

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
Programa de Engenharia de Defesa / PGED**

**Proposta de Tema de Dissertação de Mestrado  
Curso: Mestrado em Engenharia de Defesa**

**Sistemas de Defesa: Uma abordagem para desvios de  
obstáculos no auxílio do controle de um quadricóptero  
em tempo real**

**Orientador: Paulo Fernando Ferreira Rosa**

**Aluno: Bruno da Silva Giovanini (ED 14106)**

Data de Apresentação no PGED:  
Rio de Janeiro, 11 de fevereiro de 2015

## **Título da Dissertação**

**Sistemas de Defesa: Uma abordagem para desvios de obstáculos no auxílio do controle de um quadricóptero em tempo real**

## **Área de Concentração:**

Engenharia de Defesa

## **Linha de Pesquisa:**

Mecatrônica e Sistemas de Armas

## Resumo

A utilização de veículos aéreos para missões em ambientes fechados e restritos, tanto militares quanto civis, vem aumentando e os desafios envolvidos em seu controle estão atraindo as comunidades científica e industrial. Com isso, o desvio de obstáculos de forma automática ganha importância nesse cenário, dada a dificuldade de controle e o risco de colisão envolvido no manuseio destes veículos. Este trabalho propõe uma abordagem para controle do desvio de obstáculos de um quadricóptero de forma automática permitindo que sua operação mantenha o foco na missão global e evitar, assim, possíveis acidentes. O método consiste em evitar colisões estimando constantemente sua trajetória com base na dinâmica, estado atual, controle corrente e sensores ultrassônicos de distância. A validação desta proposta será realizada em ambiente simulado *hardware-in-the-loop* e posteriormente, com o embarque do sistema na plataforma de voo para teste. Quando embarcado, foram estipuladas três missões que a plataforma deverá realizar para avaliar diferentes situações: (a) manter sua posição enquanto estabilizado e sem saída quando é submetido à variações de controle, (b) desviar de um obstáculo estático a frente quando em deslocamento e controlado para colisão e (c) realizar uma trajetória segura num ambiente com vários obstáculos.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>6</b>
1.1	Motivação . . . . .	6
1.2	Objetivo . . . . .	7
1.3	Estrutura da Proposta . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Tópicos Tutoriais</b>	<b>10</b>
3.1	O Quadricóptero . . . . .	10
3.2	Sistemas Embarcados de Navegação . . . . .	13
3.3	Controle PID e quadricópteros . . . . .	16
<b>4</b>	<b>O Problema: Segurança em voo para quadricóptero</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>22</b>
5.1	Etapas . . . . .	22
5.2	Componentes necessários . . . . .	24
5.3	Software necessário . . . . .	25
5.4	Estratégia de implementação . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Cronograma</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>Viabilidade da proposta</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>29</b>
<b>9</b>	<b>Conclusão</b>	<b>31</b>

## Lista de Figuras

1	Plataforma Parrot Ardrone 2.0. Fonte [31] . . . . .	10
2	Estrutura e orientação dos motores (a), as forças e momentos atuando no quadricóptero (b) e os movimentos gerados a partir das variações de velocidades dos motores (c). Fontes [22], [21] e [10]. . . . .	12
3	Estrutura do Sistema de Navegação acoplada ao veículo (esquerda) e os movimentos gerados no quadricóptero (direita). Fonte [18] . . . . .	14
4	Gráfico das medições dos sensores inerciais da IMU do VANT-IME. Fonte [9] . . . . .	15
5	Desempenho do sistema para diferentes ganhos $K_p$ , $K_i$ e $K_d$ . Fonte [19] . . . . .	18
6	Controle PID de um quadricóptero. Fonte [20] . . . . .	19
7	Controle PID por eixo. Fonte [20] . . . . .	19
8	Etapas do método . . . . .	23
9	Estratégia de implementação . . . . .	26
10	Cronograma físico. . . . .	27
11	Missão 1. Veículo cercado e estabilizado . . . . .	29
12	Missão 2: Veículo em movimento com obstáculo a frente. Um desvio à direita (esquerda) e um desvio à esquerda (direita) . . . . .	30
13	Missão 3: Trajeto completo num ambiente com obstáculos	31

# 1 Introdução

A utilização de robôs voadores tanto em aplicações militares quanto civis vem aumentando e os desafios envolvidos em seu desenvolvimento estão atraindo as comunidades científica e industrial. Graças a isso, os veículos aéreos não tripulados (VANTs) têm se tornado cada vez mais populares. Tarefas como monitoramento de áreas alagadas, resgates em regiões de difícil acesso e inspeção de equipamentos perigosos, são aplicações que tornam os VANT's cada vez mais presentes no nosso cotidiano.

## 1.1 Motivação

Recentes avanços em processadores de baixo consumo de energia e na miniaturização dos componentes eletrônicos e sensores estão expandindo o campo de utilização dos VANT's para ambientes mais restritos. Veículos aéreos não tripulados de menor escala com decolagem e aterrissagem vertical, também chamados de Mini-VTOL (*Mini vertical taking-off and landing*) ou simplesmente VTOL, apresentam muitas vantagens em ambientes desse tipo, devido sua flexibilidade e agilidade quando em movimento. Essas habilidades tornam possível sua utilização em tarefas como busca e resgate em prédios e inspeção de áreas fechadas sem colocar outras vidas em risco. Porém, áreas restritas aumentam o risco do choque entre o robô e os itens ali contidos, dado o espaço limitado para sobrevoo. Nesse contexto, um mecanismo de controle que evite colisões contra obstáculos se torna importante para aumentar a segurança do voo e é o objeto dessa proposta. Acredita-se que, essa solução irá expandir o número dos possíveis campos de atuação de VTOL's para tarefas ainda consideradas perigosas, como sobrevoo em áreas com equipamentos críticos e sensíveis.

## 1.2 Objetivo

O propósito desse trabalho é controlar o desvio de obstáculos de um VTOL, um quadricóptero, de forma automática permitindo que sua operação mantenha o foco na missão global e evitar, assim, possíveis acidentes. Especificamente, propomos um método que consiste em evitar colisões estimando constantemente a trajetória futura do veículo, com base na sua dinâmica, seu estado atual, o *input* de controle corrente e a distância para os obstáculos, medida através de sensores ultrassônicos embarcados. Desta forma, facilitar o controle de voo contribuindo para a segurança de voos desta plataforma em ambientes restritos.

## 1.3 Estrutura da Proposta

A continuidade desta proposta está estruturada como segue. Inicialmente é discutida a revisão de literatura na seção 2. Após, os tópicos tutoriais relacionados estão descritos na seção 3. Uma descrição do problema em questão é abordado na seção 4 e metodologia proposta é descrita na seção 5. Em seguida, o cronograma de execução é mostrado na seção 6, a viabilidade da pesquisa na seção 7 e os resultados esperados na seção 8. Por fim, na seção 9, é feita uma conclusão sobre o potencial dessa proposta.

## 2 Revisão de Literatura

Nos últimos anos, veículos aéreos não tripulados receberam uma maior atenção da comunidade de robótica. Muitos autores focaram na modelagem e no controle destes veículos [34], com especial destaque para os quadricópteros [2]. Nesse contexto, estudos abrangentes sobre a configuração da plataforma, metodologias de modelagem, modelagem compreensiva não linear, os efeitos aerodinâmicos, identificação e simulação de um quadricóptero foram realizados [35] [14]. Por ser considerado um sistema complexo não linear, técnicas para controle de quadricópteros são também amplamente estudadas. [27] desenvolveu um controle PID para um quadricóptero para obter estabilidade em voo. Por outro lado, [23], propôs uma rede neural adaptativa para estabilizar o quadricóptero levando em consideração erros de modelagem e distúrbios do vento.

A partir de um modelo conhecido, diversas são as aplicações em estudo. Para a maioria, como navegação autônoma, tarefas multiagentes e desvio de obstáculos, a estimação do estado do veículo é considerado um grande desafio [1]. Quando se trata de ambientes *indoors*, a visão computacional, que utiliza-se de câmeras e processamento de imagem para estimação, é uma das linhas de pesquisa sobre o problema [29] [5] [30]. Outra linha utiliza-se de sensores estereoeceptivos para tal tarefa, como ultrassom [26] e laser [15]. Já para ambientes *outdoors*, torna-se possível a utilização do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e alguns trabalhos que utilizam essa tecnologia foram desenvolvidos, como [16] e [33].

Quando se fala especificamente sobre desvio de obstáculos em tempo real, esse campo é bastante explorado em robótica. Para resolver essa questão, várias são as abordagens que vem sido adotadas. Dentre



elas, os métodos baseados em campos potenciais artificiais, onde sensores de distância são usados e suas medidas tratadas como vetores de repulsão de forças [7], [24] e [6]; o método de janelas dinâmicas, que incorpora a dinâmica do robô ao problema através da redução do espaço de busca das possíveis velocidades alcançáveis em um curto período de tempo (janela dinâmica) [12] [28]; método de obstáculos com velocidade, que define um conjunto de velocidades possíveis que resultaria em uma colisão entre o robô e um obstáculo se movendo em uma certa velocidade [11] [8] [32]; método de estados de colisões inevitáveis, considerado um estado em que uma colisão eventualmente irá ocorrer, independente da trajetória a ser estabelecida e que leva em conta a dinâmica tanto do robô quanto dos obstáculos, fixos ou móveis [13]; dentre outros.

Um trabalho semelhante ao aqui proposto foi realizado por [17], porém o ambiente e a posição dos obstáculos já eram previamente conhecidos e geometricamente pré-programados, não sendo utilizado sensores de distância. [15] também desenvolveu um quadricóptero totalmente autônomo em ambiente *indoor*, utilizando para o desvio de obstáculos o sensor de varredura a laser em miniatura Hokuyo-URG, considerado o menor e mais leve sensor a laser disponível comercialmente. Já [4] utilizou cinco sensores ultrassônicos para tal. Porém, tanto [15] quanto [4] utilizaram plataformas desenvolvidas e testadas previamente em laboratório por alguns anos, tendo em mãos modelagens dos veículos já bem definidas.

## 3 Tópicos Tutoriais

Nessa seção serão abordados os principais aspectos teóricos envolvidos nessa proposta. Inicialmente, o quadricóptero, que é a plataforma de voo a ser aqui estudada, será descrita juntamente com sua dinâmica de voo. Após, os dispositivos embarcados e suas contribuições para o controle do voo e, por fim, o controle PID e sua utilização para o controle de quadricópteros.

### 3.1 O Quadricóptero

[27] define o quadricóptero como um veículo voador com quatro rotores com decolagem e aterrissagem vertical. Por sua vez, [14] define quadricóptero como uma classe de helicópteros com quatro rotores girando rapidamente para empurrar o ar para baixo e criar uma força para mantê-lo elevado e posicionados nas extremidades de um corpo quadrado. A Figura 1 ilustra a plataforma Parrot ArDrone 2.0, um quadricóptero bastante estudado e utilizado na comunidade de robótica.



Figura 1: Plataforma Parrot Ardrone 2.0. Fonte [31]

#### Dinâmica de voo

O objetivo da dinâmica de voo é manter a estabilidade do eixo central do quadricóptero, controlando os quatro rotores que trabalham de forma independente. Esse processo é considerado complexo e precisa de apoio eletrônico para a execução [14]. A controladora de voo é responsável por controlar a intensidade das rotações individualmente, de acordo com o movimento preterido. Um dos possíveis controles realizados pela controladora de voo é o PID que será abordado na seção 3.3.

O quadricóptero é um sistema não linear, fortemente acoplado com seis graus de liberdade, onde três são movimentos lineares  $(x, y, z)$  e os outros três angulares  $(\phi, \theta, \psi)$ . Porém, possui apenas quatro atuadores, sendo considerado então um sistema *underactuated*, com dois movimentos lineares  $(x, y)$  dependentes dos movimentos angulares  $(\phi, \theta)$ . As forças e momentos atuando no quadricóptero são produzidos pelas hélices ligadas aos rotores. Dois rotores rodam no sentido horário e dois no sentido anti-horário dispostos de forma a balancear o torque total do sistema [21]. A Figura 2a mostra a disposição dos motores e suas orientações de funcionamento. Já a Figura 2b mostra o diagrama do corpo e os eixos do quadricóptero.

Na Figura 2b,  $l$  representa a distância entre cada rotor e o centro,  $\phi$ ,  $\theta$  e  $\psi$  representam os ângulos de Euler em relação aos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , chamados de rolagem, afagem e guinada, respectivamente.  $T_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) é a força de empuxo produzida por cada hélice e cada seta circular ao redor de  $T_i$  indica o sentido de rotação daquele rotor. O referencial inercial é denotado por  $E(X, Y, Z)$  e o referencial do corpo do quadricóptero é denotado por  $B(x, y, z)$ .

A Figura 2c ilustra os movimentos gerados a partir das variações das velocidades dos motores. O aumento ou a diminuição da velocidade dos quatro rotores na mesma proporção irá gerar um movimento

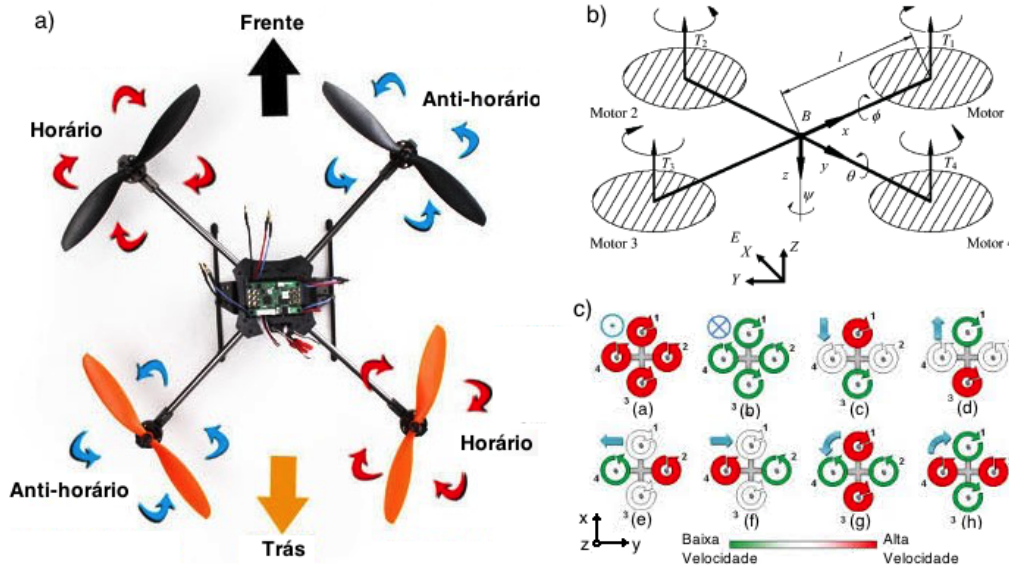


Figura 2: Estrutura e orientação dos motores (a), as forças e momentos atuando no quadricóptero (b) e os movimentos gerados a partir das variações de velocidades dos motores (c). Fontes [22], [21] e [10].

vertical (movimentos *a* e *b*). Quando os motores do par (1,3) operam independentemente e o par (2,4) mantém a mesma velocidade, o ângulo de inclinação do par (1,3), em relação ao eixo  $y$  (afagem), poderá ser controlado e, indiretamente, executará um movimento ao longo do eixo  $x$  (movimentos *c* e *d*). Da mesma forma, a operação independente do par de motores (2,4), enquanto (1,3) com velocidade constante, poderá controlar o ângulo de rolagem em relação ao eixo  $x$  e um controle indireto do movimento ao longo do eixo  $y$  também será realizado (movimentos *e* e *f*). E, por fim, se ambos os pares possuírem velocidades diferentes, o ângulo de guinada, em relação ao eixo  $z$ , poderá ser controlado (movimentos *g* e *h*). Dessa forma, o quadricóptero apresenta seis graus de liberdade e pode ser mover com agilidade em  $\mathbb{R}^3$ .

### 3.2 Sistemas Embarcados de Navegação

Navegação inercial é o processo pelo qual se adquirem informações sobre a posição, velocidade e atitude de um veículo com relação a um dado referencial, utilizando informações fornecidas por sensores inerciais tais como acelerômetros e giroscópios. Medindo-se as acelerações e velocidades angulares de um corpo, torna-se possível calcular as mudanças de velocidade, posição e atitude através de sucessivas integrações numéricas [18].

A unidade de medida inercial, ou IMU, é o componente eletrônico onde são montados os sensores inerciais, sendo três acelerômetros, que fornecem as medidas das componentes da aceleração linear (x,y,z), e três giroscópios, sensores que fornecem as componentes da velocidade angular (por exemplo, arfagem, rolagem e guinada). Já a unidade de processamento é o componente responsável por processar as medidas dos sensores inerciais. As velocidades lineares e as posições são obtidas a partir da integração dos sinais dos acelerômetros, enquanto que a integração dos sinais dos giroscópios fornece a atitude do veículo. A Figura 3 ilustra a estrutura de um Sistema de Navegação Inercial acoplado a um veículo, composta por três giroscópios, três acelerômetros (x,y,z) e uma unidade de processamento (CPU) à esquerda e os movimentos gerados no quadricóptero à direita.

Magnetômetros podem ser incluídos em IMUs, permitindo uma melhor performance de cálculos de orientação em sistemas AHRS (do inglês, *Attitude Heading Reference System*). Um sistema AHRS é composto de sensores que fornecem a orientação e atitude de uma aeronave. A principal diferença entre uma IMU e um AHRS é a adição de um sistema de processamento embarcado em um AHRS que fornece soluções de atitude e orientação, contra a IMU que apenas fornece os dados do sensor [3].

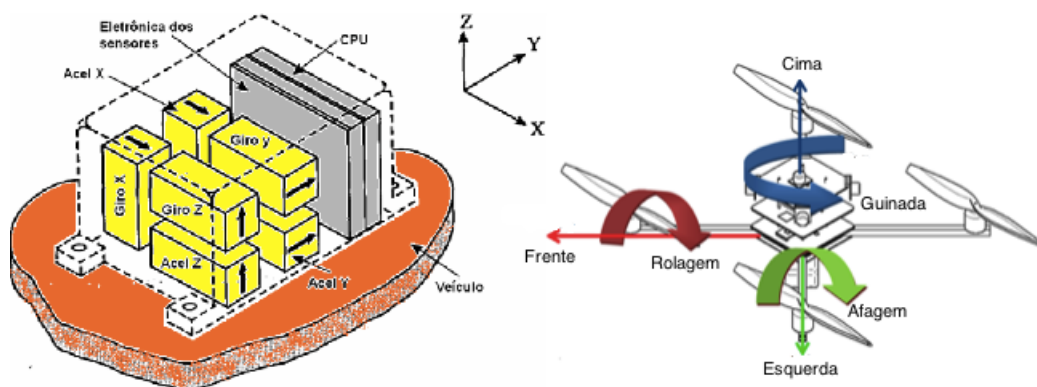
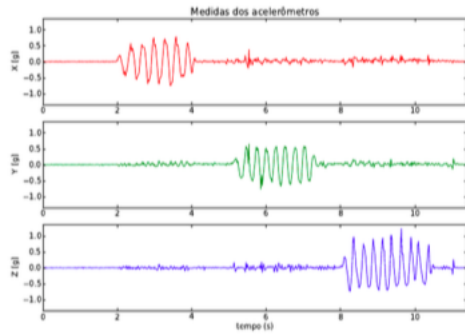


Figura 3: Estrutura do Sistema de Navegação acoplada ao veículo (esquerda) e os movimentos gerados no quadricóptero (direita). Fonte [18]

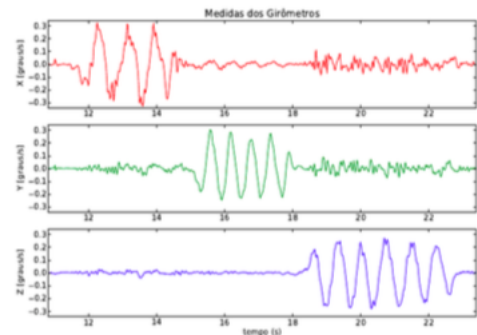
A Figura 4 demonstra o protótipo de uma IMU desenvolvida para o projeto VANT-IME. No hardware desenvolvido foram utilizados, um acelerômetro que mede a aceleração do veículo e um giroscópio de três eixos para complementar o acelerômetro, obtendo-se assim, informações de velocidade angular em altas frequências, o que se faz necessário para estabilização de aeronaves movendo-se em alta velocidade. Entretanto, devido a erros de deriva dos giroscópios, erros de integração e ao ruído, a utilização de um magnetômetro se faz necessária, pois permite a medição do campo magnético no qual está inserido. As informações de todos os sensores são lidas, filtradas e então processadas para a estimação da atitude da aeronave [9]. As Figuras 4a, 4b, 4c ilustram as leituras dos sensores inerciais e a Figura 4d demonstra o gráfico resultante após a filtragem e processamento das leituras dos sensores individuais.

### Acelerômetros e Giroscópios

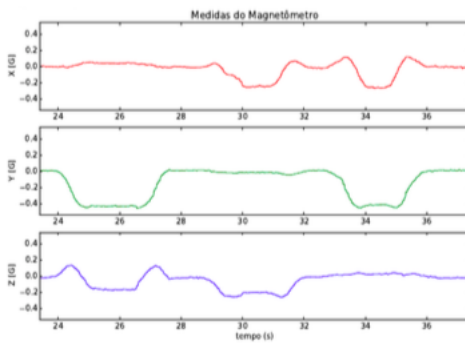
Acelerômetros são sensores que fornecem a medida e a força específica que atua no veículo, que é a resultante das ações da aceleração inercial e da aceleração da gravidade. Portanto, a partir da



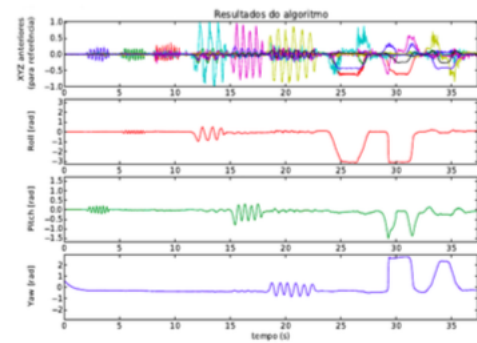
(a) Medições do acelerômetro



(b) Medições do giroscópio



(c) Medições do magnetômetro



(d) Resultado após o processamento das medições dos sensores

Figura 4: Gráfico das medições dos sensores inerciais da IMU do VANT-IME.

Fonte [9]

medida da força específica e do modelo do campo gravitacional da Terra, determina-se a aceleração linear, informação que é integrada para a determinação da velocidade e posição do veículo.

Giroscópios fornecem a medida da velocidade angular. Este dado é utilizado para a determinação da atitude do veículo. Já está na terceira geração. Esta, devido suas características de menor custo e volume, possibilitou sua utilização em grande escala em veículos de pequeno porte. Porém, sua exatidão é menor quando comparado às gerações anteriores. É formado por sensores baseados na tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) que consistem em placas de cerâmicas vibrantes que utilizam Força de Coriolis para medir a taxa independente da aceleração [18].

### 3.3 Controle PID e quadricópteros

Um controle PID é um método comum para controlar robôs e a sua utilidade está na aplicabilidade geral na maioria dos sistemas de controle, principalmente quando o modelo matemático de planta é complexo e não conhecido [25]. É um sistema de controle fechado que reage à mudanças no ambiente, que são captadas por sensores, e se baseia na constante sintonia das entradas para obter a saída esperada [19].

O algoritmo de cálculo do controle PID envolve três parâmetros constantes: o valor proporcional (P), o valor integral (I) e o valor derivativo (D) e serão descritos a seguir:

- Valor proporcional - É tipicamente o erro. Ele é usualmente a distância que o robô deve viajar, ou a temperatura que se queira alcançar. Se o robô está na posição  $A$ , mas quer estar na posição  $B$ , então o valor proporcional  $P$  é  $A - B$ .
- Valor integral - É o acúmulo dos erros passados no tempo  $t$ . Por



exemplo, se o robô está continuamente fora da média por uma certa quantidade de tempo, o valor  $I$  irá tratar isso. Supondo que em  $t_1$  o erro era  $A$ , em  $t_2$  o erro era  $B$  e em  $t_3$  o erro era  $C$ . o valor integral  $I$  seria  $A/t_1 + B/t_2 + C/t_3$ .

- Valor derivativo - É a mudança do erro no tempo  $t$ . Por exemplo, se o erro era  $A$  e, depois do tempo  $t$ , passou a ser  $B$ , o valor derivativo  $D$  é  $(A - B)/t$ . Normalmente, o contador de tempo da microcontroladora é utilizado para medir esse tempo. Além disso,  $D$  é utilizado para prever mudanças futuras baseando-se na taxa de mudança atual.

A soma ponderada desses três termos é usada para ajustar o processo através de um elemento de controle, como uma válvula ou como o controle da quantidade de energia aplicada ao sistema. O peso é atribuído através de uma constante  $K$  denominada ganho e tem o papel de ajustar os valores  $P$ ,  $I$  e  $D$ . Ou seja, cada termo  $P$ ,  $I$  e  $D$  possui o seu ganho associado e a equação básica de controle é dada pela fórmula 1.

$$P * K_p + I * K_i + D * K_d \quad (1)$$

A atuação do ganho no desempenho do sistema de controle PID pode ser visualizado na Figura 5, onde a linha azul indica o sinal de referência e as demais linhas indicam diferentes comportamentos com a variação dos ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . Um menor tempo de estabilização é normalmente desejável [19].

### **PID em quadricópteros**

A maioria dos quadricópteros utilizam PID para estabilização e permitem que o usuário altere os parâmetros para ajustar a performance [20]. A Figura 6 ilustra o esquema de controle PID de um

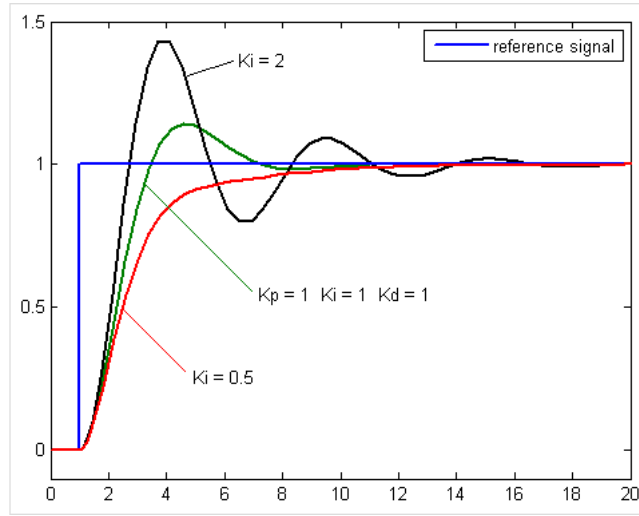


Figura 5: Desempenho do sistema para diferentes ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . Fonte [19]

quadricóptero para a estabilização. Basicamente, o *feedback* é obtido através dos sensores do quadricóptero que são avaliados em conjunto com o movimento pretendido pelo piloto através do controle PID e, após, passado ao atuador como comando para os motores.

Geralmente, segundo [20], existem ao todo três controles PID's, um para cada eixo ( $\phi, \theta, \psi$ ) e a alteração dos valores dos ganhos ( $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ ) de cada eixo acarretará em mudanças na reação do quadricóptero quando sujeito a interferências externas. A Figura 7 ilustra a estrutura do controle PID de um eixo.

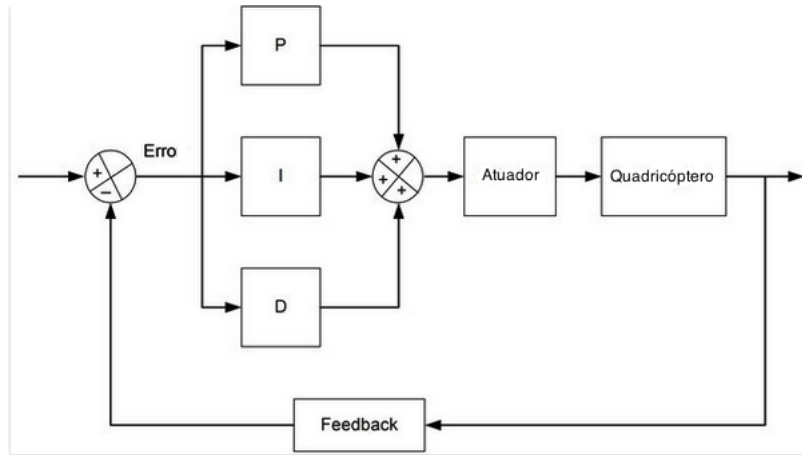


Figura 6: Controle PID de um quadricóptero. Fonte [20]

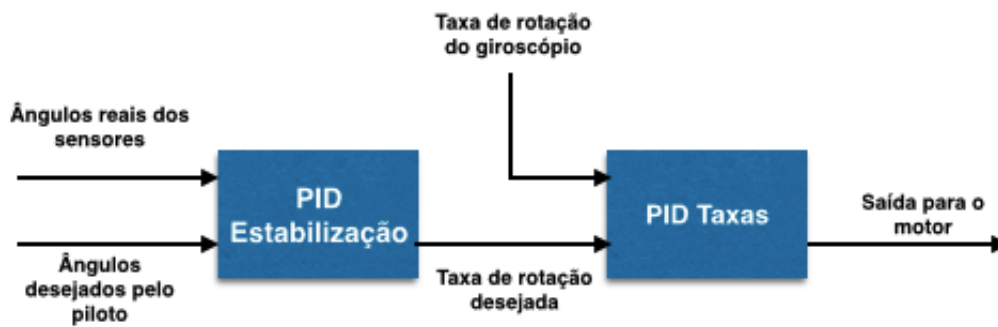


Figura 7: Controle PID por eixo. Fonte [20]

## 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero

O problema a ser tratado consiste em evitar que o quadricóptero se choque, durante sua navegação, através de um método que estima continuamente a trajetória futura do veículo, dada sua dinâmica, seu estado atual, o *input* de controle e a distância para os obstáculos, medida através de sensores ultrassônicos embarcados. Para isso, uma

pequena variação no controle será definida baseada em estimativas futuras de colisão. A formulação matemática do problema é descrita a seguir.

### Formulação do Problema

Considerando um quadricóptero como um robô com uma dinâmica não linear genérica em um espaço arbitrário,  $\mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$  sendo seu espaço de estados e  $\mathcal{U} \subset \mathbb{R}^n$  o espaço do *input* de controle. Em tempo contínuo, a dinâmica do robô é uma função em  $\mathbf{f} \in \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$  e é dada pela relação 2:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (2)$$

onde  $t$  é o tempo,  $\mathbf{x}(t)$  é o estado do robô no tempo  $t$  e  $\mathbf{u}(t)$  é o *input* de operação no tempo  $t$ . Consequentemente, dado um estado inicial  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$  e uma constante de *input* de operação  $\mathbf{u}$ , o estado do robô em um instante  $t > 0$  é dado pela relação 3:

$$\mathbf{x} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (3)$$

onde  $\mathbf{g} \in \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{X}$  representa a solução da equação diferencial 2.

Porém, quando se considera um ambiente repleto de obstáculos, o espaço de estados do robô se restringe à posições não ocupadas por eles. Define-se então  $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^3$ , como a subárea do espaço  $\mathbb{R}^n$  de movimentos possíveis do robô ocupada por obstáculos e as regiões que estão escondidas por eles quando vistas pelo estado corrente do robô. Além disso,  $\mathcal{R}(x)$ , como a subárea ocupada pelo robô no estado  $x \in \mathcal{X}$ . Assim, o problema passa a ser definido como identificar a menor variação necessária  $\Delta \mathbf{u} \in \mathcal{U}$  sobre o controle de operação  $\mathbf{u}$ , dado o atual estado  $\mathbf{x}$  do robô, a fim de que se evite uma colisão com

algum obstáculo em qualquer momento até se alcançar um período previamente definido  $\tau \in \mathbb{R}$  conforme a relação 4:

$$\begin{aligned} \min: \Delta \mathbf{u} \\ \text{Sujeito a: } \forall t \in [0, \tau], \mathcal{R}(\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}, t)) \cap \mathcal{O} = \emptyset \end{aligned} \tag{4}$$

É importante notar que, caso o *input* de operação  $\mathbf{u}$  obedeça as restrições da equação 4, ou seja, corresponde a um deslocamento seguro,  $\Delta \mathbf{u} = 0$  e nenhuma alteração do controle será realizada.

## 5 Metodologia

Para resolver este problema, é proposta a seguinte metodologia. Inicialmente, obter medidas de distâncias a partir de sensores ultrassônicos, em tempo real, para detecção de obstáculos. Em seguida, confrontá-los com os dados, já filtrados, da atitude do quadricóptero obtidos da IMU para identificar colisões iminentes em uma janela de tempo pré-determinada. Em caso positivo, interceptar o comportamento gerando uma pequena mudança de comando que seja suficiente para evitar uma colisão naquela janela de tempo.

Para facilitar o entendimento, o método foi dividido em etapas que serão descritas a seguir, juntamente com os componentes e software necessário e a estratégia de sua implementação.

### 5.1 Etapas

A Figura 8 ilustra as etapas envolvidas, onde cada cor representa um tipo de atuação e as setas indicam suas dependências. Em azul estão os responsáveis pela aquisição dos dados necessários: sensores ultrassônicos, os comandos de controle e a os sensores da IMU. Em verde, estão os processos de tratamento dos dados a fim de se obter medidas confiáveis para os módulos. Já em amarelo estão os módulos centrais para detecção de obstáculos e identificação de colisões. Por fim, em vermelho, está o controle de atitude, processo integrante da controladora de voo, que receberá comandos e os transformará em ações do quadricóptero.

Em seguida, as etapas e uma breve descrição dos passos necessários para galgá-las no trabalho proposto:

#### **Sensores ultrassônicos**

- Definir o modelo e a quantidade de sensores ultrassônicos a se-

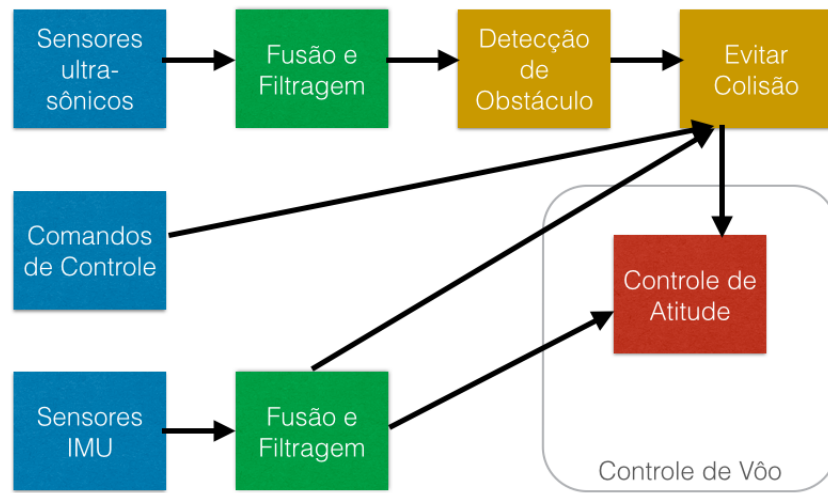


Figura 8: Etapas do método

rem utilizados e como dispô-los de forma a obter uma região de cobertura adequada.

### Fusão e Filtragem dos Sensores

- Definir e estudar o método que será utilizado para fusão dos sensores ultrassônicos.

### Comandos e Controle

- Estudar o *software development kit*, a partir daqui, chamado de SDK, de controle da plataforma de voo.

### Sensores IMU

- Verificar como obter os dados da IMU da plataforma de voo através de seu SDK.

### Fusão e Filtragem da IMU

- Estudar a utilização dos dados já filtrados pela plataforma de voo.

### Detecção de Obstáculos

- Estudar e implementar o mapeamento dos obstáculos visíveis a partir das medidas obtidas dos sensores em um dado momento.

### Identificação de Colisão

- Estudar e implementar o método para controle de colisão janela dinâmica que será utilizado para detecção de colisão com os obstáculos mapeados.
- Estudar a dinâmica de voo da plataforma de voo e implementar a extrapolação de sua posição em um dado período de tempo.

### Controle de Atitude

- Verificar o padrão de troca de comandos entre os comandos de controle e a controladora de voo para a implementação através do SDK.

## 5.2 Componentes necessários

Para realização deste trabalho, é necessária a utilização de uma plataforma de voo (quadricóptero) que aceite *input* de controle gerado por computador, através de uma interface de comunicação, e que possua SDK de código aberto para facilitar o desenvolvimento de algoritmos para seu controle.

Embarcado na plataforma, além dos sensores ultrassônicos, será necessário um *computer on module*. Ele será responsável por colher e filtrar os dados dos sensores ultrassônicos, rodar o algoritmo para detecção de obstáculos, obter os comandos de controle, identificar possíveis colisões e enviar comando para o controle de atitude. Para isso, será utilizado o *computer on module* Raspberry PI.



### 5.3 Software necessário

Inicialmente, o trabalho será desenvolvido em um ambiente simulado *hardware-in-the-loop* em MATLAB Simulink, para então ser testado na plataforma de voo. Para simular o quadricóptero, será utilizado um kit de desenvolvimento para quadricópteros do Matlab Simulink, que permite a simulação e o controle em tempo real da plataforma. Já a obtenção de dados dos sensores e o desenvolvimento dos algoritmos serão realizados com o apoio do *Raspberry Pi Support from MATLAB*, que provê acesso aos periféricos através do Raspberry Pi, permitindo adquirir dados dos sensores conectados em tempo real.

### 5.4 Estratégia de implementação

A implementação da solução consiste basicamente em duas fases do cronograma desta proposta que será ilustrado na seção 6: Fase de Simulação e Fase de testes com a Plataforma. Baseado nas etapas descritas na seção 5.1 e nos itens de hardware e software descritos nas seções 5.2 e 5.3, a estratégia de implementação pode ser visualizada na Figura 9. Em paralelo, o ambiente para simulação será montado enquanto as aquisições necessárias serão realizadas. Após, a implementação da solução será executada de forma incremental, com o primeiro ciclo utilizando apenas um sensor ultrassônico para validação dos algoritmos de detecção de obstáculo e identificação de colisão. Em seguida, serão adicionado outros sensores na solução em um segundo ciclo. Por fim, a plataforma então será utilizada, para realização de testes em campo e o embarque da solução completa.

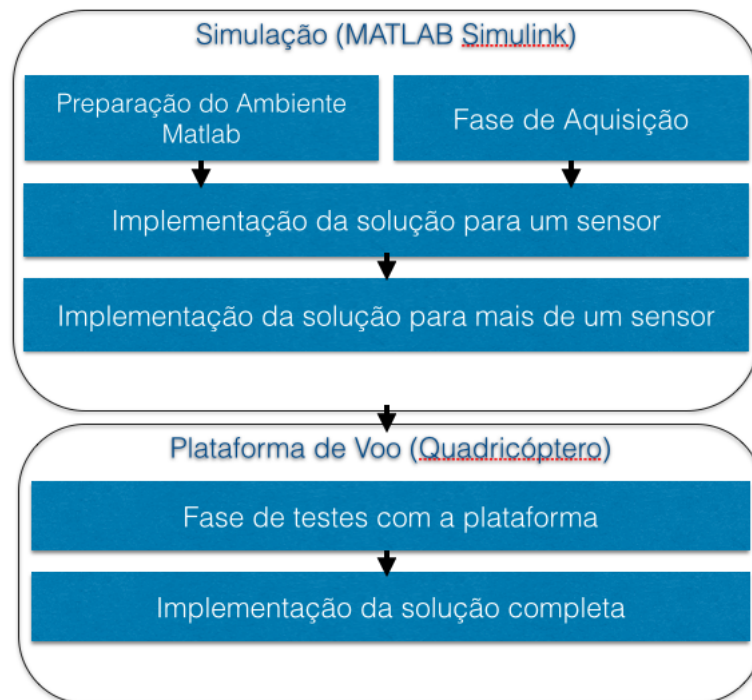


Figura 9: Estratégia de implementação

## 6 Cronograma

Para facilitar a compreensão do projeto, optou-se por dividir o trabalho em módulos que seguirão o cronograma abaixo.

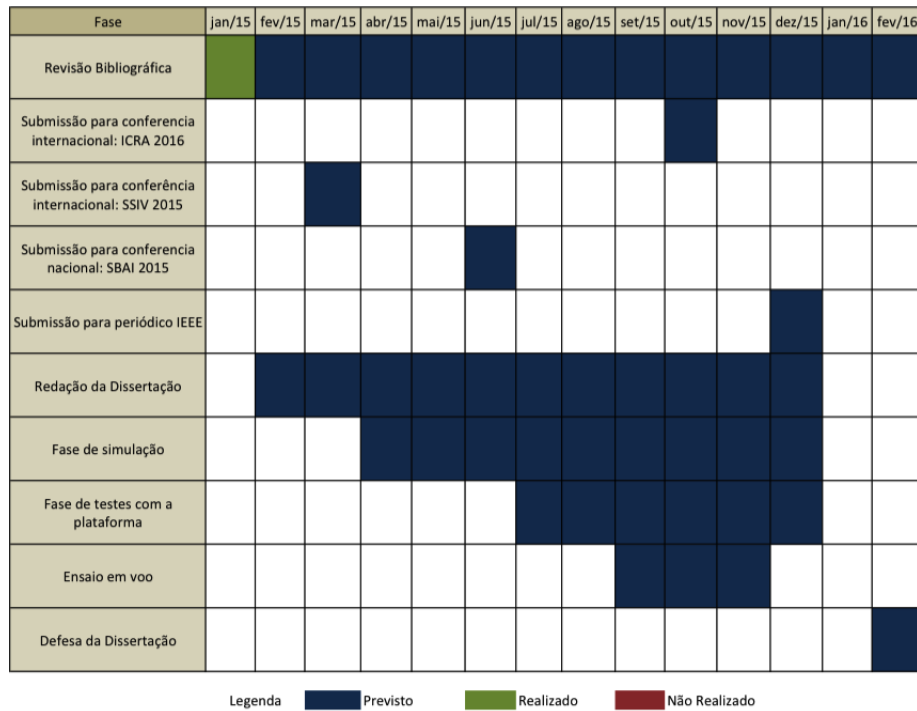


Figura 10: Cronograma físico.

## 7 Viabilidade da proposta

A viabilidade desta proposta depende da obtenção dos itens necessários para implementação e testes do método. A partir dos componentes e software necessários descritos nas seções 5.2 e 5.3, foi feito um levantamento dos itens já disponíveis para teste e os que necessitam ser adquiridos. A seguir está a listagem dos itens e suas disponibilidades no Laboratório de Robótica RoboIME.

- Plataforma de voo: O laboratório dispõe de quatro quadricópteros para teste, com aproximadamente 45cm de diâmetro, com capacidade de carga suficiente para embarcar um *computer on module* e sensores ultrassônicos.
- *Computer on module*: Estão disponíveis dois *computer on modu-*

les Raspberry PI modelo B com processador de 700MHz, 512MB de memória, duas saídas USB e portas de rede Ethernet para testes.

- Sensores ultrassônicos: Inicialmente, serão utilizados sensores ultrassônicos já adquiridos que terão suas capacidades avaliadas. Caso haja a necessidade de aquisição, são itens de baixo custo e facilmente encontrados no mercado brasileiro.
- MatLab Simulink: Usaremos o Matlab R2013a com Simulink, versão para estudante que possui todas as ferramentas necessárias para simulação do problema.

A princípio, estes itens serão suficientes para o início dos trabalhos e atestam a viabilidade da proposta. Outra alternativa, que poderá ser avaliada, é a utilização de um sensor de varredura a laser em miniatura Hokuyo-URG. Este está em fase de aquisição pelo laboratório e poderia substituir os sensores ultrassônicos, caso apresente um melhor desempenho.

## 8 Resultados esperados

Para avaliação do método, foram estipuladas três missões que o quadricóptero precisa ser capaz de realizar. Em todas, ele deverá evitar a colisão, mantendo uma distância segura dos obstáculos. Cada missão avalia o método em diferentes situações e estão descritas a seguir.

### **Missão 1: Manter sua posição enquanto estabilizado e nenhuma saída**

O quadricóptero será estabilizado e cercado, não tendo caminho possível de ser realizado enquanto o piloto executa comandos de controle. O *input* do controle será ignorado, ou seja, qualquer comando realizado pelo piloto será desprezado e a plataforma manterá sua posição. Um esboço da situação pode ser visualizado na Figura 11. Esta missão irá avaliar se o método consegue evitar os obstáculos em todas direções  $(x, y)$ .

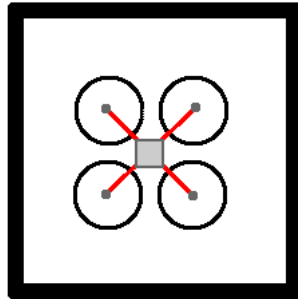


Figura 11: Missão 1. Veículo cercado e estabilizado

### **Missão 2: Desviar de um obstáculo estático a frente**

Nesta missão, o quadricóptero será conduzido a uma velocidade de aproximadamente  $2m/s$  através de uma trajetória retilínea em um ambiente *indoor* enquanto depara-se com um obstáculo a frente. Ele irá realizar um desvio pela lateral do obstáculo. Será escolhido o lado que exija o menor desvio possível (Figura 12). Esta missão irá avaliar

se o método consegue desviar a trajetória do quadricóptero, perante um obstáculo, quando em movimento.

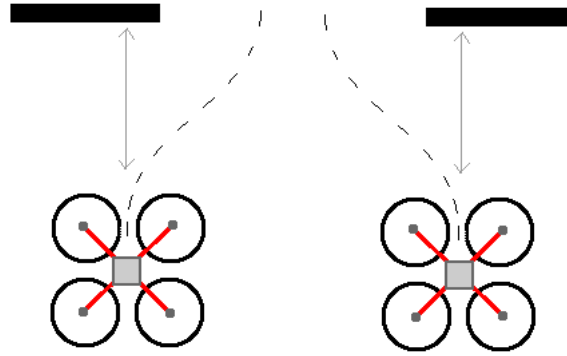


Figura 12: Missão 2: Veículo em movimento com obstáculo a frente. Um desvio à direita (esquerda) e um desvio à esquerda (direita)

**Missão 3: Realizar uma trajetória segura num ambiente com vários obstáculos**

Por fim, o quadricóptero será conduzido a uma velocidade de aproximadamente  $2m/s$  por um trajeto completo, com diversos obstáculos em posições variadas, e ele deverá ser capaz de terminá-lo sem colisões. O objetivo desta missão é avaliar a eficácia e o benefício do método simulando a condução de um quadricóptero num ambiente complexo de difícil pilotagem. A Figura 13 ilustra o mapa do ambiente a ser utilizado com as setas indicando o início e o fim do trajeto.

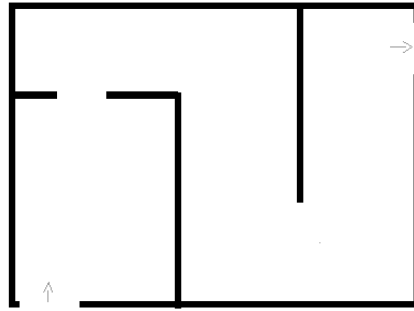


Figura 13: Missão 3: Trajeto completo num ambiente com obstáculos

## 9 Conclusão

O advento da utilização dos VANT's, mais especificamente os quadricópteros, em ambientes restritos, trazem a tona a necessidade de controlar o desvio de obstáculo de forma automática. Este é um tema que tem merecido atenção na área de robótica e nossa proposta visa explorá-lo com medições de sensores em tempo real, auxiliando o controle do veículo. Com esse enfoque, nossa proposta é viável e poderá ser utilizada em uma variedade de aplicações na área de defesa. Além disso, a solução, uma vez construída, será o módulo de desvio de obstáculos da plataforma VANT-IME, que está em fase de concepção no Laboratório RoboIME.

## Referências

- [1] M. Achtelik, A. Bachrach, R. He, S. Prentice, and N. Roy. Autonomous navigation and exploration of a quadrotor helicopter in GPS-denied indoor environments. In *First Symposium on Indoor Flight*, 2009.
- [2] E. Altug, J. P. Ostrowski, and R. Mahony. Control of a quadrotor helicopter using visual feedback. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 72–77. IEEE, 2002.
- [3] A. T. Angonese and P. Ferreira Rosa. Ground control station for multiple uavs flight simulation. In *Robotics Symposium and Competition (LARS/LARC), 2013 Latin American*, pages 136–141. IEEE, 2013.
- [4] M. Becker, R. C. B. Sampaio, S. Bouabdallah, V. d. Perrot, and R. Siegwart. In-flight collision avoidance controller based only on OS4 embedded sensors. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(3):294–307, 2012.
- [5] M. Bloesch, S. Weiss, D. Scaramuzza, and R. Siegwart. Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments. In *Robotics and automation (ICRA), 2010 IEEE international conference on*, pages 21–28. IEEE, 2010.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 19(5):1179–1187, 1989.
- [7] Y. Bouktir, M. Haddad, and T. Chettibi. Trajectory planning for a quadrotor helicopter. In *Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*, pages 1258–1263. IEEE, 2008.



- [8] D. Claes, D. Hennes, K. Tuyls, and W. Meeussen. Collision avoidance under bounded localization uncertainty. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1192–1198. IEEE, 2012.
- [9] R. A. da Paixao, P. F. F. Rosa, and J. M. M. Neto. An attitude heading and reference system: basic concepts and prototype. In *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 2225–2230. IEEE, 2011.
- [10] J. M. B. Domingues. Quadrotor prototype. *Universidade Tecnica de Lisboa. Dissertação*, 2009.
- [11] P. Fiorini and Z. Shiller. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *The International Journal of Robotics Research*, 17(7):760–772, 1998.
- [12] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1):23–33, 1997.
- [13] T. Fraichard and H. Asama. Inevitable collision states - a step towards safer robots? *Advanced Robotics*, 18(10):1001–1024, 2004.
- [14] A. Gibiansky. Quadcopter dynamics, simulation, and control. 2010.
- [15] S. Grzonka, G. Grisetti, and W. Burgard. A fully autonomous indoor quadrotor. *Robotics, IEEE Transactions on*, 28(1):90–100, 2012.
- [16] G. Hoffmann, D. G. Rajnarayan, S. L. Waslander, D. Dostal, J. S. Jang, and C. J. Tomlin. The stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi agent control (starmac). In *Digital Avionics*

- Systems Conference, 2004. DASC 04. The 23rd*, volume 2, pages 12–E. IEEE, 2004.
- [17] J. Israelsen, M. Beall, D. Bareiss, D. Stuart, E. Keeney, and J. van den Berg. Automatic collision avoidance for manually tele-operated unmanned aerial vehicles.
  - [18] J. Junior. Simulação e implementação em tempo real de sistemas de navegação inercial integrados INS/GPS. [http://pged.ime.eb.br/teses/mestrado/tese\\_msc\\_2009\\_adalberto.pdf](http://pged.ime.eb.br/teses/mestrado/tese_msc_2009_adalberto.pdf), 2009.
  - [19] R. Kingdom. PID controller tutorial for robots. <http://robot-kingdom.com/pid-controller-tutorial-for-robots/>, 2013. Acessado em 12/01/2015.
  - [20] O. Liang. Quadcopter PID explained and tuning. <http://blog.oscarliang.net/quadcopter-pid-explained-tuning/>, 2014. Acessado em 12/01/2015.
  - [21] A. A. Mian and W. Daobo. Modeling and backstepping-based nonlinear control strategy for a 6 DOF quadrotor helicopter. *Chinese Journal of Aeronautics*, 21(3):261–268, 2008.
  - [22] multicopter.forestblue.nl. Quadcopter (x-mode build log). [http://multicopter.forestblue.nl/quadcopter\\_build\\_log.html](http://multicopter.forestblue.nl/quadcopter_build_log.html), 2012. Acessado em 25/02/2015.
  - [23] C. Nicol, C. Macnab, and A. Ramirez-Serrano. Robust neural network control of a quadrotor helicopter. In *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pages 1233–1237, 2008.
  - [24] M. Nieuwenhuisen, D. Droeschel, J. Schneider, D. Holz, T. Labe, and S. Behnke. Multimodal obstacle detection and collision avoi-

- dance for micro aerial vehicles. In *Mobile Robots (ECMR), 2013 European Conference on*, pages 7–12. IEEE, 2013.
- [25] K. Ogata, P. Á. Maya, and F. Leonardi. *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall, 2003.
- [26] J. Roberts, T. Stirling, J.-C. Zufferey, and D. Floreano. Quadrotor using minimal sensing for autonomous indoor flight. In *Proceedings of the European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (EMAV2007)*, 2007.
- [27] A. L. Salih, M. Moghavvemi, H. A. Mohamed, and K. S. Gaeid. Flight PID controller design for a UAV quadrotor. *Scientific Research and Essays*, 5(23):3660–3667, 2010.
- [28] P. Saranrittichai, N. Niparnan, and A. Sudsang. Robust local obstacle avoidance for mobile robot based on dynamic window approach. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2013 10th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2013.
- [29] S. Shen, Y. Mulgaonkar, N. Michael, and V. Kumar. Vision-based state estimation and trajectory control towards high-speed flight with a quadrotor. In *Robotics: Science and Systems*. Citeseer, 2013.
- [30] S. Shen, Y. Mulgaonkar, N. Michael, and V. Kumar. Vision-based state estimation for autonomous rotorcraft MAVs in complex environments. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1758–1764. IEEE, 2013.
- [31] F. D. Stephane, Nicolas Brulez. Ar.drone developer guide. [http://ardrone2.parrot.com/media/uploads/support\\_ardrone\\_1/ar.drone\\_user-guide\\_uk.pdf](http://ardrone2.parrot.com/media/uploads/support_ardrone_1/ar.drone_user-guide_uk.pdf), 2014. Acessado em 25/01/2015.

- [32] J. van den Berg, D. Wilkie, S. J. Guy, M. Niethammer, and D. Manocha. LQG-obstacles: Feedback control with collision avoidance for mobile robots with motion and sensing uncertainty. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 346–353. IEEE, 2012.
- [33] J. Wendel, O. Meister, C. Schlaile, and G. F. Trommer. An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter. *Aerospace Science and Technology*, 10(6):527–533, 2006.
- [34] Z. Ye, P. Bhattacharya, H. Mohamadian, H. Majleseini, and Y. Ye. Equational dynamic modeling and adaptive control of UAV. In *System of Systems Engineering, 2006 IEEE/SMC International Conference on*, pages 5–pp. IEEE, 2006.
- [35] X. Zhang, X. Li, K. Wang, and Y. Lu. A survey of modelling and identification of quadrotor robot. <http://downloads.hindawi.com/journals/aaa/2014/320526.pdf>, 2014. Acessado em 12/02/2015.

---

Bruno da Silva Giovanini (ED 14106)

Aluno

**A presente proposta foi avaliada e aprovada pela banca examinadora:**

---

Paulo Fernando Ferreira Rosa, Ph.D

Presidente

---

Paulo César Pellanda, Docteur

Membro

---

Jorge Audrin Morgado de Gois, DrEng

Membro

Rio de Janeiro, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_