

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

Bruno da Silva Giovanini

Paulo F.F. Rosa<sup>1</sup>  
(Orientador)

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia - IME  
Laboratório de Robótica e Inteligência Computacional  
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa

11 de fevereiro de 2015

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão

# Objetivo

- Evitar colisões de um quadricóptero utilizando estimativas de sua trajetória futura e distâncias para obstáculos, criando desvios, se necessário, e proporcionando uma maior segurança de voo em ambientes restritos e sensíveis

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução**
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão

# Motivação I

- Crescente utilização para missões civis e militares
- Voos em ambientes fechados e restritos
- Risco de colisão com equipamentos críticos e sensíveis
- Difícil controle e manuseio

# Motivação II

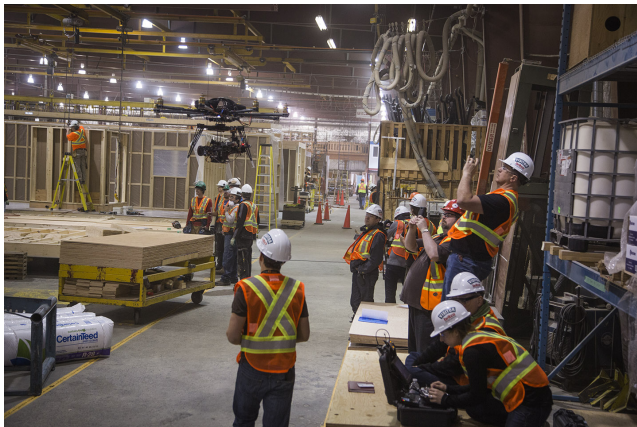


Figura: Filmagem *indoor*

# Motivação III



Figura: Inspeção de equipamentos sensíveis



# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias**
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão

# O quadricóptero - A Plataforma

- Veículo voador com quatro rotores com decolagem e aterrissagem vertical [Salih et al., 2010]

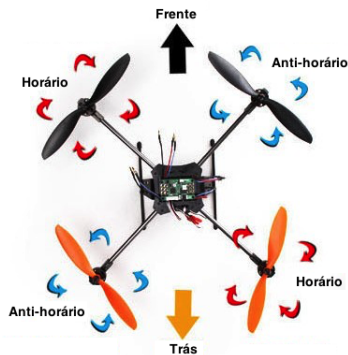


Figura: Plataforma Parrot Ardrone 2.0. Fonte [Stephane, 2014]

# O quadricóptero - Dinâmica de Voo I

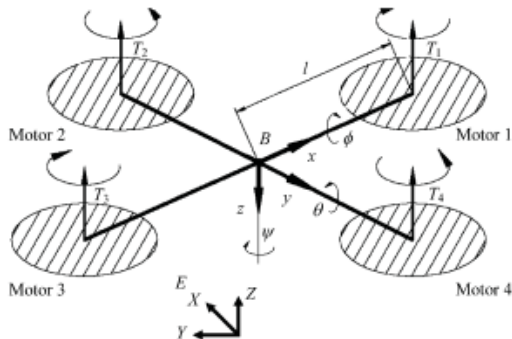
- Seis graus de liberdade e quatro atuadores
- Três são movimentos lineares  $(x,y,z)$  e três são angulares  $(\phi,\theta,\psi)$
- Sistema não-holonômico (subatuado), movimentos  $(x,y)$  dependentes dos movimentos  $(\phi,\theta)$  [Figueiredo and Jota, 2004]
- Objetivo é manter a estabilidade do eixo central controlando quatro motores independentes eletronicamente

# O quadricóptero - Dinâmica de Voo II



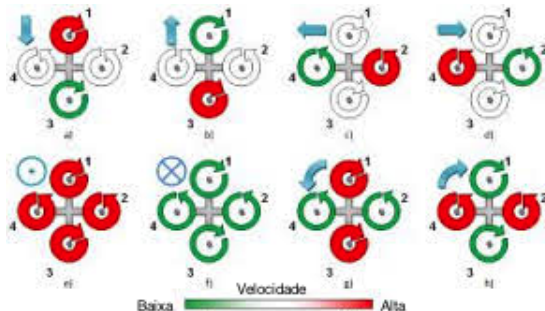
**Figura:** Estrutura e orientação dos motores. Fonte [multicopter.forestblue.nl, 2012]

# O quadricóptero - Dinâmica de Voo III



**Figura:** As forças e momentos atuando no quadricóptero. Fonte [Mian and Daobo, 2008]

# O quadricóptero - Dinâmica de Voo IV



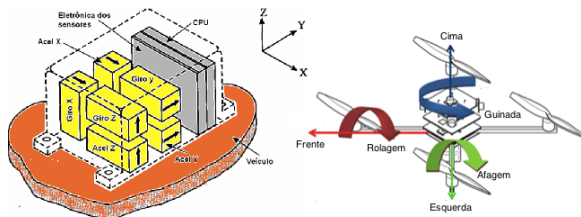
**Figura:** Os movimentos gerados a partir das variações de velocidades dos motores. Fonte [Domingues, 2009]

# Sistemas embarcados para navegação

- Obtenção de informações sobre a posição, velocidade e atitude de um veículo com relação a um dado referencial
- Fornecidas por sensores inerciais: acelerômetros e giroscópios
- Magnetômetros incluídos melhoram a medida da atitude do veículo

# IMU

- Componente eletrônico onde estão montados os sensores.
- Três acelerômetros: aceleração linear ( $x, y, z$ )
- Três giroscópios: velocidade angular ( $\phi, \theta, \psi$ )



**Figura:** Estrutura do Sistema de Navegação acoplada ao veículo (esquerda) e os movimentos gerados no quadricóptero (direita). Fonte [JUNIOR, 2009]



# AHRS

- *Attitude Heading Reference System*
- Mesmos sensores da IMU (com magnetômetro)
- Unidade de processamento para cálculo da velocidade angular e atitude
- Fornece  $(\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \phi \quad \theta \quad \psi)$

# Controle PID I

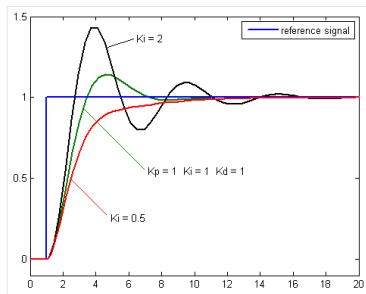
- Método de controle adaptativo comum para controle de robôs
- Controle fechado que reage a mudanças no ambiente captadas por sensores
- Reação a partir do erro medido
- Três parâmetros constantes: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D)

# Controle PID II

- Proporcional (P)
  - É tipicamente o erro.
  - Fórmula:  $A - B$ , onde  $A$  é a posição atual e  $B$  é onde deveria estar
- Integral (I)
  - É o acúmulo dos erros passados no tempo.
  - Fórmula:  $A/t_1 + B/t_2 + C/t_3$ , sendo  $A$  o erro em  $t_1$ ,  $B$  em  $t_2$  e  $C$  em  $t_3$
- Derivativo (D)
  - É a mudança do erro no tempo.
  - Fórmula:  $(A - B)/t$ , sendo  $A$  o erro inicial e  $B$  o erro depois do tempo  $t$

## Controle PID III

- Cada parâmetro tem seu ganho  $K$  associado
- Variável medida =  $P * K_p + I * K_i + D * K_d$



**Figura:** Desempenho do sistema para diferentes ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . Fonte [Kingdom, 2013]

# PID para quadricópteros I

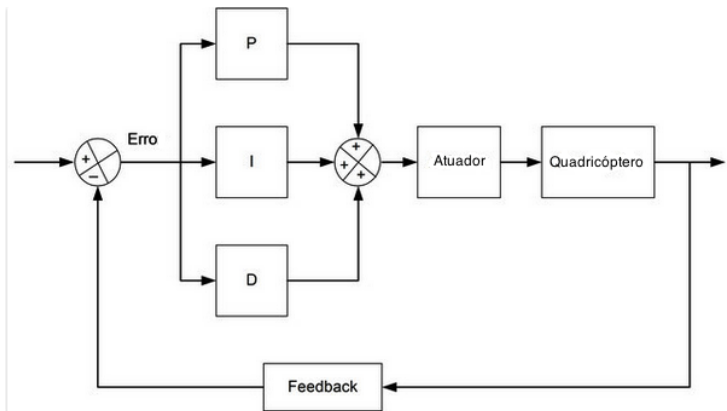


Figura: Controle PID de um quadricóptero. Fonte [Liang, 2014]

# PID para quadricópteros II

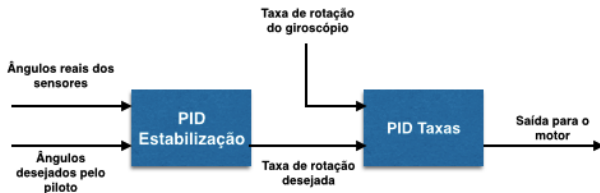


Figura: Controle PID por eixo. Fonte [Liang, 2014]

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero**
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão

# O Problema: Segurança em voo para quadricóptero I

- Auxiliar o controle da plataforma com base na dinâmica, estado atual, controle corrente e distância para obstáculos
- Dinâmica do robô ( $\mathbf{f} \in \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ ):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (1)$$

Dado  $\mathbf{x}(t)$  o estado do robô no tempo  $t$  e  $\mathbf{u}(t)$  o *input* de operação no tempo  $t$ .

- Estado do robô ( $\mathbf{g} \in \mathcal{X} \times \mathcal{U} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{X}$  é a solução da equação diferencial 1):

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

Dado  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$  e  $\mathbf{u}$  a constante de *input* de operação



# O Problema: Segurança em voo para quadricóptero II

- O Problema: Definir a menor variação de controle  $\Delta \mathbf{u} \in \mathcal{U}$  necessária para evitar colisão em  $t \in [0, \tau]$ , onde  $\tau$  é um horizonte de tempo já definido:

$$\begin{aligned} \min: & \Delta \mathbf{u} \\ \text{Sujeito a: } & \forall t \in [0, \tau], \mathcal{R}(\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}, t)) \cap \mathcal{O} = \emptyset \end{aligned} \quad (3)$$

Dado  $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^3$ , a subárea do espaço  $\mathbb{R}^n$  ocupadas por obstáculos escondidas quando vistas pelo robô e  $\mathcal{R}(x)$ , a subárea ocupada pelo robô no estado  $x \in \mathcal{X}$

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia**
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão

# Metodologia I

- Divisão em etapas

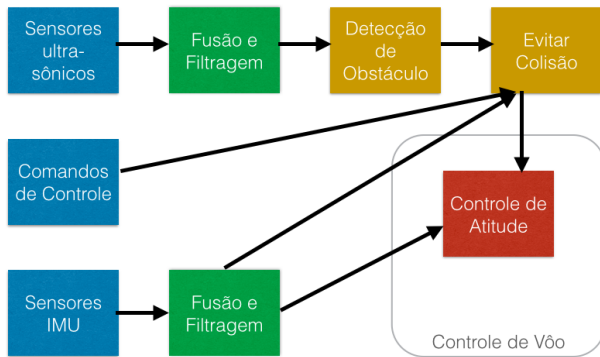


Figura: Etapas do método

# Metodologia II

## • Evitar colisão

- Dados da AHRS:  $d_t = [\dot{x}_t \ \dot{y}_t \ \dot{z}_t \ \phi_t \ \theta_t \ \psi_t]^T$
- Dados do Controle:  $u_t = [\delta\phi_t \ \delta\theta_t \ \delta\psi_t \ \delta h_t]^T$
- Estimação da trajetória futura (Integração Numérica em  $t$ )
- Espaço de estados com  $\Delta t$  pequeno. Fonte [Basit et al., 2014]

$$\begin{aligned}
 x_{t+1} &= x_t + (\dot{x}_t \cos \psi_t - \dot{y}_t \sin \psi_t) \Delta t \\
 y_{t+1} &= y_t + (\dot{x}_t \sin \psi_t + \dot{y}_t \cos \psi_t) \Delta t \\
 z_{t+1} &= z_t + \delta h_t \\
 \phi_{t+1} &= \phi_t + \delta\phi_t \\
 \theta_{t+1} &= \theta_t + \delta\theta_t \\
 \psi_{t+1} &= \psi_t + \delta\psi_t \\
 \dot{x}_{t+1} &= \mathbf{C}_1 \phi_t \\
 \dot{y}_{t+1} &= \mathbf{C}_2 \theta_t
 \end{aligned} \tag{4}$$

# Metodologia III

- Evitar colisão (cont.)
  - Identificar rota em choque e desviar
  - Utilização das distâncias medidas para os obstáculos
  - Método da Janela dinâmica [Saranrittichai et al., 2013]
  - Determinar  $\Delta \mathbf{u}$  possíveis e seguros no espaço de estados  $\mathcal{U}$  em  $t \in [0, \tau]$
  - Otimização:  $\min \Delta \mathbf{u}$

# Metodologia IV

- Componentes necessários
  - Plataforma de voo (quadricóptero) com interface de comunicação e SDK código aberto
  - Sensores ultrassônicos
  - *Computer on module* para embarque na plataforma: Raspberry PI
- Software necessário
  - Matlab com pacote Simulink
  - Kit de desenvolvimento para quadricópteros do Matlab Simulink
  - Raspberry Pi Support from MATLAB

# Metodologia V

- Estratégia de implementação

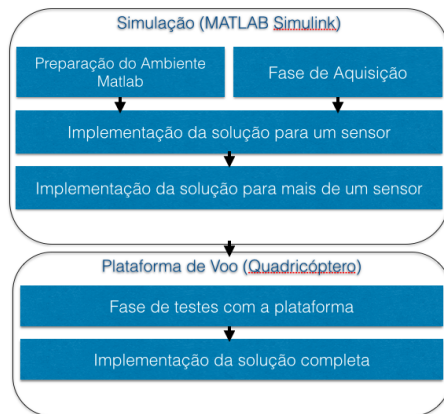


Figura: Estratégia de implementação

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma**
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão



# Cronograma

Fase	jan/15	fev/15	mar/15	abr/15	mai/15	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15	jan/16	fev/16
Revisão Bibliográfica	Realizado	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto
Submissão para conferência internacional: ICRA 2016										Previsto				
Submissão para conferência internacional: SSIV 2015			Previsto											
Submissão para conferência nacional: SBAI 2015						Previsto								
Submissão para periódico IEEE												Previsto		
Redação da Dissertação		Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Fase de simulação				Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Fase de testes com a plataforma							Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Ensaio em voo									Previsto	Previsto	Previsto	Previsto		
Defesa da Dissertação														Previsto

Legenda    Previsto    Realizado    Não Realizado

Figura: Cronograma físico.

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta**
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão

# Viabilidade da proposta

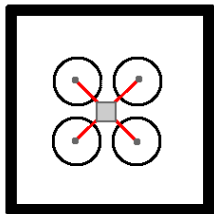
- Quatro quadricópteros com 45cm de diâmetro
- Dois Raspberry PI modelo B com processador de 700MHz, 512MB de memória
- Sensores ultrassônicos
- Matlab R2013a com Simulink

# Sumário

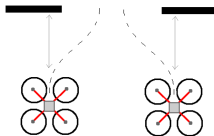
- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados**
- 9 Conclusão

## Resultados esperados

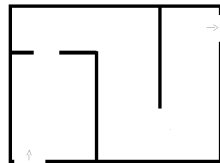
- Foram elaboradas três missões



**Figura:** Missão 1.  
Veículo cercado e estabilizado



**Figura:** Missão 2:  
Veículo em  
movimento com  
obstáculo a frente.  
Desvio pelos lados



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

# Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Introdução
- 3 Tópicos tutorias
- 4 O Problema: Segurança em voo para quadricóptero
- 5 Metodologia
- 6 Cronograma
- 7 Viabilidade da proposta
- 8 Resultados esperados
- 9 Conclusão**

# Conclusão

- Um tema importante e recorrente para estudo do domínio de controle em *Cyber-Physical Systems*(CPS)
- Inúmeras aplicações na área de defesa
- Construção do módulo de desvio de obstáculos da plataforma VANT-IME

# Referências I



Basit, A., Qureshi, W. S., Dailey, M. N., and Krajník, T. (2014).  
Joint localization of pursuit quadcopters and target using monocular cues.  
*Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pages 1–18.



Domingues, J. M. B. (2009).  
Quadrotor prototype.  
*Universidade Tecnica de Lisboa. Dissertacio.*



Figueiredo, L. C. and Jota, F. G. (2004).  
Introdução ao controle de sistemas não-holonômicos.  
*Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, 15(3):243–268.



JUNIOR, J. A. F. (2009).  
Simulação e implementação em tempo real de sistemas de navegação inercial integrados ins/gps.  
Master's thesis, IME.



## Referências II



Kingdom, R. (2013).

Pid controller tutorial for robots.



Liang, O. (2014).

Quadcopter pid explained and tuning.



Mian, A. A. and Daobo, W. (2008).

Modeling and backstepping-based nonlinear control strategy for a 6 dof quadrotor helicopter.

*Chinese Journal of Aeronautics*, 21(3):261–268.



multicopter.forestblue.nl (2012).

Quadcopter (x-mode build log).



Salih, A. L., Moghavvemi, M., Mohamed, H. A., and Gaeid, K. S. (2010).

Flight pid controller design for a uav quadrotor.

*Scientific Research and Essays*, 5(23):3660–3667.

## Referências III



Saranrittichai, P., Niparnan, N., and Sudsang, A. (2013).

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.



Stephane, Nicolas Brulez, F. D. (2014).

*AR.Drone Developer Guide*.

# Obrigado

bsgiovanini@gmail.com

