



IEEE RAS Day



Embarcações e Veículos Aéreos Não Tripulados

José Paulo Vilela Soares da Cunha

Professor Associado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica (PEL)
Faculdade de Engenharia (FEN)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Rio de Janeiro, 30 de outubro de 2020

Financiamento: FAPERJ, CNPq e CAPES

Organização



- Partes:
 - I Embarcações de Superfície Não Tripuladas
 - II Modelagem da Dinâmica e Controle de Embarcações de Superfície Não Tripuladas
 - III Controle de Veículos Aéreos Não Tripulados

Parte I: Embarcações de Superfície Não Tripuladas

Introdução: Embarcações de Superfície Não Tripuladas



- *Unmanned surface vessels/vehicles* – USVs:
 - Teleoperadas;
 - Autônomas (*autonomous surface vessels* – ASVs).

Introdução: Aplicações de USVs



- Estudos oceanográficos, fluviais e atmosféricos;
- Busca submarina e de superfície com câmeras e sonares (ex.: caça minas);
- Retirada de poluentes (ex.: óleo);
- Inspeção de navios;
- Apoio a operações com veículos submarinos autônomos (AUVs) e outros USVs;
- Repetidor de comunicação;
- Vigilância ...

Introdução: Motivações para USVs



- Fornecem vasta gama de informações e monitoração.
- Equipamento de baixo custo para medições ambientais precisas *in-loco* de longa duração.
- Evitar presença humana em locais perigosos ou poluídos.
- Plataforma flexível com boas perspectivas de aplicação.
- Operação menos onerosa do que navios tripulados.
- Mais simples e menos onerosos que veículos submarinos.
- Alternativa móvel a bóias fixas.
- Alternativa manobrável a bóias livres.

Características de USVs

- Propulsão:
 - Motores elétricos;
 - Motores à combustão interna;
 - Velas.
- Fontes de Energia:
 - Baterias;
 - Painéis fotovoltaicos;
 - Combustíveis;
 - Ventos e correntes marinhas.
- Comunicação:
 - Rádio;
 - *Wi-Fi*;
 - *Internet* 4G,
 - Satélite ...

Exemplos de USVs

- OASIS, NOAA



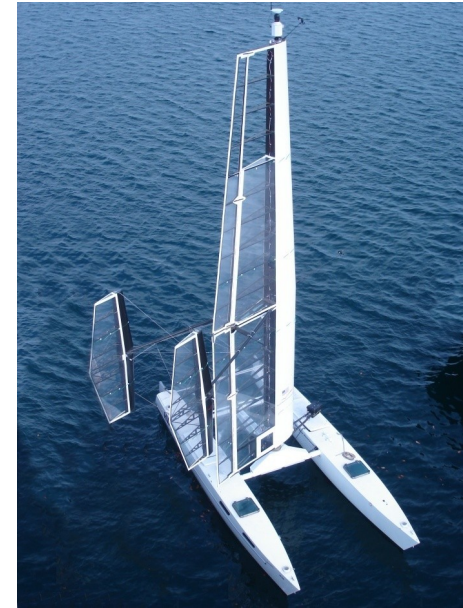
- Scout ASC, MIT



Exemplos de USVs



- HWT X-1, Stanford University



- UMV, YAMAHA Motor Co.



Exemplos de USVs

- *Autonomous Self-Mooring Vehicle (ASMV), Florida Institute of Technology*



- *AOS USV, Atmospheric Observing Systems, Inc.*



Exemplos de USVs

- C-Worker 8 – ASV



- C-Sweep – ASV





Embarcações Não Tripuladas para Monitoração Ambiental e Defesa

- Projeto desenvolvido na FEN/UERJ;
- Cooperação com UFRJ e UEZO.
- Financiamento:
 - Edital nº 25/2010: Apoio a Núcleos Emergentes de Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro – 2010 – PRONEM;
 - Parceria CNPq/FAPERJ.



Objetivos deste Projeto

- Desenvolver USVs:
 - Pequeno porte,
 - Baixo custo,
 - Autônomos ou teleoperados.
- Aquisição de dados ambientais e meteorológicos.
- Promover trabalhos multidisciplinares:
 - Controle de embarcações;
 - Propulsão elétrica;
 - Energia solar;
 - Comunicação e sensores sem fios;
 - Autonomia.

1º USV Desenvolvido

- Monocasco (Schultze, 2012)



Arquitetura do 1º USV

- Comunicação, instrumentação e controle centralizados num *netbook*.
- Unidade de comando em terra: *laptop*.
- Sistema operacional Linux.
- Comunicação *Wi-Fi*.
- *Dois motores de popa elétricos* fixos.
- Alimentação: bateria 12V x 115Ah para barco.

Propulsão do 1º USV

- 2 motores de popa elétricos fixos;
- Propulsor transversal opcional para posicionamento dinâmico.
- Motores acionados por Arduino e relés:
 - 2 velocidades diretas e
 - 2 reversas.



Teste do 1º USV



30/10/2020

2º USV em Desenvolvimento

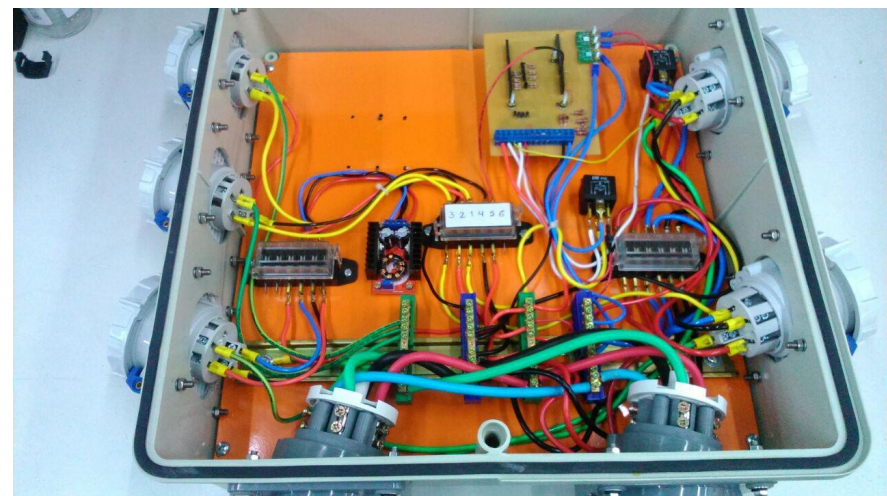


- Catamarã



Arquitetura do 2º USV

- Para ampliar autonomia energética:
 - Baterias recarregadas por painéis fotovoltaicos (Falcão, 2018);
 - Auto-ancoragem para economizar propulsão.



Arquitetura do 2º USV

- Comunicação por roteadores *Wi-Fi* de longo alcance (Pinto e Mok, 2015).
- Caixa da eletrônica (Chaves Filho, 2016):



Propulsão do 2º USV

- 2 motores de popa elétricos fixos;
- 2 propulsores transversais opcionais para posicionamento dinâmico.
- Acionamento dos motores (Souza, 2016):
 - Eletrônica de potência;
 - Controle de velocidade de rotação (tensão);
 - Controle de empuxo (corrente);
 - Sensores de tensões, correntes e temperatura;
 - Comunicação *ZigBee* ou *Wi-Fi*;
 - Cabos apenas para energia.



Sensores do 2º USV

- GPS integrado a navegador inercial;
- Câmera de vídeo *IP* com *pan*, *tilt*, *zoom* e foco comandados remotamente;
- Dotado de redes de sensores sem fios:
 - *ZigBee*;
 - *Wi-Fi*.

Parte II: Modelagem da Dinâmica e Controle de Embarcações de Superfície Não Tripuladas

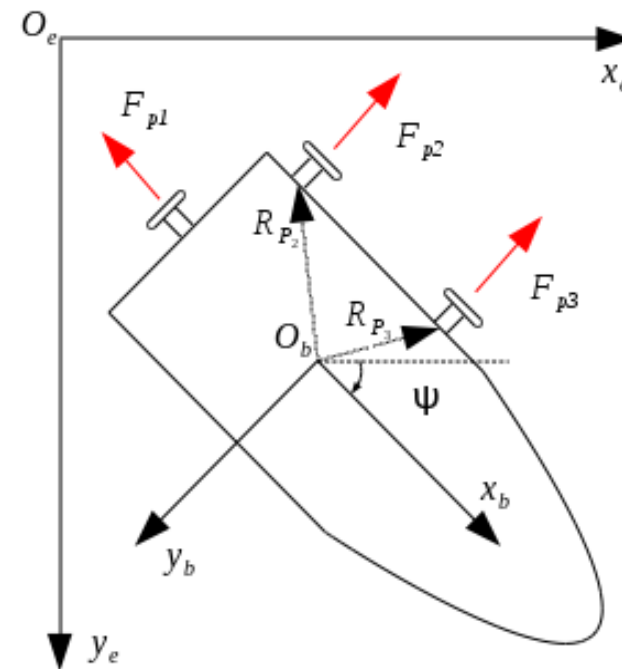


Resposta Dinâmica de USVs

- Parâmetros (Fossen, 2011; Rosario, 2017):
 - Massa, momentos de inércia e massas adicionais;
 - Centros: flutuação, massa e arraste;
 - Coeficientes de arraste;
 - Disposição e características dos propulsores.
- Perturbações:
 - Correnteza;
 - Ondas;
 - Vento;
 - Efeitos de equipamentos extra.

Sistema de Propulsão

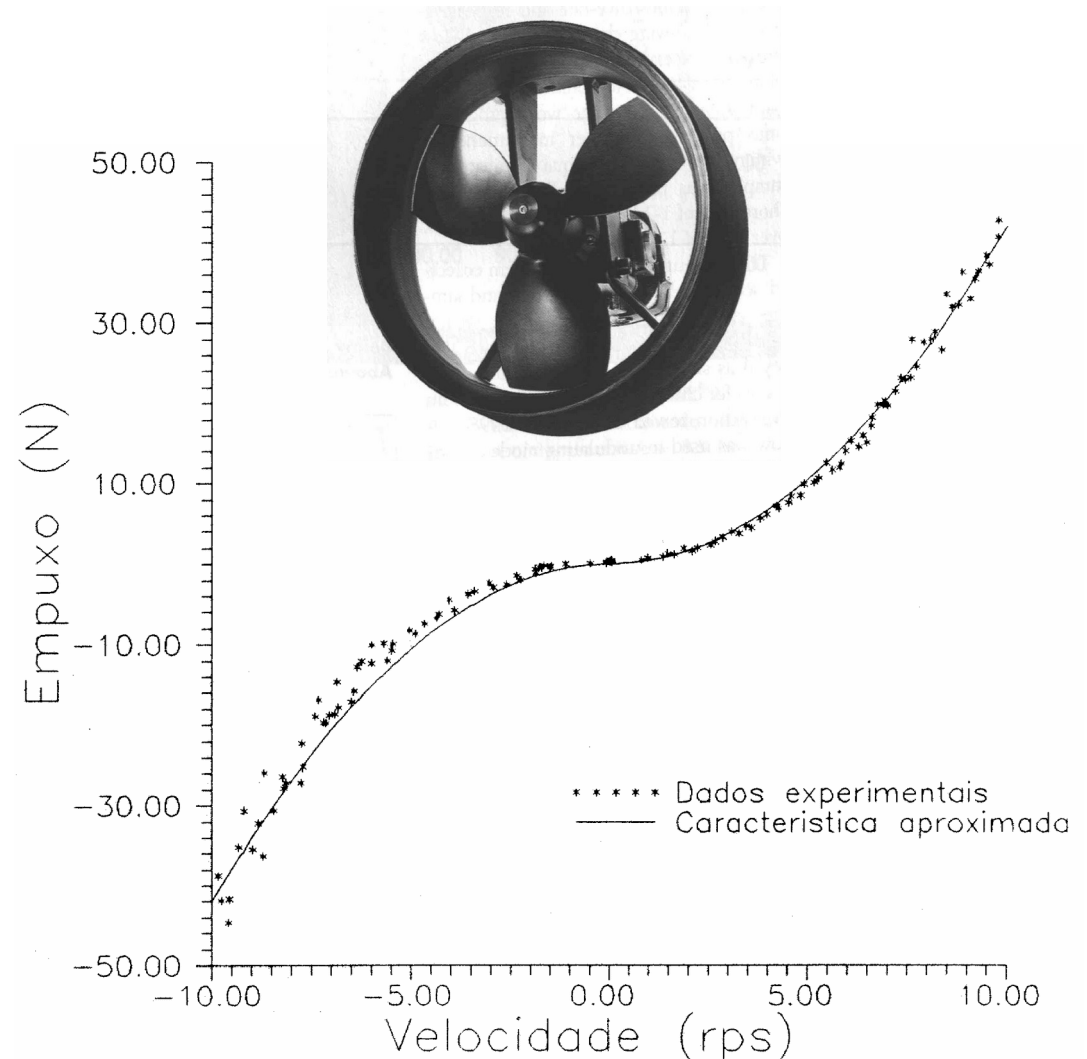
- Alternativas para comando:
 - Propulsores orientáveis (ex.: motores de popa);
 - Lemes;
 - Composição de forças:



Propulsores

- Hélice + motor
- Empuxo do hélice (Hsu *et alli*, 2000):

$$F_p = \alpha n_p |n_p|$$



Identificação de Parâmetros da Dinâmica do 1º USV



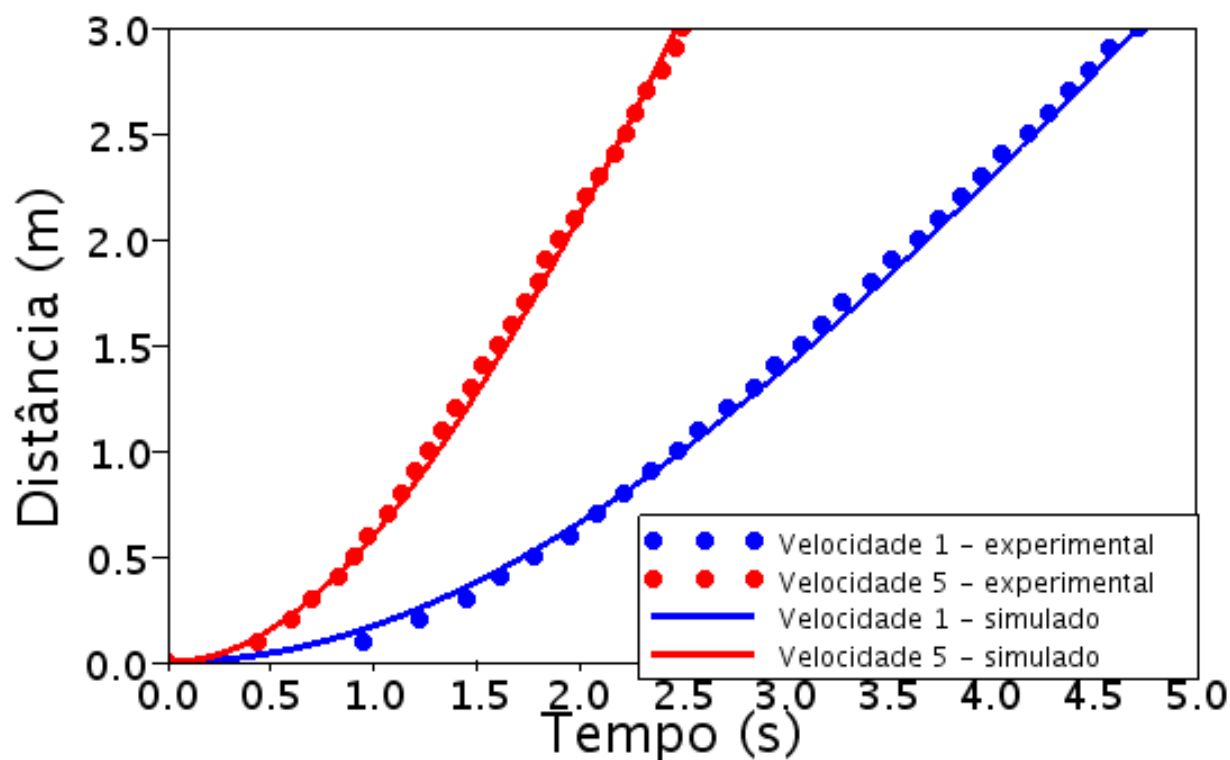
- Teste do movimento em um grau de liberdade:



Identificação de Parâmetros da Dinâmica do 1º USV

- Modelo dinâmico de um grau de liberdade:

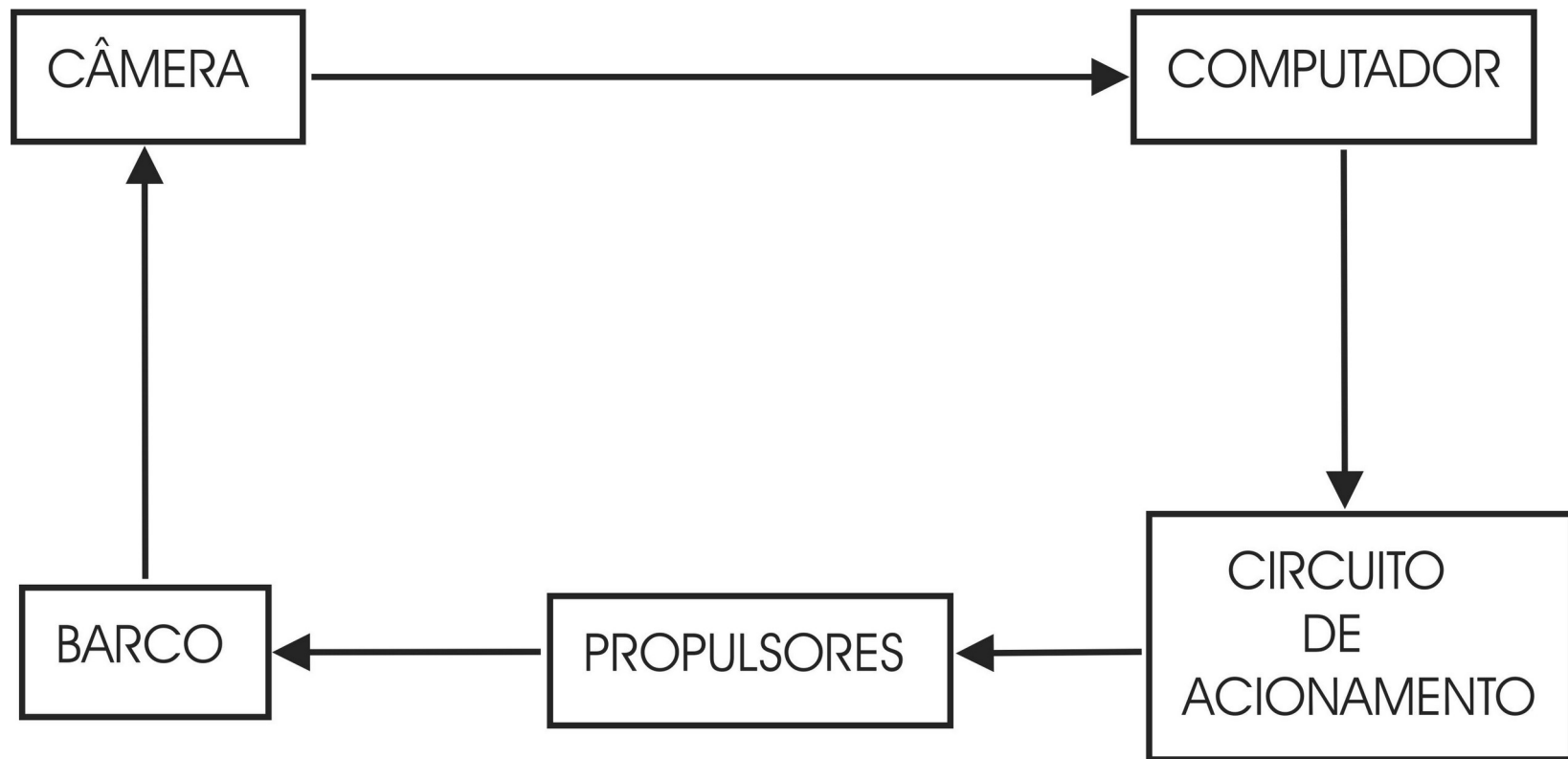
$$\ddot{x} = \frac{1}{m_x} (F_{px} - C_{dx} \dot{x} |\dot{x}|)$$



Posicionamento Dinâmico para USV



- Sistema de Amaral (2008) e Sokal (2010):



Posicionamento Dinâmico para USV

- Vista geral:

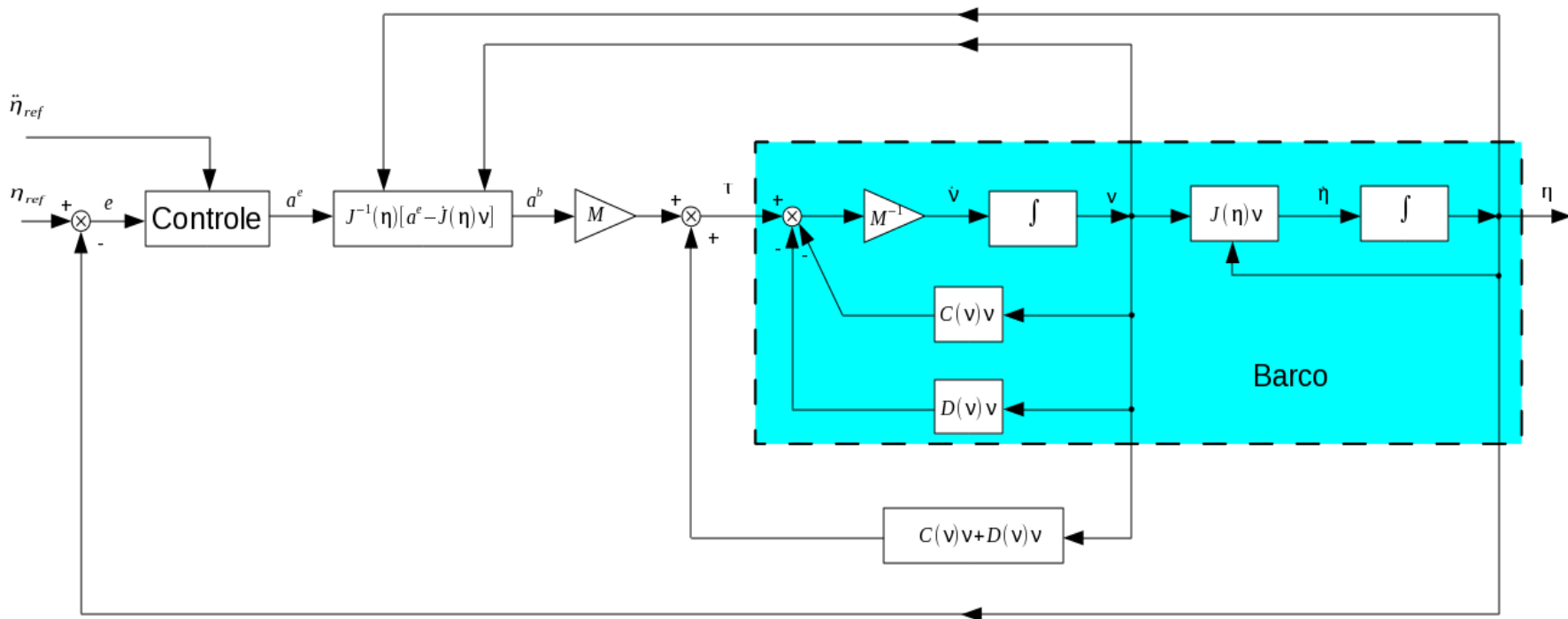


Desempenho do Posicionamento Dinâmico



Rastreamento de Trajetória para USV

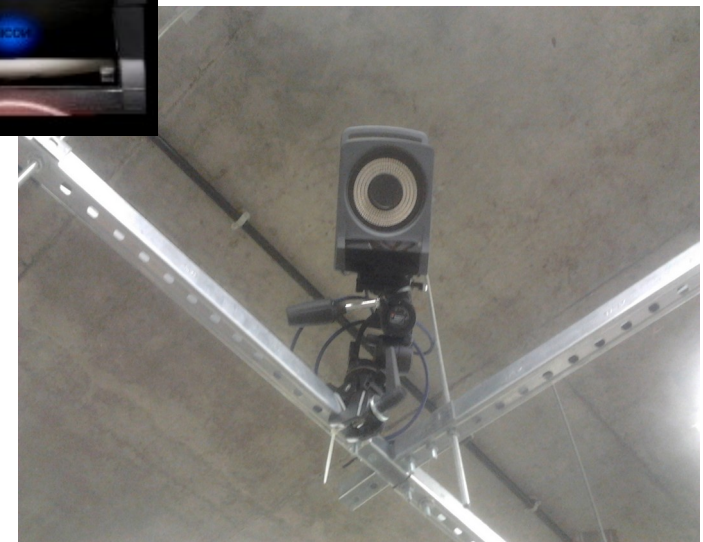
- Estratégia (Rosario e Cunha, 2017):
 - Linearização por realimentação e
 - Controle a estrutura variável – VSC.



Sistema Visual de Captura de Movimento



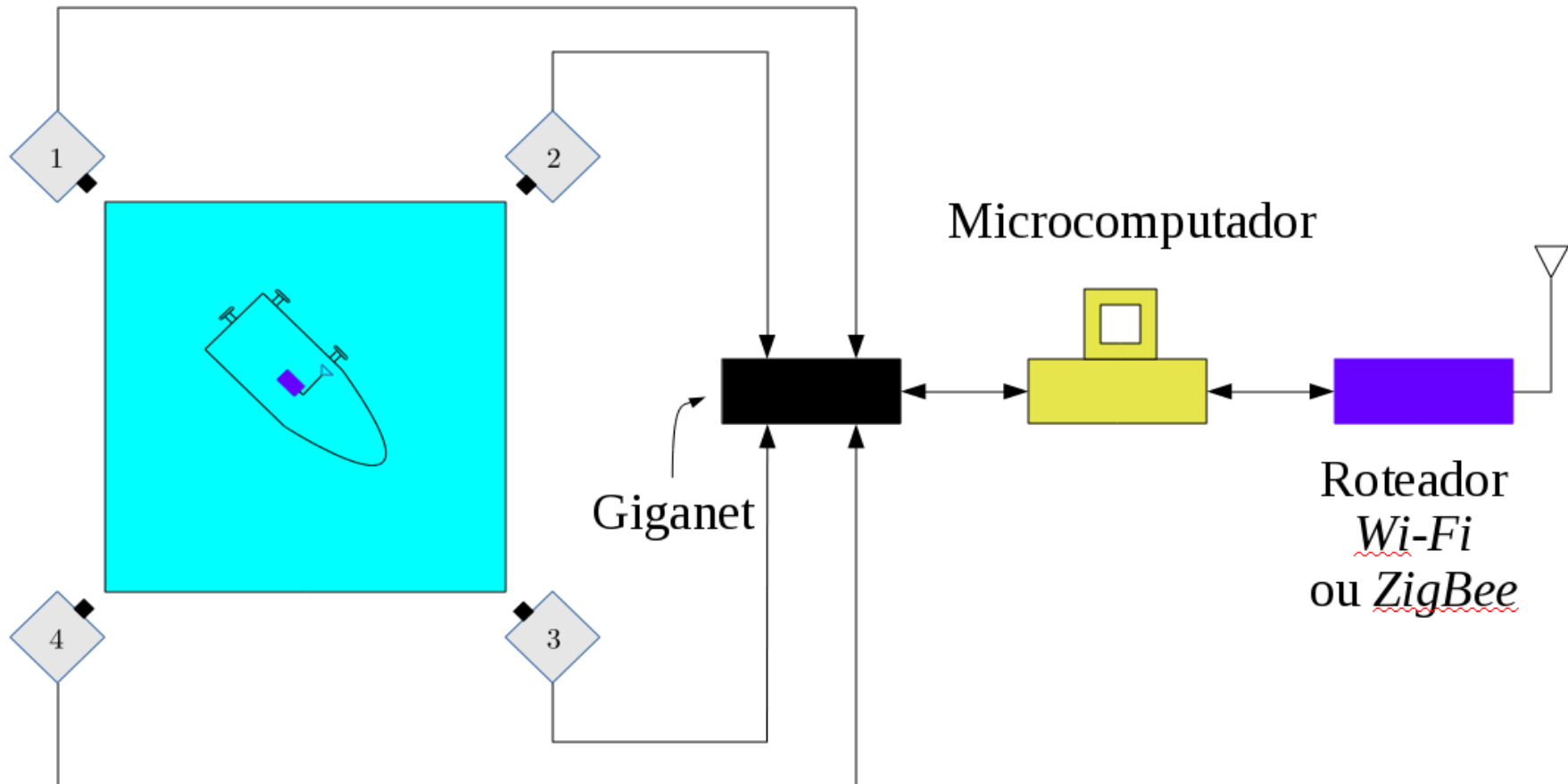
- 4 câmeras T10S – 1 *megapixel*;
- 3 câmeras V5 – 5 *megapixel*;
- *LEDs estroboscópicos quase infravermelhos*;
- Alvos: esferas refletoras fixadas nos veículos;
- *Software Vicon Tracker*:
 - Mede posição, orientação e velocidade 3D;
 - Amostragem até 1 kHz;
 - Precisão melhor que 1 mm.



Sistema para Teste de Controladores



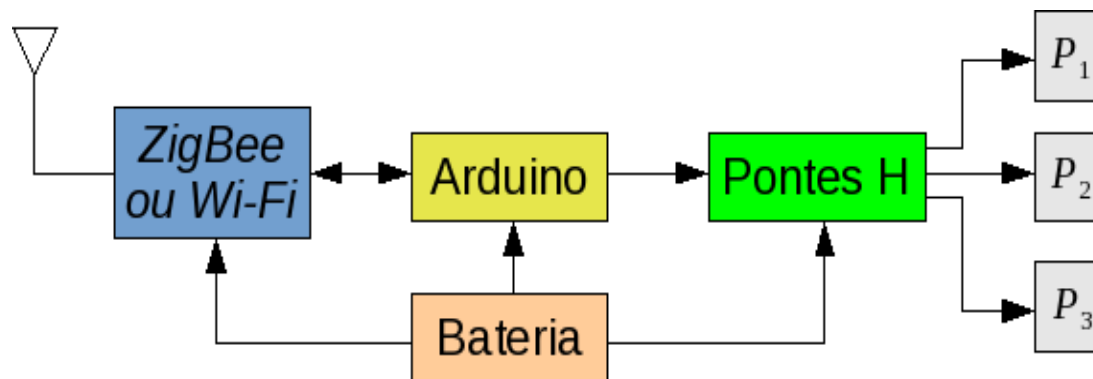
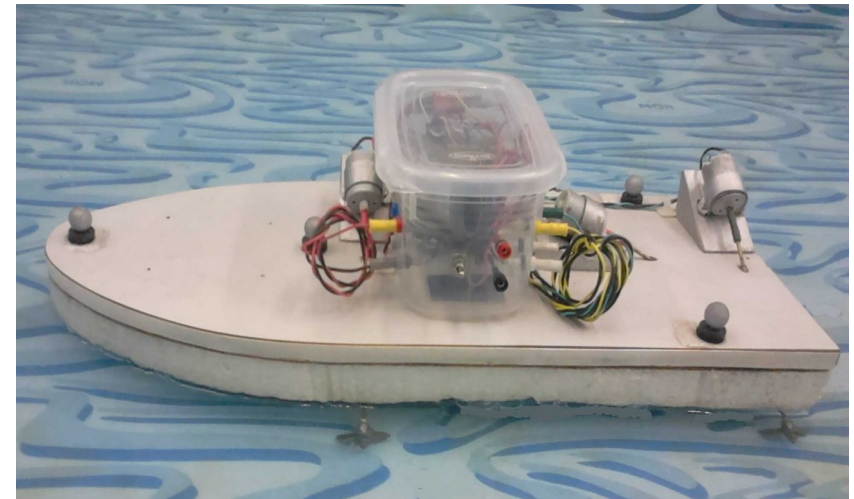
- Diagrama geral:



Barco para Teste de Controladores



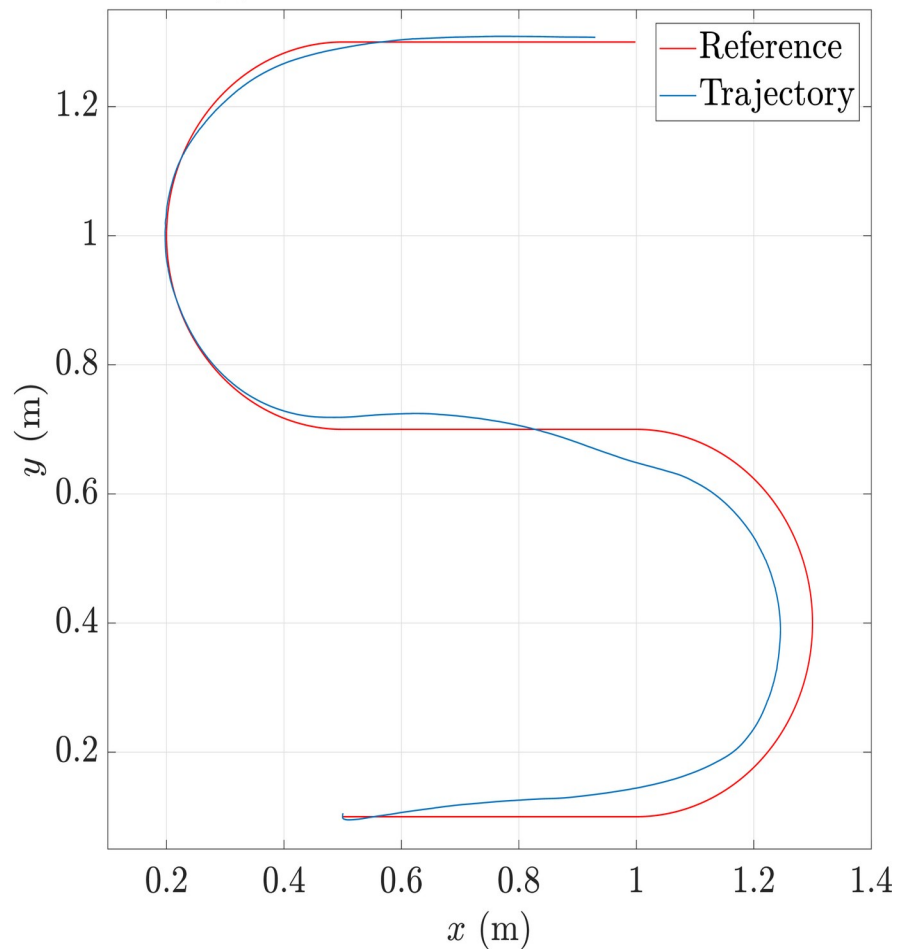
- Velocidade máxima: 0,26 m/s;
- Comprimento: 0,48 m;
- Massa: 1,3 kg;
- Três propulsores.



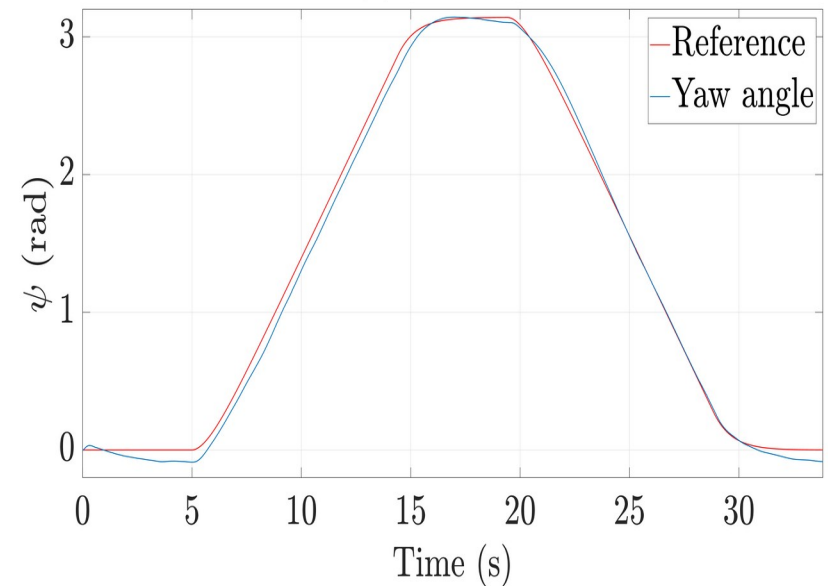
Rastreamento de Trajetória com Controle PD



(a) Trajectory in the horizontal plane



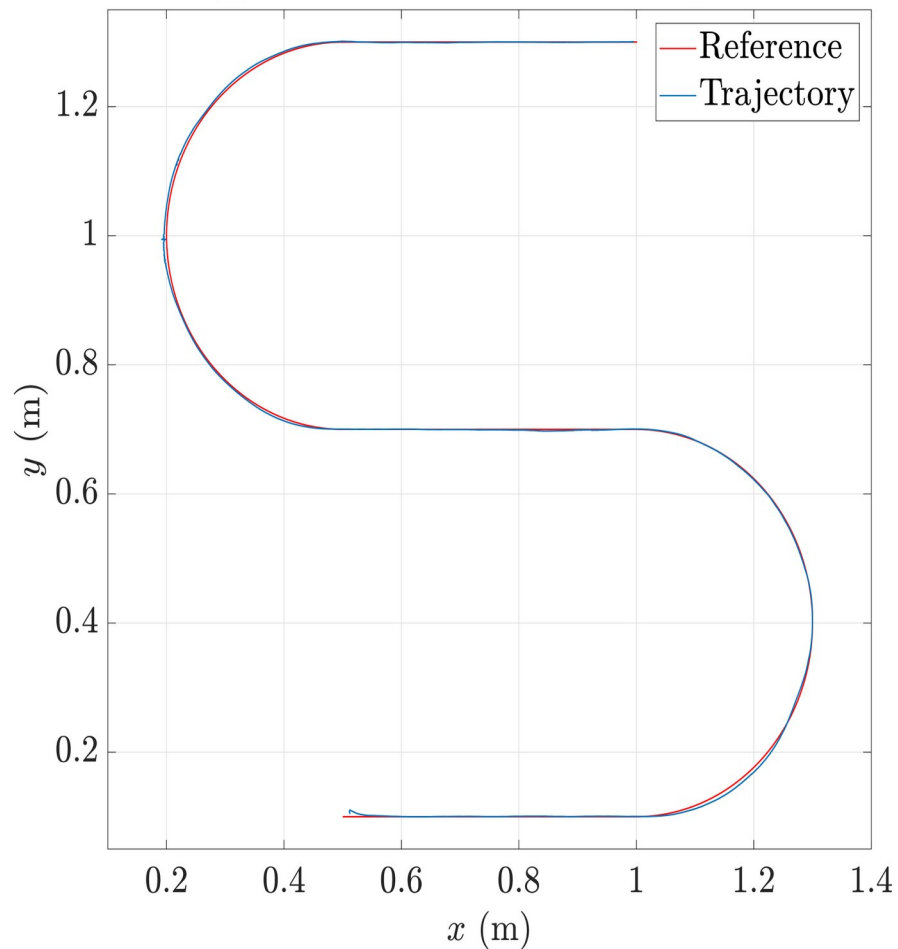
(b) Yaw angle



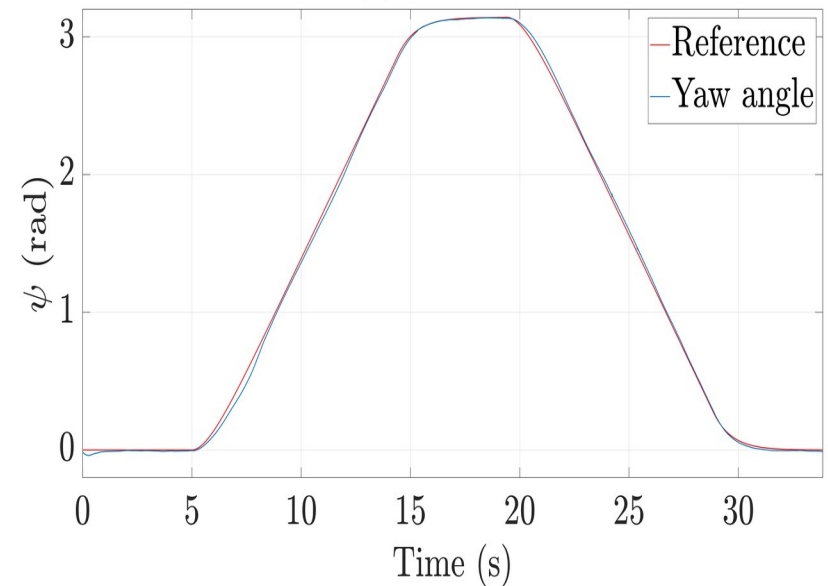
Rastreamento de Trajetória com VSC



(a) Trajectory in the horizontal plane



(b) Yaw angle



Rastreamento de Trajetória



Barco Seguindo Alvo



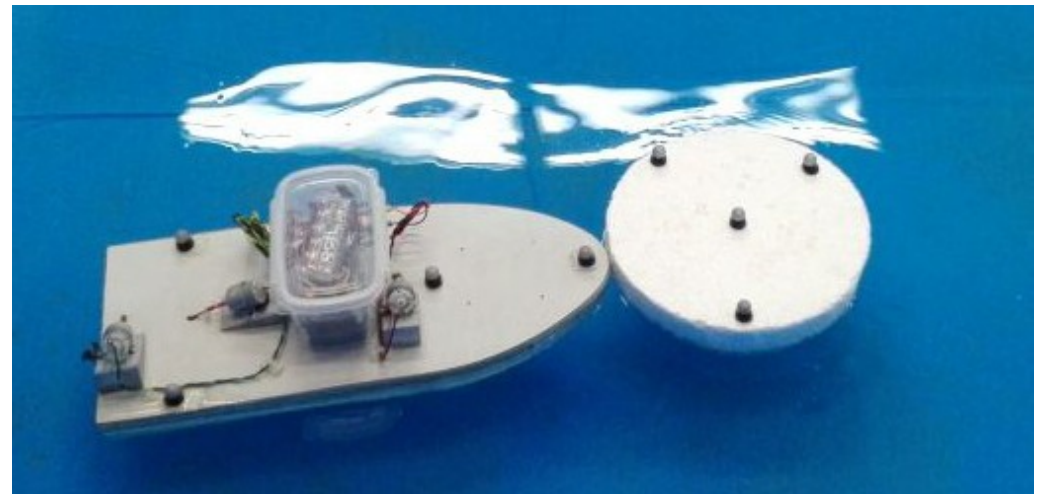
- Controle PD realizado a bordo pelo Arduino (Lemos e Silva, 2019).



Barco Empurrando Carga Flutuante



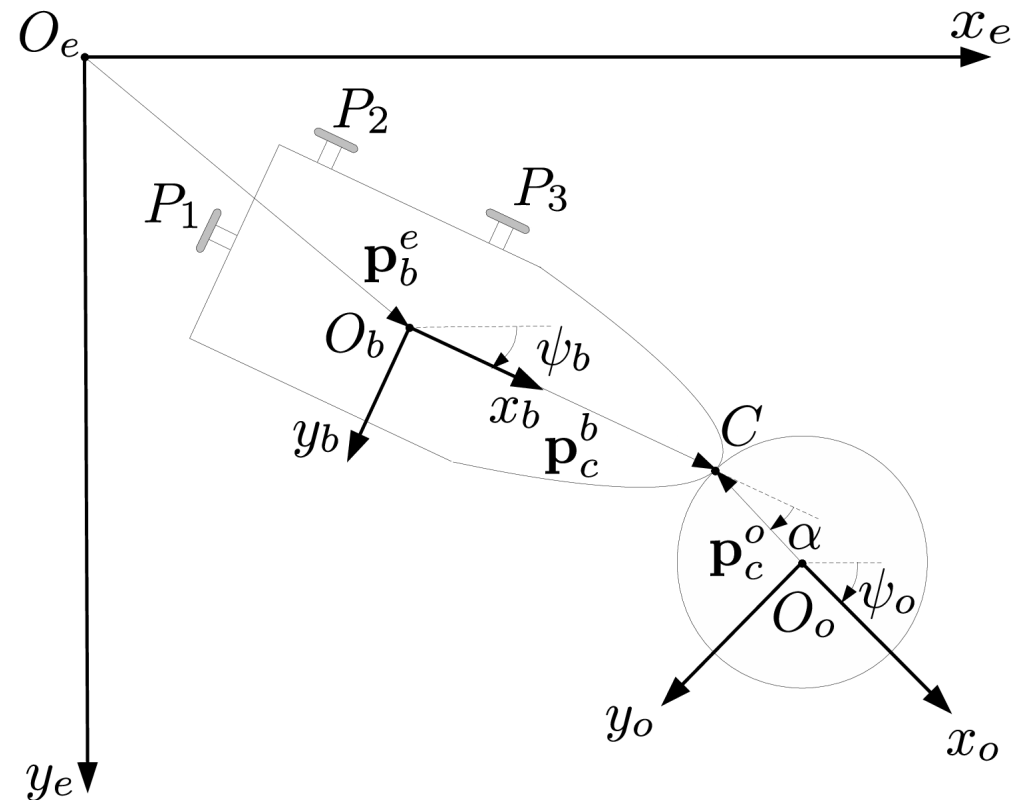
- Aplicações:
 - Mover cargas flutuantes;
 - Mover barcos enguiçados;
 - Atracar barcos.
- Empurrar dispensa amarras.



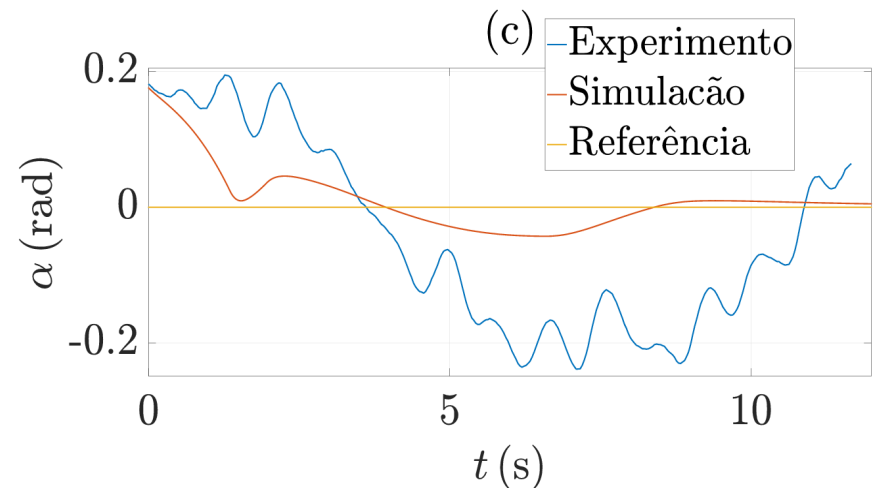
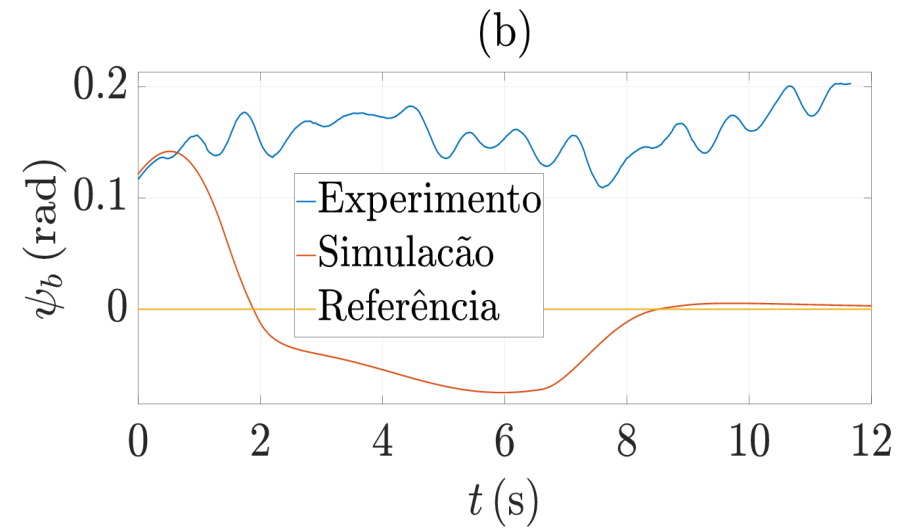
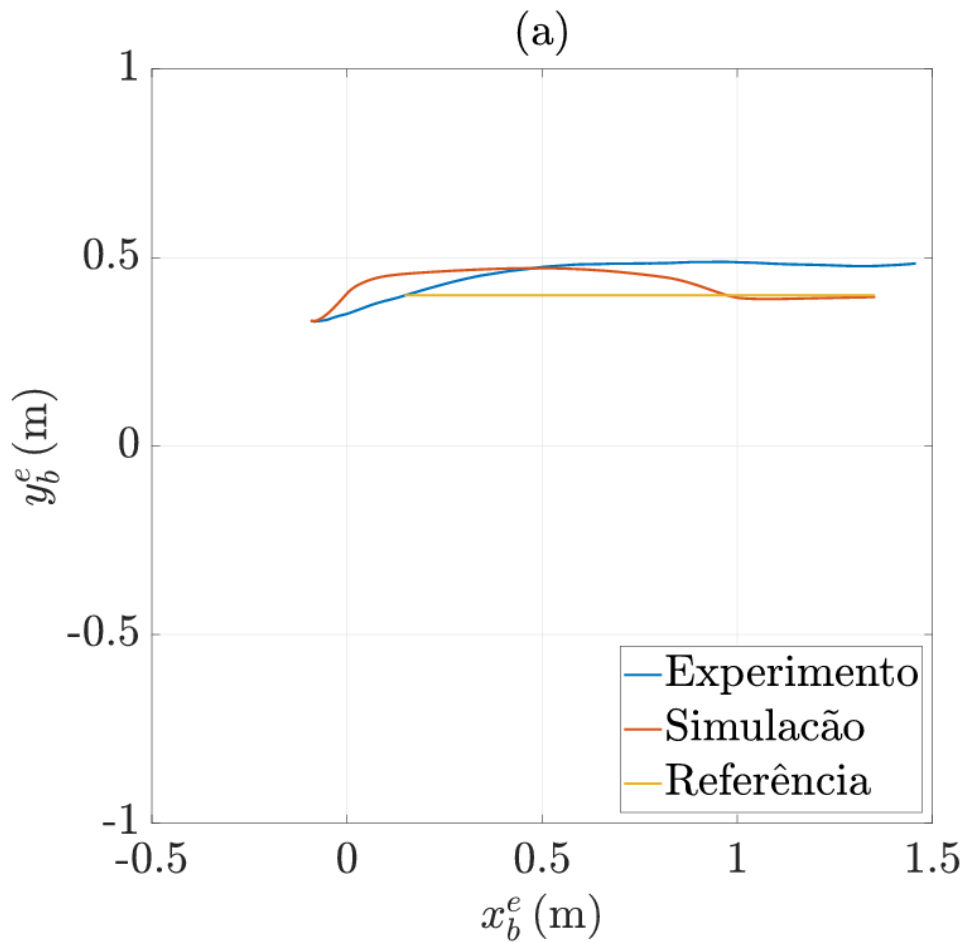
Barco Empurrando Carga Flutuante



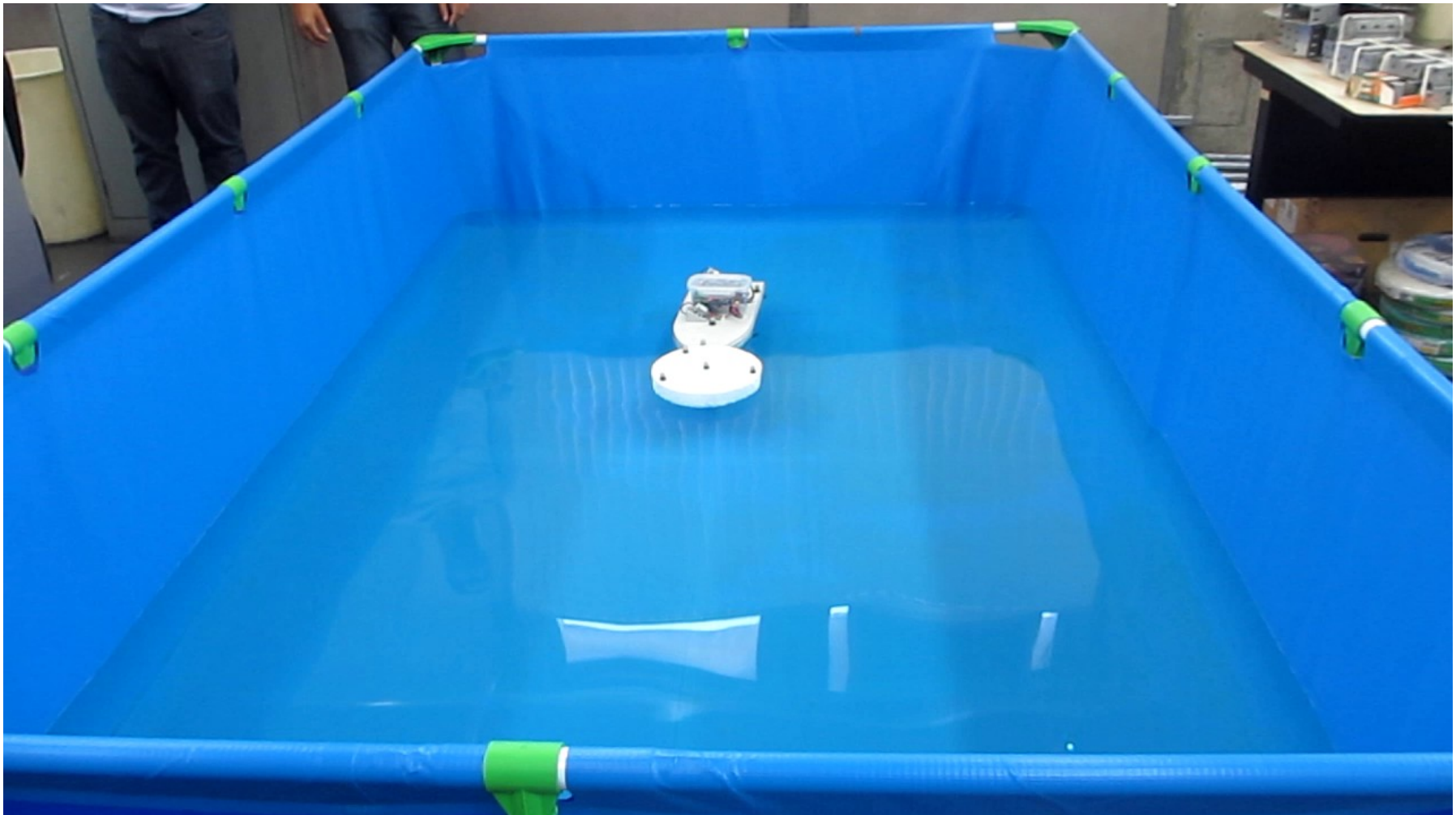
- Dificuldades:
 - Sistema subatuado:
3 propulsores x 4 graus de liberdade;
 - Dinâmica instável;
 - Perturbações.
- Solução (Rosario *et alli*, 2020):
 - Linearização parcial por realimentação;
 - Controle a estrutura variável.



Barco Empurrando Carga Flutuante



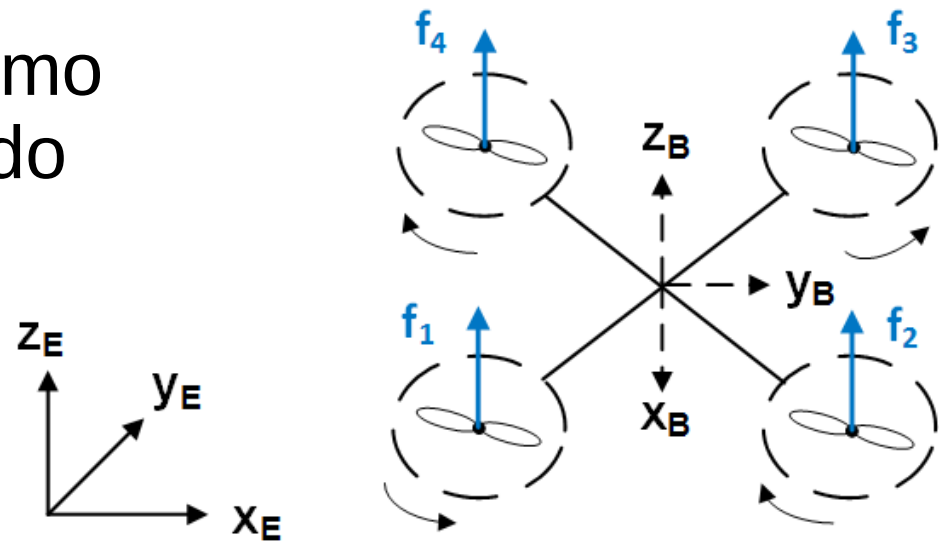
Barco Empurrando Carga Flutuante



Parte III: Controle de Veículos Aéreos Não Tripulados

Modelagem da Dinâmica de um Quadrrrotor

- Sistemas de coordenadas (Gomes e Leal, 2014; Gomes et alli, 2016):
 - Referencial fixo do sistema Vicon;
 - Referencial móvel, próximo do centro de gravidade do quadrrrotor.

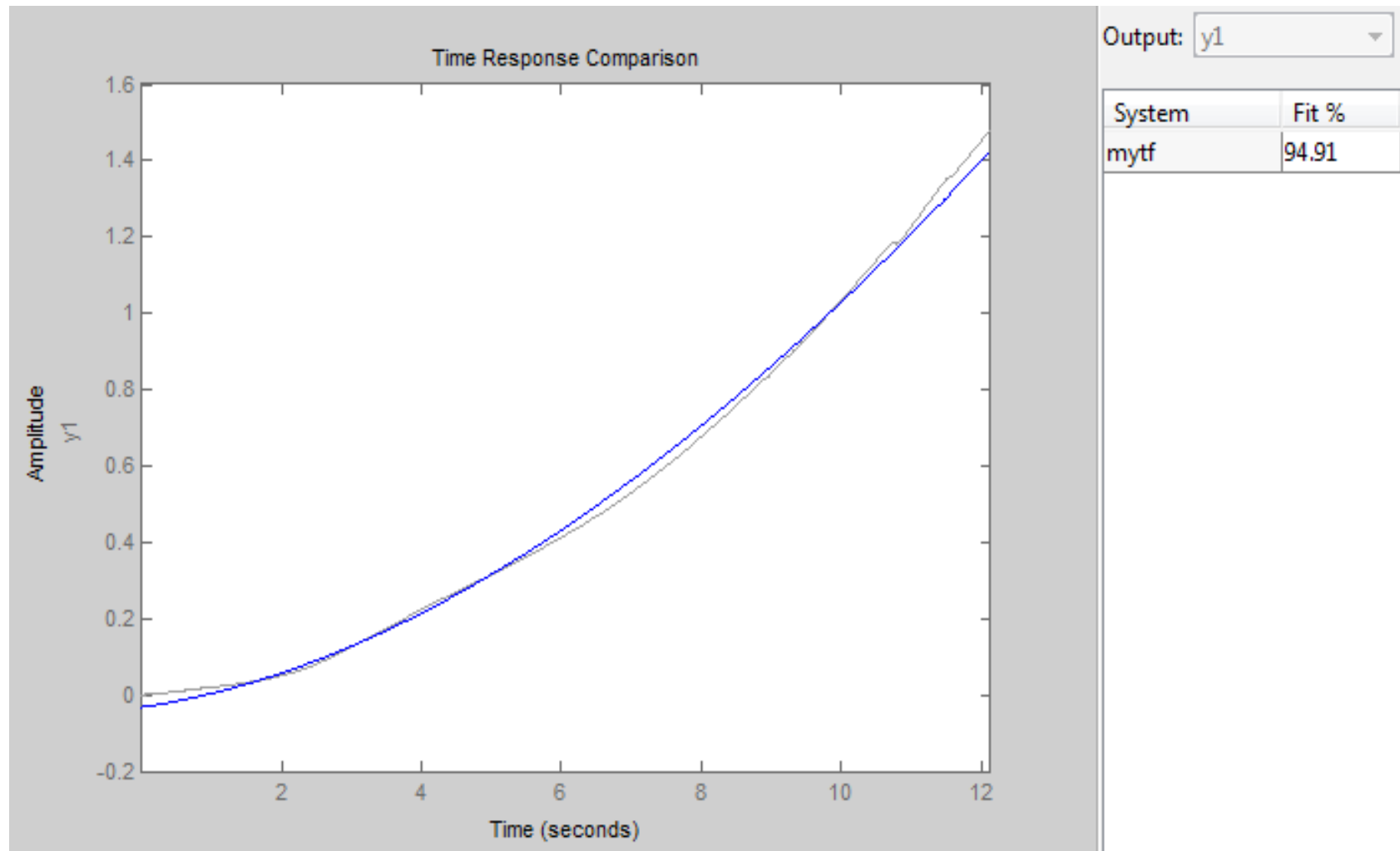


Modelagem da Dinâmica de um Quadrrrotor

- Em vez de modelagem física, usou-se modelagem por identificação entrada/saída:
 - Entradas: comandos dos motores;
 - Saídas: coordenadas de posição.
- Inclui o controle interno do quadrrrotor.
- Função de transferência:

$$H(s) = 2 \frac{s+1}{s(s+0,05)}$$

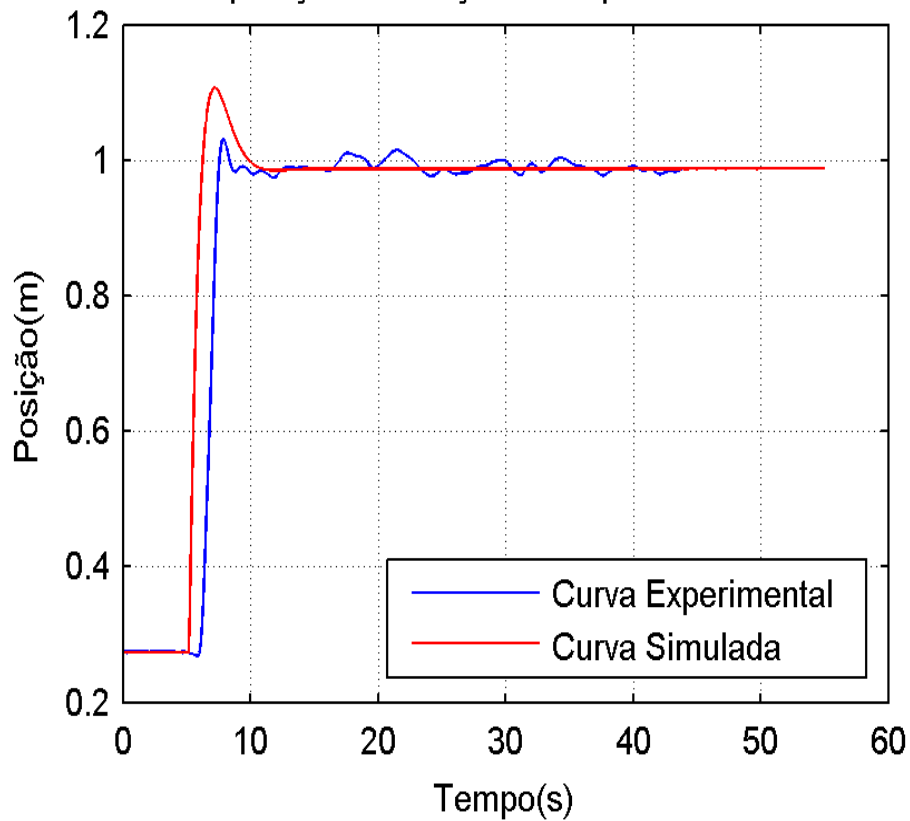
Modelagem da Dinâmica de um Quadrrrotor



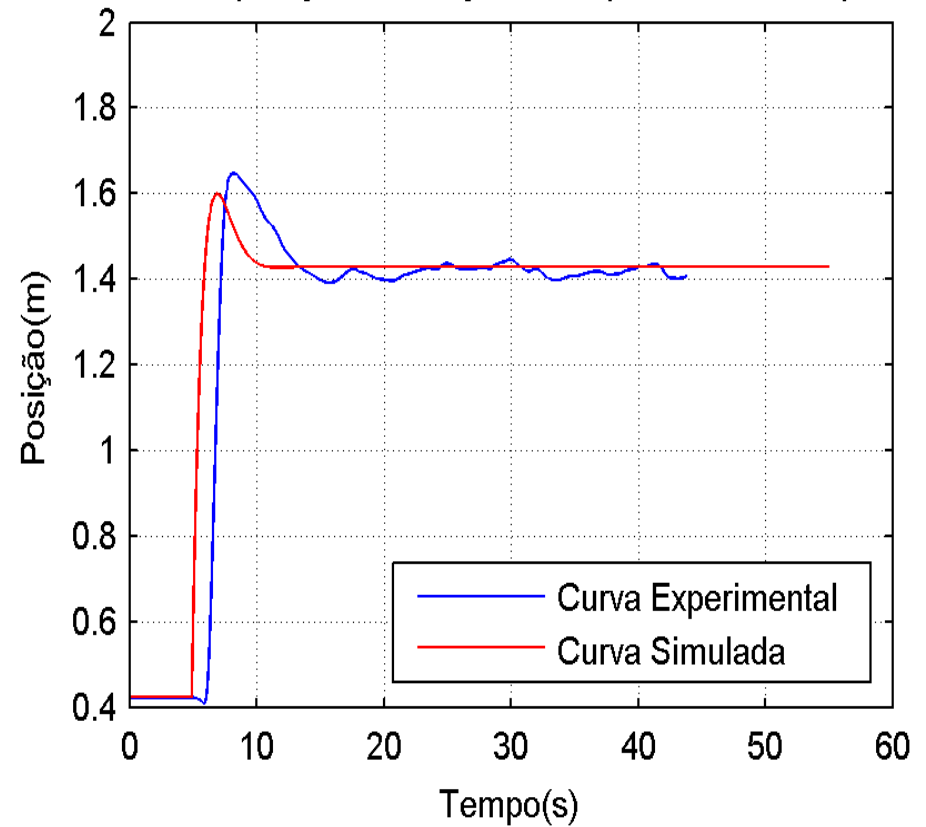
Controle PD de um Quadrirrotor



Comparação Simulação vs. Experimento- Eixo x

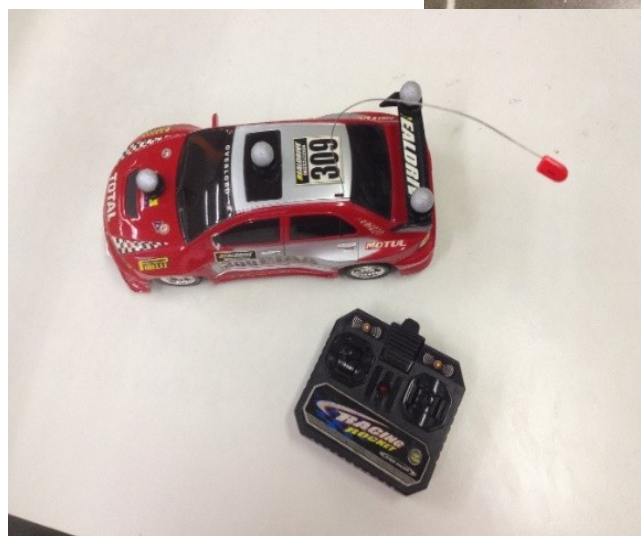
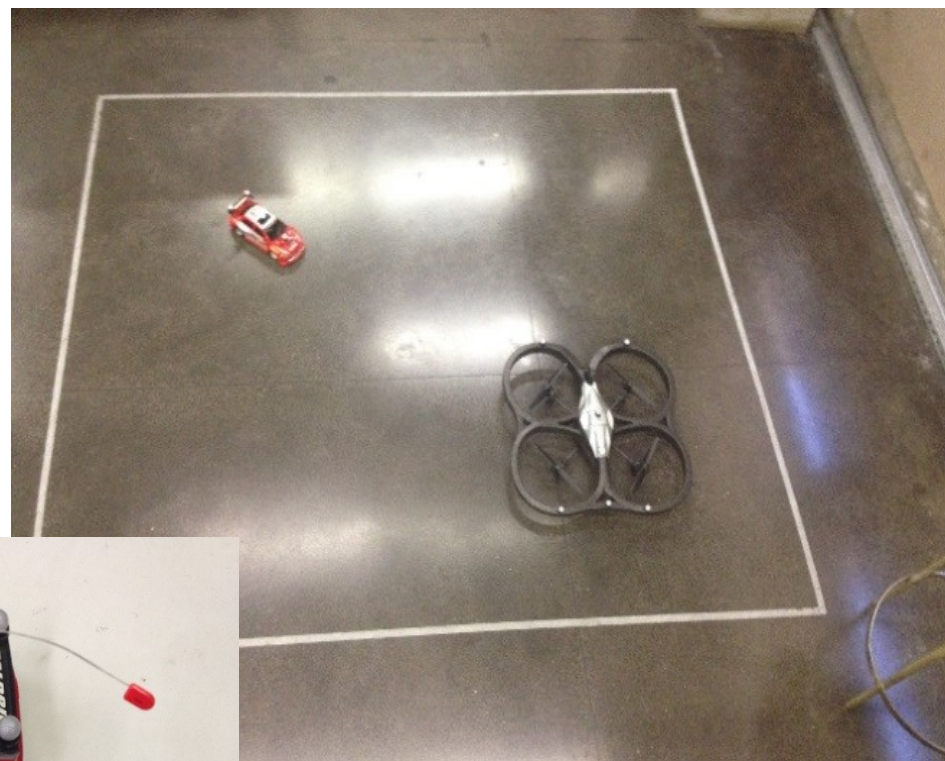


Comparação Simulação vs. Experimento- Eixo y

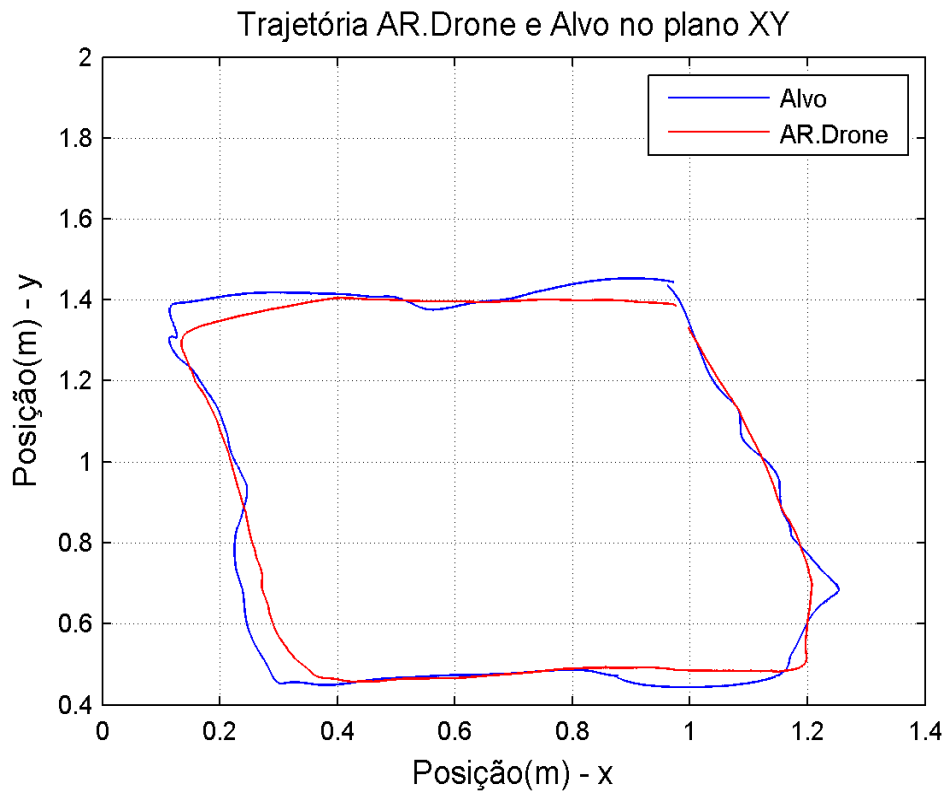


Seguimento de Alvo

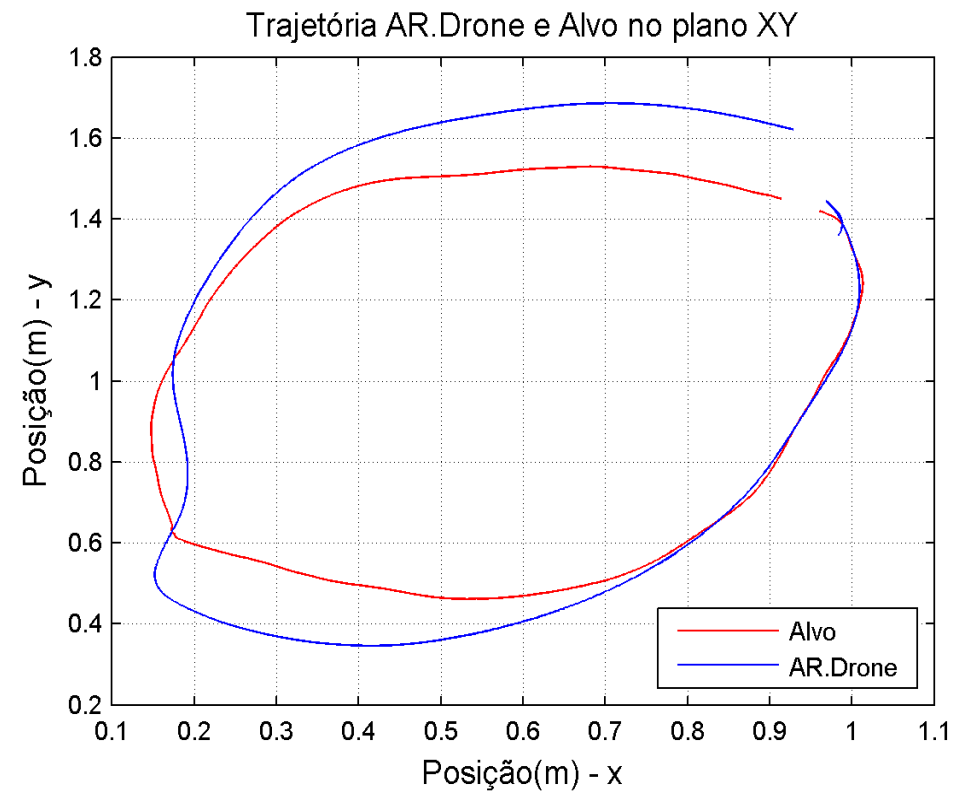
- Aplicações:
 - Carga e descarga,
 - Pouso em plataformas móveis,
 - Integração com USVs,
 - etc.



Seguimento de Alvo

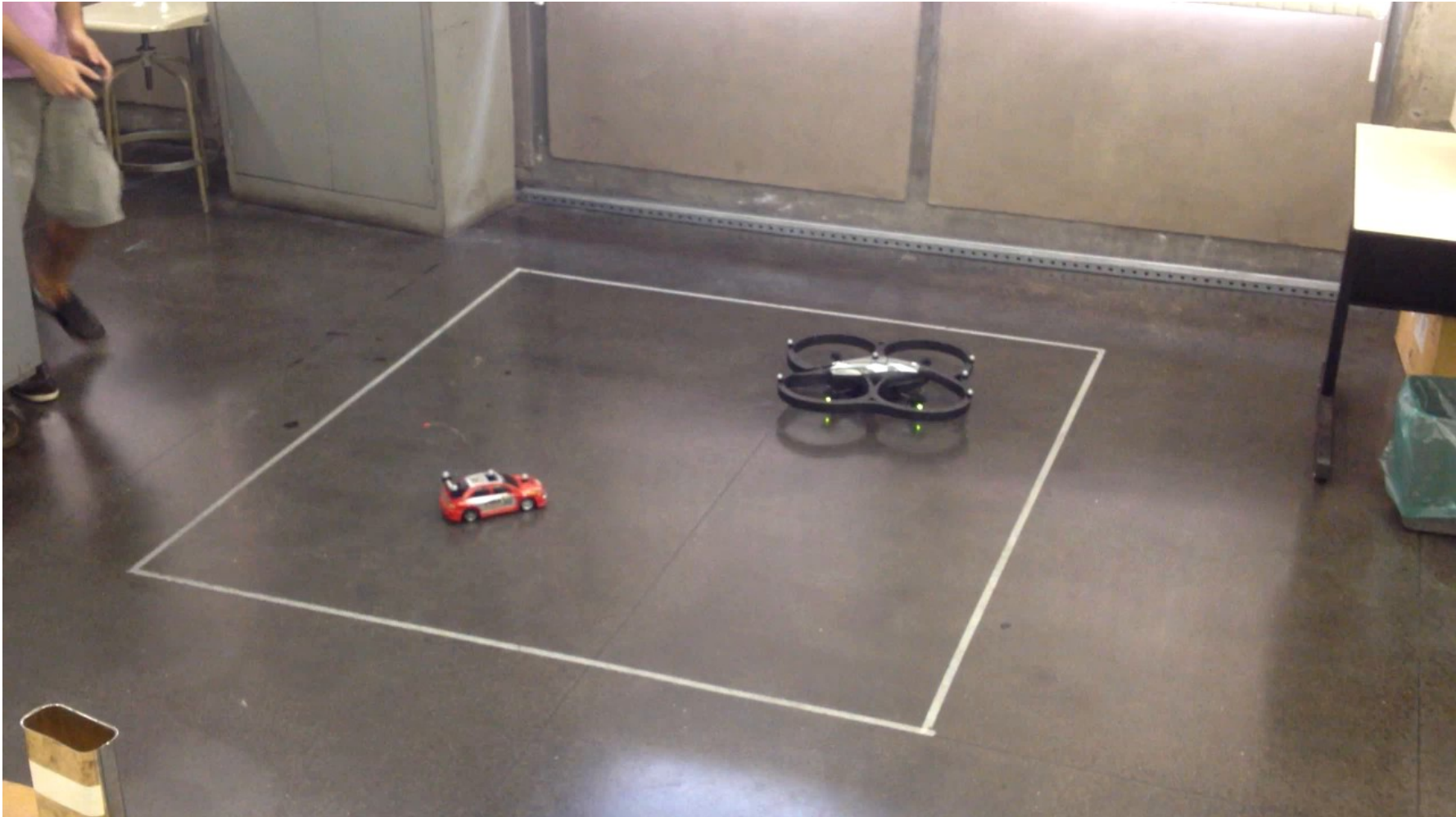


Alvo lento



Alvo moderado

Seguimento de Alvo



Conclusão

- USVs desenvolvidos:
 - Monocasco;
 - Catamarã:
 - Mais área útil e capacidade de carga;
 - Painéis fotovoltaicos e auto-ancoragem ampliarão autonomia operacional.
 - Componentes *off-the-shelf* de baixo custo.
- Controladores testados em barcos e quadricóptero pequenos.
- Trabalhos futuros: cooperação entre USVs, quadricópteros e outros veículos.

Agradecimentos



- Aos docentes, discentes e técnicos colaboradores deste projeto.
- Financiamentos:
 - Parceria CNPq/FAPERJ no Edital nº 25/2010: Apoio a Núcleos Emergentes de Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro – 2010 – PRONEM;
 - FEN/UERJ.
- Bolsas para alunos de Mestrado e Iniciação Científica concedidas pela CAPES, CNPq, DCARH/UERJ e FEN/UERJ.

Contato



- *Homepage:* <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo>
- *E-mail:* jpaulo@ieee.org
- *Telefone:* (21) 2334-0027



Referências

- Amaral, G. S. (2008), Sistema de posicionamento dinâmico para um pequeno veículo flutuante, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.
- Chaves Filho, R. A. M. (2016), Desenvolvimento e montagem da caixa de comando de uma embarcação teleoperada, Relatório das Atividades de Pesquisa de Iniciação Científica — UERJ, Rio de Janeiro.
- Falcão, A. D. S. (2018), Sistema de painéis fotovoltaicos e baterias para um barco teleoperado, Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica — UERJ, Rio de Janeiro.
- Fossen, T. I. (2011), Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley.
- Gomes, L. L. e Leal, L. P. (2014), Controle de um quadricóptero por servovisão, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.
- Gomes, L. L., Leal, L., Oliveira, T. R., Cunha, J. P. V. S. e Revoredo, T. C. (2016). “Unmanned quadcopter control using a motion capture system,” IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 8, pp. 3606-3613, August.



Referências

- Hsu, L., Costa, R. R., Lizarralde, F. e Cunha, J. P. V. S. (2000), “Avaliação experimental da modelagem e simulação da dinâmica de um veículo submarino de operação remota,” *Revista Controle & Automação*, vol. 11, no. 2, pp. 82-93.
- Lemos, F. M. M. e Silva, V. E. S. (2019), Controle de uma embarcação não tripulada para seguimento de um alvo, Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica — UERJ, Rio de Janeiro.
- Manley, J. E. (2008), Unmanned surface vehicles, 15 years of development, *in: Proc. OCEANS*, Quebec City – QC, pp. 1-4.
- Pinto, P. H. S. e Mok, R. W. (2015), Projeto e construção de uma embarcação multicasco teleoperada, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.

Referências



- Rosario, R. V. C. e Cunha, J. P. V. S. (2017), “Experimental variable structure trajectory tracking control of a surface vessel with a motion capture system”. *in: Proc. of the 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Beijing, China., pp. 2864-2869.
- Rosario, R. V. C. (2017), Controle a estrutura variável de um barco empurrando uma carga flutuante subatuada, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro.
- Rosario, R. V. C., Cunha, J. P. V. S. e Garcia-Rosa, P. B. (2020), “Stabilizing Control of an Unmanned Surface Vehicle Pushing a Floating Load”, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020 (*to appear*).
- Schultze, H. J. (2012), Projeto e construção de uma embarcação teleoperada, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.
- Sokal, G. J. (2010), Posicionamento dinâmico utilizando controle a estrutura variável e servovisão, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, UERJ, Rio de Janeiro.
- Sousa, L. R. (2016), Acionamento dos motores CC de uma embarcação teleoperada, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.
- The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan (2007).