ativado, bem como instrução para armar e desarmar os motores no início ou término de um voo, exatamente como acontece quando o veículo é pilotado por uma pessoa em solo.

Algumas das instruções PWM enviadas à controladora necessitam de observar e/ou manipular alguns parâmetros, esses parâmetros são usados definir alguns pontos importantes da execução dos testes, por exemplo, a altitude que o veículo deve atingir, o tempo que o veículo deve permanecer estabilizado na execução da rotina de planar (hover) ou mesmo os limites toleráveis para a ocorrência de instabilidades, ou seja, valores de leituras dos sensores que se encontrarem fora desse limite tolerável indicam a ocorrência de uma instabilidade no veículo e acionam rotinas de correção para manter o veículo estável.

A definição dos valores para esses parâmetros pode mostrar o comportamento esperado para o veículo durante um determinado voo, a comparação entre os valores definidos para os parâmetros e os valores capturados pelo sensoramento mostram se o comportamento do veículo ocorreu como esperado, em outras palavras, a partir dos valores precisamente atribuídos aos parâmetros é possível prever como o veículo deve se comportar e com a análise após o voo é possível verificar se o veículo desempenhou um comportamento adequado ou não.

Durante essa etapa do experimento os voos foram realizados em um ambiente livre de interferências externas, o que tornou possível monitorar o estado do veículo observando as inclinações nos eixos X, Y e Z e identificando a estabilidade horizontal e vertical, e a partir disso foi possível indentificar e quantificar a ocorrência de instabilidades. Dos dados de voo considerados nesta etapa da experimentação, os dados de aceleração se destacam por conseguirem mostrar as mudanças de posicionamento do veículo. O acelerômetro presente no sensoramento da arquitetura do sistema embarcado apresentado nesse trabalho é capaz de capturar os valores das acelerações do veículo nos três eixos a cada instante durante o voo, os valores coletados durante um voo podem ser observados na Figura 5.11.

Os dados apresentados na Figura 5.11, por si só não são capazes de determinar a estabilidade do voo ao qual se referem, mas podem indicar instantes de tempo em que o veículo sofreu maiores ou menores alterações nos valores das acelerações nos eixos. Uma rápida análise sobre os dados apresentados nessa figura permite identificar que os valores das acelerações em todos os eixos tendem a zero quando o veículo entra em contato com o solo.

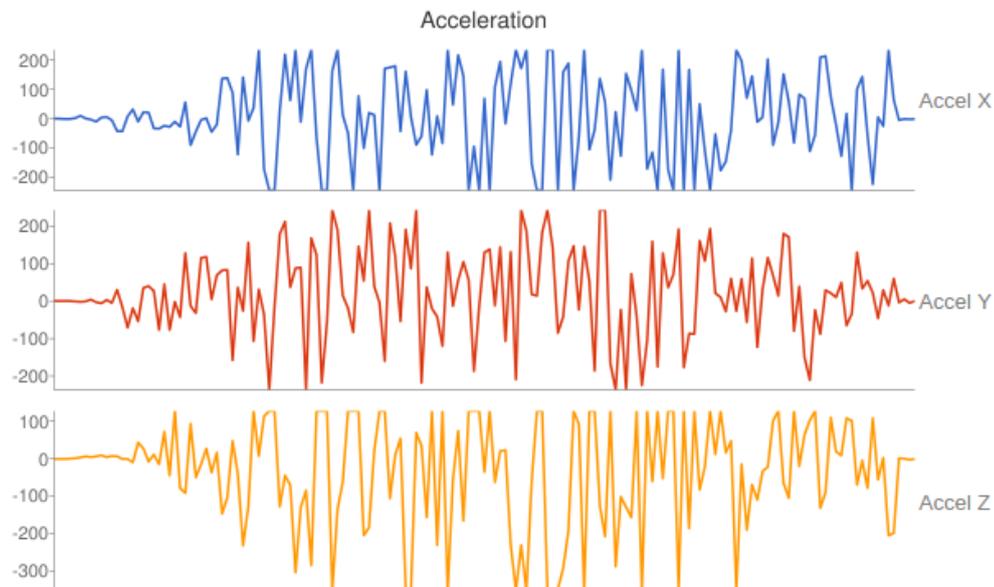


Figura 5.11: Monitoramento da Aceleração nos eixos X, Y e Z durante um voo

A partir dessa constatação é possível inferir que quanto maior a diferença entre o valor da aceleração e zero, maior a instabilidade.

É necessário considerar também a ocorrência de vibrações no veículo, que por sua vez são captadas pelo acelerômetro e isso pode causar ruídos nos valores da aceleração, ampliando a intensidade de uma variação na aceleração. Essas vibrações são normais tendo em vista que são provocadas pelo movimento das hélices e motores. Diante disso é necessário estabelecer um limiar de acelerações nos eixos que são consideradas dentro dos padrões normais. Na Figura 5.11 é possível observar a ocorrência de vibrações em todos os eixos durante o voo, porém nos momentos que antecedem a decolagem e os que sucedem ao pouso, os valores das acelerações tendem a zero.

Para compreender melhor o monitoramento da estabilidade do veículo foi adicionado um distúrbio proposital no veículo, nesse experimento ocorreu a adição de um peso de 80g em um dos lados do veículo comprometendo o equilíbrio do voo. As consequências dessa interferência externa para o voo pode ser observada no comportamento do veículo durante a etapa do voo onde o veículo deveria permanecer estável, sem movimentos durante um período de 10 segundos (execução da função Hover).

O comportamento do veículo durante o voo foi fortemente alterado com a adição em seu peso e equilíbrio. Esse fato obrigou o sistema de controle a corrigir a instabilidade

aumentando a potência dos motores para que produzissem uma força contrária à do distúrbio, buscando reestabilizar o veículo. Todas essas informações de instabilidade, a quantificação dessa ocorrência e a ação de correção foram percebidas pelo sistema de controle externo através dos sensores e armazenadas na Caixa Preta.

O gráfico apresentado na Figura 5.12 apresenta uma comparação entre dois voos, o primeiro deles apresenta dados de um voo estável, sem interferências e o segundo trata de um voo que sofreu um desequilíbrio proposital ocasionado pela adição de um distúrbio. No gráfico, a comparação entre o voo regular e o voo desbalanceado permite perceber que os dados dos dois voos seguem um padrão durante a maior parte do tempo, sendo possível perceber diferenças significativas nos dados dos dois voos apenas no final do experimento com a adição do distúrbio.

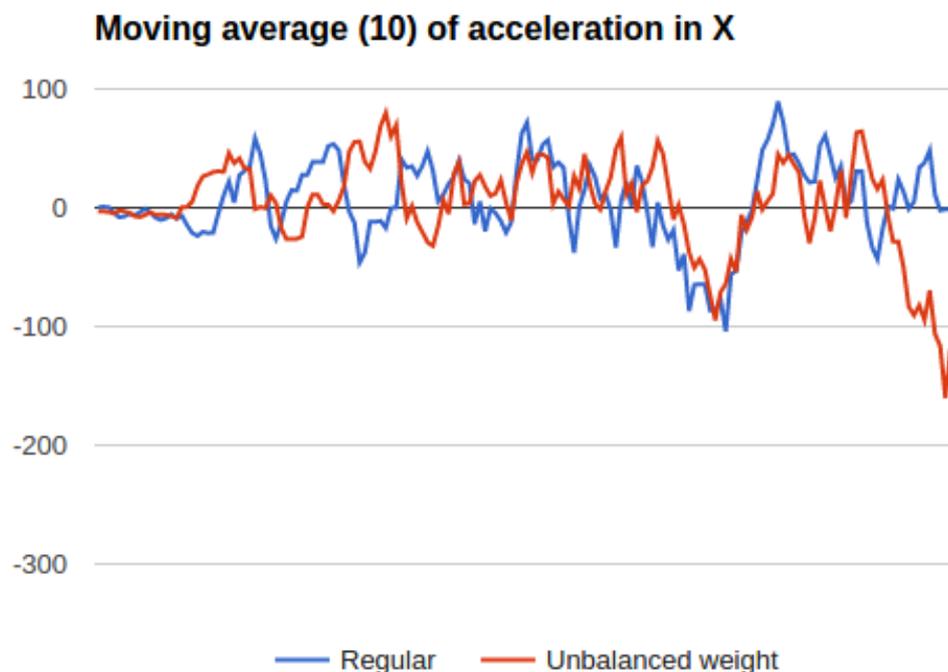


Figura 5.12: Média Móvel por 10 da aceleração no eixo X

Observando o gráfico da Figura 5.12 é possível concluir que é possível identificar a ocorrência de instabilidades em um voo analisando apenas os dados das suas inclinações nos eixos X, Y e Z. Essa identificação é o primeiro passo para se estabelecer um padrão de comportamento para voos ocorridos em condições normais, sem instabilidades, e a partir disso conseguir facilmente distinguir um voo estável de um que sofreu interferências externas.



### 5.1.3 Conclusão do Experimento

Esta etapa do trabalho apresentou um sistema de controle externo capaz de armazenar o estado de um VANT durante uma missão de voo. A análise desses dados possibilita identificar padrões de estabilidade do veículo. A partir da definição desses padrões, busca-se identificar e quantificar a ocorrência de instabilidades. O sistema de controle externo foi desenvolvido para ser facilmente acoplado a qualquer VANT que possua comunicação com radiocontroles de solo, tornando essa solução compatível com um elevado número de veículos, além disso, esse sistema é capaz de controlar o veículo, seus movimentos e ações, e também possui capacidade de monitorar o estado do veículo através de sensores e armazenar esses dados em uma Caixa Preta para posterior recuperação e análise.

Os experimentos realizados validam a solução proposta, demonstrando que é possível controlar externamente o veículo e analisar o estado do VANT durante ou depois do voo. É o primeiro passo do desenvolvimento de um sistema para o diagnóstico e recuperação de VANTs autonomamente. Em experimentos futuros, mais voos serão realizados a fim de identificar automaticamente os padrões e perturbações nos voos, com a implementação de ações corretivas para os distúrbios identificados. Algumas abordagens de Aprendizado de Máquina estão sendo estudadas para serem aplicado a essa solução.

### 5.1.4 Experimento usando Intel Genuino 101 no sistema de Controle e Monitoramento com sensoriamento externo

O objetivo da terceira etapa da experimentação do presente trabalho envolve a identificação de ocorrências de instabilidades durante um voo de um VANT por meio do estabelecimento de padrões nos dados das acelerações e velocidade angular nos eixos X, Y e Z, pois esses dados refletem as inclinações ocorridas no veículo durante o voo. Buscando estabelecer um padrão de comportamento para voos que não sofreram interferências ou ocorrências de instabilidade. De posse do conhecimento acerca de quais dados melhor refletem os padrões de voo, o foco dessa etapa da experimentação é ampliar o número de voos realizados e o número de amostras do estado do veículo coletadas por voo para estabelecer precisamente um padrão de comportamento para os voos estáveis.

Essa etapa de experimentos é uma evolução das etapas anteriores, com diminuição no

tamanho dos componentes de hardware, conseqüentemente diminuição no espaço necessário para acoplar o sistema, assim como o peso total do sistema embarcado no VANT que também foi diminuído. Nesta etapa o poder computacional do sistema foi ampliado com a substituição da estrutura do sistema de controle externo. Essa fase envolve também melhorias no sistema de coleta de dados para possibilitar um aumento na quantidade de amostras do estado do veículo coletadas por voo, melhorias no sistema de controle externo, que passa a dispor de maior poder computacional para efetuar com maior eficiência o processamento das informações recebidas do sensoriamento e tomar decisões de comandos a serem enviados à controladora.

A maior evolução, a mais significativa mudança no sistema ocorreu no sensoriamento onde todos os sensores externos foram substituídos pelos sensores integrados da placa responsável pelo controle externo. Apesar de tantas mudanças no controle externo, a controladora de voo permaneceu inalterada, bem como o veículo utilizado nos experimentos que não sofreram nenhuma alteração. O mesmo aconteceu com o sistema de alimentação que permaneceu inalterado em relação à etapa anterior.

A Caixa Preta também sofreu alterações nos contextos de hardware e software, fisicamente passou a utilizar um cartão SD que permite acesso mais rápido ao sistema de arquivos, dessa forma as transações acontecem de maneira mais rápida, com o número de amostras coletadas por voo significativamente ampliadas em comparação com os experimentos anteriores. A capacidade de armazenamento da Caixa Preta também foi ampliada de 2GB para 32GB de armazenamento. Em software, as mudanças ocorridas na Caixa Preta ocorreram nos dados que são armazenados a cada instante, algumas informações deixaram de ser persistidas, enquanto outras novas passaram a ser armazenadas, por exemplo, as informações de direção e altitude do veículo deixaram de ser persistidas, por outro lado, a informação acerca de qual função está sendo executada em cada instante passou a ser persistida, o mesmo acontece com o modo de voo ativo, além do valor PWM do canal de rádio responsável pela alteração no modo de voo que já era armazenado, também a informação acerca de qual modo de voo deve estar ativo no momento também passou a ser persistida.

Mudanças significativas também ocorreram no procedimento de voo do experimento, foi dado mais ênfase aos procedimentos de verificação de funcionamento dos componentes do sistema embarcado, ou seja, antes do início de cada procedimento de voo os componentes

como a Caixa Preta e os canais de comunicação são verificados, ocorrendo casos onde o veículo é impedido de decolar porque o sistema de controle externo identificou problemas em alguma parte do sistema embarcado, como a ausência do cartão de memória para armazenar os dados da Caixa Preta. A sequência de operações adotadas no procedimento de voo desse experimento pode ser visualizado a seguir:

1. Inicializar Sensoriamento
2. Inicializar/Habilitar canais de comunicação
3. Verificar/Inicializar Caixa Preta
4. Emitir alerta sonoro pré voo
5. Persistir estado do veículo
6. Aguardar inicialização da Controladora de voo
7. Persistir estado do veículo
8. Armar os motores
9. Decolar até a aceleração de término de decolagem ser alcançada
10. Permanecer imóvel no ar, estabilizado em todos os eixos durante 10 segundos
11. Pousar no solo
12. Persistir estado do veículo
13. Desarmar os motores
14. Emitir alerta sonoro pós voo
15. Aguardar um período de 10 segundos e retornar ao item 4

Alertas sonoros passaram a ser utilizados de maneira mais efetiva em todos os procedimentos de voo, bem como em todas as funções executadas pelo controle externo emitem esse tipo de alerta, no sentido de evitar acidentes ao informar que há um veículo autônomo atuando na área, ou simplesmente para indicar o acionamento de motores ou procedimento

de pouco. A sequência de execução das funções de voo permaneceu inalterada em relação ao experimento anterior, permanecendo com as ações de armar motores, em seguida decolar, aguardar, pousar e desarmar motores. Apesar da sequência do experimento não ter sofrido alterações, os procedimentos de decolagem e pouso sofreram mudanças significativas, deixando de funcionar com base na altitude medida por sonar ou por sensores da controladora, essas funções passaram a operar com base no valor de controle da aceleração enviada aos motores. Nessa nova abordagem o veículo move-se verticalmente baseando-se apenas nos valores atribuídos à aceleração dos motores em função do tempo.

Da mesma maneira que os experimentos anteriores, os voos realizados na terceira etapa da experimentação ocorreram de maneira exatamente igual entre si, executando exatamente as mesmas funções e na mesma sequência. Assim, em cada voo realizado nessa etapa, o veículo recebeu exatamente os mesmos comandos no mesmo espaço de tempo para que realize e repita sempre a mesma ação em todos os voos. O trecho de código a seguir apresenta o algoritmo da função executada no procedimento de decolagem do veículo, nesse algoritmo é possível identificar a estratégia de decolagem sem o uso de informações da altitude, sendo usado apenas o comando de aceleração para controlar e deslocar positiva ou negativamente o veículo na direção vertical.

---

```
1 funcao decolar(){
2     alerta_sonoro(preparar_decolagem)
3     caixa_preta (estado_veiculo)
4     enquanto (aceleracao_atual < aceleracao_de_final_de_decolagem){
5         acelerar(aceleracao_atual);
6         aceleracao_atual += 1;
7         caixa_preta (estado_veiculo)
8         aguardar(200); //tempo em milissegundos
9     }
10    alerta_sonoro(decolagem_finalizada)
11 }
```

---

O ambiente utilizado para a realização desses experimentos foi o mesmo usado nos anteriores, o espaço para teste de voo do Laboratório LaSER da UFPB. onde foi possível interferir propositalmente no voo, liberando correntes de vento no ambiente do experimento e analisando o comportamento do veículo diante da turbulência causada propositalmente.

Nesse ambiente foram realizados diversos voos de procedimentos idênticos, utilizando o mesmo veículo em todos os voos, esse veículo possui um sistema embarcado evoluído das

etapas de experimentos anteriores que está estruturado conforme a arquitetura apresentada na Figura 5.13. Essa arquitetura é muito semelhante à arquitetura proposta nos experimentos anteriores, porém apresenta alterações em relação às arquiteturas das etapas passadas, essas alterações serão descritas nos parágrafos que seguem.

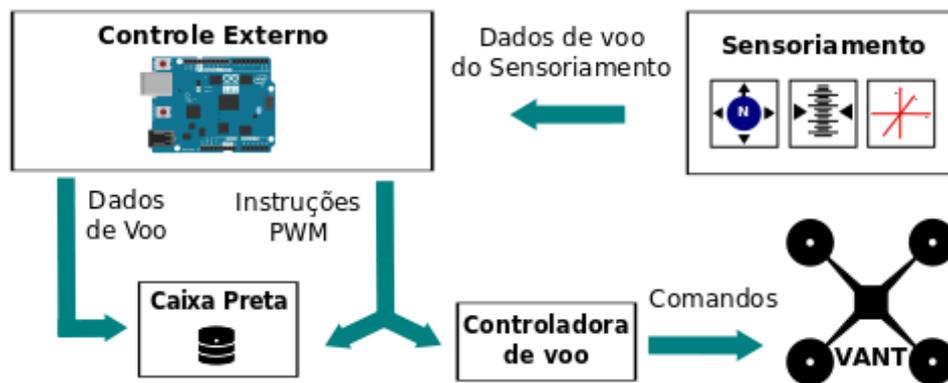


Figura 5.13: Arquitetura do sistema embarcado

A arquitetura do sistema implementada para essa etapa do experimento foi montada sobre o mesmo VANT utilizado nas etapas anteriores, a principal diferença em relação à arquitetura anterior está na inclusão do novo sistema de controle externo, agora, com menos componentes externos acoplados, necessita de cada vez menos conexões, simplificando a sua prototipação. O novo sistema de controle externo funciona sobre o Arduino Genuino 101 que já possui sensores embarcados nativamente na placa, dispensando assim a inclusão de sensores externos, por isso necessita apenas estabelecer conexões físicas entre os outros componentes da arquitetura, conforme estabelecido na Figura 5.14.

As conexões apresentadas na Figura 5.14 permitem observar a montagem do sistema e a comunicação entre os componentes. Vemos que apenas dois componentes do sistema embarcado possuem conexão com o controle externo, o módulo de cartão SD e o alarme sonoro. As outras duas conexões existentes são a alimentação do sistema e a conexão entre o controle externo e a controladora de voo por meio dos canais digitais compatíveis com PWM no lado do controle externo interligados aos canais de rádio na controladora. A controladora possui 8 canais através dos quais recebe sinais de pilotos em solo, desses, 5 canais estão sendo mapeados: o canal de controle de aceleração vertical (THROTTLE), deslocamento horizontal (PITCH e ROLL, respectivamente deslocamento em direção frontal e lateral), rotação (YAW) e o canal utilizado para mudança no modo de voo ativo no momento (MODE

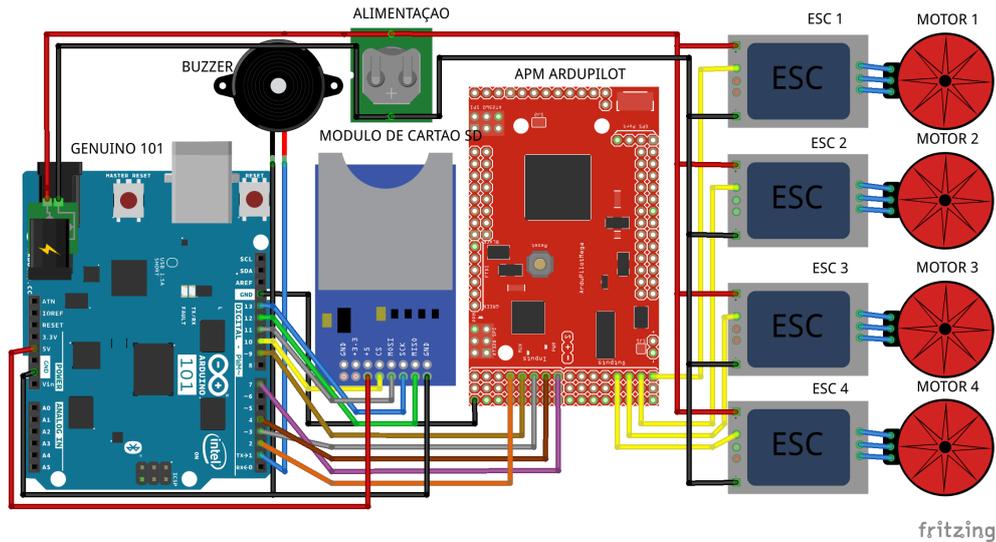


Figura 5.14: Esquema de conexões do sistema

SWITCH).

Das conexões apresentadas, nenhuma está associada a componentes da arquitetura ligados ao sensoriamento, pois todos os sensores utilizados nessa etapa da experimentação são integrados ao IMU, parte do Intel Genuino 101. O sensoriamento da arquitetura proposta é composto apenas por dois sensores: acelerômetro e Giroscópio, ambos de três eixos, que juntos fornecem informação completa sobre o estado do veículo quanto ao seu posicionamento tridimensional nos eixos X, Y e Z a cada instante, de maneira que a partir desses dados é possível estabelecer as variações de movimento e inclinação do veículo durante uma missão de voo. A Tabela 5.11 apresenta esses sensores e os dados por eles fornecidos.

O número de sensores utilizados no sensoriamento do veículo foi reduzido em comparação com as etapas anteriores da experimentação, apenas dois sensores estão em uso e ambos integrados à Curie IMU. O sistema embarcado proposto nesta solução é composto por mais alguns periféricos, conforme descrito na arquitetura: O sistema de controle externo, o armazenamento de dados, o sistema de alarmes sonoros, etc. Todos esses componentes estão descritos na Tabela 5.12 com o tipo e o modelo de cada componente.

Os dados do sensoriamento são muito importantes para a percepção de alterações no posicionamento do veículo, mas determinar a ocorrência de instabilidades durante o voo de um VANT é uma tarefa que exige mais informações, por exemplo, os comandos enviados à controladora de voo que podem determinar se alguma mudança da estabilidade detectada

pelo sensoriamento, trata-se de algo provocado por fatores externos ou por comandos originados no controle externo. Em síntese, os dados dos sensores traduzem o comportamento do veículo, porém é necessário conhecer o estado dos comandos do controle externo para então determinar se ocorreu uma instabilidade ou uma reação esperada, por essa razão, tanto os dados do sensoriamento, quanto os comandos do sistema de controle externo são armazenados pela caixa preta.

A Tabela 5.13 apresenta todos os dados manipulados pelo sistema de caixa preta, ou seja, todas as informações relacionadas ao posicionamento do veículo no plano tridimensional, com seus valores de aceleração e velocidade angular nos três eixos, dados que são gerados pelo sensoriamento e os comandos fornecidos pelo controle externo à controladora de voo, bem como o tempo corrente em milissegundos e os valores PWM que estão sendo transmitidos a cada instante pelos canais de comunicação entre o controle externo e a controladora de voo.

Todos esses dados formam a composição do estado do veículo. Estado que é gerado e armazenado em uma frequência de coleta em torno de 750 amostras capturadas durante um voo de duração inferior a 60 segundo. Em comparação com os experimentos realizados nas etapas anteriores, a taxa de capturas foi ampliada de 200 amostras na segunda etapa da experimentação (Arduino Mega) para 750 amostras na etapa atual. Já em relação à primeira etapa (API Dronekit), o número de amostras foi expandido de 60 para as 750 amostras por voo da etapa atual. Essas amostras são coletadas durante a execução de funções que controlam de alguma maneira o comportamento do veículo.

Essas funções são executadas no controle externo e atuam no sistema manipulando o comportamento e movimento do veículo, são responsáveis pelo deslocamento do veículo nos planos horizontal e vertical, bem como movimento de rotação e os processos de decolagem, pouso arme e desarme dos motores. Todas essas funções são apresentadas na Tabela 5.14, cada uma com a sua respectiva descrição acerca da ação que é executada pelo veículo quando uma determinada função é invocada.

Essas funções proporcionam toda a operacionalização do veículo, seus movimentos e deslocamentos, porém, a execução de uma missão de voo, mesmo em condições ideais, sem o veículo realizar movimentos bruscos, faz-se necessário que alguns parâmetros sejam determinados. Esses parâmetros são variáveis que admitem determinados valores e guiam o

comportamento do veículo, como o parâmetro que determina o tempo de inicialização da controladora de voo, impedindo que o sistema envie comandos antes que a esta tenha concluído seu processo de inicialização ou o parâmetro que rege os limites para instabilidades normais de voo.

Os parâmetros que tratam dos limites mínimo e máximo para ocorrência de instabilidades são muito importantes para o desempenho do veículo, permitindo que o sistema despreze a ocorrência de instabilidades de baixa intensidade e acione rotinas de correção quando as instabilidades superam esses limiares. Além desses, mais parâmetros são manipulados em uma missão de voo, exercendo funções vitais no sistema, guiando movimentos ou alertando para a execução de determinadas operações como o caso do parâmetro `buzzer_value` apresentado na tabela 5.15. Na mesma tabela são apresentados todos os parâmetros utilizados nas missões de voo desse experimento, juntamente com os seus valores e uma descrição acerca de seus papéis na missão.

Todos esses parâmetros apresentados na Tabela 5.15 sofrem variação de acordo com o veículo que está realizando a missão de voo, ou seja, os valores estabelecidos para cada parâmetro pode variar de acordo com o VANT utilizado, pois cada VANT possui valores particulares para cada parâmetro, os valores para os parâmetros também podem variar caso seja desado um determinado comportamento para o veículo, como voar a altitudes mais elevadas ou por intervalos de tempo maiores. Portanto, a realização do mesmo experimento utilizando veículos diferentes torna necessário o estabelecimento de cada um dos parâmetros para cada veículo. Sendo assim, os valores dos parâmetros apresentados são válidos para o VANT utilizado no experimento que possui as características apresentadas na Tabela 5.16.

O veículo utilizado nessa etapa da experimentação está descrito na Tabela 5.16, suas dimensões, peso, modelo da estrutura e da controladora de voo e sistema de alimentação são apresentados em detalhes, incluindo o modelo dos ESCs e hélices utilizados, além das especificações do sistema de alimentação como as capacidades da fonte de alimentação. De posse das informações do veículo e conhecendo as condições e procedimentos do experimento (descritos anteriormente), é possível analisar os dados obtidos a partir dos voos realizados.

Na presente etapa são analisados um volume de dados coletados em 12 voos, desses, dois apresentaram interferências externas e os outros foram realizados em condições de voo livres dessas interferências. A Tabela 5.17 apresenta de forma resumida os resultados obtidos em



cada voo, indicando quais voos ocorreram em condições normais e quais se submeteram a interferência externa, nesse caso é indicado o tipo de interferência observada em cada voo.

Tabela 5.4: Média e Desvio Padrão dos dados de inclinação lateral e frontal

| Voo  | Média        | Desvio Padrão |
|--|--------------|---------------|
| Hélices de Fibra de Carbono - Inclinação Frontal |              |               |
| Vôo 1 (42)                                       | -0,026647145 | 0,02894757    |
| Vôo 2 (39)                                       | -0,001144638 | 0,04480212    |
| Vôo 3 (40)                                       | 0,00646923   | 0,044462283   |
| Vôo 4 (38)                                       | -0,232533051 | 0,265013638   |
| Vôo 5 (41)                                       | 0,013325415  | 0,050645759   |
| Hélices de Fibra de Carbono - Inclinação Lateral |              |               |
| Vôo 1 (42)                                       | 0,084351413  | 0,041156098   |
| Vôo 2 (39)                                       | 0,075642756  | 0,039227781   |
| Vôo 3 (40)                                       | 0,087252617  | 0,038748815   |
| Vôo 4 (38)                                       | 0,077046336  | 0,209453738   |
| Vôo 5 (41)                                       | 0,090520367  | 0,064061856   |
| Hélices de Nylon - Inclinação Frontal            |              |               |
| Vôo 6 (31)                                       | 0,009878684  | 0,032824582   |
| Vôo 7 (37)                                       | -0,067683146 | 0,047182862   |
| Vôo 8 (35)                                       | -0,054761177 | 0,115859399   |
| Vôo 9 (32)                                       | -0,054006777 | 0,194015213   |
| Vôo 10 (33)                                      | 0,010810199  | 0,026455931   |
| Vôo 11 (36)                                      | 0,025886292  | 0,134611586   |
| Hélices de Nylon - Inclinação Lateral            |              |               |
| Vôo 6 (31)                                       | 0,072093759  | 0,056036827   |
| Vôo 7 (37)                                       | -0,014604654 | 0,026388994   |
| Vôo 8 (35)                                       | -0,014648817 | 0,115959811   |
| Vôo 9 (32)                                       | 0,069397546  | 0,103678298   |
| Vôo 10 (33)                                      | 0,096646482  | 0,057999068   |
| Vôo 11 (36)                                      | -0,11447845  | 0,114920925   |

Tabela 5.5: Dados de voo do sensoriamento

| <b>Atributo</b>    | <b>Descrição</b>              | <b>Sensor</b> |
|--------------------|-------------------------------|---------------|
| Aceleração         | Inclinação em X, Y e Z        | Acelerometro  |
| Orientação (Norte) | Orientação em graus           | Bússola       |
| Velocidade angular | Velocidade angular in X, Y, Z | Giroscópio    |
| Orientação         | Orientação em X, Y, Z         | Bússola       |
| Altitude inicial   | altitude em solo              | Sonar         |
| Altitude           | Altitude                      | Sonar         |
| Temperatura        | Temperatura                   | Termômetro    |

Tabela 5.6: Commandos e estados armazenados na Caixa Preta

| <b>Atributo</b>   | <b>Descrição</b>                            |
|-------------------|---|
| Ação              | Action description                          |
| Comando           | Instrução PWM enviada à Controladora de Voo |
| Função invocada   | Trecho de código invocado                   |
| Instante de Tempo | Tempo corrente em milissegundos             |
| Modo de Voo       | Modo de voo atual                           |
| Throttle          | Aceleração Vertical (Intensidade em PWM)    |
| Yaw               | Rotação (Intensidade em PWM)                |
| Pitch             | Inclinação Frontal (Intensidade em PWM)     |
| Roll              | Inclinação Lateral (Intensidade em PWM)     |
| Mode switch       | Modo de Voo ativo (Intensidade em PWM)      |

Tabela 5.7: Especificação dos periféricos adicionados ao VANT

| <b>Periféricos</b>                 | <b>Especificação</b>                   |
|------------------------------------|--|
| Sistema de Controle                | 1 Arduino Mega 2560                    |
| Sensoriamento                      | 1 Gy87 10dof Imu Module                |
| Acelerômetro de 3 eixos            | MPU6050                                |
| Gisrocópio de 3 eixos              | MPU6050                                |
| Barômetro Microsensível            | BMP180                                 |
| Magnetômetro (Bússola) 3 eixos     | HMC5883L                               |
| Sonar                              | HC-SR04                                |
| Armazenamento de dados             | 1 Módulo de Cartão SD +1 Cartão SD 2GB |
| Alarme sonoro                      | 1 Buzzer                               |
| Alimentação do Sistema de Controle | 1 plugue DC P4 com garras jacaré       |
| Conexões do sistema                | 30 jumpers Fêmea-Macho 20cm            |

Tabela 5.8: Especificação do VANT

| Especificação                    | Valor                                       |
|----------------------------------|---|
| Peso do VANT (sem periféricos)   | 875g (com bateria: 1070g)                   |
| Peso da Bateria                  | 195g (3s, 2200mAh, 25c, 11.1v)              |
| Peso do VANT (com periféricos)   | 1060g                                       |
| Peso dos periféricos             | 185g  |
| Peso do distúrbio usado no teste | 80g   |
| Dimensão diagonal do VANT        | 70cm com hélices / 50cm sem hélices         |
| Altura do VANT                   | 16cm sem periféricos / 21cm com periféricos |
| Modelo da estrutura              | Frame Q450                                  |
| Modelo da Controladora de voo    | Ardupilot APM 2.6                           |
| Modelo dos Motores               | Multistar 2212 of 920Kv                     |
| Modelo do ESC                    | EMAX [4 in 1] 25A Simonk                    |
| Hélices                          | Modelo 1045R (10x4.5 polegadas)             |
| Sistema de Alimentação           | Fonte DC de 19A                             |
| Cabo de Alimentação              | 10m / 925g (se completamente elevado)       |

Tabela 5.9: Instruções PWM enviadas para a Controladora de Voo

| <b>Função</b>     | <b>Descrição</b>   |
|-------------------|--|
| Armar             | Prepara o VANT para receber comandos   |
| Desarmar          | prepar o VANT para parar de receber comandos   |
| Decolar           | Decola o Veículo   |
| Pousar            | Pousa o veículo  |
| Estabilizar       | Mantém o VANT em uma posição de voo estável durante um determinado intervalo de tempo              |
| Rotacionar        | Rotaciona o veículo nos sentidos horário ou anti-horário   |
| Mover             | Movimenta o veículo na vertical (subir ou descer) e horizontal (frente, trás, esquerda ou direita) |
| Mudar Modo de Voo | Muda o modo de voo ativo no veículo  |

Tabela 5.10: Parâmetros de voo do VANT

| <b>Parâmetro</b>         | <b>Valor</b> | <b>Descrição</b>                                  |
|--------------------------|--------------|---|
| before_altitude          | 0.0m         | Última leitura do sonar. Usado em falha do sensor |
| last_file_number         | 0            | Número do último voo armazenado                   |
| apm_initialization_delay | 10s          | Tempo de inicialização da Controladora de Voo     |
| hover_altitude           | 100cm        | Altura para permanecer após decolagem             |
| hover_target_time        | 10s          | Tempo para permanecer estável sem movimentos      |
| buzzer_value             | variável     | Alerta sonoro usado em determinadas situações     |
| max_limit                | 2g           | Limite positivo tolerável para desestabilização   |
| min_limit                | -2g          | Limite negativo tolerável para desestabilização   |
| k                        | 0.001        | Constante de correção de desestabilização         |

Tabela 5.11: Dados de voo do sensoriamento

| <b>Atributo</b>    | <b>Descrição</b>              | <b>Sensor</b> |
|--------------------|-------------------------------|---------------|
| Aceleração         | Inclinação em X, Y e Z        | Acelerometro  |
| Velocidade angular | Velocidade angular in X, Y, Z | Giroscópio    |

Tabela 5.12: Especificação dos periféricos adicionados ao VANT

| <b>Periféricos</b>                 | <b>Especificação</b>                    |
|------------------------------------|---|
| Sistema de Controle                | 1 Arduino Genuino 101 - Intel Curie     |
| Sensoriamento                      | Integrado - Curie IMU                   |
| Acelerômetro de 3 eixos            | Curie IMU                               |
| Gisroscópio de 3 eixos             | Curie IMU                               |
| Armazenamento de dados             | 1 Módulo de Cartão SD +1 Cartão SD 32GB |
| Alarme sonoro                      | 1 Buzzer                                |
| Alimentação do Sistema de Controle | 1 plugue DC P4 com garras jacaré        |
| Conexões do sistema                | jumpers Fêmea-Macho 20cm                |

Tabela 5.13: Commandos e estados armazenados na Caixa Preta

| <b>Atributo</b>       | <b>Descrição</b>                            |
|-----------------------|---|
| COMMAND               | Instrução PWM enviada à Controladora de Voo |
| ACTION                | Descrição da ação a ser executada           |
| CURRENT METHOD        | Função Invocada no momento                  |
| TIME INSTANT          | Instante de tempo em milissegundos          |
| CURRENT FLYGHT MODE   | Modo de Voo ativo no momento                |
| ACCELL X              | Aceleração no eixo X                        |
| ACCELL Y              | Aceleração no eixo Y                        |
| ACCELL Z              | Aceleração no eixo Z                        |
| GYRO X                | Velocidade Angular no eixo X                |
| GYRO Y                | Velocidade Angular no eixo Y                |
| GYRO Z                | Velocidade Angular no eixo Z                |
| THROTTLE PWM VALUE    | Aceleração Vertical (Intensidade em PWM)    |
| YAW PWM VALUE         | Rotação (Intensidade em PWM)                |
| PITCH PWM VALUE       | Inclinação Frontal (Intensidade em PWM)     |
| ROLL PWM VALUE        | Inclinação Lateral (Intensidade em PWM)     |
| MODE SWITCH PWM VALUE | Comando para alterar modo de voo (PWM)      |



Tabela 5.14: Funções executadas pelo controle externo

| <b>Função</b>            | <b>Descrição</b>   |
|--------------------------|--|
| arm_method               | Prepara o VANT para receber comandos   |
| disarm_method            | prepar o VANT para parar de receber comandos   |
| takeOff_method           | Decola o Veículo   |
| land_method              | Pousa o veículo  |
| lateral_stabilize_method | Mantém o VANT em uma posição de voo estável durante um determinado intervalo de tempo              |
| frontal_stabilize_method | Mantém o VANT em uma posição de voo estável durante um determinado intervalo de tempo              |
| hover_method             | Mantém o VANT em uma posição de voo estável durante um determinado intervalo de tempo              |
| turn_method              | Rotaciona o veículo nos sentidos horário ou anti-horário   |
| move_method              | Movimenta o veículo na vertical (subir ou descer) e horizontal (frente, trás, esquerda ou direita) |
| mode_switch_method       | Muda o modo de voo ativo no veículo  |

Tabela 5.15: Parâmetros de voo do VANT

| Parâmetro                | Valor     | Descrição   |
|--------------------------|-----------|---|
| current_flyght_mode      | STABILIZE | Informação do Modo de Voo Ativo no momento            |
| last_file_number         | 0         | Número do último voo armazenado                       |
| apm_initialization_delay | 10s       | Tempo de inicialização da Controladora de Voo         |
| throttle_value_takeoff   | 290       | Valor do acelerador para fim do processo de decolagem |
| hover_target_time        | 10s       | Tempo para permanecer estável sem movimentos          |
| buzzer_value             | variável  | Alerta sonoro usado em determinadas situações         |
| max_limit                | 2g        | Limite positivo tolerável para desestabilização       |
| min_limit                | -2g       | Limite negativo tolerável para desestabilização       |
| k                        | 0.001     | Constante de correção de desestabilização             |

Tabela 5.16: Especificação do VANT

| Especificação                  | Valor                                       |
|--------------------------------|---|
| Peso do VANT (sem periféricos) | 875g (com bateria: 1070g)                   |
| Peso da Bateria                | 195g (3s, 2200mAh, 25c, 11.1v)              |
| Peso do VANT (com periféricos) | 940g  |
| Peso dos periféricos           | 65g   |
| Dimensão diagonal do VANT      | 70cm com hélices / 50cm sem hélices         |
| Altura do VANT                 | 16cm sem periféricos / 16cm com periféricos |
| Modelo da estrutura            | Frame Q450                                  |
| Modelo da Controladora de voo  | Ardupilot APM 2.6                           |
| Modelo dos Motores             | Multistar 2212 of 920Kv                     |
| Modelo do ESC                  | EMAX [4 in 1] 25A Simonk                    |
| Hélices                        | Modelo 1045R (10x4.5 polegadas)             |
| Sistema de Alimentação         | Fonte DC de 19A                             |
| Cabo de Alimentação            | 10m / 925g (se completamente elevado)       |

Tabela 5.17: Análise dos voos

| <b>Voo</b> | <b>Condição</b> | <b>Causa</b>             |
|------------|-----------------|--------------------------|
| VOO 0      | NORMAL          |                          |
| VOO 1      | INTERFERÊNCIA   | RAJADA DE VENTO          |
| VOO 2      | NORMAL          |                          |
| VOO 3      | NORMAL          |                          |
| VOO 4      | NORMAL          |                          |
| VOO 5      | NORMAL          |                          |
| VOO 6      | NORMAL          |                          |
| VOO 7      | NORMAL          |                          |
| VOO 8      | NORMAL          |                          |
| VOO 9      | NORMAL          |                          |
| VOO 10     | NORMAL          |                          |
| VOO 11     | ACIDENTE        | FIO DE ALIMENTAÇÃO PRESO |

As informações apresentadas na Tabela 5.17 que dos doze voos realizados nessa etapa da experimentação, dois são classificados como instáveis ou que sofreram influência externa com base em contato visual. O VOO 1 sofreu interferência de vento e o outro (VOO 11) sofreu um acidente, ou seja, veio a colidir com o solo durante o experimento, provocado pelo fato de o fio de alimentação ter sido preso ao solo durante o voo, o que impossibilitou o deslocamento vertical do veículo e conseqüentemente ocasionou a queda.

Conhecendo quais voos foram visualmente estáveis e quais sofreram interferências externas, torna-se possível analisar os dois voos que sofreram interferência em busca de identificar um padrão de comportamento nesses voos e fazer o mesmo para os voos ocorridos em condições normais, o que permite compará-los e identificar as diferenças existentes entre eles, e a partir disso identificar precisamente o padrão de comportamento estável. A seguir são apresentados gráficos que com os resultados obtidos nessa etapa da experimentação. Esses gráficos tentam mostrar o comportamento do veículo durante o voo para a identificação de padrões de comportamento para voos estáveis e instáveis.

### Análise dos dados de aceleração resultante em X, Y e Z

O primeiro gráfico, apresentado na Figura 5.15, mostra os dados de aceleração resultante em X, Y e Z de todos os voos em função do tempo. Esses dados refletem as variações ocorridas no posicionamento do veículo durante a missão de voo, mostram as dimensões das inclinações apresentadas pelo veículo enquanto realiza uma missão de voo normais e com a ocorrência de distúrbios. Analisando os dados expressos no gráfico é percebida a nítida diferença entre o comportamento apresentado pelos voos que sofreram interferência externa (VOO 1 e VOO 11), os dois apresentaram valores que os diferenciam dos demais, o VOO 11 com mais intensidade e o VOO 1 com dados com mudanças menos bruscas.

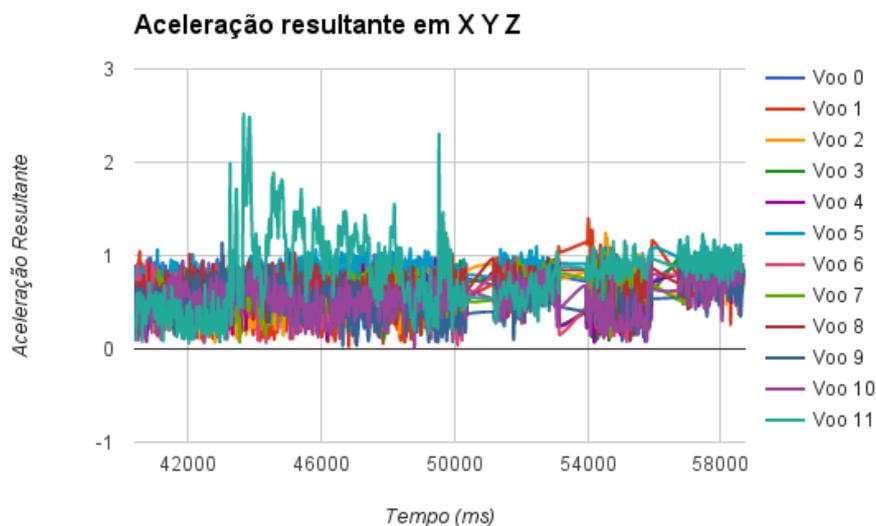


Figura 5.15: Aceleração resultante em X, Y e Z

Essa análise permite diferenciar claramente os voos que sofreram turbulências de intensidade forte, pois esses voos apresentam valores significativamente elevados em relação aos voos que não sofreram interferências, porém, observando os dados do VOO 1, que sofreu interferência menos intensa que o VOO 11, percebe-se que esse voo não apresentou valores muito significativos, diferenciando-se dos demais apenas em discretos picos nos valores da aceleração resultante.

A partir desses dados não é possível identificar um claro padrão de comportamento para os voos estáveis, pois os voos livre de interferências externas apresentam significativas variações em seus valores, o que torna difícil estabelecer um padrão para os valores de aceleração

resultante que seja um padrão para os voos estáveis. Isso indica que para identificar um padrão de comportamento para os voos estáveis os dados necessitam ser submetidos a processamentos como o Filtro de Kalman para que sejam retirados os ruídos e retificadas as variações, operação que podem permitir a identificação de um padrão de comportamento estável.

### **Análise dos dados de aceleração resultante em X, Y e Z processados utilizando o Filtro de Kalman**

Diante dos resultados obtidos a partir da análise dos dados de aceleração em X, Y e Z se tornou necessária uma análise sobre dados aceleração resultante processados utilizando o Filtro de Kalman. Nessa análise os voos foram submetidos ao processamento e os dados resultantes podem ser visualizados no gráfico apresenta na Figura 5.16. No gráfico, todos os voos são apresentados com os valores da aceleração resultante processados são dispostos em função do tempo, buscando identificar claramente um padrão de comportamento estável.

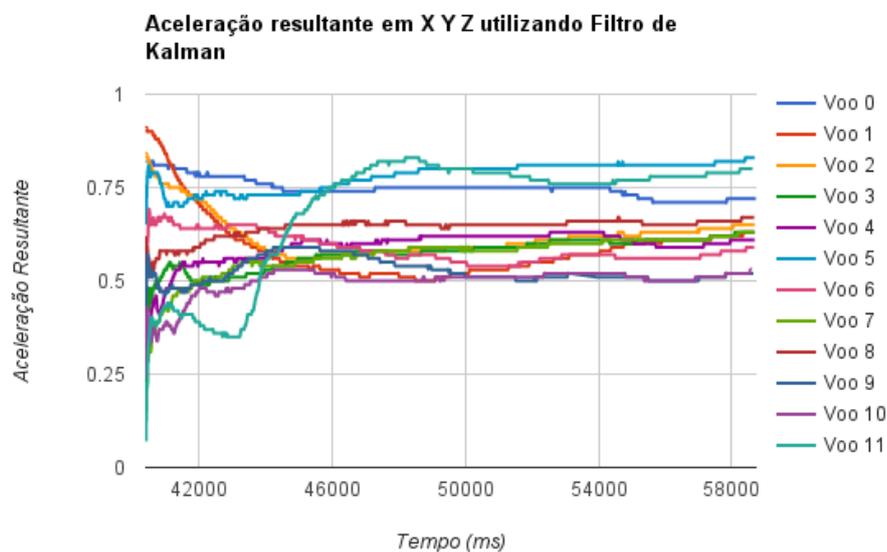


Figura 5.16: Aceleração resultante em X, Y e Z utilizando o Filtro de Kalman

Diferentemente da abordagem apresentada na Figura 5.15 em que os dados foram apresentados calculando a resultante da aceleração nos três eixos sobre os dados brutos. Na Figura 5.16 os dados apresentados são resultado de um processamento utilizando Filtro de Kalman que resultou em dados com variações menos acentuadas e conseqüentemente mais

estáveis, o que permitiu uma identificação mais clara do padrão de comportamento para os voos estáveis.

Observando a Figura 5.16 e o gráfico de cada voo, é possível perceber que os voos visualmente considerados estáveis apresentaram variações na aceleração resultante com intensidade inferior às observadas nos voos que sofreram instabilidades provocadas por influências externas. A observação do gráfico permite perceber que os voos estáveis tendem a apresentar mínimas variações nos valores de aceleração resultante quando os dados são submetidos ao Filtro de Kalman, esse fato indica a existência de um padrão de comportamento nos voos estáveis. Uma análise sobre os dados processados utilizando o Filtro de Kalman permite perceber que a aceleração resultante em X, Y e Z consiste em um bom indicador para identificar um padrão de comportamento para voos, permitindo determinar com certa precisão a estabilidade de um voo, assim como diferenciar um voo estável de um que sofreu interferência externa.

Observando esse indicador percebe-se que a intensidade de variação da aceleração resultante é inversamente proporcional à estabilidade, ou seja quanto mais estável um voo, menor a variação da sua aceleração resultante, que tende a permanecer constante ao longo do tempo. Já a ocorrência de instabilidades tende a alterar esse padrão, elevando os valores da aceleração resultante.

Apesar dessa constatação, a análise de apenas esse indicador é insuficiente para determinar um padrão de comportamento preciso. A análise dos dados permite observar que dois voos, um ocorrido em aparentes condições normais (VOO 2) e outro que sofreu interferência externa provocada por rajadas de vento (VOO 1), apresentaram dados semelhantes, esse fato permite entender que existe a necessidade de adotar mais indicadores para determinar com maior clareza o padrão de comportamento para voos estáveis e a partir disso determinar a ocorrência e dimensão de instabilidades em voos. Isso sugere que o processamento dos dados de voo precisam ocorrer de maneira mais específica, analisando além da aceleração resultante, a aceleração em cada eixo separadamente e realizando a comparação desses dados para cada voo buscando identificar o padrão de comportamento de forma mais precisa.

Inicialmente serão analisados separadamente todos os voos que visualmente apresentaram comportamento estável, ou seja, voos que não sofreram interferências externas. Nesse caso foi calculada a média de todos os voos ao longo do tempo, permitindo comparar os

valores da aceleração resultante em X, Y e Z em todos os voos e a cada instante de tempo. A análise da média em relação aos dados dos voos é apresentada a seguir.

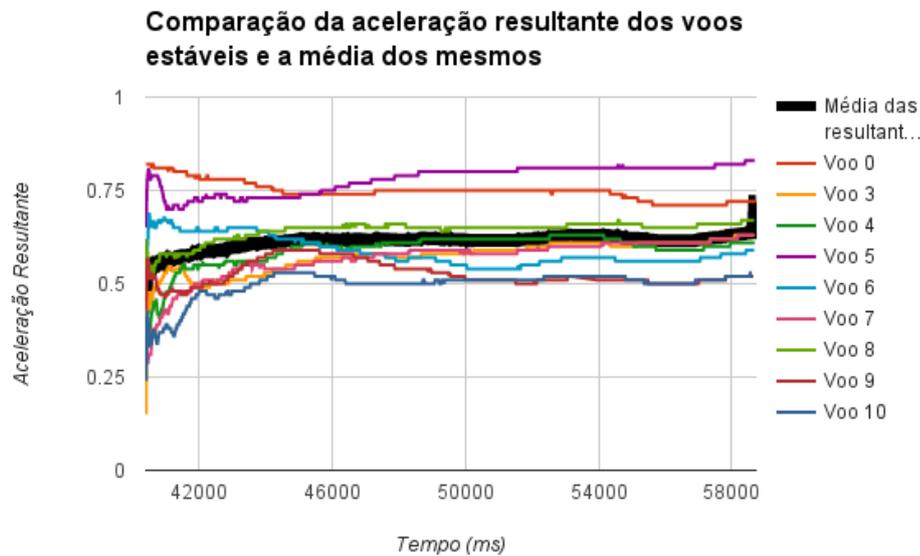


Figura 5.17: Média das acelerações resultantes dos voos estáveis

A representação gráfica da média dos valores da aceleração resultante dos voos estáveis pode ser observada na Figura 5.17, na qual a média das acelerações resultantes é representada no gráfico pela linha mais larga que as demais e em cor preta, enquanto as outras linhas representam os voos visualmente estáveis, colocados em comparação com a média. Percebe-se na Figura 5.17 que todos os voos visualmente estáveis apresentam dados aproximados à média, com variações pouco significativas, tendendo a apresentar medidas cada vez menos variantes no decorrer do tempo, porém, apesar de visualmente estáveis e seguindo o padrão da média, alguns voos apresentaram valores que iniciam e se mantêm elevados em relação à média (VOO 5 e VOO 0), fator que pode indicar que esses voos podem ter sofrido influências que não foram detectadas por meio de observação, por outro lado, alguns voos apresentaram dados muito aproximados à média, em alguns casos como os voos 8 e 4. Isso sugere que seriam mais estáveis que aqueles que apresentam dados mais distantes, porém essa constatação é insuficiente para formar um padrão de comportamento.

Para se obter uma visão mais detalhada acerca da média da aceleração resultante em X, Y e Z vamos comparar essa mesma média com os voos considerados visualmente instáveis e verificar se esses seguem ou não o mesmo padrão da média. A Figura 5.18 traz uma

representação dos voos visualmente instáveis mais um voo que visualmente foi considerado estável, porém seus dados não confirmam essa estabilidade (VOO 2), junto deles foi colocado também a média dos voos estáveis para se obter uma comparação.

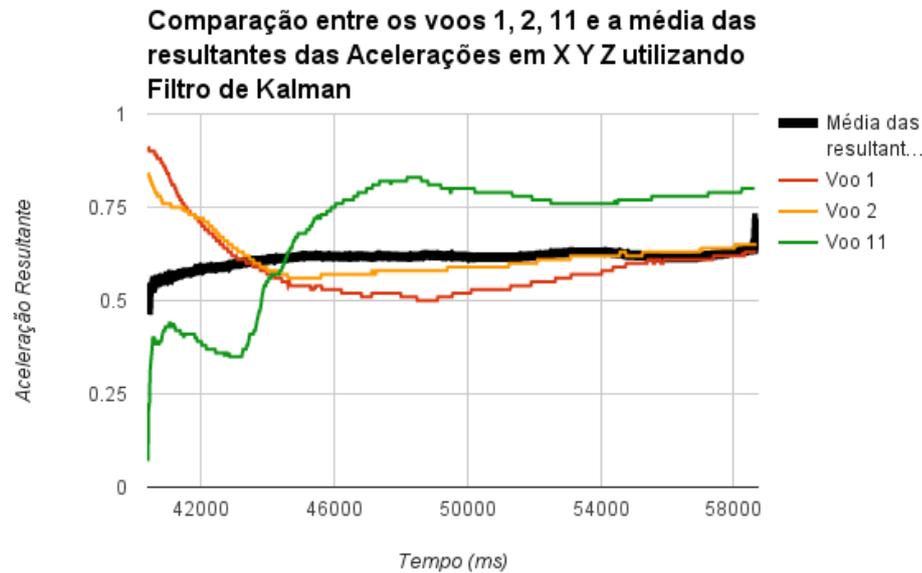


Figura 5.18: Comparação entre os voos instáveis e a média das acelerações resultantes dos voos estáveis

A observação da Figura 5.18 permite perceber que a representação da média diverge acentuadamente dos voos instáveis. Esses voos sofreram interferências de diferentes intensidades, isso permitiu observar que quanto maior a intensidade da interferência externa sofrida pelo veículo durante um voo, mais significativas são as variações nos valores da aceleração resultante, divergindo, assim, da média dos voos estáveis. Outra observação importante nessa mesma figura é que os voos instáveis apresentam intensas variações positivas e negativas seus dados, indicando que seus dados sofrem oscilações ao longo do tempo do voo.

Diante desses fatores, percebe-se que a média da aceleração resultante em X, Y e Z dos voos estáveis é um forte indicador para um padrão de estabilidade, sendo assim, a aproximação dos valores da aceleração resultante a essa média indica estabilidade do voo, enquanto o afastamento, com oscilações, indica a ocorrência de um voo instável, um voo que provavelmente sofreu interferência externa. Para estimar o quanto os dados de um determinado voo se distanciam da média vamos calcular o seu desvio padrão, que é uma unidade para a dispersão estatística que mostra a variação existente em relação à média. Nesse contexto



vamos quantificar a dispersão da aceleração resultante em relação à média dos voos estáveis. A medida do desvio padrão de todos os voos é apresentada no gráfico presente na Figura 5.19 a seguir.

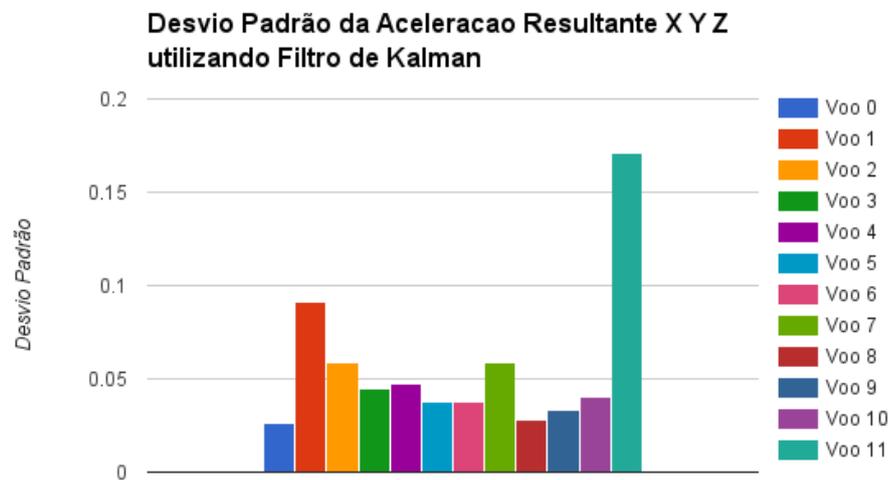


Figura 5.19: Desvio padrão de todos os voos em relação à aceleração resultante em X, Y e Z

A Figura 5.19 apresenta o gráfico do desvio padrão de cada voo, nesse gráfico observamos que os voos que apresentaram o desvio padrão mais elevado foram justamente o VOO 1 e o VOO 11, aqueles que foram considerados visualmente instáveis e que sofreram interferência externa. A partir da observação do gráfico da Figura 5.19 ficou confirmado que os voos estáveis apresentam desvio padrão menos elevado, enquanto os valores de desvio padrão mais elevados foram encontrados nos voos mais instáveis, confirmando essa como uma medida muito importante para determinar um padrão de comportamento para estabilidade.

A análise da Figura 5.19 também confirmou que o VOO 2, considerado inicialmente estável por não ter sofrido interferências externas, que teve sua estabilidade questionada na análise anteriores por divergir do padrão da média, apresenta valor de desvio padrão elevado, indicando a ocorrência de instabilidades nesse voo. Por outro lado, o VOO 7, que também foi considerado visualmente estável, apresentou um elevado desvio padrão, assemelhando-se ao desvio padrão identificado no VOO 2, isso revela que voos com estabilidade aparente podem revelar instabilidade quando verificado o valor desvio padrão da aceleração resultante em X, Y e Z. Isso também reforça a ideia de que o contato visual é insuficiente para determinar se

um voo ocorreu de maneira estável.

Analisando os dados da caixa preta ficou constatado que os voos que se mostraram visualmente instáveis foram confirmados pelas análises dos gráficos, voos estáveis foram também confirmados e voos que aparentemente se mostravam estáveis por não sofrerem interferências externas foram contestados e a ocorrência de instabilidades confirmadas a partir da revisão das imagens dos voos.

Revisando os registros dos voos foi observado que o uso do fio para alimentação do veículo interfere na estabilidade do voo e isso é percebido pelo sensoriamento e armazenado na caixa preta. Uma vez que o veículo é alimentado por uma fonte externa ligada através de um cabo, esse cabo sofre influência da movimentação do veículo em sua missão de voo, ou seja, o fio se movimenta quando o veículo se movimenta e a ocorrência desse movimento provoca interferência no desempenho do voo, alterando a estabilidade, trajetória e posicionamento do veículo.

Analisando os vídeos dos voos, ficou confirmado que aqueles que não sofreram interferências externas ou interferências provocadas pelo movimento do fio de alimentação apresentaram um baixo valor para o desvio padrão, o contrário ocorre com os voos que sofreram essas interferências, quanto maior a interferência, mais elevado o valor do desvio padrão.

Diante disso, podemos afirmar que o valor do desvio padrão da aceleração resultante em X, Y e Z de um voo é inversamente proporcional à sua estabilidade, ou seja, quanto mais instável o desempenho do veículo, mais elevado o valor do desvio padrão da aceleração resultante em X, Y e Z. Por essa razão, o desvio padrão da aceleração resultante em X, Y e Z torna-se um forte indicador para o estabelecimento de um padrão de comportamento para VANTs.

Com a análise do desvio padrão da aceleração resultante ficou evidente que uma análise mais aprofundada dos dados de voo se faz necessária para a obtenção de uma ideia mais clara a respeito do padrão de comportamento estável. Por essa razão, foram analisados os dados de aceleração em cada eixo separadamente (eixos X, Y e Z) em busca de identificar em cada um desses parâmetros um padrão de comportamento de voo mais preciso.

Inicialmente serão analisados os dados de aceleração em sua forma bruta, tal qual foram coletados pelo sensoriamento. Nessa análise serão observados os dados de aceleração relativos aos três eixos separadamente, iniciando pelos eixos horizontais X e Y e encerrando com

a análise do eixo vertical Z.

### Análise dos dados de aceleração em X

Para iniciar o processo de análise mais aprofundada e específica acerca dos dados de voo, serão levados em conta os dados de aceleração em X no estado bruto. O gráfico apresentado na Figura 5.20 traz os dados brutos de aceleração em X de todos os voos em função do tempo. Diante dessa análise é possível acompanhar as variações ocorridas no estado do veículo a cada instante de tempo.

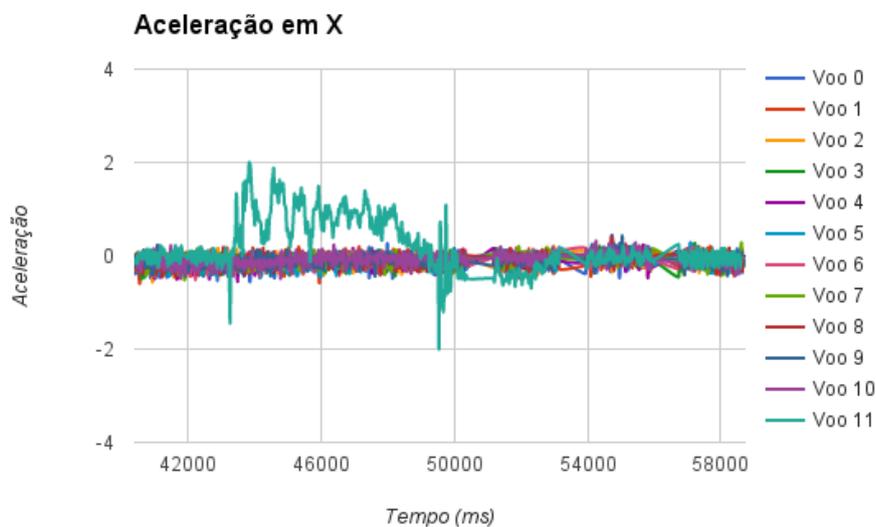


Figura 5.20: Aceleração em X

A observação do gráfico permite perceber as variações ocorridas na aceleração em X para cada voo, e essas variações possuem diferentes dimensões para cada um deles, diante disso observou-se que apresentam valores e variações semelhantes para a aceleração em X, não sendo possível diferenciar um voo estável de um que sofreu interferência. A única exceção é o voo 11, que sofreu as interferências externas mais intensas e apenas essas interferências fortemente intensas foram detectadas analisando os dados brutos.

As informações expressas no gráfico revelam que os dados de aceleração em X no seu estado bruto possuem pouco significado para estabelecer um padrão de comportamento, pois nesse estado, os dados permitem diferenciar apenas voos que sofreram alterações muito significativas na estabilidade, mas isso não é suficiente para determinar um padrão de comporta-

mento, pois um voo que sofreu interferência (VOO 1) não pôde ser diferenciado dos demais nessa análise.

### Análise dos dados de aceleração em Y

Diante dessa constatação percebemos que apenas os dados brutos de aceleração em X não se tratam de um bom indicador para identificar um padrão de comportamento para os voos estáveis, portanto, esse fato justifica analisar também os dados de aceleração no eixo Y, essa nova análise é apresentada pelo gráfico da Figura 5.21 que também trata de dados em sua forma bruta.

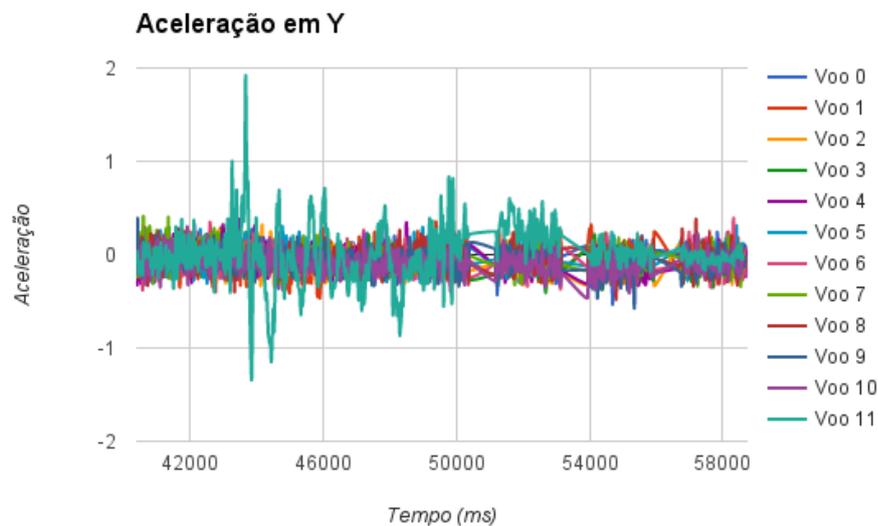


Figura 5.21: Aceleração em Y

O gráfico apresenta os valores da aceleração em Y de todos os voos em função do tempo, e mostra variações muito mais expressivas nos dados de aceleração em Y do que nos dados em X apresentados na Figura 5.20. O gráfico permite perceber que alguns voos apresentam variações nos dados mais significativas que outros, com a ocorrência de picos em diversos momentos do voo, os outros voos demonstraram um comportamento muito semelhante sugerindo a existência de um padrão.

O voo destacado dos demais é o VOO 11, o mesmo que se destacou na análise dos dados de aceleração em X por sofrer as interferências externas mais intensas. Esse voo apresenta variações bem mais intensas que anteriormente, porém apenas ele se diferenciou

dos demais, o que sugere que todos os outros voos teriam ocorrido em condições normais, o que não é verdade, uma vez que o VOO 1 também sofreu interferências externas e isso não foi identificado.

Portanto um padrão de comportamento não é possível ser identificado nessa análise, pois os dados brutos de aceleração em Y permitem identificar claramente apenas os voos que sofreram interferências externas de forte intensidade, isso é comprovado quando apenas as interferências sofridas pelo VOO 11 são identificadas e as sofridas pelo VOO 1 são ignoradas.

A análise dos dados brutos de aceleração em X e Y não revelaram um claro padrão de comportamento, permitiram identificar apenas voos com a ocorrência de distúrbios muito intensos. Os dados analisados correspondem ao posicionamento horizontal do veículo, a seguir vamos analisar também os dados brutos de aceleração em Z que corresponde ao posicionamento vertical do veículo.

### **Análise dos dados de aceleração em Z**

Os dados de aceleração em Z são apresentados no gráfico da Figura 5.22, assim como os anteriores trata da intensidade da aceleração em Z utilizando dados tal como foram coletados pelo sensoriamento. No gráfico analisamos as variações ocorridas nos valores de aceleração em Z buscando identificar um padrão de comportamento direcionado à estabilidade.

O gráfico da aceleração em Z mostra variações mais intensas que nos eixos horizontais, diferentemente dos dados de aceleração em X e Y onde apenas os voos que sofreram interferências mais intensas puderam ser identificados, a análise dos dados de aceleração em Z permitiu visualizar também voos com distúrbios menos intensos.

A identificação clara de um padrão de comportamento não foi possível, porém é possível identificar que a maioria dos voos apresentaram valores oscilando entre 0 e 1. Os voos 1, 2 e 11 apresentaram fugas ao padrão dos demais, com o VOO 11 com uma fuga mais expressiva que os outros voos, isso mostra que além do VOO 11, claramente instável, os dados dos voos 1 e 2 também revelaram distúrbios como era esperado a partir da análise das Figuras 5.15, 5.16 e 5.18. Essa análise mostra, em determinados momentos, pequenas fugas do padrão em alguns voos, o que sugere uma nova análise com uma maior profundidade e utilizando processamento dos dados utilizando o Filtro de Kalman.

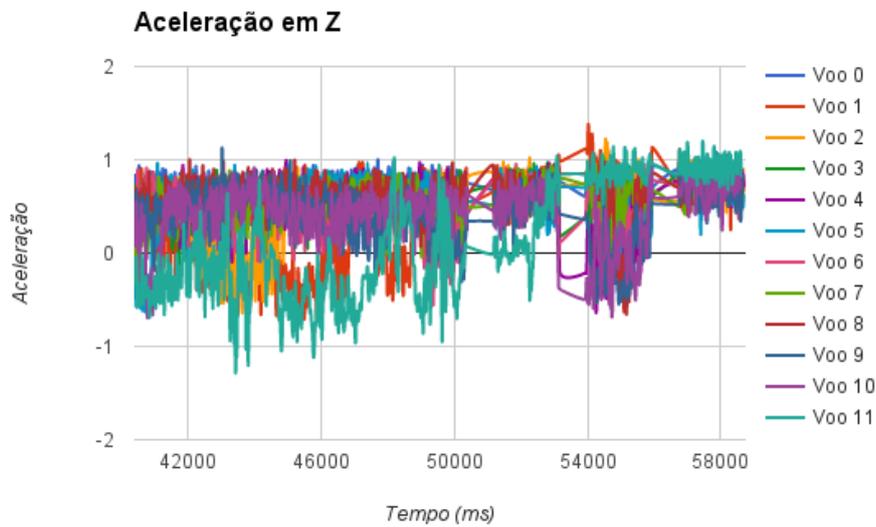


Figura 5.22: Aceleração em Z

Os dados brutos de aceleração em Z, diferentemente dos demais, permitem a distinção mais clara entre os voos de acordo com a intensidade dos distúrbios que o veículo sofreu em cada voo. Apesar de se mostrar mais efetivo que os dados dos eixos horizontais, a análise dos dados brutos de aceleração em Z não se mostrou suficiente para determinar um padrão de comportamento preciso, pois as variações identificadas nos voos não permitem determinar um valor para a aceleração em Z, que a partir dele um voo pode ser considerado instável.

Concluimos que a análise dos dados brutos de aceleração em X, Y e Z revelam a ocorrência de variações nos valores desses dados, porém algumas dessas variações são normais e existe uma faixa de valores em que a aceleração pode variar sem indicar a ocorrência de instabilidade no voo, ou seja, até determinada dimensão, as variações identificadas nos valores das acelerações não indicam a ocorrência de instabilidade. Diante disso, faz-se necessário a realização de uma filtragem nesses dados afim de desprezar os valores que tratam de variações com intensidade insuficiente para determinar a ocorrência de um distúrbio no voo, isso reforça a necessidade de uma análise mais aprofundada utilizando Filtro de Kalman e a análise de outros parâmetros como Velocidade Angular.

### Análise dos dados de aceleração em X processados utilizando o Filtro de Kalman

Diante da necessidade de eliminar dos dados de voos as variações que não são suficientemente intensas para indicar a ocorrência de um distúrbio, os dados de aceleração em todos os eixos serão submetidos ao processamento utilizando o Filtro de Kalman, esse processo será iniciado pelos dados de aceleração em X, e da mesma maneira que nas análises que utilizaram dados brutos, serão analisados também os dados em Y, e Z.

Após submeter os dados de aceleração em X ao processo de filtragem utilizando o Filtro de Kalman ocorreu uma extração de ruídos dos dados de aceleração, ou seja, as variações que não indicam distúrbio no voo foram retiradas. Após o uso do Filtro de Kalman, os dados de aceleração em X novamente permitiram identificar apenas o VOO 11, com os dados desse voo apresentando uma elevada diferenciação dos dados dos demais voos, conforme pode ser visualizado no gráfico presente na Figura 5.23

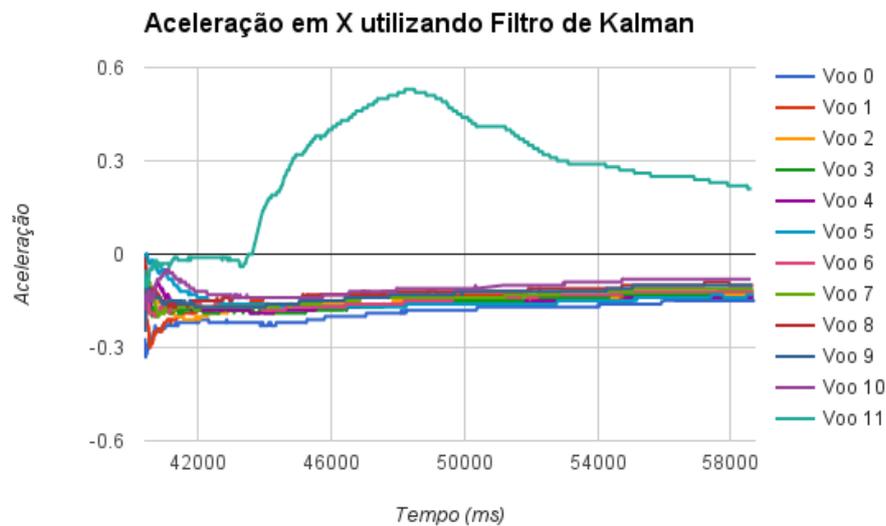


Figura 5.23: Aceleração em X utilizando o Filtro de Kalman

Por outro lado, o uso do Filtro de Kalman permitiu enxergar mais claramente a existência de um padrão de comportamento para os voos que não sofreram interferências muito significativas. Apesar disso, voos que sofreram interferências pouco significativas não puderam ser identificados claramente.

O padrão de comportamento identificado inicialmente nessa análise sugere que os voos estáveis tentem a apresentar dados com pouca variação ao longo do tempo, ou seja, quando

os dados são submetidos ao Filtro de Kalman, os valores tentem a manter-se relativamente constantes no decorrer de um voo.

Isso não é suficientemente conclusivo para deterinar se um voo é estável ou não, nem permite identificar com precisão quais voos ocorreram mais ou menos estáveis que outros, caso esses voos não tenham sofrido turbulências muito significativas, mas permite a identificação de voos que sofreram fortes interferências dos demais voos, além de possibilitar a visualização preliminar de um padrão de comportamento para os voos estáveis.

### Análise dos dados de aceleração em Y processados utilizando o Filtro de Kalman

O mesmo processo de filtragem ao qual os dados de aceleração em X foram submetidos, foi aplicado aos dados de aceleração em Y com o mesmo objetivo de eliminar os ruídos nos dados. O resultado desse processamento é apresentado no gráfico da Figura 5.24 e mostra as variações ocorridas em todos os voos a cada instante de tempo. A discussão desses resultados é apresentada a seguir.

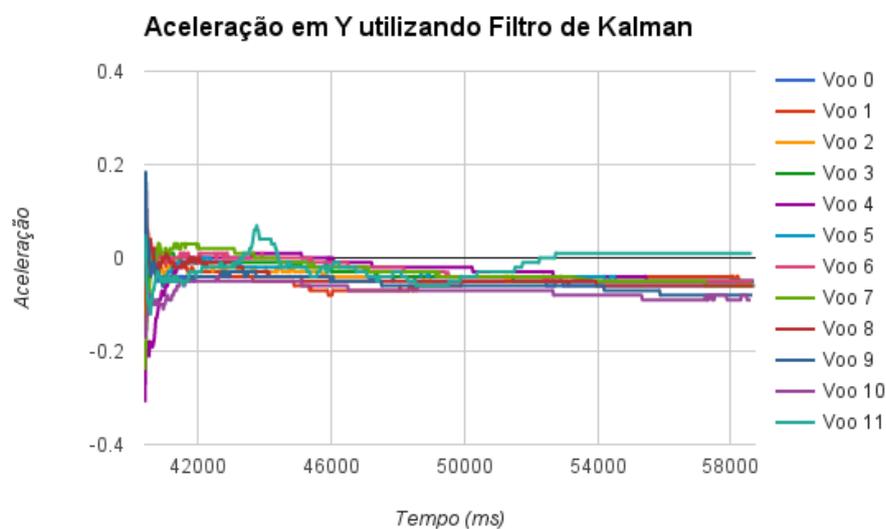


Figura 5.24: Aceleração em Y utilizando o Filtro de Kalman

Analisando os dados expressos no gráfico da Figura 5.24 é possível perceber que o padrão de dados estáveis não fica claramente estabelecido, pois todos os voos apresentaram dados com valores muito aproximados, e os voos que sofreram interferências externas acabaram se confundindo com os voos que não foram acometidos por essas interferências. O VOO



11, acometido por fortes interferências externas pouco se destacou dos demais, podendo ser identificado somente através da observação de um pico nos valores da sua aceleração em Y e por apresentar variações em alguns momentos do voo, fator que não é observado nos outros voos que tendem a sofrer pouca variação no decorrer do voo.

Percebemos que a análise desse parâmetro não permitiu a identificação de quais voos ocorreram em condições claras de estabilidade, também não é possível a comparação entre os voos para determinar quais foram mais ou menos estáveis, uma vez que os voos apresentaram dados muito aproximados com pouca diferença até mesmo entre os voos que sofreram interferências externas de intensidade alta e os que não sofreram nenhuma interferência.

Diante disso, percebemos que os dados de aceleração em Y, após o processo de extração de ruídos utilizando o Filtro de Kalman, não são capazes de determinar um padrão de comportamento para os voos estáveis, esse fator torna esse parâmetro um fraco indicador para distinguir um voo estável de um que sofreu interferências externas.

### **Análise dos dados de aceleração em Z processados utilizando o Filtro de Kalman**

Após o estudo dos dados tratados de aceleração em X e Y, observamos os dados de aceleração em Z processados através do uso do Filtro de Kalman. Esses dados são apresentados no gráfico presente na Figura 5.25 que nos mostra os valores de aceleração em Z em função do tempo de todos os voos. No gráfico é possível observar que no caso do eixo Z os dados apresentam diferenças mais expressivas entre os voos, isso possibilita analisar melhor o comportamento individual de cada voo ao longo do tempo.

Diferente dos dados analisados em X e Y, os dados de aceleração em Z, processados por meio do Filtro de Kalman, apresentaram dados de voo mais significativos, permitindo obter uma ideia mais clara acerca de um padrão de comportamento para os voos estáveis e a identificação para aqueles que sofreram interferências externas. Cada voo apresentou dados menos aproximados dos outros, permitindo julgar melhor quais fugiram mais ou menos de um padrão de comportamento estável.

Essa análise reforça e confirma as constatações observadas na análise dos dados de desvio padrão da aceleração resultante, onde se percebe que quanto menor a variação dos dados de aceleração, maior a estabilidade do voo. Em outras palavras, quando o veículo se mantém estável durante um voo a aceleração em seus eixos tende a se manter apresentando variações

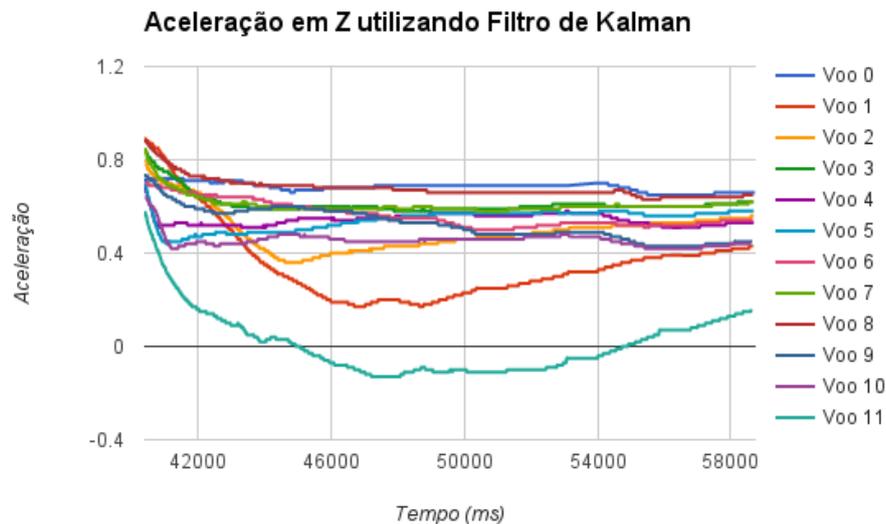


Figura 5.25: Aceleração em Z utilizando o Filtro de Kalman

mínimas. Essa constatação indica a existência de um padrão de comportamento para os voos estáveis e a fuga a esse padrão pode ser utilizado como um indicador para desestabilização do veículo.

A observação do gráfico permite perceber que os voos mais estáveis são aqueles que sofreram a mínima variação em seus dados de aceleração em Z ao longo do tempo. Enquanto os voos com variações mais significativas são justamente aqueles que sofreram interferências externas mais severas, como é o caso dos voos 1 e 11. Foi observado também que o distanciamento dos dados de voo desse padrão de estabilidade ocorreu de acordo com a intensidade dos distúrbios aos quais o veículo foi submetido durante o voo, ou seja, naqueles voos que sofreram interferências mais fortes, a intensidade da variação da aceleração em Z foi mais elevada dos que nos voos que sofreram interferências de menor intensidade.

Voos que não sofreram interferências externas como no caso do VOO 2, mas que sofreram distúrbios provocados pela oscilação do posicionamento do fio de alimentação, puderam ser identificados de acordo com a diferença entre eles e os voos mais estáveis, comparando as dimensões das variações observadas nesses voos. As variações nos dados do VOO 2 permitem classificá-lo como um voo instável, pois apesar de não ter sofrido interferências externas intensas como o VOO 1 ou VOO 11, seus dados mostram consideráveis variações na aceleração em Z, observação que aproxima o VOO 2 dos voos que sofreram interferências

externas, impossibilitando-o de ser classificado como um voo estável.

Diante de tais observações, constatamos que a aceleração em Z, após ter seus dados submetidos ao Filtro de Kalman, torna-se um forte indicador para a identificação de um padrão de comportamento para os voos estáveis. Em comparação com os dados puros, sem o uso do Filtro de Kalman, os dados filtrados apresentam valores expressivamente mais estáveis, com menos ruídos, o que os torna menos confusos. Isso permite julgar com mais clareza quais voos ocorreram em condições de estabilidade, bem como, quais se mostraram mais ou menos estáveis que outros.

Diante do exposto, vamos analisar também os dados de velocidade angular em X, Y e Z, na busca de encontrar uma solução baseada em diversos parâmetros que seja suficientemente conclusiva para a determinar um padrão de comportamento estável. Apesar de os dados de aceleração em X, Y e Z fornecerem uma boa estimativa acerca da estabilidade de um voo e um padrão de comportamento para os voos estáveis, ainda é necessário um aprofundamento nessa análise para que se permita julgar com clareza a comparação entre os voos, para indicar quais apresentaram comportamento mais ou menos estável que outros.

### **Análise dos dados de velocidade angular**

Após analisar o comportamento de um VANT através da observação dos dados de aceleração em X, Y e Z com o objetivo de determinar um padrão de comportamento para os voos estáveis, agora será analisado um outro parâmetro com mesmo objetivo. Dessa vez o parâmetro levado em consideração é a velocidade angular do veículo também em X, Y e Z coletada a cada instante de tempo durante os mesmos voos dos quais foram analisados os dados de aceleração.

Durante o experimento, a coleta dos dados de aceleração e velocidade angular ocorreu de forma simultânea, portanto a os dados analisados correspondem sempre ao mesmo voo, tanto na análise da aceleração quanto na análise da velocidade angular que será discutida a seguir.

Além dos dados de aceleração em X, Y e Z, coletados do acelerômetro, o sensoriamento do VANT armazena os dados de velocidade angular do veículo também nos três eixos, da mesma forma e ao mesmo tempo que coleta os dados de aceleração. O monitoramento da velocidade angular permite identificar a velocidade em que o veículo está rotacionando em

seus eixos X, Y e Z.

Quando o veículo encontra-se em estado de repouso, ou seja, parado no ar, sem realizar nenhum movimento e sem apresentar nenhuma inclinação em nenhum dos eixos, a velocidade angular registrada nos três eixos é igual a zero. Portanto, qualquer deslocamento, seja em X, Y ou Z, implica em alteração nesses valores, o valor da velocidade angular indica a velocidade desse movimento medido em metros por segundo (m/s). Considerando a velocidade angular como três variáveis diferentes: uma para cada eixo levando em conta que o veículo encontra-se em repouso e, portanto o valor de todas as variáveis iguais a zero, a ocorrência de movimentos em qualquer dos eixos implica na alteração dos valores dessas variáveis positiva ou negativamente. Quando ocorre um movimento de giro ou inclinação do veículo, portanto uma alteração na posição de repouso do veículo, a velocidade em que ocorreu essa alteração é capturada e armazenada para análise.

É esperado que os voos estáveis apresentem valores de velocidade angular com mínimas variações ao longo do tempo. Teoricamente, em um caso ideal, um voo completamente estável deve apresentar velocidade angular com valores sempre constantes e sempre iguais a zero. Por outro lado, não é esperado observar valores elevados para a velocidade angular em momentos do voo em que o veículo não esteja programado para realizar qualquer movimento. E é esperado que valores elevado para a velocidade angular em momentos estáveis, reflitam a ocorrência de instabilidades no voo. Diante disso, serão analisados os dados dos voos e verificados se os resultados observados correspondem ao esperado nos três eixos.

### **Análise dos dados de velocidade angular em X**

Iniciando a análise dos dados de velocidade angular como um novo parâmetro para estabelecimento de um padrão de comportamento para os voos estáveis, os dados de velocidade angular em X serão os primeiros a serem analisados, levando em conta que esses dados que ainda não foram submetidos a nenhum tipo processamento, portanto permanecem em seu estado bruto.

Os dados de velocidade angular em X podem ser visualizados por meio do gráfico apresentado na Figura 5.26, no qual esses valores, coletados pelo sensoriamento, são expressos em função do tempo. No gráfico todos os voos estão representados os valores da velocidade angular em X correspondente a cada um dos 12 voos realizados nessa etapa do experimento.

Busca-se com a análise do gráfico, perceber se o padrão de comportamento esperado está, ou não, se confirmando.

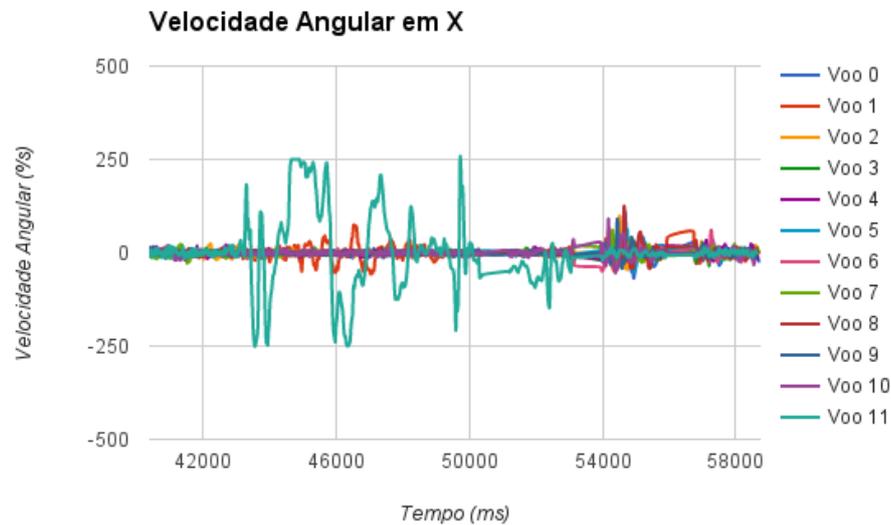


Figura 5.26: Velocidade angular em X

É sabido que os voos 1 e 11 sofreram interferências externas de intensidade elevada e esse fator pode ser identificado pela simples observação do gráfico, pois os dois voos se destacam dos demais com valores apresentando fortes variações e significativo distanciamento de zero, enquanto os outros voos tendem a permanecer estáveis e muito próximos desse valor. Esses voos que apresentam pouca ou nenhuma variação nos dados de velocidade angular ao longo do tempo, sugerem ter ocorrido em condições livres de interferências, esse fator será analisado com mais profundidade.

Dois fatores comprovam os resultados esperados: os voos mais estáveis apresentam valores de velocidade angular em X com pouca variação e os voos que sofreram distúrbios, ao contrário, apresentam valores com elevadas e recorrentes variações, esses fatores confirmam os resultados que eram esperados quanto à identificação de um padrão de comportamento para os voos estáveis, que comprovadamente tendem a apresentar dados de velocidade angular estáveis ao longo do tempo e muito aproximados de zero. O outro fator comprova a fuga do padrão de comportamento estável quando os dois voos que sofreram interferências externas puderam ser claramente identificados por meio da análise dos dados. Apesar disso, o padrão de estabilidade passa a ser questionado quando voos que não apresentaram distúr-

bios significativos como o VOO 2, mas que se mostraram instáveis nas análises anteriores, não puderam ser identificados por meio da análise dos dados brutos de velocidade angular em X.

Analisando esse gráfico é possível perceber que os dados, em sua forma bruta, já se mostraram capazes de promover a identificação preliminar de um padrão de comportamento, apesar de ser possível perceber quais voos sofreram interferências externas e a proporção de determinadas interferências através da análise dos dados, essa análise ainda não permite identificar e diferenciar os voos que sofreram interferências externas de baixa intensidade.

Os dados de velocidade angular em X se revelaram um bom indicador para um padrão de comportamento, mas de acordo com as análises dos dados de aceleração realizadas anteriormente, alguns voos podem apresentar comportamento instável apesar de não sofrerem interferências externas e por essa razão são identificados como voos instáveis, porém não foi possível perceber as instabilidades ocorridas nesses voos diante da análise dos dados brutos de Velocidade Angular em X. Isso sugere que um estudo mais aprofundado sobre os dados de velocidade angular analisando os dados dos eixos Y e Z, visando a identificação dos voos que sofreram distúrbios de baixa intensidade.

### **Análise dos dados de velocidade angular em Y**

A análise sobre os dados de velocidade angular em X revelou que é possível identificar apenas os voos que sofreram a ocorrência de distúrbios de forte intensidade. Assim se torna necessária a análise dos dados de velocidade angular em Y que é realizada através do gráfico da Figura 5.27. Os dados apresentados nesse gráfico também são a representação de dados em estado bruto, e assim como no caso da análise anterior, todos os voos são analisados em função do tempo, buscando identificar um padrão de comportamento quanto à estabilidade, comparar entre os voos quais foram mais ou menos estáveis, além de buscar a confirmação dos resultados esperados em relação aos dados de velocidade angular.

Os dados de velocidade angular em Y no estado bruto apresentados no gráfico confirmam o padrão esperado de comportamento para os voos estáveis: os voos que não sofreram distúrbios externos, assim como na análise da velocidade angular em X, apresentaram valores que tendem a se manter aproximados zero ao longo do tempo, enquanto os voos que foram acometidos por distúrbios apresentaram valores com fortes e recorrentes variações positivas

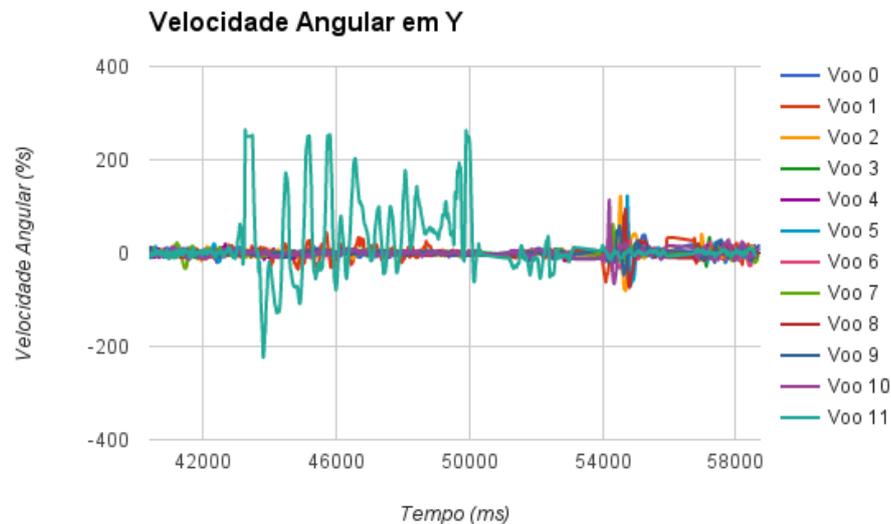


Figura 5.27: Velocidade angular em Y

e negativas.

A Observação do gráfico permite identificar que os voos que sofreram interferências externas: VOO 1 e VOO 11 são claramente identificados como instáveis por apresentarem dados que se distanciam significativamente do padrão de estabilidade. Diferentemente da análise em X, além dos voos mais instáveis, outros voos apresentaram sinais de instabilidade, o VOO 2 apresentou valores discretamente distantes do padrão de comportamento estável. Apesar disso, essa análise ainda não pode ser conclusiva quanto ao padrão de estabilidade, mas já permite comparar os voos que sofreram interferências mais elevadas.

Por outro lado, a tarefa de analisar os voos que não sofreram interferências externas ainda não pode ser realizada com clareza, pois esses voos não apresentam dados significativamente expressivos que permitam classificá-los quanto ao nível de estabilidade. Em comparação com os dados brutos de aceleração em Y, os dados de velocidade angular mostraram uma identificação mais convincente de um padrão de estabilidade.

Diante dos fatos apresentados é possível concluir que os dados brutos de velocidade angular em Y se mostraram efetivamente um forte indicador para um padrão comportamental de estabilidade, pois permitem verificar a ocorrência de instabilidades relativamente elevadas em voos, isso permite diferenciar voos que sofreram instabilidades dos que não sofreram. Apesar de ser um bom indicador para o padrão de comportamento estável, a análise dos da-

dos de velocidade angular em Y também não é conclusiva o suficiente, necessitando analisar também os dados de velocidade angular em Z para estabelecer um padrão de comportamento mais preciso.

### Análise dos dados de velocidade angular em Z

Da mesma maneira que as análises anteriores de velocidade angular em X e Y, o gráfico dos dados brutos da velocidade angular em Z, apresentado na Figura 5.28, destacam-se dois aspectos: o padrão de comportamento para os voos estáveis que também foi observado nas análises anteriores de velocidade angular em X e Y, e as dimensões das variações nos valores coletados dos voos 1 e 11, tornando visível as interferências externas sofridas nesses voos.

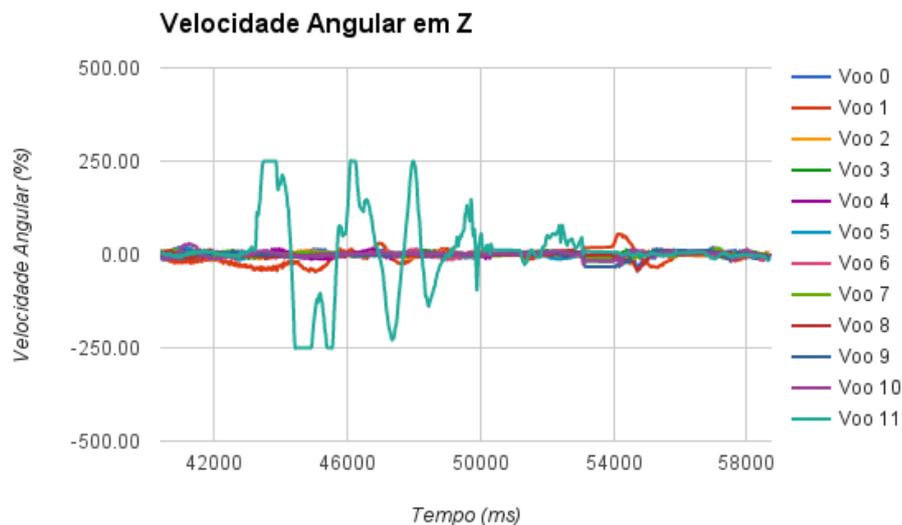


Figura 5.28: Velocidade angular em Z

O padrão de comportamento de estabilidade destacado na análise do gráfico revela novamente o comportamento esperado quanto aos voos que não sofreram interferências: os valores de velocidade angular se mantiveram estáveis, e constantemente aproximados de zero, concluindo assim, que apenas os voos 1 e 11 apresentaram variações significativas o suficiente para classificá-los como voos instáveis, e todos os outros se revelaram ter ocorrido em condições normais. Porém, o VOO 2, identificado como instável nas análises de aceleração e velocidade angular em Y, não pôde ser diferenciado do padrão de comportamento estável nessa análise, pois apresenta dados que revelam uma aparente estabilidade, um fato



a ser estudado com maior profundidade.

Analisando o gráfico é possível perceber que alguns voos apresentam discretas fugas do padrão de estabilidade, apesar dessa fugas apresentarem intensidades muito discretas, a existência delas requer uma análise mais aprofundada para que se verifique se os voos que apresentaram essas fugas, realmente sofreram algum distúrbio ou se trata-se apenas de ruídos e isso não afeta o padrão de comportamento.

Para possibilitar uma identificação mais precisa de distúrbios de intensidade pouco elevada se faz necessário o processamento dos dados de velocidade angular utilizando o Filtro de Kalman, de maneira semelhante ao ocorrido com os dados de aceleração. Esse processamento de dados utilizando o Filtro de Kalman busca verificar as pequenas alterações percebidas na análise do comportamento do veículo em Z, bem como em X e Y, pois o uso do Filtro de Kalman pode revelar informações que não foram percebidas na análise dos dados brutos, como a ocorrência de instabilidade nos voos que até o momento são considerados estáveis, o que contribui para o estabelecimento de um padrão de comportamento de estabilidade mais bem estabelecido, preciso e significativo.

### **Análise dos dados de velocidade angular em X processados utilizando o Filtro de Kalman**

Ao processar os dados de velocidade angular utilizando o Filtro de Kalman ocorreu a retirada de ruídos nos dados de velocidade angular em X. A retirada desses ruídos tornou os dados melhor legíveis quando comparados aos mesmos dados em estado bruto, conforme pode ser observado no gráfico expresso na Figura 5.29, nesse gráfico todos os voos são representados com os dados de velocidade angular em X processados utilizando filtro de Kalman em função do tempo.

Uma rápida análise sobre os dados representados no gráfico revela que os voos que não sofreram interferências externas apresentam valores muito constantes e sempre aproximados de zero, esses dados apresentam valores ainda mais constantes que os valores observados nos mesmos dados em estado bruto. Por outro lado, foram observadas variâncias consideráveis nos voos que sofreram instabilidades provocadas por distúrbios externos, essas variâncias apresentaram valores pouco significativos no VOO 1, que sofreu interferências menos intensas, mas no VOO 11, que sofreu distúrbios bem mais fortes, apresentou variações bem mais

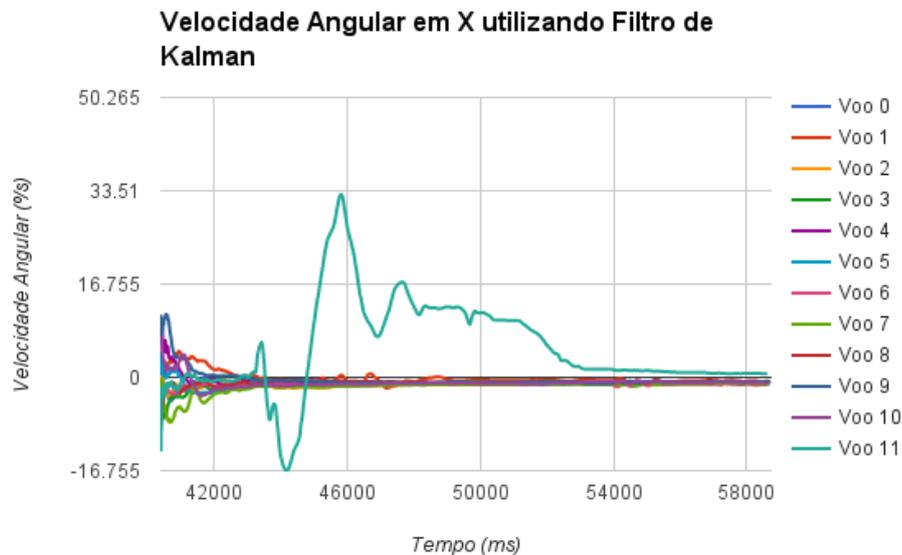


Figura 5.29: Velocidade angular em X utilizando o Filtro de Kalman

significativas.

Após o processamento dos dados utilizando o Filtro de Kalman, o padrão de comportamento para os voos estáveis pôde ser observado nos voos que não sofreram distúrbios, pois apresentaram valores para a velocidade angular em X muito constantes e aproximados de zero, como esperado. Esse padrão poder ser observado em todos os voos que não sofreram interferências externas, enquanto os voos que sofreram distúrbios apresentaram valores com variações positivas e negativas, umas mais fortes que outras.

A intensidade das variações observadas indicam a existência de uma relação de proporcionalidade entre a intensidade dos distúrbios sofridos pelo veículo durante o voo e as dimensões das variações nos valores da velocidade angular em X, pois quanto mais intensos os distúrbios sofridos, mais elevados os valores para a velocidade angular. Os voos 1 e 11 apresentaram fugas do padrão de estabilidade, apresentando valores de velocidade angular em X com variações significativamente intensas. Dentre os dois voos, o VOO 11 apresentou variações mais acentuadas, uma verificação que já era esperada, uma vez que o VOO 11 sofreu interferências mais intensas que o VOO 1.

Comparando os resultados obtidos com a análise dos dados de velocidade angular em X no estado bruto e os dados processados utilizando o Filtro de Kalman, percebe-se que as duas análises permitem obter conclusões semelhantes e as duas apresentam poucas diferenças

entre si. O padrão de comportamento para os voos estáveis é identificado da mesma maneira e com uma precisão semelhante nos dois casos e os voos identificados como instáveis são os mesmos nas duas análises.

A principal diferença entre as duas abordagens reside no fato de que os dados processados utilizando o Filtro de Kalman apresentam valores com menos variações que os dados brutos, esse fator permite visualizar com mais nitidez a existência do padrão de comportamento estável, bem como a fuga desse padrão por parte dos voos que sofreram distúrbios. Apesar disso, as duas abordagens para a velocidade angular em X falham quando não são capazes de permitir a identificação da ocorrência de distúrbios de baixa intensidade, como é o caso dos distúrbios sofridos no VOO 2 que não pôde ser visualizado em nenhuma das duas análises.

Em síntese, os dados de velocidade angular em X, estejam em estado bruto ou processados pelo Filtro de Kalman, são capazes de revelar um padrão de comportamento para os voos estáveis e permitem identificar os voos que sofreram fortes distúrbios externos, porém não são capazes de identificar a ocorrência de distúrbios de baixa intensidade, esses fatores tornam esse parâmetro um bom indicador para a identificação de um padrão de comportamento de estabilidade, porém esse é um indicador de baixa precisão.

### **Análise dos dados de velocidade angular em Y processados utilizando o Filtro de Kalman**

A baixa precisão na identificação de distúrbios apresentada pela análise dos dados de velocidade angular em X realizada anteriormente, alerta para a necessidade de encontrar indicadores mais precisos para o padrão de comportamento estável, e assim permitir que distúrbios cada vez menos intensos sejam identificados. Essa necessidade leva a analisar também os dados de velocidade angular em Y processados utilizando o Filtro de Kalman.

Antes que fossem submetidos a análises, os dados de velocidade angular em Y foram sujeitos a um processamento utilizando o Filtro de Kalman, os dados processados são apresentados no gráfico da Figura 5.30, no qual estão expressos os dados de todos os voos em função do tempo, destacando o padrão de comportamento apresentado pelos voos que não sofreram interferências externas e as fugas a esse padrão identificadas naqueles que sofreram distúrbios.

Os dados de velocidade angular em Y após o processamento utilizando o Filtro de Kal-

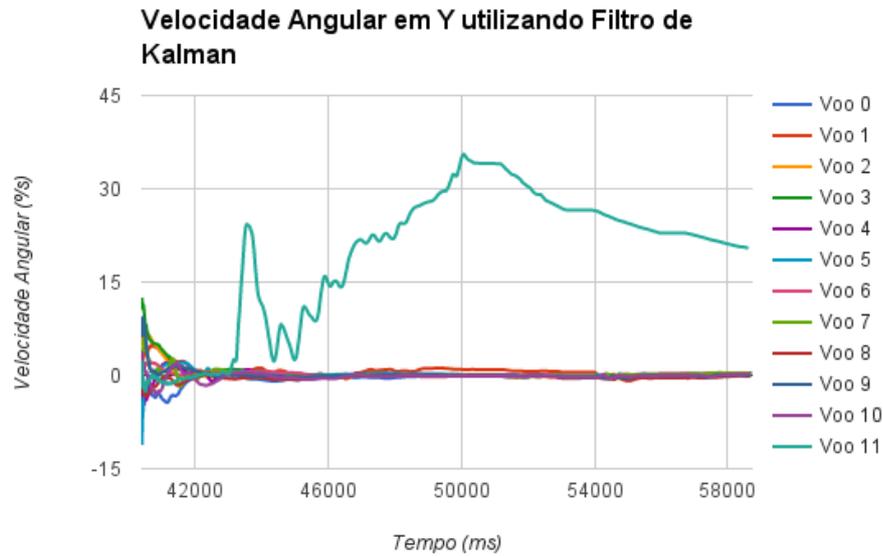


Figura 5.30: Velocidade angular em Y utilizando o Filtro de Kalman

man revelam que, semelhante às constatações da análise da velocidade angular em X, os voos que não sofreram interferências externas apresentam valores de velocidade angular constantes e aproximados de zero. Também foi possível perceber a existência de instabilidades provocadas por distúrbios ocorridos durante o voo através da observação de valores elevados e com fortes variações para a velocidade angular em Y.

A observação do gráfico permite notar que, apenas dois voos se diferenciaram dos demais, como já era esperado, os voos 1 e 11 apresentaram elevados valores para a velocidade angular em Y, por essa razão puderam ser identificados e facilmente diferenciados dos demais voos. O VOO 11 apresentou valores para a velocidade angular expressivamente mais elevados e variações nos valores muito mais significativas que o apresentado pelo VOO 1, esse fator já era aguardado porque o VOO 11 sofreu distúrbios muito mais significativos que o VOO 1.

Essa observação permite entender que os dados tratados de velocidade angular em Y permitem identificar os voos que sofreram distúrbios, assim como visualizar quais voos sofreram distúrbios mais ou menos intensos que outros. Porém, os voos que sofreram distúrbios de intensidades muito baixas novamente não puderam ser visualizados nessa análise, até mesmo o VOO 1 foi identificado com baixa precisão, pois não apresentou diferenças significativas em relação ao padrão observado nos voos estáveis.

Se comparadas as análises dos dados de velocidade angular em Y em estado bruto e dos dados processados utilizando o Filtro de Kalman, percebe-se que o padrão de comportamento para os voos estáveis é melhor estabelecido, pois os voos estáveis apresentando valores mais constantes e sem a existência de ruídos. Já os voos que sofreram interferências foram identificados nas duas análises, quando se distanciam do padrão de estabilidade. Apesar disso, percebe-se que voos que sofreram distúrbios pouco intensos não são claramente destacados tornando esse um parâmetro pouco preciso.

Apesar de revelar os voos que sofreram interferências muito intensas, como no caso do VOO 11, essa análise não permitiu uma clara identificação do VOO 1, pois esse sofreu distúrbios bem menos intensos que o VOO 11. Essa observação indica que os dados de velocidade angular em Y, da mesma maneira que os dados de velocidade angular em X, são um bom indicador para o estabelecimento de um padrão de estabilidade, porém os dois são indicadores muito pouco precisos.

### **Análise dos dados de velocidade angular em Z processados utilizando o Filtro de Kalman**

Considerando que os dados de velocidade angular em X e Y são bons indicadores para o padrão de estabilidade, apesar de que, mesmo processados utilizando o Filtro de Kalman, se mostraram imprecisos para determinar a estabilidade de voos que sofreram distúrbios de baixa intensidade, nesse contexto serão analisados os dados de velocidade angular em Z processados utilizando o Filtro de Kalman. Essa análise apresenta os dados de todos os voos em função do tempo, mostrando em um gráfico a comparação entre eles. O gráfico é apresentado na Figura 5.31 a seguir.

Semelhante ao ocorrido nas abordagens anteriores da velocidade angular em X e Y utilizando o Filtro de Kalman o processo de filtragem retirou os ruídos dos dados para tornar mais simples a visualização do comportamento apresentado pelo veículo durante seus voos. Nessa abordagem percebe-se claramente o padrão de comportamento para os voos estáveis. Obedecendo a esse padrão, os voos que não sofreram interferências externas se mantiveram apresentando valores constantes e aproximados de zero. Por outro lado, os voos que sofreram interferências externas apresentam valores claramente alheios a esse padrão: valores distantes de zero, positiva ou negativamente, e que apresentam fortes variações em seus

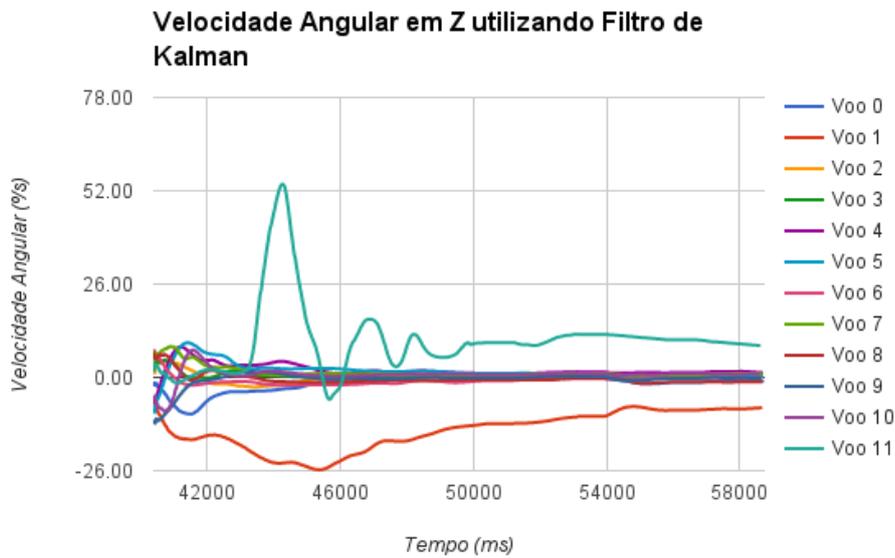


Figura 5.31: Velocidade angular em Z utilizando o Filtro de Kalman

valores.

A análise da velocidade angular em Z permite perceber que todos os voos estáveis apresentaram comportamento semelhante, mantendo-se constantemente próximo de zero, mas, diferentemente das observações em X e Y, em que todos os voos apresentaram valores muito aproximados, ou mesmo idênticos, a análise dos dados processados em Z permite perceber que alguns voos apresentam dados que se distanciam discretamente dos demais, sugerindo uma análise mais aprofundada, semelhante ao ocorrido nas análises ocorridas com os dados de aceleração.

Outro fator que distingue a análise da velocidade angular em Z, das abordagens observadas em X e Y é o fator do nível de precisão encontrados nos dados: nas análises dos dados de X e Y apenas os voos que foram submetidos a distúrbios mais intensos podem ser identificados facilmente, os voos que sofreram interferências de baixa intensidade são identificados com certa dificuldade. A abordagem atual possibilitou uma fácil identificação do VOO 1 como instável por apresentar uma clara fuga ao padrão de estabilidade, constatação realizada com dificuldade nas análises anteriores.

Diante dessa realidade, percebe-se que quanto mais baixa a intensidade dos distúrbios mais difícil identificá-los a partir da análise dos dados. A análise dos dados de velocidade angular em Z, após o processo de filtragem utilizando o Filtro de Kalman, possibilita uma

distinção mais fácil dos voos que sofreram distúrbios leves diante do padrão de estabilidade. Até mesmo os voos que não sofreram interferências externas apresentaram discretas fugas do padrão indicando a ocorrência de distúrbios nesses voos, porém, essas fugas ocorreram em uma proporção que não permite classificá-los como instáveis.

Diante do exposto, a análise dos dados permite afirmar que os dados de velocidade angular em Z processados utilizando o Filtro de Kalman são um bom indicador para o padrão de comportamento dos voos estáveis, com um nível de precisão bem mais elevado que as abordagens anteriores em X e Y. Como os dados de velocidade angular em Z se mostraram mais eficientes que os mesmos dados em X e Y, para concluir essas análises serão realizadas as análises da aceleração resultante em X, Y e Z com dados em estado bruto e processados utilizando o Filtro de Kalman.

### **Análise dos dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z**

Diante das análises anteriores sobre os dados de velocidade angular foram analisados separadamente em X, em Y e em Z, nessas análises foi percebido que dentre todos dados analisados, os que se mostraram mais eficientes foram os dados de velocidade angular em Z, porém os outros dados de velocidade angular em X e Y também exercem um papel importante na identificação de um padrão de comportamento estável, a diferença é nível de precisão que é mais elevado em Z, ou seja, analisando os dados de velocidade angular em Z é possível identificar distúrbios mais discretos que em X e Y.

Diante dessa realidade, será realizada também uma análise sobre os dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z para tentar encontrar mais um bom e preciso indicador para fortalecer o estabelecimento do padrão de comportamento estável. Os dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z são apresentados no gráfico da Figura 5.32 mostrando os dados de todos os voos, os estáveis e aqueles que sofreram distúrbios.

No gráfico, os voos que não sofreram distúrbios, voos estáveis, apresentaram valores sempre próximos de zero, bem como apresentam variações mínimas no decorrer do tempo. Isso mostra a existência de um padrão de comportamento para os voos estáveis, pois os voos que foram submetidos a interferências externas apresentaram valores elevados e variações nos valores da velocidade angular resultante, o que indica a fuga do padrão de comportamento estável.

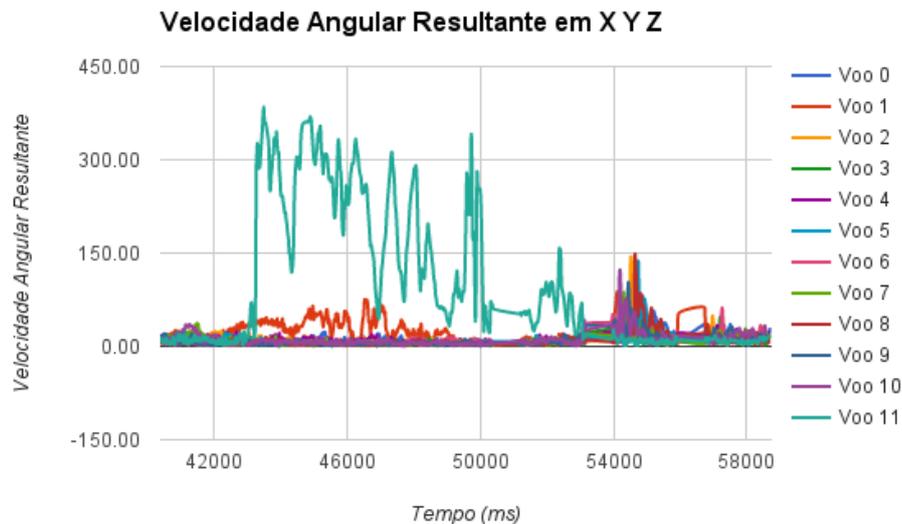


Figura 5.32: Velocidade angular resultante em X, Y e Z

As variações identificadas nos voos que sofreram interferências externas apresentam valores elevados e fortes recorrências, já os voos que não sofreram essas interferências apresentaram dados mais constantes, apesar de também apresentarem algumas fugas a esse padrão, com a existência de variações discretas nos valores ao longo do tempo. Essas variações apresentadas nos voos que não sofreram interferências externas podem indicar que esses voos não ocorreram em condições estáveis, mas isso precisa ser confirmado com análises mais precisas.

Por outro lado, os voos 1 e 11 apresentaram claras fugas ao padrão de estabilidade com valores elevados e fortes variações positivas e negativas ao longo do tempo. Os dois voos que sofreram interferências externas foram claramente diferenciados dos demais voos a partir da análise dos dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z. A existência de discretas variações nos valores observados nos voos estáveis, torna necessária a realização de uma análise mais aprofundada com a utilização do Filtro de Kalman sobre os dados brutos.

Se comparados os dados de velocidade angular resultante aos dados de velocidade angular em X e Y, percebe-se um nível de precisão superior na análise dos dados de velocidade angular resultante, tendo em vista que algumas discretas variações ocorridas nos voos que não sofreram interferências externas puderam ser identificadas, algo que não ocorreu na análise dos dados de velocidade angular em X e Y.



Diante disso, é possível afirmar que os dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z constituem um forte indicador para o padrão de comportamento estável, porém a existência de discretas variações nos valores dos voos estáveis torna necessária a realização de novas análises sobre os dados processamentos buscando esclarecer se essas variações sinalizam a ocorrência de distúrbios ou ruídos.

### **Análise dos dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z processados utilizando o Filtro de Kalman**

Os dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z processados utilizando o Filtro de Kalman são apresentados pelo gráfico da Figura 5.33. No gráfico estão expostos os valores de velocidade angular resultante em X, Y e Z calculados a partir dos valores individuais fornecidos pelo sensoriamento, que representam o comportamento de todos os voos em função do tempo.

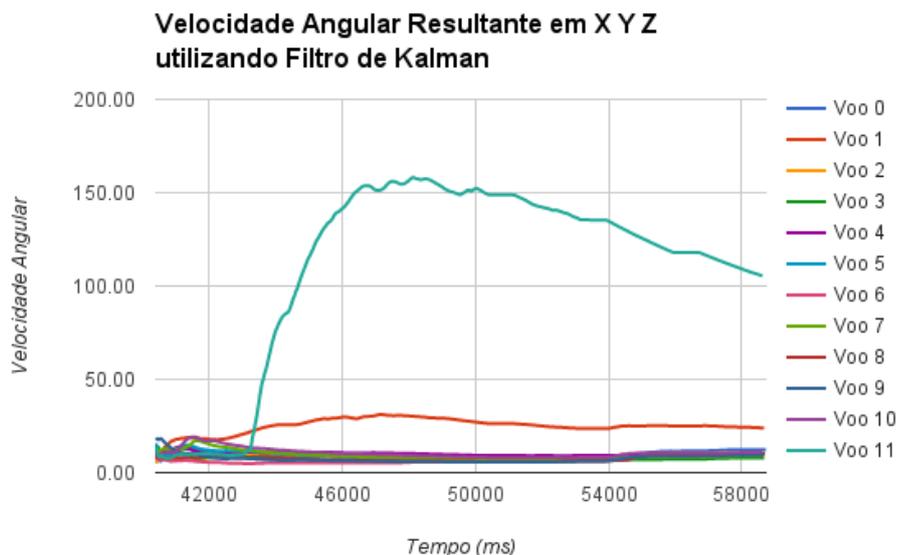


Figura 5.33: Velocidade angular resultante em X, Y e Z utilizando o Filtro de Kalman

Os dados processados utilizando o Filtro de Kalman revelam claramente a existência de um padrão de comportamento para os voos estáveis, pois os voos que não foram submetidos a distúrbios apresentaram valores aproximados de zero e relativamente constantes, apresentando mínimas variações nos valores da velocidade angular resultante ao longo do tempo.

A fuga a esse padrão de comportamento também pode ser claramente identificada nessa

análise, pois nos voos que sofreram interferências externas foram observadas fugas ao padrão de estabilidade, com variações positivas e negativas nos valores de velocidade angular resultante. Os voos 1 e 11 apresentaram um comportamento totalmente diferenciado do padrão, sendo facilmente diferenciados dos demais por apresentarem valores elevados ou reduzido em relação ao padrão de comportamento, outra diferença que pode ser observada são as fortes variações nos valores apresentadas por esses voos, enquanto os dados dos voos estáveis se mostraram constantes.

Após o processamento dos dados utilizando o Filtro de Kalman, os voos estáveis apresentaram valores aproximados de zero e relativamente constantes, mas, mesmo assim, apresentaram mínimas variações ao longo do tempo. Isso confirma a ideia de que alguns voos, ditos estáveis, podem ter sofrido discretos, mas significativos distúrbios. Por outro lado, voos que já foram identificados como instáveis, como o VOO 2, não puderam ser claramente identificados nessa análise. Esses fatores permitem entender que os dados de velocidade angular resultante apresentam um considerável nível de precisão. Esse fator tornou os dados de velocidade angular resultante em X, Y e Z processados com o Filtro de Kalman um forte indicador para o padrão de comportamento, e o fato de perceber variações, mesmo que pequenas, no comportamento dos voos estáveis torna esse um parâmetro moderadamente preciso.

## **Conclusões**

Levando em consideração que alguns voos que não sofreram interferências externas apresentaram dados que permitiram classificá-los como instáveis nas análises de aceleração e velocidade angular, as duas se mostraram satisfatórias no processo de identificação de um padrão de comportamento para os voos estáveis. As duas abordagens se mostraram relativamente eficientes, porém as abordagens relativas ao eixo Z se mostraram mais efetivas que as demais análises em X e Y, tanto para os dados de aceleração quanto para os de velocidade angular.

Outro fato notável é a contribuição do uso do Filtro de Kalman que permitiu tornar os dados e consequentemente as análises mais claras, possibilitando perceber o padrão de comportamento para os voos estáveis com um nível de precisão mais elevado do que quando são usados dados em estado bruto. Já as análises dos dados resultantes em X, Y e Z, tanto de

aceleração quanto de velocidade angular, também revelaram um padrão de estabilidade com relativa precisão, o que permitiu distinguir quais voos ocorreram em condições estáveis e quais sofreram distúrbios somente através da análise dos dados de voo.

## Capítulo 6

# Considerações Finais e Trabalhos

## Futuros

A presente pesquisa foi desenvolvida almejando alcançar resultados que permitissem avaliar o desempenho dos veículos em relação à sua estabilidade de voo, e dessa forma conferir-lhes maior segurança e confiabilidade. Nesse contexto o principal objetivo desse trabalho foi alcançado com o desenvolvimento de um sistema embarcado facilmente acoplável e compatível com os tipos de veículos mais comuns do mercado. O sistema proposto foi desenvolvido e demonstrou eficiência satisfatória na realização das duas tarefas a que foi incumbido: controle automatizado do veículo e monitoramento do seu estado durante o voo.

O sistema embarcado desenvolvido tornou-se compatível com a maioria dos modelos de VANTs, porque se comunica com a controladora de voo por meio dos seus canais de rádio. Outra característica desse sistema embarcado é que a sua operacionalização torna o veículo completamente autônomo, pois as rotinas do sistema de controle externo dispensam totalmente a intervenção humana ao comandarem todas as ações do veículo durante a execução de missões de voo de baixa complexidade. Esse mesmo sistema também realiza o monitoramento do estado do veículo durante toda a duração da missão de voos em intervalos mínimos de tempo, dessa forma o sistema de caixa preta é alimentado com dados de voo ficam disponíveis para análises posteriores. Os testes realizados durante a pesquisa puderam ser replicados e executados repetidas vezes, ação possível devido ao comando sobre o veículo executado pelo sistema de controle externo.

Com a execução de experimentos envolvendo testes de voo idênticos e repetidos, o sis-

tema de caixa preta gerou dados detalhados sobre o comportamento do veículo para análise posterior. Com base na análise desses dados foi possível identificar um padrão de comportamento estável em determinadas variáveis de voo, como velocidade angular e aceleração. Os valores de algumas dessas variáveis permitiram a identificação do padrão de comportamento estável ainda em seu estado puro, tal como foram coletadas do sensoriamento, outras variáveis, porém, não demonstraram a mesma precisão, mas através de processamento utilizando Filtro de Kalman foi possível vislumbrar a existência do padrão de estabilidade na maioria das variáveis.

A análise sobre os dados de voo, a partir do estabelecimento do padrão de estabilidade permitem identificar anomalias no comportamento do veículo, bem como permitem determinar se essas anomalias comportamentais são fruto de comandos recebidos pela controladora de voo, ou se tratam-se de distúrbios sofridos pelo veículo durante o voo. Esse tipo de análise pode ajudar a elucidar causas de acidentes envolvendo VANTs, uma outra contribuição desse trabalho para o campo de segurança em VANTs.

A execução dos testes apresentados nesse trabalho contribuem para uma maior segurança dos VANTs, uma vez que tornam possível determinar se um veículo é capaz de realizar missões de voo de forma estável, assim como torna possível mensurar o desempenho da estabilidade de um VANT em relação a outro, permitindo assim julgar as seguintes situações:

1. Considerando vários veículos executando uma mesma missão de voo, qual obteve melhor desempenho;
2. Considerando um veículo em várias missões diferentes, em quais perfis de missões o veículo apresenta melhor desempenho.

### **6.0.1 Trabalhos Futuros**

Como trabalhos futuros podemos citar o desenvolvimento de estratégias para estabelecer um padrão de comportamento mais estável e preciso que o atual, levando em consideração os mesmos parâmetros utilizados na presente pesquisa. Uma possibilidade interessante para trabalhos futuros seria o desenvolvimento de um sistema que analise automaticamente os dados de voo e emita um relatório quantificando a estabilidade do veículo em relação ao padrão de estabilidade dos voos estáveis. Outra contribuição futura importante poderia ser a

identificação dos distúrbios de voo mais comum e a modelagem dinâmica dos mesmos para ser utilizada para guiar sistemas de controle. Por fim, o desenvolvimento de um sistema de controle de voo que monitore e analise o comportamento do veículo em tempo real, seja inteligente, aplicando técnicas de aprendizagem de máquina para a identificação e atualização do padrão de comportamento estável, e além disso atue na correção dos distúrbios identificados a partir de fugas ao padrão de comportamento estável em tempo real.

# Bibliografia

- [Ahmed, Pota e Garratt 2008]AHMED, B.; POTA, H. R.; GARRATT, M. Flight control of a rotary wing uav - a practical approach. In: *2008 47th IEEE Conference on Decision and Control*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 5042–5047. ISSN 0191-2216.
- [Ahsan, Rafique e Ahmed 2013]AHSAN, M.; RAFIQUE, H.; AHMED, W. Verification of equilibrium point stability for linearization of an aircraft model. In: *Multi Topic Conference (INMIC), 2013 16th International*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- [Alothman, Jasim e Gu 2015]ALOTHMAN, Y.; JASIM, W.; GU, D. Quad-rotor lifting-transporting cable-suspended payloads control. In: *2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- [Anwar et al. 2016]ANWAR, J. et al. High gain and super-twisting sliding mode observers for the adaptive control of quadrotor uav. In: *2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 145–153.
- [ArduPilot 2016]ARDUPILOT. *ArduPilot*. 2016. [Http://ardupilot.org/](http://ardupilot.org/). Acesso em: 15 Mar. 2016.
- [ArduPilot Autopilot Suite 2016]ARDUPILOT Autopilot Suite. 2016. [Http://ardupilot.org/ardupilot](http://ardupilot.org/ardupilot). Acesso em: 20 jan. 2017.
- [ArduPilot Mega - Home 2016]ARDUPILOT Mega - Home. 2016. [Http://www.ardupilot.co.uk/](http://www.ardupilot.co.uk/). Acesso em: 20 jan. 2017.
- [Azinheira e Moutinho 2008]AZINHEIRA, J. R.; MOUTINHO, A. Hover control of an uav with backstepping design including input saturations. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 16, n. 3, p. 517–526, May 2008. ISSN 1063-6536.

- [Barry, Majumdar e Tedrake 2012]BARRY, A. J.; MAJUMDAR, A.; TEDRAKE, R. Safety verification of reactive controllers for uav flight in cluttered environments using barrier certificates. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 484–490. ISSN 1050-4729.
- [Cai et al. 2008]CAI, G. et al. Design and implementation of a hardware-in-the-loop simulation system for small-scale uav helicopters. In: *Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 29–34.
- [Carrillo et al. 2015]CARRILLO, L. R. G. et al. Three-dimensional position and velocity regulation of a quad-rotorcraft using optical flow. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 51, n. 1, p. 358–371, January 2015. ISSN 0018-9251.
- [Casau, Cabecinhas e Silvestre 2012]CASAU, P.; CABECINHAS, D.; SILVESTRE, C. Almost global stabilization of a vertical take-off and landing aircraft in hovered flight. In: *2012 American Control Conference (ACC)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 3247–3252. ISSN 0743-1619.
- [Chen, Peng e Zhang 2014]CHEN, Z.; PENG, Z.; ZHANG, F. Attitude control of coaxial tri-rotor uav based on linear extended state observer. In: *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 4204–4209. ISSN 1948-9439.
- [Coopmans, Stark e Coffin 2012]COOPMANS, C.; STARK, B.; COFFIN, C. A payload verification and management framework for small uav-based personal remote sensing systems. In: *Resilient Control Systems (ISRCS), 2012 5th International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 184–189.
- [Copter Home 2016]COPTER Home. 2016. [Http://ardupilot.org/copter/index.html](http://ardupilot.org/copter/index.html). Acesso em: 20 jan. 2017.
- [Dawei e Baoan 2014]DAWEI, D.; BAOAN, L. Flight safety control and ground test on uav. In: *Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2014 IEEE Chinese*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 388–392.



- [DECEA 2015]DECEA. *Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro*. 2015. [Http://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4262](http://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4262). Acesso em: 19 jan. 2017.
- [Deng e Yuan 2015]DENG, D.; YUAN, H. Uav flight safety ground test and evaluation. In: *2015 IEEE AUTOTESTCON*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 422–427.
- [Denuelle et al. 2015]DENUELLE, A. et al. Biologically-inspired visual stabilization of a rotorcraft uav in unknown outdoor environments. In: *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1084–1093.
- [Dittrich e Johnson 2002]DITTRICH, J. S.; JOHNSON, E. N. Multi-sensor navigation system for an autonomous helicopter. In: *Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 8C1–1–8C1–19 vol.2.
- [Dobrokhodov, Jones e Kaminer 2013]DOBROKHODOV, V.; JONES, K.; KAMINER, I. Rapid flight control prototyping - steps toward cooperative mission-oriented capabilities. In: *American Control Conference (ACC), 2013*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 680–685. ISSN 0743-1619.
- [Ducard, Kulling e Geering 2007]DUCARD, G.; KULLING, K. C.; GEERING, H. P. Evaluation of reduction in the performance of a small uav after an aileron failure for an adaptive guidance system. In: *2007 American Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1793–1798. ISSN 0743-1619.
- [Emran et al. 2015]EMRAN, B. J. et al. Robust adaptive control design for quadcopter payload add and drop applications. In: *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 3252–3257.
- [Erdos, Erdos e Watkins 2013]ERDOS, D.; ERDOS, A.; WATKINS, S. E. An experimental uav system for search and rescue challenge. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 28, n. 5, p. 32–37, May 2013. ISSN 0885-8985.
- [Escareno, Salazar-Cruz e Lozano 2006]ESCARENO, J.; SALAZAR-CRUZ, S.; LOZANO, R. Embedded control of a four-rotor uav. In: *2006 American Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 6 pp.–. ISSN 0743-1619.

- [Fowers et al. 2007]FOWERS, S. G. et al. Vision aided stabilization and the development of a quad-rotor micro uav. In: *2007 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 143–148.
- [Freeman et al. 2013]FREEMAN, P. et al. Model-based and data-driven fault detection performance for a small uav. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 18, n. 4, p. 1300–1309, Aug 2013. ISSN 1083-4435.
- [Furtado et al. 2008]FURTADO, V. et al. Aspectos de segurança na integração de veículos aéreos não tripulados (vant) no espaço aéreo brasileiro. *Sitraer 7 (2008) 506-517 – Tr. 494*, November 2008.
- [Garcia-Carrillo et al. 2010]GARCIA-CARRILLO, L. R. et al. Hovering quad-rotor control: A comparison of nonlinear controllers using visual feedback. In: *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1662–1667. ISSN 0191-2216.
- [Goodarzi, Lee e Lee 2014]GOODARZI, F. A.; LEE, D.; LEE, T. Geometric stabilization of a quadrotor uav with a payload connected by flexible cable. In: *2014 American Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 4925–4930. ISSN 0743-1619.
- [Haddadi, Zarafshan e Niroumand 2015]HADDADI, S. J.; ZARAFSHAN, P.; NIROUMAND, F. J. Dynamics modelling and implementation of an attitude control on an octo-rotor. In: *2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 722–727. ISSN 0840-7789.
- [Hassan, Ikram e Shah 2016]HASSAN, M. ul; IKRAM, M. A.; SHAH, S. I. A. Development of an autonomous flight controller for surveillance uav. In: *2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- [He, Chan e Guizani 2016]HE, D.; CHAN, S.; GUIZANI, M. Communication security of unmanned aerial vehicles. *IEEE Wireless Communications*, PP, n. 99, p. 2–7, December 2016. ISSN 1536-1284.
- [Heredia et al. 2005]HEREDIA, G. et al. Detection of sensor faults in autonomous helicopters. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2229–2234. ISSN 1050-4729.

- [Herisse et al. 2010]HERISSE, B. et al. The landing problem of a vtol unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. In: *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1600–1605. ISSN 2153-0858.
- [Herisse et al. 2008]HERISSE, B. et al. Hovering flight and vertical landing control of a vtol unmanned aerial vehicle using optical flow. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 801–806. ISSN 2153-0858.
- [Holtsov et al. 2016]HOLTISOV, A. S. et al. Comparison of the uav adaptive control with the robust control based on mu-synthesis. In: *2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 18–21.
- [How et al. 2008]HOW, J. P. et al. Real-time indoor autonomous vehicle test environment. *IEEE Control Systems*, v. 28, n. 2, p. 51–64, April 2008. ISSN 1066-033X.
- [Hui et al. 2013]HUI, C. et al. Autonomous takeoff, tracking and landing of a uav on a moving ugv using onboard monocular vision. In: *Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 5895–5901.
- [Introducing Copter 2016]INTRODUCING Copter. 2016. [Http://ardupilot.org/copter/docs/introduction.html](http://ardupilot.org/copter/docs/introduction.html). Acesso em: 20 jan. 2017.
- [Jardine e Givigi 2016]JARDINE, P. T.; GIVIGI, S. A predictive motion planner for guidance of autonomous uav systems. In: *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- [Jiang e Voyles 2013]JIANG, G.; VOYLES, R. Hexrotor uav platform enabling dextrous interaction with structures-flight test. In: *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. ISSN 2374-3247.
- [Jun et al. 2013]JUN, J. et al. Control platform design and experiment of a quadrotor. In: *Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 2974–2979.
- [Kang et al. 2010]KANG, Y. s. et al. Ground test results of flight control system for the smart uav. In: *ICCAS 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2533–2536.

- [Kendoul et al. 2006]KENDOUL, F. et al. Nonlinear control for systems with bounded inputs: Real-time embedded control applied to uavs. In: *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 5888–5893. ISSN 0191-2216.
- [Kim e Choi 2016]KIM, H.; CHOI, K. A modular wireless sensor network for architecture of autonomous uav using dual platform for assisting rescue operation. In: *2016 IEEE SENSORS*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3.
- [Krokowicz et al. 2010]KROKOWICZ, T. et al. Indoor navigation for quadrotor uavs using schematic environment maps. In: *19th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2010)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 457–462.
- [Li et al. 2016]LI, J. et al. Multi-target detection and tracking from a single camera in unmanned aerial vehicles (uavs). In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 4992–4997.
- [Loh, Bian e Roe 2006]LOH, R.; BIAN, Y.; ROE, T. Safety requirements for unmanned aerial vehicles (uav) in future civil airspace. In: *2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1151–1163. ISSN 2153-358X.
- [Loh, Bian e Roe 2009]LOH, R.; BIAN, Y.; ROE, T. Uavs in civil airspace: Safety requirements. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, v. 24, n. 1, p. 5–17, Jan 2009. ISSN 0885-8985.
- [Lu et al. 2016]LU, B. et al. Parameter matching of hybrid coaxial rotors and multi-rotor uav's power system. In: *2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1099–1104.
- [Mora et al. 2015]MORA, A. et al. Flight performance assessment of land surveying trajectories for multiple uav platforms. In: *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–7.
- [Mou et al. 2016]MOU, Y. et al. The flight control of micro quad-rotor uav based on pid. In: *2016 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 353–356.

- [Mustapa et al. 2014]MUSTAPA, Z. et al. Altitude controller design for multi-copter uav. In: *2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 382–387.
- [Nagarjuna e Suresh 2015]NAGARJUNA, K.; SURESH, G. R. Design of effective landing mechanism for fully autonomous unmanned aerial vehicle. In: *2015 3rd International Conference on Signal Processing, Communication and Networking (ICSCN)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- [Oosedo et al. 2013]OOSEDO, A. et al. Development of a quad rotor tail-sitter vtol uav without control surfaces and experimental verification. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 317–322. ISSN 1050-4729.
- [Patel e Barve 2014]PATEL, K.; BARVE, J. Modeling, simulation and control study for the quad-copter uav. In: *2014 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. ISSN 2164-7011.
- [Pflimlin et al. 2007]PFLIMLIN, J. M. et al. Aerodynamic modeling and practical attitude stabilization of a ducted fan uav. In: *2007 European Control Conference (ECC)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 4023–4029.
- [Pounds e Dollar 2011]POUNDS, P. E. I.; DOLLAR, A. M. Uav rotorcraft in compliant contact: Stability analysis and simulation. In: *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 2660–2667. ISSN 2153-0858.
- [Rangel, Kienitz e Brandão 2011]RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P. Development of a multi-purpose portable electrical uav system, fixed amp; rotative wing. In: *2011 Aerospace Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–9. ISSN 1095-323X.
- [Saied et al. 2015]SAIED, M. et al. Model identification and validation for translational movements of an octorotor uav. In: *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 102–108.
- [Sanca, Alsina e Cerqueira 2014]SANCA, A. S.; ALSINA, P. J.; CERQUEIRA, J. J. F. Stability analysis of a multicopter uav with robust backstepping controller. In: *2014 Joint Con-*

- ference on Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 241–246.
- [Santana, Sarcinelli-Filho e Carelli 2013]SANTANA, L. V.; SARCINELLI-FILHO, M.; CARELLI, R. Estimation and control of the 3d position of a quadrotor in indoor environments. In: *2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- [Shixianjun, Jiakun e Hongxing 2006]SHIXIANJUN; JIAKUN, S.; HONGXING, L. Hardware-in-the-loop simulation framework design for a uav embedded control system. In: *Control Conference, 2006. CCC 2006. Chinese*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1890–1894.
- [Stojcsics e Molnar 2011]STOJCSICS, D.; MOLNAR, A. Fixed-wing small-size uav navigation methods with hil simulation for aerobot autopilot. In: *Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2011 IEEE 9th International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 241–245.
- [Sugimoto e Gouko 2016]SUGIMOTO, T.; GOUKO, M. Acquisition of hovering by actual uav using reinforcement learning. In: *2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 148–152.
- [Uhlig, Bhamidipati e Neogi 2006]UHLIG, D.; BHAMIDIPATI, K.; NEOGI, N. Safety and reliability within uav construction. In: *2006 IEEE/AIAA 25TH Digital Avionics Systems Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–9. ISSN 2155-7195.
- [Wang, Ke e Chen 2016]WANG, K.; KE, Y.; CHEN, B. M. Development of autonomous hybrid uav u-lion with vtol and cruise flying capabilities. In: *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1053–1060.
- [Wang et al. 2015]WANG, Z. et al. Experimental verification of the model predictive control with disturbance rejection for quadrotors. In: *Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2015 54th Annual Conference of the*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 778–783.
- [What is a MultiCopter and How Does it Work? 2016]WHAT is a MultiCopter and How Does it Work? 2016. [Http://ardupilot.org/copter/docs/what-is-a-multicopter-and-how-does-it-work.html](http://ardupilot.org/copter/docs/what-is-a-multicopter-and-how-does-it-work.html). Acesso em: 20 jan. 2017.

---

[Xu, Tian e Hu 2016]XU, J.; TIAN, G.; HU, Z. Attitude control of ducted fan uav with three auxiliary rotor. In: *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 10938–10943.

[Yanjun, Yang e Shenglin 2013]YANJUN, L.; YANG, L.; SHENGLIN, Y. Research on the algorithm of information fusion for height of uav. In: *Intelligent Systems Design and Engineering Applications, 2013 Fourth International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 523–526.