

VI Semana da Engenharia Elétrica - SEE



Controle de Embarcações Teleoperadas e Quadrirrotores

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, 24 de outubro de 2018

Financiamento: FAPERJ, CNPq e CAPES

VI Semana da Engenharia Elétrica - SEE



Parte I: Controle de Embarcações Teleoperadas

Introdução: Embarcações de Superfície



- Tripuladas;
- Não tripuladas (*unmanned surface vessels* – USVs):
 - Autônomas (*autonomous surface vessels* – ASVs);
 - Teleoperadas.

Introdução: Aplicações de USVs



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

Introdução: Motivações para USVs



- Fornecer vasta gama de informações e monitoração.
- Equipamento de baixo custo para facilitar medições ambientais precisas *in-loco* por grandes períodos de tempo.
- 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 ...*

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



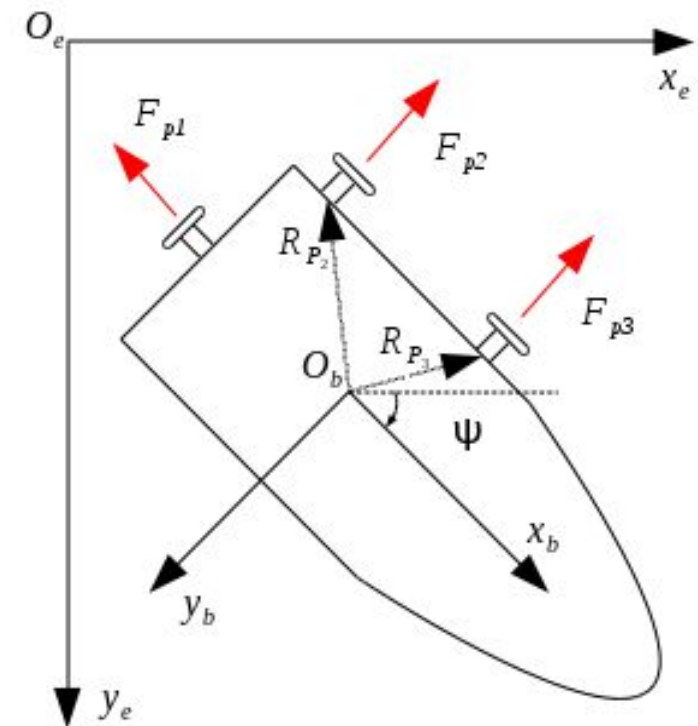
Resposta Dinâmica de USVs



- Parâmetros importantes (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

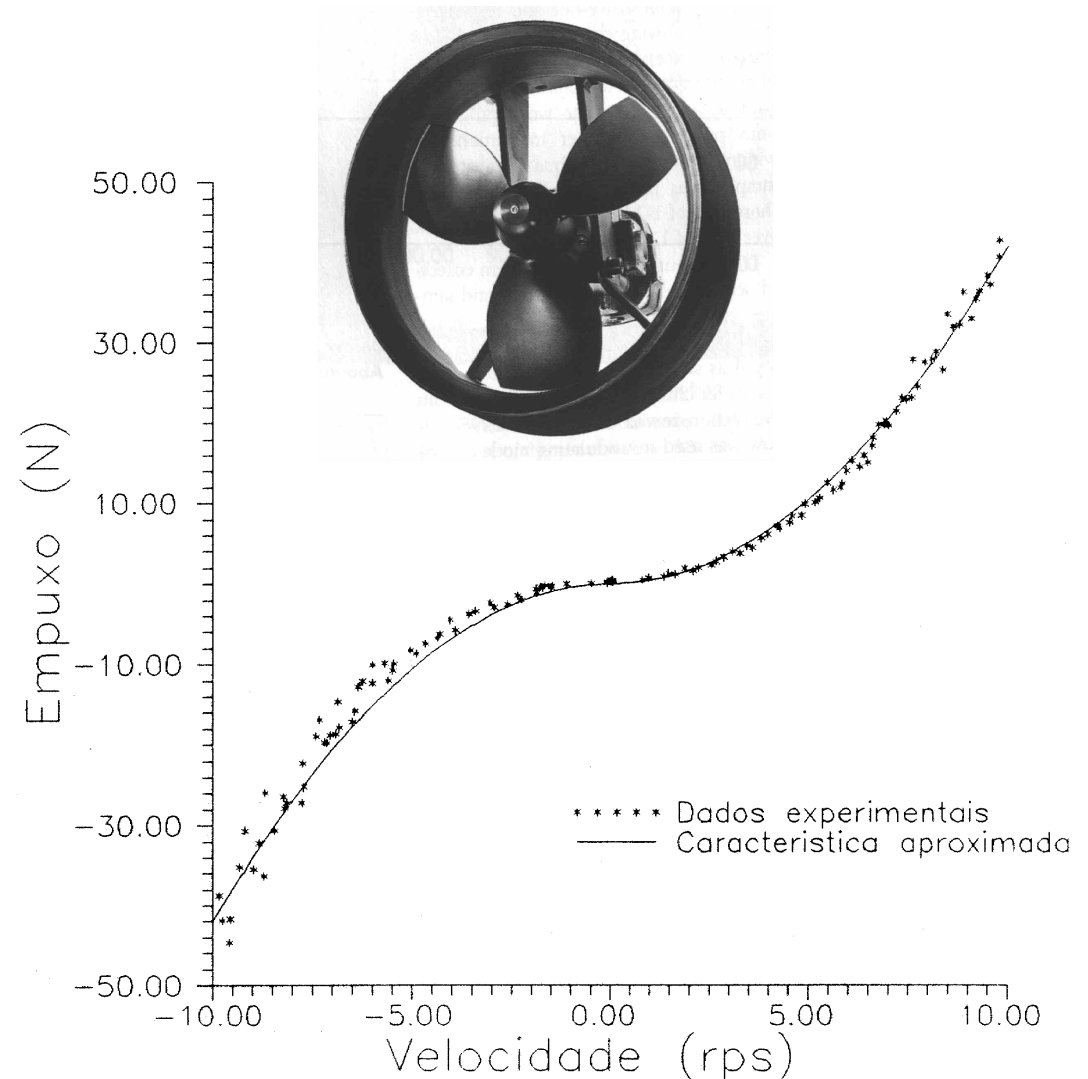
- Força e momento resultantes movem USV.
- Alternativas para comando:
 - Propulsores orientáveis (ex.: motores de popa);
 - Lemes;
 - Composição de forças:



Propulsores

- Hélice + motor
- Motor:
 - Elétrico;
 - Hidráulico;
 - Combustão interna.
- Empuxo do hélice (Hsu *et alli*, 2000):

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



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 veículos aquáticos de superfície:
 - Pequeno porte,
 - Baixo custo,
 - Autônomos ou teleoperados.
- Possibilitar 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





Arquitetura do 1º USV

- Desenvolvido por Schultze (2012).
- Comunicação, instrumentação e controle centralizados num *netbook*.
- Unidade de comando em terra: *laptop*.
- Sistema operacional Linux.
- Comunicação *Wi-Fi*.
- Alimentação: bateria 12V x 115Ah para barco.

Propulsão do 1º USV



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



Sensores do 1º USV



- Medição de posição por GPS;
- Medição de rumo por bússola e girômetro;
- Vídeo de *webcam* para pilotagem;
- Sensores de tensões, correntes e temperaturas conectados ao conversor A/D de um Arduino.

Teste do 1º USV

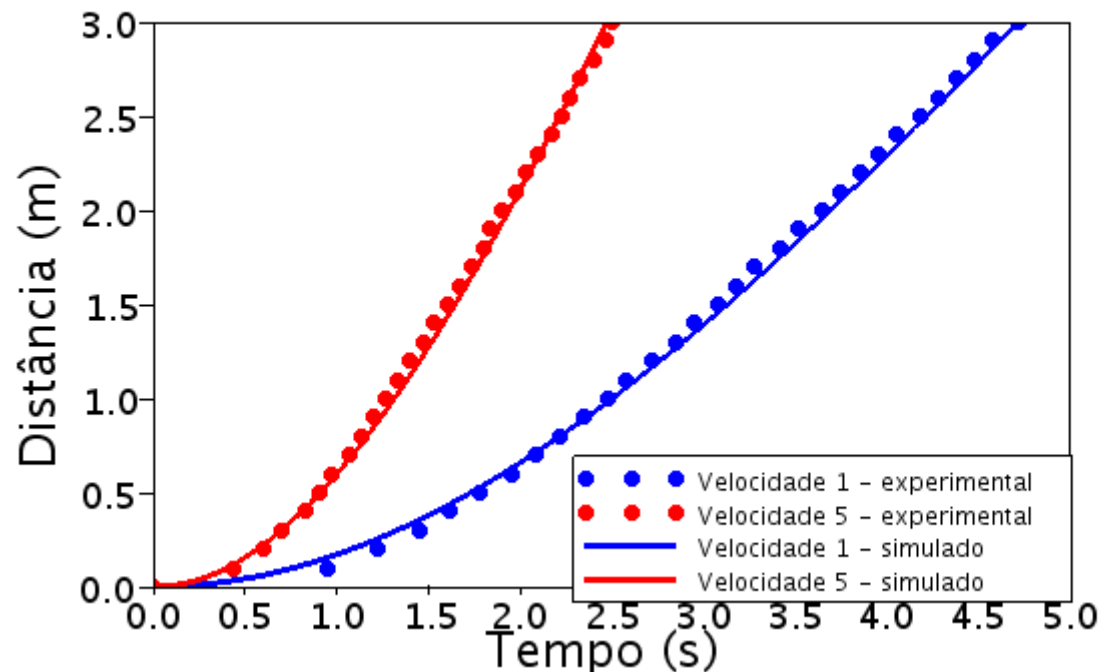


Identificação de Parâmetros Dinâmicos do 1º USV



- Modelo dinâmico de um grau de liberdade:

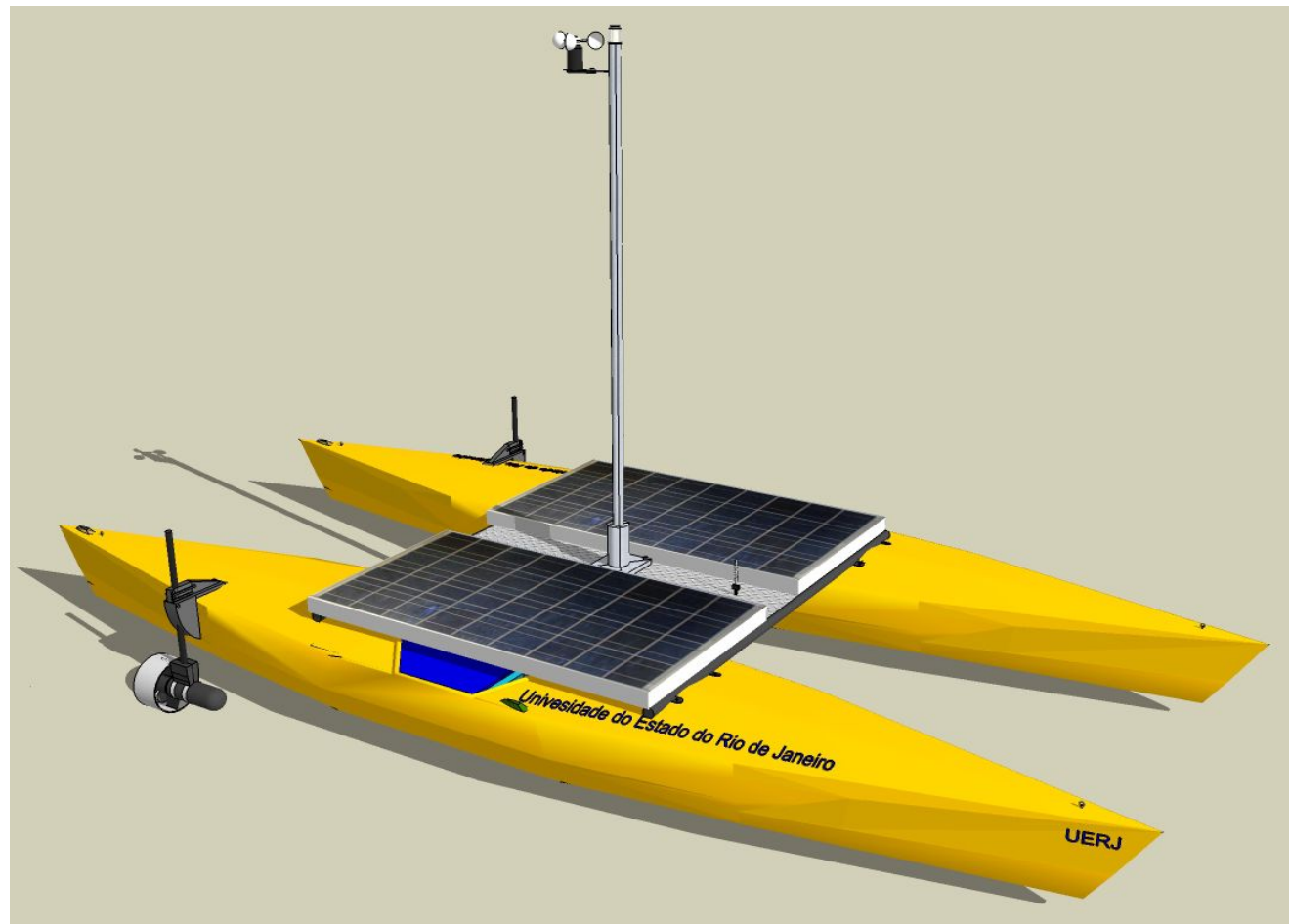
$$\ddot{x} = \frac{1}{m_x} (F_{px} - C_{dx} \dot{x} |\dot{x}|)$$



2º USV em Desenvolvimento



- Catamarã





Arquitetura do 2º USV

- Para ampliar autonomia operacional:
 - Energia fornecida por baterias e painéis fotovoltaicos;
 - Auto-ancoragem para economia de propulsão.
- Controle centralizado num *netbook*.
- Unidade de comando em terra: *laptop*.
- Sistema operacional Linux.
- Comunicação por roteadores *Wi-Fi* com maior alcance.

Propulsão do 2º USV



- Dois motores de popa elétricos fixos;
- Dois propulsores transversais opcionais para posicionamento dinâmico.
- Eletrônica de potência para acionamento de cada motor (Souza, 2016):
 - 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

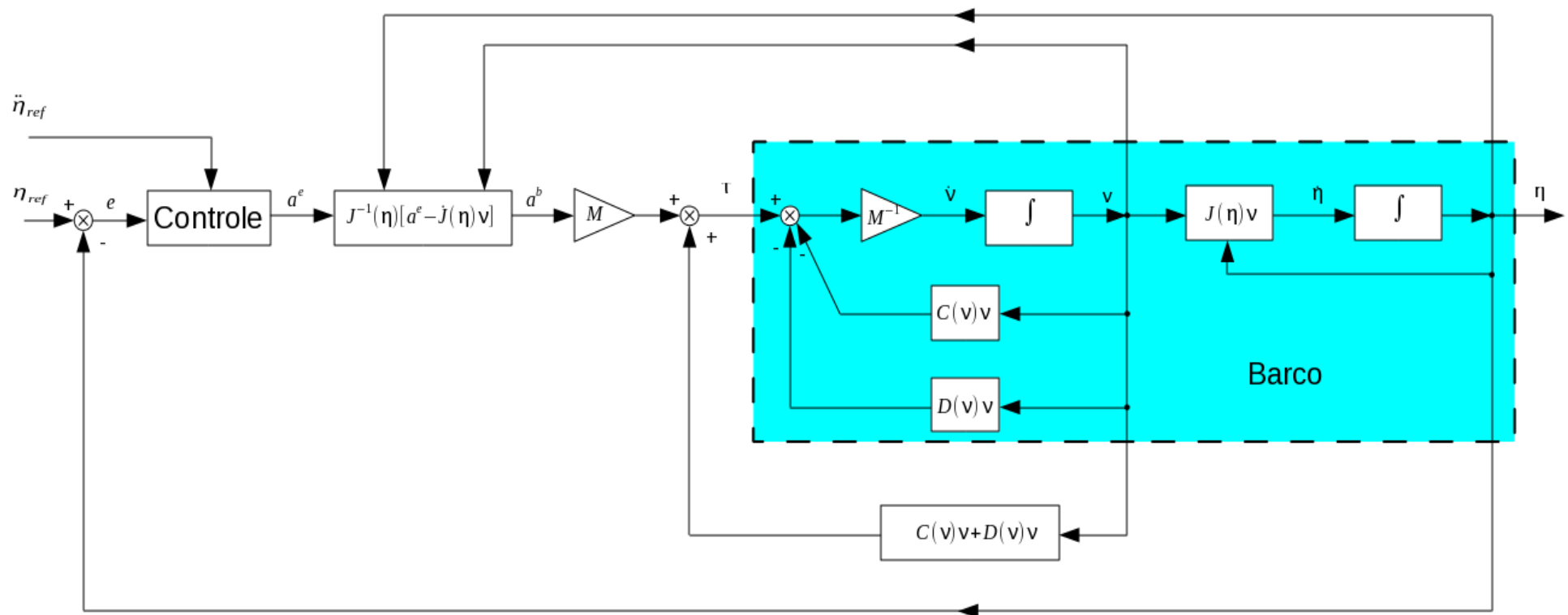


- GPS integrado a navegador inercial;
- Câmera de vídeo *IP* com *pan*, *tilt*, *zoom* e foco comandados remotamente;
- Dotado de redes de sensores sem fios:
 - *ZigBee*;
 - *Wi-Fi*.

Rastreamento de Trajetória para USV



- Estratégia (Rosario e Cunha, 2016 e 2017):
 - Linearização por realimentação e
 - Controle a estrutura variável – VSC.



Sistema Visual de Captura de Movimento



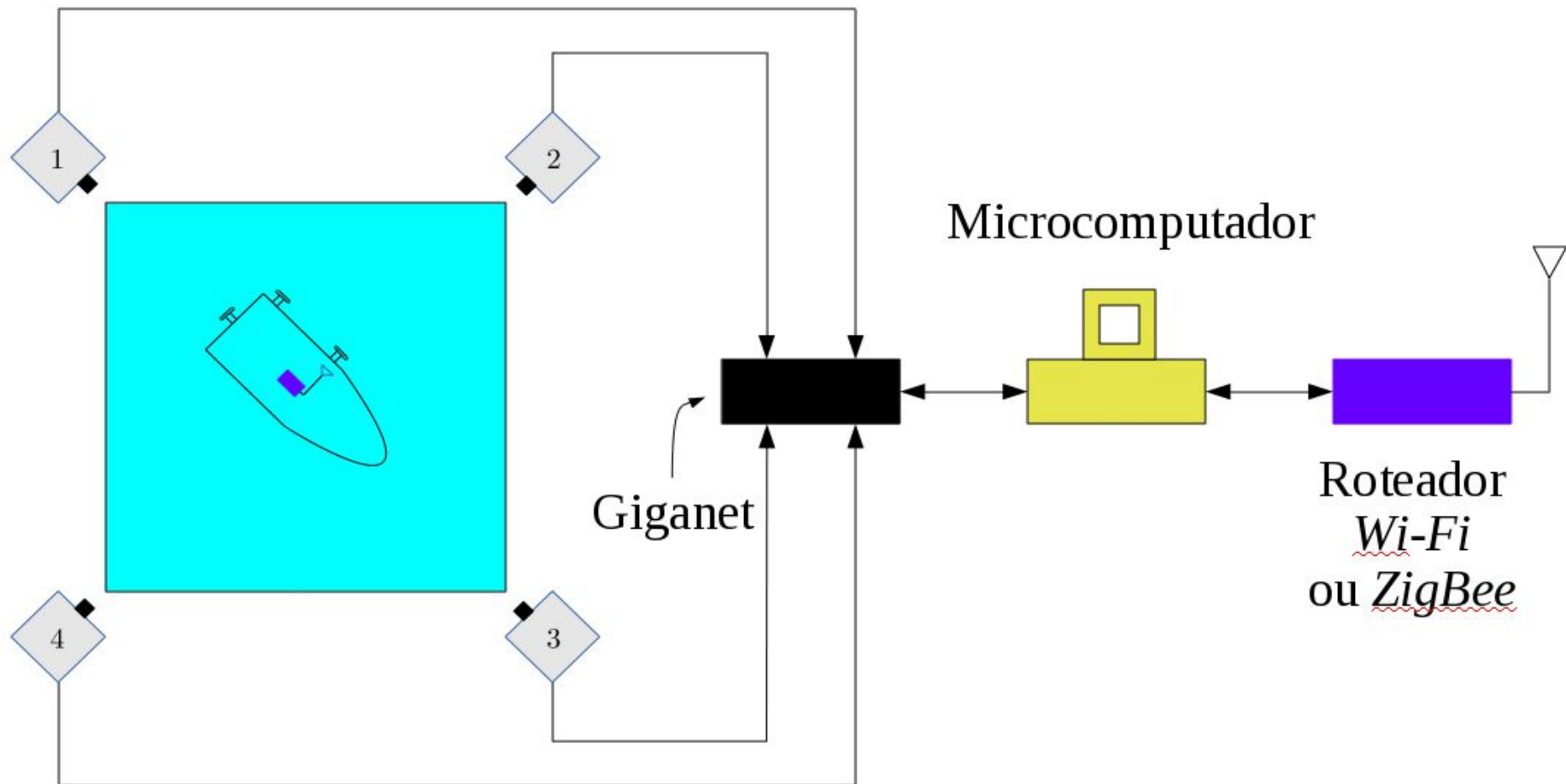
- 4 câmeras T10S – 1 *megapixel*;
- 3 câmeras Vantage V5 – 5 *megapixel*;
- *LEDs estroboscópicos quase infravermelhos*;
- Esferas refletoras fixadas nos veículos;
- *Software Vicon Tracker*:
 - Medição da posição, orientação e velocidade 3D;
 - Amostragem até 1 kHz;
 - Precisão melhor que 1 mm.



Sistema para Controle de Alto Desempenho



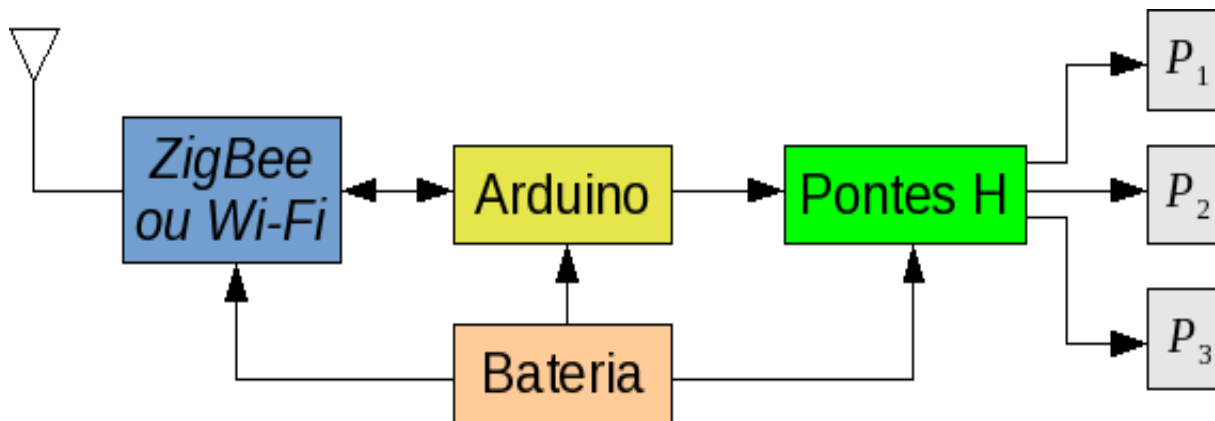
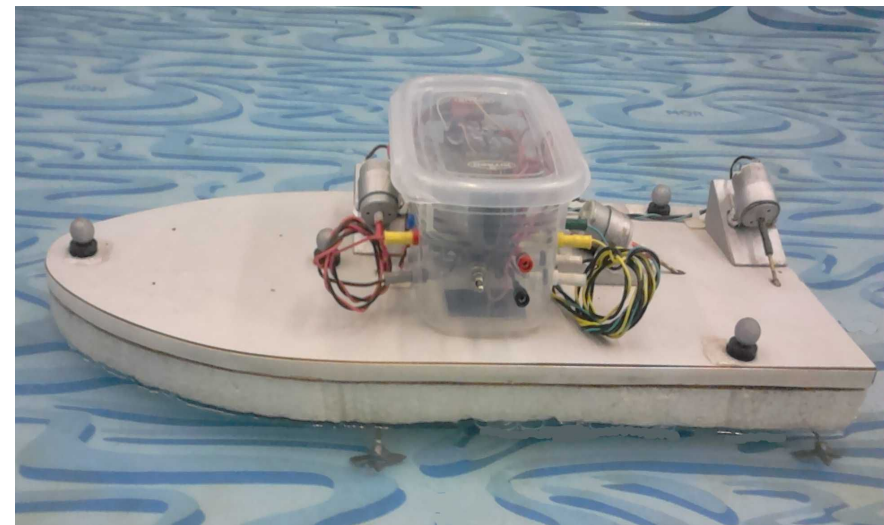
- Diagrama geral:



Barco para Experimentos de Controle



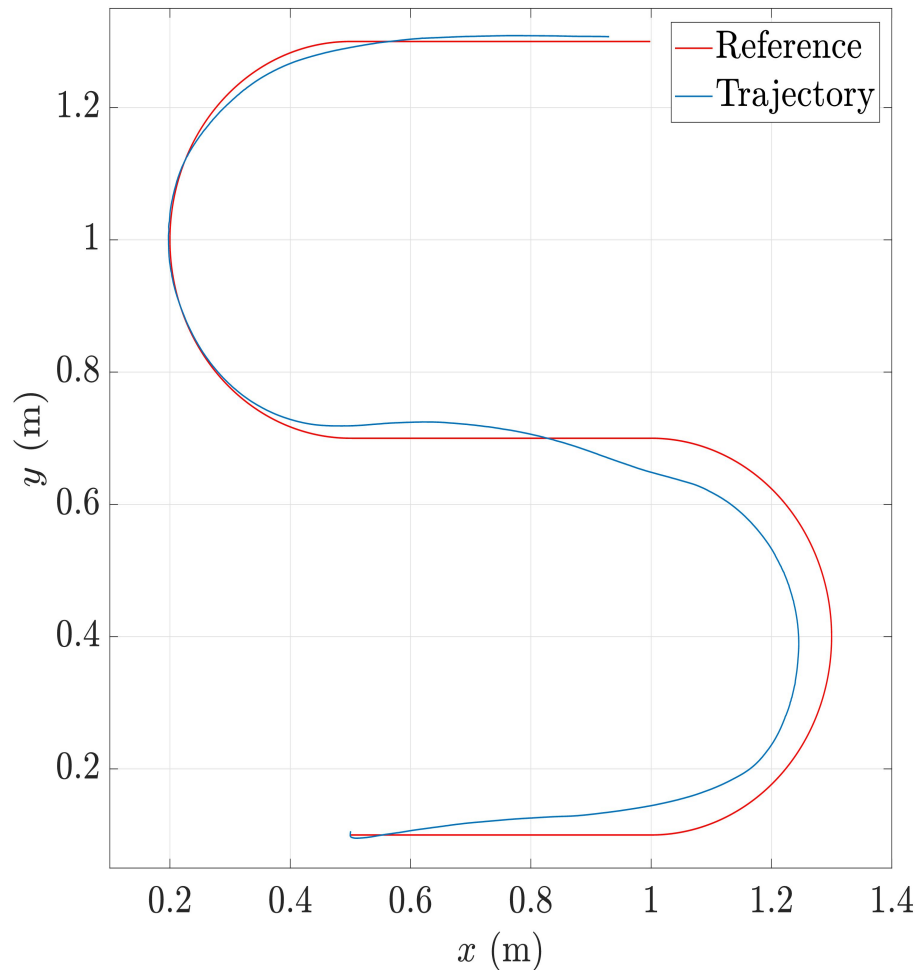
- Velocidade máxima: 0,26 m/s;
- Comprimento: 0,48 m;
- Massa: 1,3 kg;
- Três propulsores.



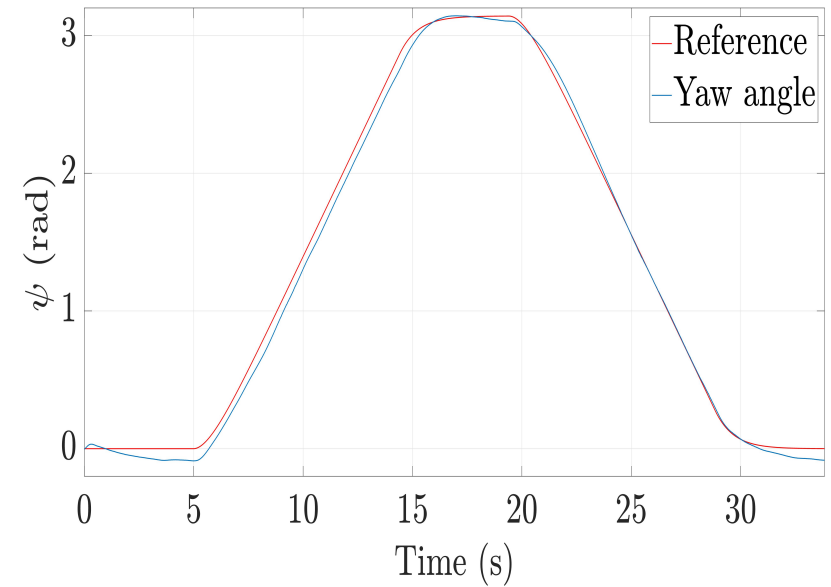
Rastreamento de Trajetória com Controle PD



(a) Trajectory in the horizontal plane



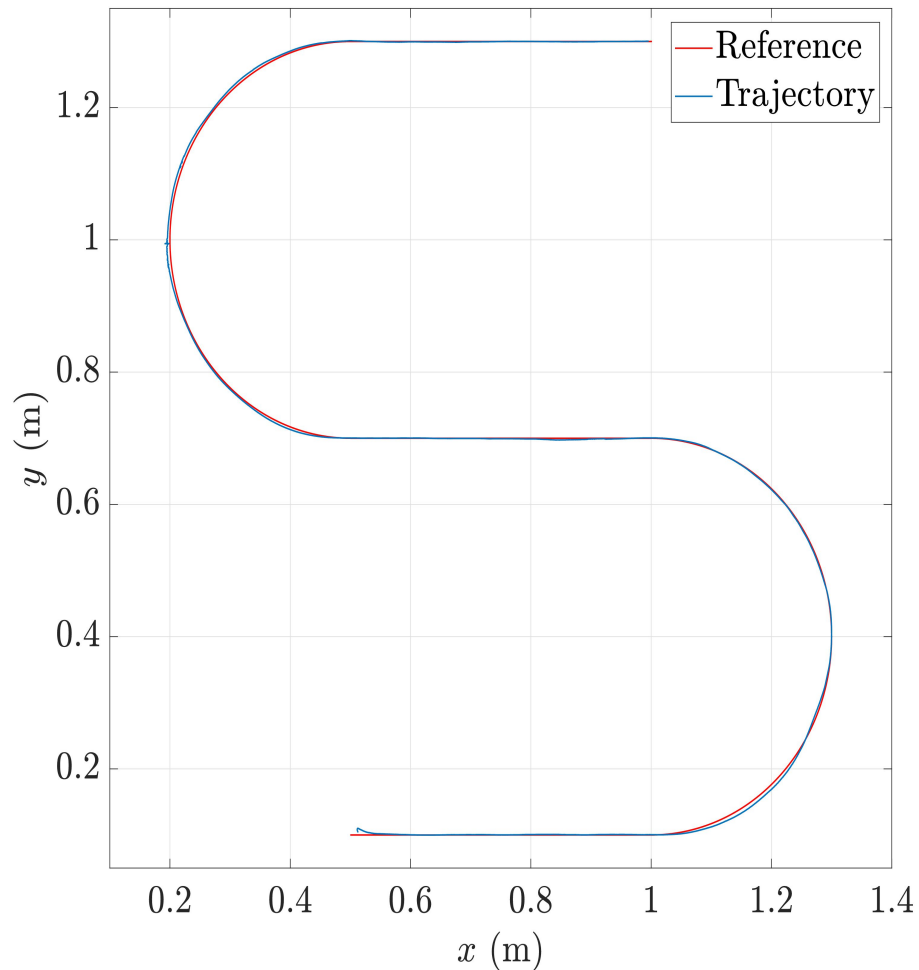
(b) Yaw angle



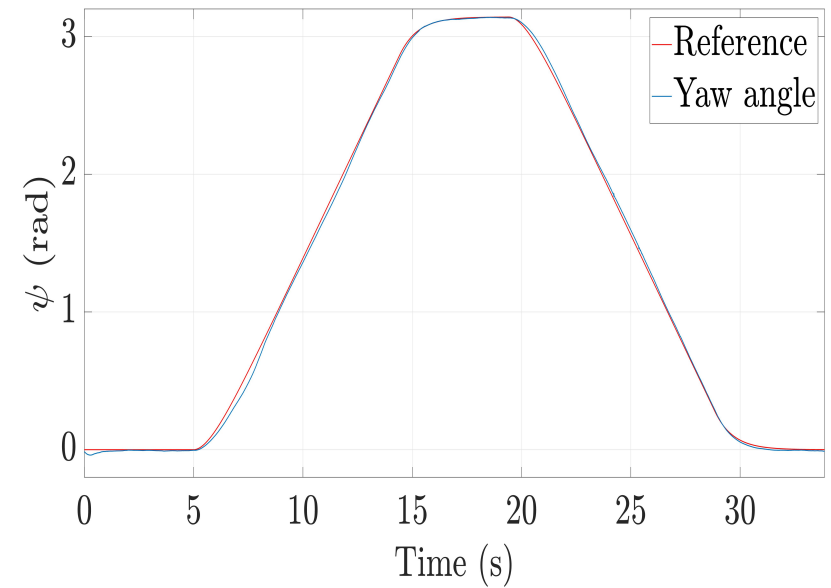
Rastreamento de Trajetória com VSC



(a) Trajectory in the horizontal plane



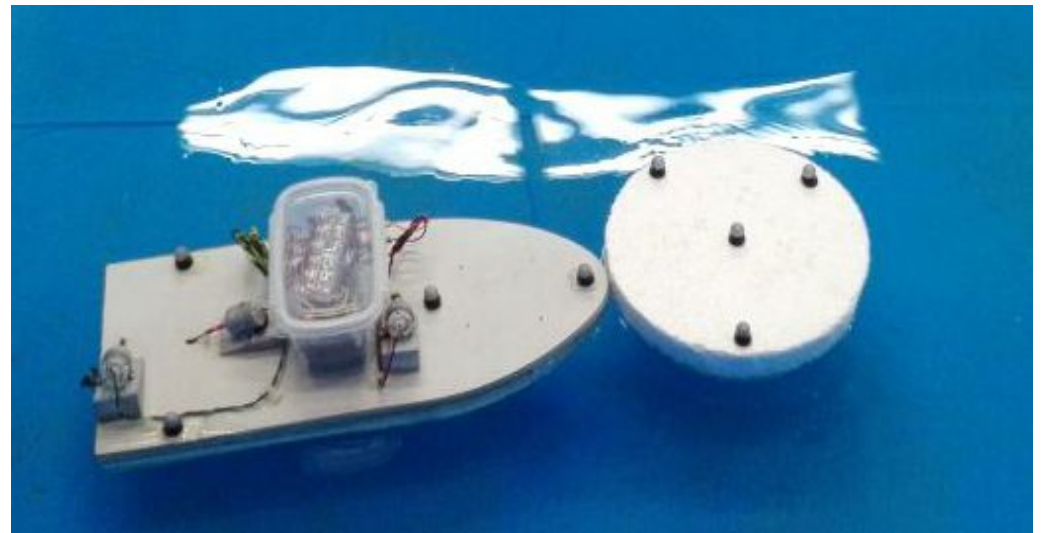
(b) Yaw angle



Barco Empurrando Carga Flutuante



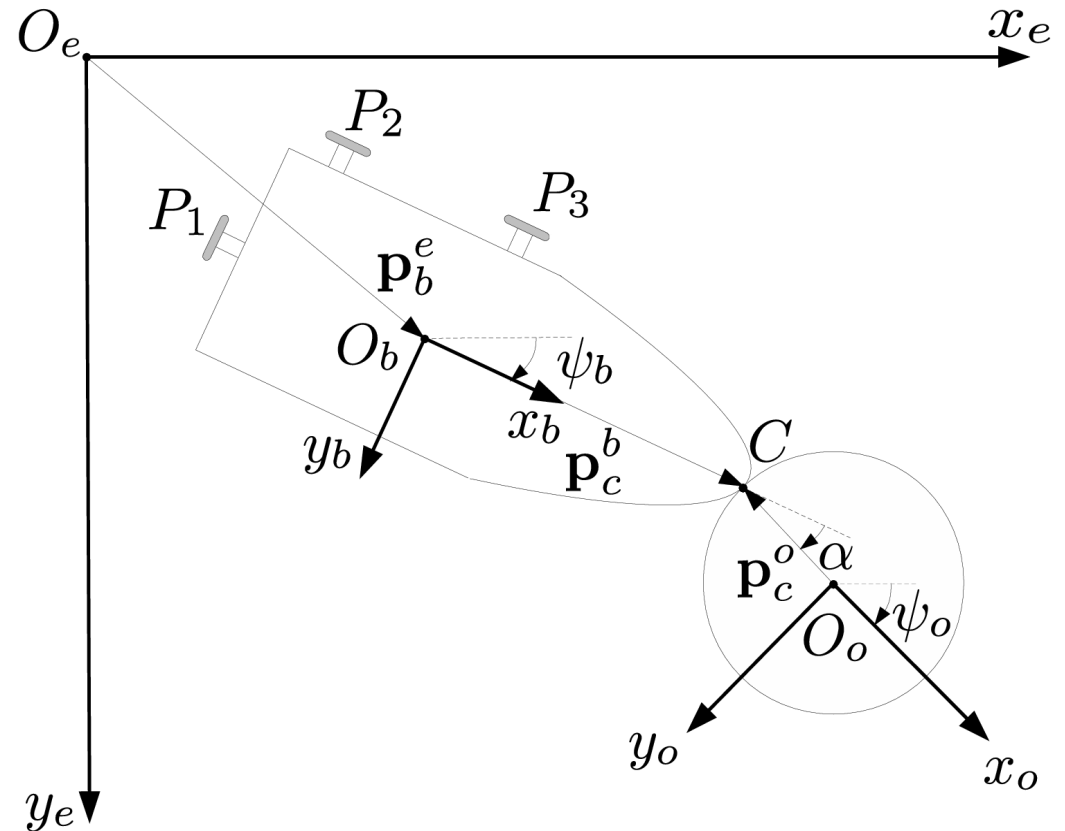
- Aplicações:
 - Mover cargas flutuantes;
 - Mover barcos enguiçados;
 - Atracar barcos.
- Empurrar dispensa amarras.



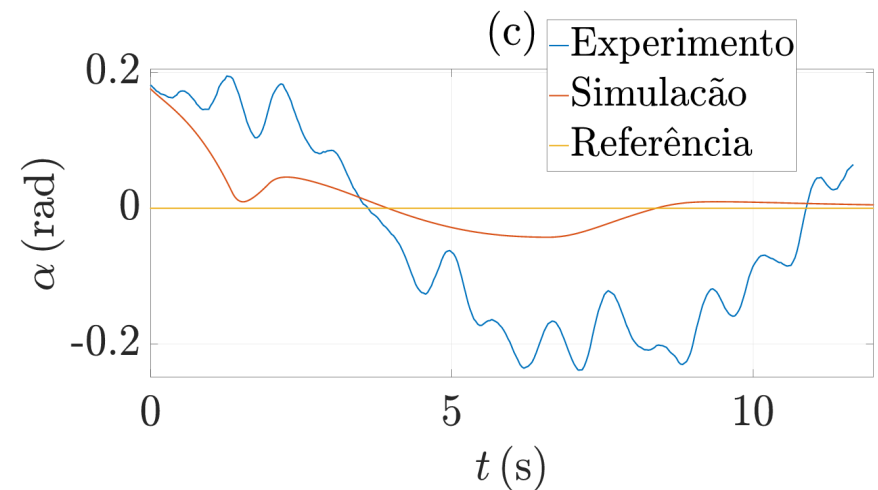
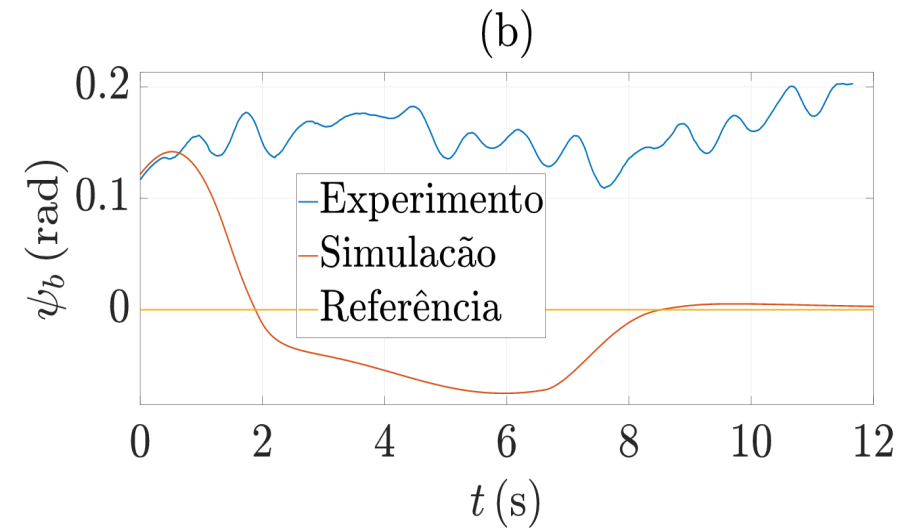
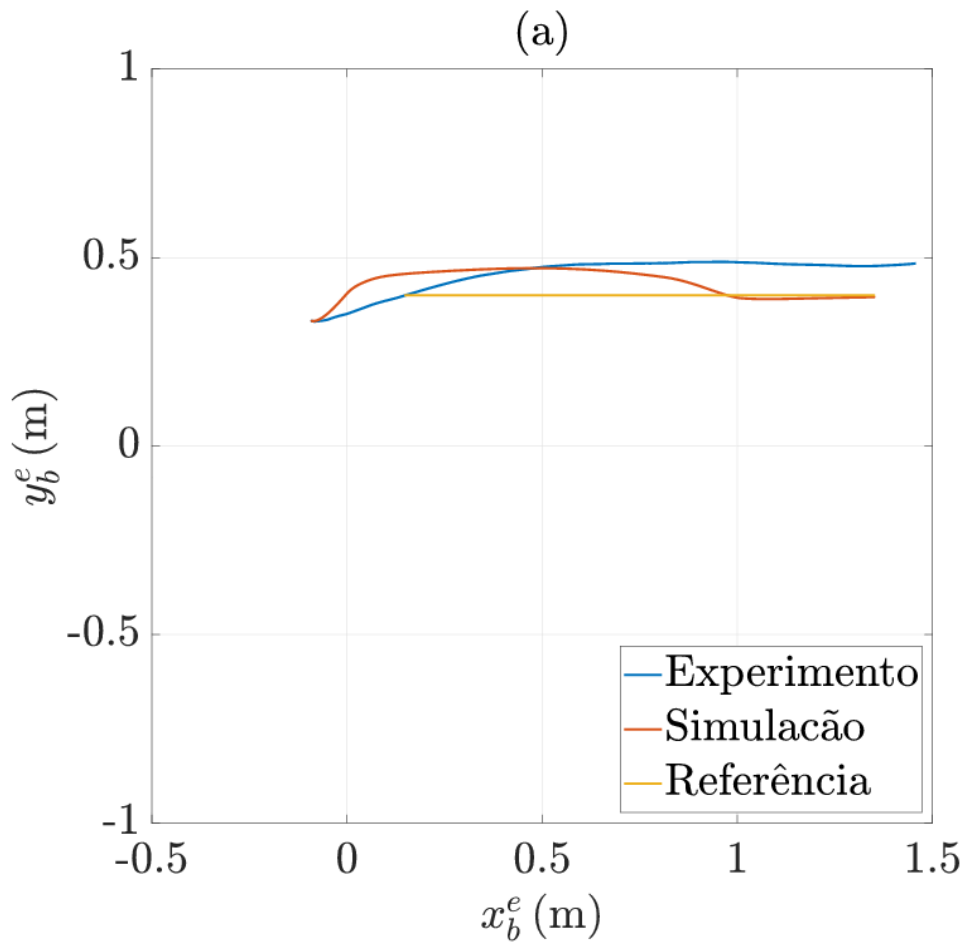
Barco Empurrando Carga Flutuante



- Dificuldades:
 - Sistema subatuado:
3 propulsores x 4 graus de liberdade;
 - Dinâmica instável;
 - Perturbações.
- Solução (Rosario e Cunha, 2018):
 - Linearização parcial por realimentação;
 - Controle a estrutura variável.



Barco Empurrando Carga Flutuante





Conclusão da Parte I

- Foco: embarcações de superfície teleoperadas – USVs.
- USVs em desenvolvimento:
 - 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 barco pequeno.
- Projeto multidisciplinar.

Agradecimentos



- Aos docentes, discentes e técnicos colaboradores deste projeto.
- Convite para esta apresentação feito pelo Ramo Estudantil IEEE UERJ.
- 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:** 0xx–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.
- Fossen, T. I. (2011), Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley.
- 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.
- 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.
- Rosario, R. V. C. e Cunha, J. P. V. S. (2016), “Experimentos de rastreamento de trajetória de uma embarcação de superfície utilizando linearização por realimentação e controle a estrutura variável”. *in: Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática*, Vitória. pp. 3034-3039.
- 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. e Cunha, J. P. V. S. (2018), “Controle de um barco empurrando uma carga flutuante subatuada”. *in: Anais do XXII Congresso Brasileiro de Automática*, João Pessoa.
- 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). Disponível em <http://www.navy.mil/navydata/technology/usvmppr.pdf>.