

Eduardo Gomes Pereira

Relatório de Estágio

Campina Grande, Brasil

7 de março de 2014

Eduardo Gomes Pereira

Relatório de Estágio

Relatório de Estágio submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Orientador: Antonio Marcus Nogueira Lima

Campina Grande, Brasil

7 de março de 2014

Eduardo Gomes Pereira

Relatório de Estágio/ Eduardo Gomes Pereira. – Campina Grande, Brasil, 7 de março de 2014-

30 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Antonio Marcus Nogueira Lima

Relatório de Estágio – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica , 7 de março de 2014.

1. Controle de Trajetória. 2. Sistema de Navegação. 3. Sistema de Posicionamento Global. 4. Veículo Autônomo. I. Antonio Marcus Nogueira Lima. II. Universidade Federal de Campina Grande. III. Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica. IV. Relatório de Estágio

Eduardo Gomes Pereira

Relatório de Estágio

Relatório de Estágio submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Campina Grande, Brasil, 06 de março de 2014:

Antonio Marcus Nogueira Lima
Orientador

Alexandre Cunha Oliveira
Convidado

Campina Grande, Brasil
7 de março de 2014

Agradecimentos

Os principais agradecimentos são direcionados:

- A Deus, pela força e perseverança, pela capacidade e sabedoria, por este mundo incrível... por tudo.
- À Fundação Parque Tecnológico da Paraíba, pela oportunidade de estágio.
- Ao professor Antonio Marcus, pela orientação e pela confiança.
- Ao professor Marcos Morais, pelo auxílio e esclarecimento em diversas ocasiões, e pela paciência.
- Ao professor Alexandre, pela supervisão das minhas atividades, e pela assistência durante a realização deste trabalho.
- Ao técnico Simões, por seu excepcional trabalho e ajuda nas montagens eletrônicas.
- Ao técnico Danilo, pelo valioso auxílio nas montagens mecânicas desenvolvidas.
- À minha família, pelo apoio e compreensão, não apenas durante esta longa trajetória, mas durante toda a minha vida, e pela confiança no meu trabalho.
- A todos os amigos e colegas conquistados nestes cinco anos de curso, pelo compartilhamento de alegrias e tristezas, pelo sentimento de “não estou sozinho” nos momentos difíceis, e pelas boas e memoráveis ocasiões vividas no decorrer desta jornada.
- A todas as pessoas anônimas (colegas, professores, funcionários, ...) que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

*“I can’t change the direction of the wind,
but I can adjust my sails to always reach my destination.”
(Jimmy Dean)*

Resumo

No presente trabalho, é apresentado o desenvolvimento de um sistema automático de navegação e controle, baseado no Sistema de Posicionamento Global (GPS), para aplicação em um Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios (VASAR), com o objetivo de seguir uma trajetória pré-definida. Um dispositivo GPS é utilizado para determinar as variáveis de estado do veículo, tais como posição, velocidade e direção. Todos os dados são adquiridos e processados em um Microcontrolador PIC16F877A, desenvolvido pela Microchip. Para testar o sistema de navegação, um protótipo miniaturizado do VASAR foi criado.

Palavras-chaves: Controle de Trajetória, Sistema de Navegação, Sistema de Posicionamento Global, Veículo Autônomo.

Abstract

In this work, we present the development of an automatic navigation and control system, based on the Global Positioning System (GPS), for application in an Autonomous Vehicle for Reservoirs Water Sensing (VASAR), with the goal of following a pre-defined trajectory. A GPS device is used to determine the state variables of the vehicle, such as position, speed and direction. All data are acquired and processed on a PIC16F877A microcontroller, designed by Microchip. To test the navigation system, a miniaturized VASAR prototype was created.

Key-words: Trajectory Control, Navigation System, Global Positioning System , Autonomous Vehicle.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Representação em diagrama de blocos do sistema computacional do VASAR | 5 |
| Figura 2 – Configuração Mecânica Proposta do VASAR. | 6 |
| Figura 3 – Configuração Mecânica Proposta do VASAR. | 6 |
| Figura 4 – Representação explicativa do fenômeno de arrasto. | 8 |
| Figura 5 – Representação em diagrama de blocos do sistema de controle de trajetória do VASAR. | 11 |
| Figura 6 – Exemplo de trajetória. | 12 |
| Figura 7 – Esquema da construção mecânica desenvolvida. | 14 |
| Figura 8 – Diagrama de blocos do sistema eletrônico. | 16 |
| Figura 9 – Circuito de acionamento dos motores. | 17 |
| Figura 10 – Foto do modelo miniaturizado, visão frontal. | 18 |
| Figura 11 – Foto do modelo miniaturizado, visão lateral direita. | 19 |
| Figura 12 – Foto do modelo miniaturizado, visão lateral esquerda. | 20 |
| Figura 13 – Foto do modelo miniaturizado, visão traseira. | 21 |
| Figura 14 – Foto do propulsor esquerdo. | 22 |
| Figura 15 – Foto do propulsor direito. | 23 |
| Figura 16 – Foto do modelo miniaturizado, visão inferior. | 24 |
| Figura 17 – Foto do barco em operação. | 25 |
| Figura 18 – Foto do barco em operação. | 26 |
| Figura 19 – Foto do barco em operação. | 27 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------|---|
| CHESF | Companhia Hidro Elétrica do São Francisco |
| GPS | Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>) |
| IHM | Interface Homem Máquina |
| INS | Sistema de Navegação Inercial (<i>Inertial Navigating System</i>) |
| PWM | Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse-Width Modulation</i>) |
| VASAR | Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios |

Lista de símbolos

| | |
|--------------|---|
| a | Parâmetro que relaciona sinal de antrada à força gerada por um propulsor |
| α | Aceleração angular do barco |
| A | Parâmetro que engloba todos os parâmetros não dependentes da velocidade na equação de arrasto na direção tangencial |
| \mathbf{A} | Matriz A |
| A_s | Área da secção Transversal |
| B | Parâmetro que engloba todos os parâmetros não dependentes da velocidade na equação de arrasto na direção de rotação |
| \mathbf{B} | Matriz B |
| C_d | Coefficiente de arrasto |
| F_d | Força devido ao arrasto na direção do movimento tangencial do barco |
| F_δ | Força devido ao arrasto na direção do movimento de rotação do barco |
| F_l | Força aplicada pelo propulsor direito do barco |
| F_r | Força aplicada pelo propulsor esquerdo do barco |
| F_t | Força aplicada na direção do movimento tangencial do barco |
| K_p | Ganho do Controlador Proporcional |
| K_i | Ganho do Controlador Integral |
| K_d | Ganho do Controlador Derivativo |
| M | Massa do barco |
| R | Metade da distância entre os eixos dos dois propulsores |
| ρ | Densidade |
| t | Tempo |
| τ | Torque |
| τ_r | Torque de referência |

| | |
|--------------|--|
| \mathbf{u} | Vetor de entradas |
| u_l | Sinal de controle aplicado ao propulsor esquerdo |
| u_r | Sinal de controle aplicado ao propulsor direito |
| v | Velocidade tangencial do barco |
| v_e | Erro de velocidade tangencial do barco |
| v_r | Velocidade tangencial de referência do barco |
| ω | Velocidade de rotação do do barco |
| \mathbf{x} | Vetor de estados |
| θ | Ângulo de orientação do barco |
| θ_r | Ângulo de orientação de referência do barco |
| θ_e | Erro de ângulo de orientação do barco |

Sumário

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | VASAR | 3 |
| 2.1 | Projeto Sistema Automático de Análise Limnológica das Águas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas | 3 |
| 2.2 | Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios | 4 |
| 3 | SISTEMA DE NAVEGAÇÃO E CONTROLE | 7 |
| 3.1 | Modelo do VASAR | 7 |
| 3.1.1 | Arrasto | 7 |
| 3.1.2 | Movimento de Translação | 8 |
| 3.1.3 | Movimento de Rotação | 9 |
| 3.1.4 | Representação em Espaço de Estados | 10 |
| 3.2 | Estratégia de Controle | 10 |
| 3.2.1 | Geração de Referência | 10 |
| 3.2.2 | Controle de Direção e Velocidade | 11 |
| 3.2.2.1 | Controle de Direção | 11 |
| 3.2.2.2 | Controle de Velocidade | 12 |
| 3.2.2.3 | Considerações Práticas | 13 |
| 4 | IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA | 14 |
| 4.1 | Construção Mecânica | 14 |
| 4.2 | Implementação Eletrônica | 15 |
| 4.3 | Algoritmo | 16 |
| 4.4 | Realização Experimental | 18 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 28 |
| 5.1 | Síntese do Trabalho | 28 |
| 5.2 | Considerações | 28 |
| 5.3 | Trabalhos Futuros | 28 |
| | Referências | 30 |

1 Introdução

Usinas hidrelétricas são a principal fonte de energia elétrica utilizada no Brasil. Geralmente, estas usinas hidrelétricas contêm um grande reservatório de água para regular a potência gerada e manter uma reserva para os períodos de estiagem. Após utilização para a geração de energia elétrica, a água é liberada para o leito do rio e pode ser utilizada para consumo.

Devido ao transporte de sedimentos e redução do fluxo médio da água na região do reservatório, qualquer reservatório está sujeito ao processo de assoreamento, que é a obstrução do canal por acúmulo de sedimentos (areia, pedras, detritos quaisquer) (1). Isso resulta em perda da capacidade de geração neste reservatório. Ainda, a água, que posteriormente pode ser usada para consumo, também está sujeita a contaminação devido a diversos fatores.

Dado o problema de possíveis assoreamento e contaminação de reservatórios, é necessário monitorar periodicamente o estado do reservatório e atuar regularmente para cumprir padrões pré-estabelecidos de qualidade (2, 3).

Neste contexto, existe um projeto intitulado ‘Sistema Automático de Análise Limnológica das Águas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas’, em desenvolvimento na Fundação Parque Tecnológico da Paraíba (PAQTCPB), a pedido da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), para a concepção de um Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios (VASAR).

O VASAR consiste de uma estrutura física à qual são integrados diversos equipamentos, tais como sensores; atuadores; dispositivos de comunicação; e unidades de processamento, para a realização contínua de missões de verificação da qualidade das águas de reservatórios, visando identificar ou prever problemas para atuar de forma rápida e eficiente na sua correção.

Neste trabalho, são apresentadas as atividades desenvolvidas por Eduardo Gomes Pereira, durante seu período de estágio, como contribuições ao projeto ‘Sistema Automático de Análise Limnológica das Águas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas’. A principal atividade desenvolvida foi a criação de um modelo miniaturizado do VASAR e o desenvolvimento de seu sistema de navegação e controle.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No [Capítulo 2](#), é apresentada uma breve descrição do projeto ‘Sistema Automático de Análise Limnológica das Águas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas’ e das especificações do Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios. No [Capítulo 3](#), é apresentado o desenvolvimento do

modelo e do sistema de navegação e controle do VASAR. No [Capítulo 4](#), são apresentadas a construção do modelo miniaturizado do VASAR, a configuração eletrônica e os testes experimentais realizados para a verificação do funcionamento do modelo miniaturizado e da estratégia de navegação e controle. No [Capítulo 5](#), são apresentadas as considerações finais, contendo um breve resumo do que foi desenvolvido e o que ainda precisa ser feito para conclusão do projeto.

2 VASAR

O projeto intitulado ‘Sistema Automático de Análise Limnológica das Águas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas’ é um projeto multidisciplinar para o desenvolvimento de um Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios. O projeto é financiado pela CHESF e conta com a colaboração de equipes de Engenharia Elétrica e de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande e de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Brasília. Neste capítulo, será apresentada uma breve descrição do projeto e das especificações do VASAR.

2.1 Projeto Sistema Automático de Análise Limnológica das Águas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas

O objetivo geral do projeto é montar um sistema piloto para realização de medições de grandezas físico-químicas da água de reservatórios do sistema hidrelétrico da CHESF com capacidade de mobilidade autônoma e transmissão on-line de dados via sistema de rádio para estação base instalada na sede Recife da CHESF, fornecendo informações que permitam antecipar condições de degradação da qualidade da água para uma ação corretiva mais rápida e eficaz.

Os objetivos específicos do projeto são:

- Desenvolver e montar unidade de sensoriamento e limpeza de sensores, com capacidade para medição das seguintes grandezas físico-químicas: temperatura, pH, oxigênio dissolvido, potencial de oxi-redução (orp/redux), turbidez, condutividade, clorofila A e cianobactérias;
- Desenvolver e montar estrutura flutuante para um veículo autônomo, de pequenas dimensões, que permita acomodar todos os sistemas do VASAR;
- Desenvolver e montar sistema de alimentação baseado em painéis solares;
- Desenvolver e montar unidade de controle embarcada, responsável pelo gerenciamento dos sistemas do veículo e comunicação com a estação base;
- Desenvolver e montar unidade de comunicação embarcada, baseada em tecnologia de rádio digital em faixa de frequência livre de licenciamento;

- Desenvolver e montar unidade de comunicação fixa na barragem, com conexão Ethernet, por rádio ou cabeada, à rede intranet da CHESF e com link via rádio digital com a respectiva unidade embarcada;
- Desenvolver e montar sistema de propulsão e direção do veículo autônomo aquático, que permita o seu deslocamento para locações de análise pré-programadas, atualizáveis remotamente;
- Desenvolver e montar sistema anti-furto e de proteção do veículo de modo a garantir sua integridade quanto a compartilhamento do meio aquático com outras embarcações, bem como garantir a proteção dos sistemas contra ações de depredação ou furto;
- Desenvolver e montar unidade de sensoriamento de obstáculos, profundidade e ancoragem, que permita ao veículo se desviar de objetos na direção de seu deslocamento, que informe a profundidade para fins de medição das grandezas físico-químicas da água e que permita estacionar o veículo em uma posição fixa no reservatório.
- Desenvolvimento de rotinas para: gravação das informações coletadas em banco de dados; tratamento e correlação dos dados de modo a gerar diagnósticos sobre as condições da água; monitoramento dos sistemas do VASAR com geração de alarmes indicadores de condições de falha; configuração de rotinas de análises contemplado aspectos como locais para realização das análises e de uma Interface Homem Máquina (IHM), que apresente em uma tela com a imagem do reservatório onde o sistema esteja atuando a posição geográfica do veículo e outras informações do sistema, análises e diagnósticos.
- Desenvolvimento de aplicação WEB, com interface IHM equivalente à descrita acima, para acesso aos dados, diagnósticos e posicionamento do VASAR.
- Desenvolver e montar plataforma de atracação do VASAR.

Nas [Figura 1](#), é exibida uma representação em diagrama de blocos do sistema computacional do VASAR.

2.2 Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios

O VASAR consiste de uma plataforma para alocação de todos os sensores necessários à análise das características das águas de reservatórios. O VASAR deve realizar continuamente missões automáticas de verificação de qualidade da água de um reservatório. Para isso, o veículo deve contar com um sistema de baterias com alimentação baseada

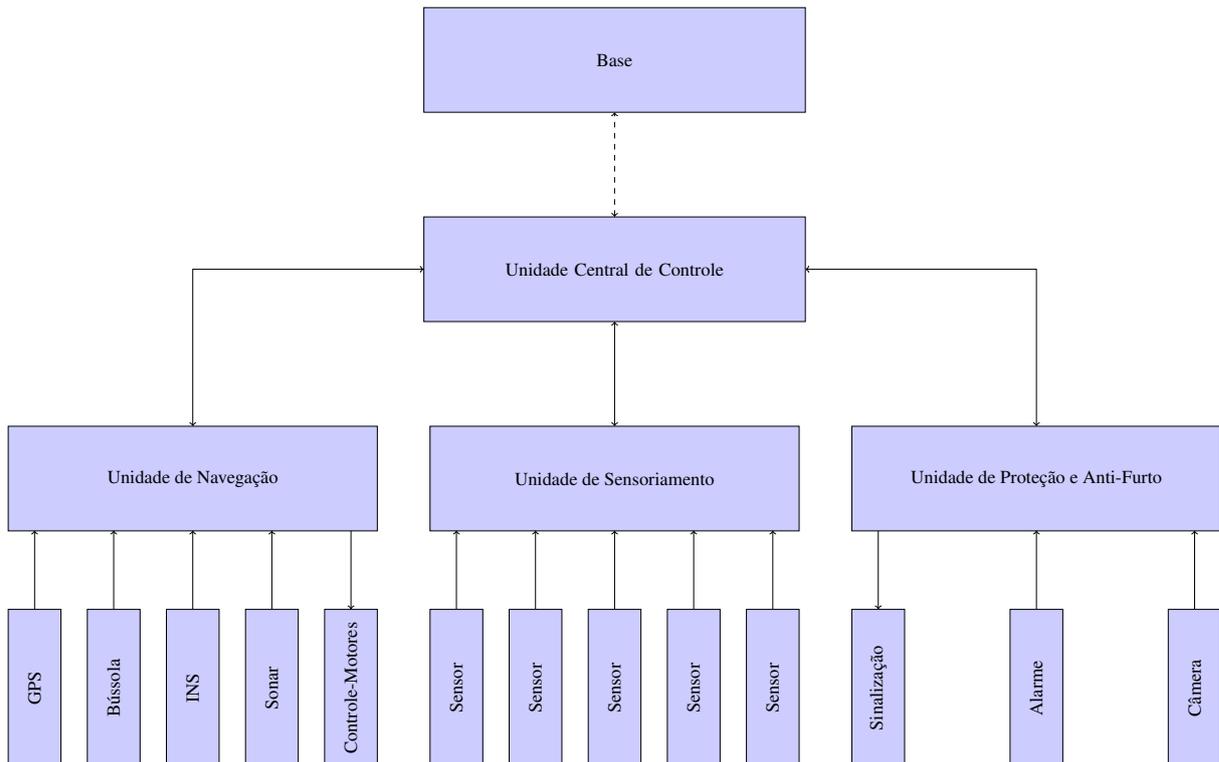


Figura 1 – Representação em diagrama de blocos do sistema computacional do VASAR .

em painéis solares, garantindo assim sua autonomia. Nas Figuras 2 e 3, são exibidas imagens da configuração mecânica do VASAR.

A plataforma deverá dispor de um sistema de localização para determinar com precisão seu posicionamento geo-referenciado. O sistema GPS pode ser usado para esta tarefa, mas sua baixa precisão impede seu uso para fins de controle da plataforma. A solução para este problema consiste em um sistema completo de localização por fusão de dados GPS/INS/Magnetômetro. Uma INS (Inertial Navigating System) é na verdade um sistema que estima o deslocamento relativo de um veículo por meio da integração numérica de medidas de aceleração e velocidade de rotação dos três eixos no espaço. Estas medidas são feitas por acelerômetros e giroscópios, e contribuem para determinar a posição e a atitude (orientação) no espaço. Também, para auxiliar na orientação, devem ser feitas medidas das orientações locais do campo magnético (magnetômetro) e da linha de ação da força gravitacional (acelerômetro). Este tipo de sistema como um todo é bastante confiável, podendo apresentar erros de posicionamento inferiores a 50cm no espaço. Esta precisão pode ser ainda maior se uma estação de terra prover medidas GPS locais, usadas para correção de um fator que provoca grande erro no sistema GPS, resultando assim em um sistema GPS diferencial.

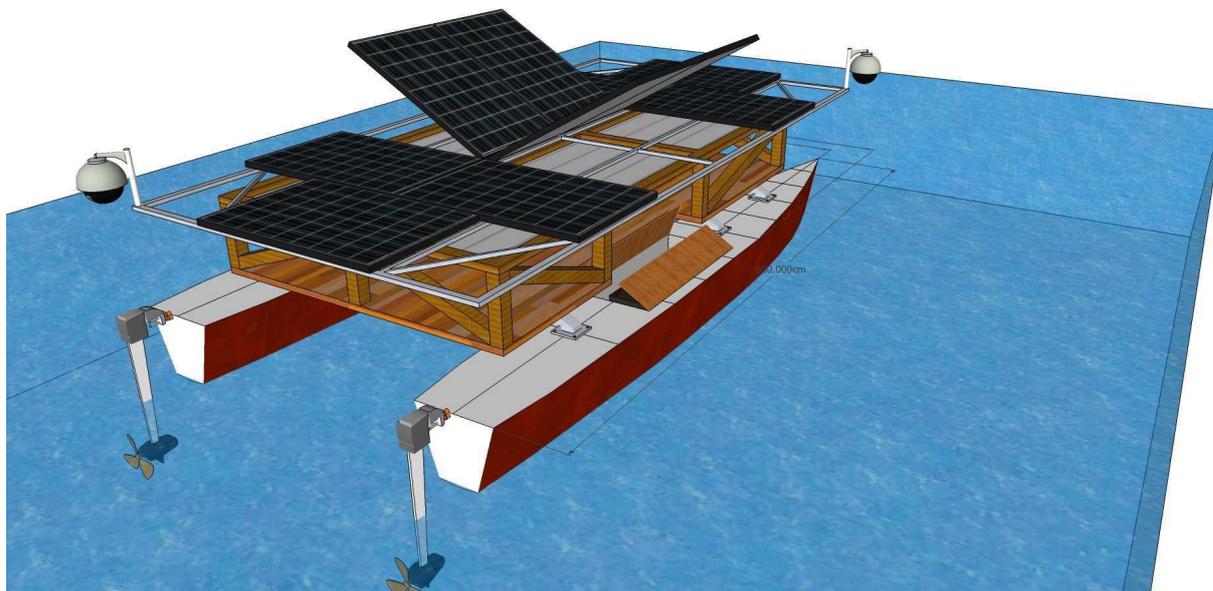


Figura 2 – Configuração Mecânica Proposta do VASAR.

Fonte: Mikael Pereira Belo Themoteo

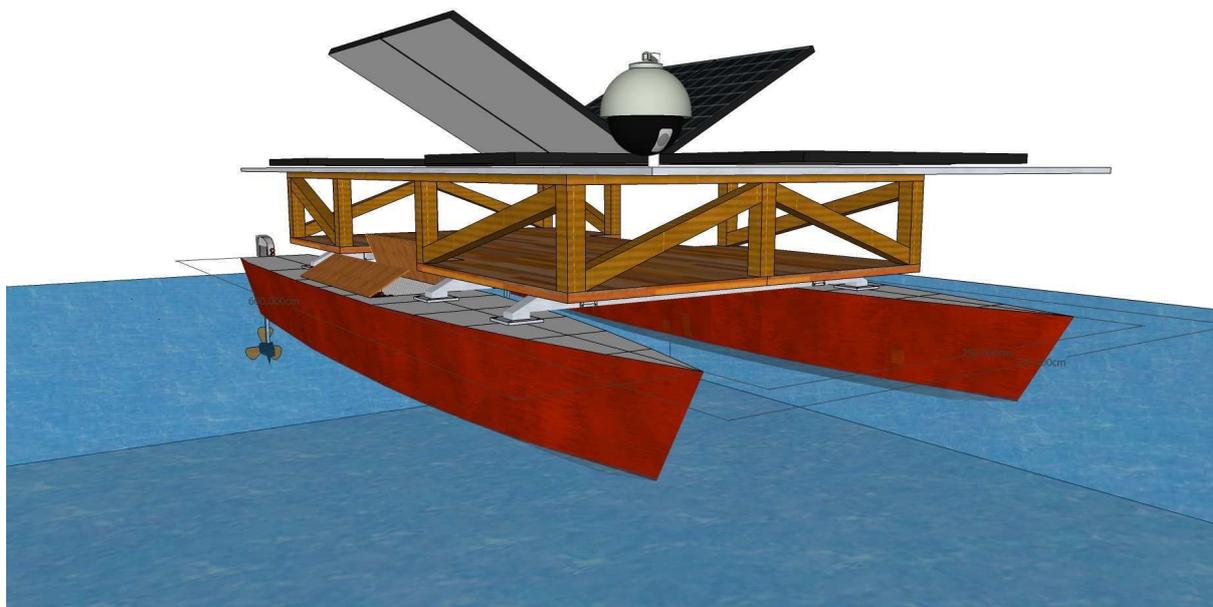


Figura 3 – Configuração Mecânica Proposta do VASAR.

Fonte: Mikael Pereira Belo Themoteo

3 Sistema de Navegação e Controle

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de estratégias de navegação e controle para possibilitar a autonomia do VASAR. Em resumo, o veículo terá três modos de controle: controle manual, necessário para manobras que exigem grande precisão, como quando necessário aportar para possível manutenção; controle automático de trajetória, utilizado na maior parte do tempo para levar o barco a seu destino; e controle de desvio de obstáculos, utilizado quando forem encontrados obstáculos e necessário mapear e seguir uma trajetória diferente da pré-definida. Neste capítulo, é descrito o modo ‘controle automático de trajetória’, que é o foco principal deste trabalho.

3.1 Modelo do VASAR

Para realizar o projeto de controle do VASAR, um modelo matemático simplificado do barco foi gerado. Embora um modelo complexo pudesse captar melhor a dinâmica do barco (4), um modelo simples é suficiente para realizar o projeto de controle. Este modelo simplificado é gerado partindo de várias hipóteses, tais como comportamento linear nas faixas de operação; simetria perfeita do barco, como centro de massa exatamente no centro geométrico do barco; dinâmica nula dos atuadores, visto que eles são bem mais rápidos que o barco; desacoplamento entre os movimentos de translação e rotação (orientação); etc.

3.1.1 Arrasto

Ao se deslocar em um fluido, um corpo rígido está sujeito a uma força oposta ao movimento relativo entre o corpo em movimento e o fluido. Esta força é resultante de vários efeitos, como o efeito de empurrar o fluido para abrir passagem para a passagem do corpo e a fricção entre as laterais do corpo e o fluido. Esta força é chamada de arrasto. O arrasto depende de diversos fatores, tais como características do fluido e propriedades do objeto em movimento. Na [Figura 4](#), é exibida uma representação do fenômeno de arrasto. A força devido ao arrasto pode ser expressa pela seguinte Equação

$$F_d(t) = \frac{1}{2} \rho A_s C_d v^2(t) \quad (3.1)$$

na qual: ρ é a densidade do fluido; A_s é a área da secção transversal em contato com o fluido; C_d é o coeficiente de arrasto, que depende de diversos fatores, tais como forma do objeto, a fricção entre as laterais do objeto, área da secção transversal em contato com o fluido, etc; e v é a velocidade tangencial do barco.

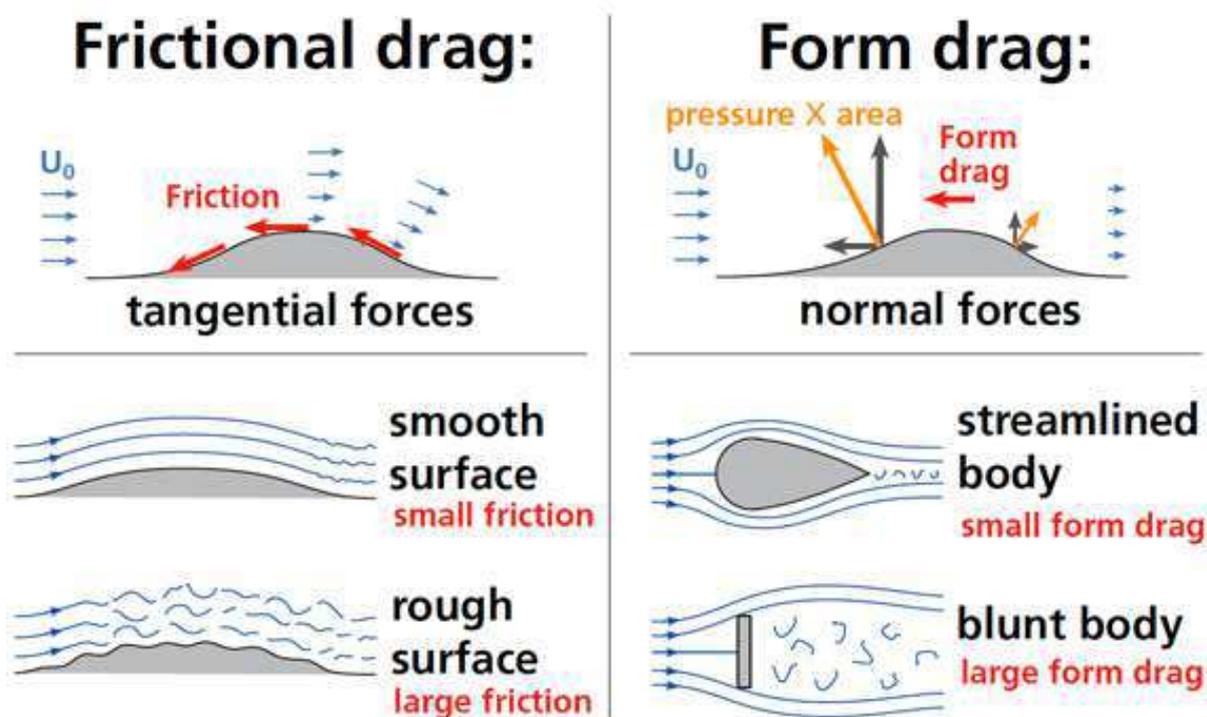


Figura 4 – Representação explicativa do fenômeno de arrasto.

Fonte: <http://people.oregonstate.edu/~warnersa/research_phd.html>, acessado em 15 de fevereiro de 2014.

Para os fins propostos neste trabalho, a representação da Equação 3.1 é um tanto inconveniente. É introduzida a seguinte representação

$$F_d(t) = Av^2(t) \quad (3.2)$$

onde o parâmetro A engloba todos os parâmetros não dependentes da velocidade na equação de arrasto.

Da mesma forma que o movimento de translação está sujeito a uma força de arrasto, o movimento de rotação (mudança de direção) também está. A força de arrasto no movimento de rotação é análoga a expressa pela Equação 3.2, expressa aqui após simples alterações

$$F_\delta(t) = B\omega^2(t) \quad (3.3)$$

em que ω representa a velocidade angular (mudança de posição), e o parâmetro B engloba todos os parâmetros não dependentes da velocidade na equação de arrasto.

3.1.2 Movimento de Translação

Para mover o barco, dois propulsores ligados à parte traseira dele são utilizados. Cada propulsor é composto por uma hélice acoplada a um motor CC (corrente contínua), o qual está ligado a um transistor e seu acionamento se dá pela aplicação de um sinal

de PWM (*Pulse-Width Modulation*) à base do transistor. Cada motor gera uma força independente no barco, fazendo ele se mover para frente. Um comando PWM aplicado ao transistor induz uma corrente equivalente no motor CC que gera força de rotação na hélices, resultando em movimento do barco. A força criada por meia da aplicação move o barco. Considerando que a força gerada em um motor CC é aproximadamente linear à aplicação do ciclo de PWM, a força aplicada ao barco no instante de tempo t pode ser expressa por

$$F_t(t) = F_l(t) + F_r(t) = au_l(t) + au_r(t) = a[u_l(t) + u_r(t)] \quad (3.4)$$

na qual: a é um parametro que relaciona a entrada à força gerada; F_l e F_r são as forças aplicadas respectivamente aos lados esquerdo e direito do barco; e u_l e u_r são os sinais de controle aplicados respectivamente aos motores esquerdo e direito.

Com base nas considerações previamente estabelecidas, o movimento de translação do barco pode ser descrito por

$$\dot{v}(t) = -\frac{F_d(t)}{M} + \frac{F_t(t)}{M} = -\frac{A}{M}v^2(t) + \frac{a}{M}[u_l(t) + au_r(t)] \quad (3.5)$$

na qual: $v(t)$ é a velocidade tangencial do barco no instante de tempo t ; M é a massa total do barco; e $F(t)$ é a força aplicada ao barco na direção tangencial no instante de tempo t .

A velocidade tangencial máxima de operação do barco é de 2m/s. Linearizando a Equação 3.5 por meio de expansão em séries de Taylor (5), é obtida

$$\dot{v}(t) = -2\frac{A}{M}v(t) + \frac{a[u_l(t) + au_r(t)]}{M} \quad (3.6)$$

que representa um boa aproximação em todos os pontos da faixa de operação. A aproximação usando mínimos quadrados (6) leva ao mesmo resultado.

3.1.3 Movimento de Rotação

O controle de orientação do VASAR é realizado utilizando uma estratégia diferencial. Neste tipo de estratégia, considerando o barco livre de perturbações, se ambas as forças aplicadas ao barco, F_l e F_r , são iguais, o barco não sofre mudança de direção, se as forças forem diferentes, um torque é aplicado ao barco, resultando em mudança de direção, ou rotação. O torque aplicado é dado por

$$\tau = -\frac{F_l}{R} + \frac{F_r}{R} = -\frac{a}{R}u_l(t) + \frac{a}{R}u_r(t) = \frac{a}{R}[-u_l(t) + u_r(t)] \quad (3.7)$$

onde R corresponde à metade da distância entre os eixos do dois motores.

Com base nas considerações previamente estabelecidas, a dinâmica do ângulo de direção do barco $\theta(t)$ é descrito da seguinte forma

$$\dot{\theta}(t) = \omega(t) \quad (3.8)$$

$$\dot{\omega}(t) = -\frac{B}{M}\omega^2(t) + \frac{1}{R^2M}\tau(t) \quad (3.9)$$

$$\dot{\theta}(t) = \int \omega(t)dt = \int \left[-\frac{B}{M}\omega^2(t) + \frac{1}{R^2M}\tau(t) \right] dt \quad (3.10)$$

$$\ddot{\theta}(t) = -\frac{B}{M}\dot{\theta}^2(t) + \frac{1}{R^2M}\tau(t) \quad (3.11)$$

A equação [Equação 3.11](#) é não linear. É esperado que os valores de $\dot{\theta}$ sejam pequenos, assim, uma aproximação linear adequada da [Equação 3.11](#) é

$$\ddot{\theta}(t) = -\frac{B}{M}\dot{\theta}(t) + \frac{1}{R^2M}\tau(t) \quad (3.12)$$

3.1.4 Representação em Espaço de Estados

Com base nas equações descritas nas subseções [3.1.2](#) e [3.1.3](#), uma representação em espaço de estados foi obtida. A representação contínua omitindo a variável tempo é apresentada a seguir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -2\frac{A}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{a}{RM} & -\frac{a}{RM} \\ \frac{a}{M} & \frac{a}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_l \\ u_r \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

ou numa forma mais compacta

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3.14)$$

3.2 Estratégia de Controle

Pela especificação de projeto, o barco deve seguir uma trajetória pré-definida direcionada a pontos específicos para realização de medições. Desta forma, foi gerado um sistema de navegação e controle. Uma representação em diagrama de blocos do sistema de controle pode ser vista na [Figura 5](#).

Nesta seção, são descritas as partes referentes à representação exibida na [Figura 5](#) e apresentada sua interligação para a construção do sistema completo.

3.2.1 Geração de Referência

Conforme mencionado anteriormente, o barco deve seguir uma trajetória pré-definida direcionada a pontos específicos para realização de medições. Um exemplo de trajetória pode ser visto na [Figura 6](#), em que a linha em vermelho corresponde a trajetória especificada e os pontos verdes correspondem aos pontos de parada para medição. A trajetória é contínua, no entanto pode ser discretizada, resultando em uma interligação

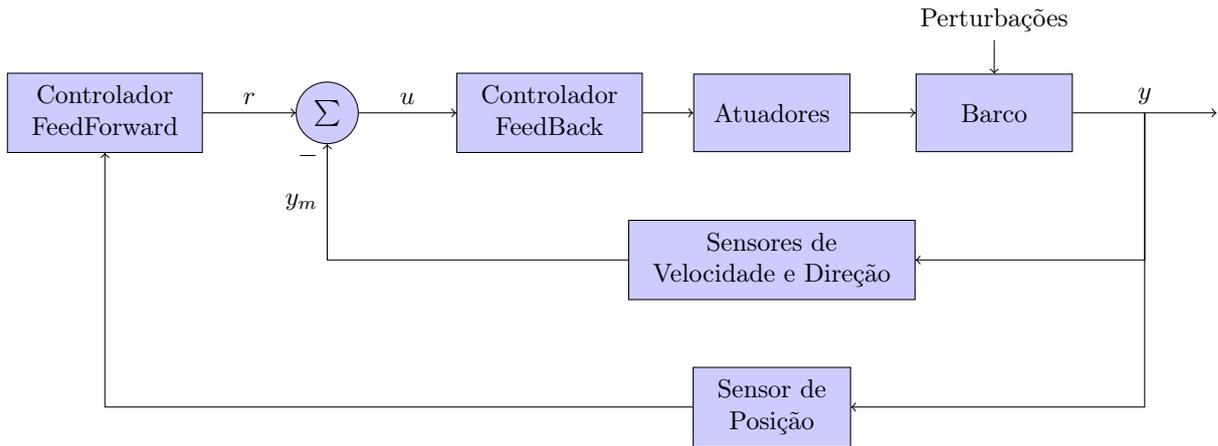


Figura 5 – Representação em diagrama de blocos do sistema de controle de trajetória do VASAR.

de pontos a uma distância d do próximo ponto. Assim, a estratégia de navegação adotada é: i) estando o barco em uma posição, controlar sua orientação para que o mesmo siga em direção ao próximo ponto da trajetória e ii) estando o barco próximo a um ponto de parada, ajustar para que a sua velocidade seja zero durante o intervalo de tempo de medição.

O sistema de geração de referência (Controlador FeedForward na Figura 5) recebe a posição do barco via GPS e calcula a distância entre a posição atual e o ponto de referência. Se a distância for menor que um valor pré-estabelecido, é considerado que o barco chegou naquele ponto e o ponto de referência é alterado para o próximo ponto. Com base na posição atual e na posição destino, o sistema de geração de referência calcula o ângulo necessário para a trajetória em direção ao próximo ponto e envia ao controlador FeedBack. Similarmente, quando o barco está a uma distância de um ponto de parada menor que um valor pré-estabelecido, é considerado que o barco chegou naquele ponto e o valor de referência de velocidade é ajustado para zero.

3.2.2 Controle de Direção e Velocidade

3.2.2.1 Controle de Direção

O controle de direção tem como base a definição de um torque necessário para mudar a direção do barco para a direção desejada. Uma bússola é utilizada para determinar a direção atual do barco. O controlador então usa a diferença entre o ângulo medido e o ângulo de referência para determinar o torque necessário para ajustar a direção do barco. Então, este torque é transformado em uma diferença de sinais aplicados aos motores CC. Neste caso, um controlador Proporcional (P) ou um controlador Proporcional-Derivativo (PD) é mais apropriado que um Proporcional-Integral-Derivativo (PID), pois a ação de controle em regime permanente deve ser nula (o sistema já contém um integrador). Assim,

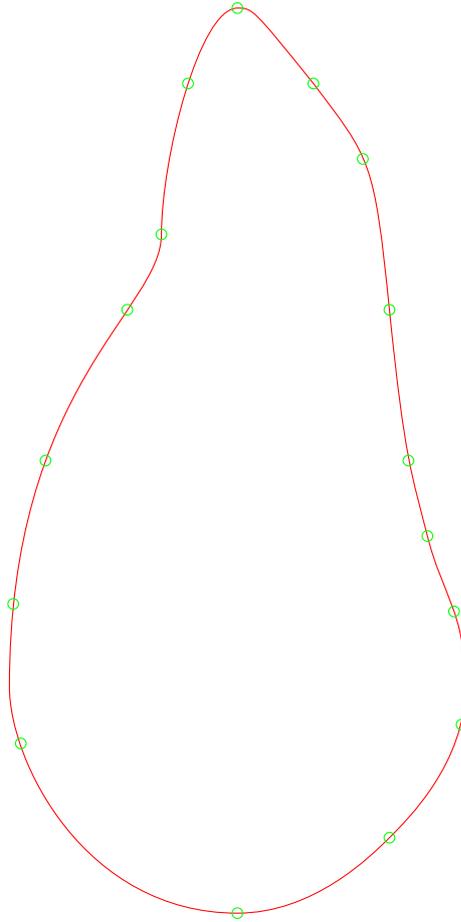


Figura 6 – Exemplo de trajetória.

a lei de controle definida é dada por

$$\tau_r = K_p e_\theta + K_d \frac{de_\theta}{dt} \quad (3.15)$$

com

$$e_\theta = \theta_r - \theta \quad (3.16)$$

e K_p e K_d sendo os ganhos proporcional e derivativo respectivamente. Os sinais de controle aplicados são

$$u_l = \frac{\frac{F}{2} - \tau}{a} \quad (3.17)$$

e

$$u_r = \frac{\frac{F}{2} + \tau}{a} \quad (3.18)$$

3.2.2.2 Controle de Velocidade

O controle de direção tem como base a geração de uma força necessária para manter ou aumentar a velocidade do barco. Uma unidade inercial é utilizada para determinar a velocidade e aceleração do barco, sendo apenas a velocidade utilizada na estratégia de controle. O controlador então usa a diferença entre a velocidade de referência e a

velocidade atual para determinar a força necessária para ajustar a direção do barco. Neste caso, não é exigência de projeto que a velocidade tenha um valor fixo, portanto, um controlador Proporcional (P) é o mais adequado para realização de controle. Assim, a lei de controle definida é dada por

$$F = \begin{cases} K_p e_v & e_v > 0 \\ 0 & e_v \leq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

com

$$e_v = v_r - v \quad (3.20)$$

e K_p sendo o ganho proporcional do controlador. O limitante de F em zero deve ao fato de que não há como impor uma tensão de alimentação negativa aos motores. O valor de F é determinado e utilizado nas Equações 3.17 e 3.18.

3.2.2.3 Considerações Práticas

Conforme a proposta de montagem e ligação dos motores (mostrada no [Capítulo 4](#), os motores não terão capacidade de girar no sentido inverso. Assim, os sinais de controle aplicados ao motor esquerdo são nulos se a [Equação 3.17](#) for negativa e os sinais de controle aplicados ao motor direito são nulos se a [Equação 3.18](#) for negativa.

4 Implementação do Sistema

4.1 Construção Mecânica

Para testar a implementação da estratégia de controle, um modelo miniaturizado do VASAR teve que ser construído. Este modelo miniaturizado também deverá ser útil para testar outros dispositivos e equipamentos que serão parte importante do VASAR, como o sonar para detecção de obstáculos. Um esquema simplificado da estrutura mecânica desenvolvida é exibido na [Figura 7](#). Os elementos que compõe a estrutura são suficientes para garantir flutuação, rigidez e suporte aos componentes eletrônicas necessárias ao controle do barco.

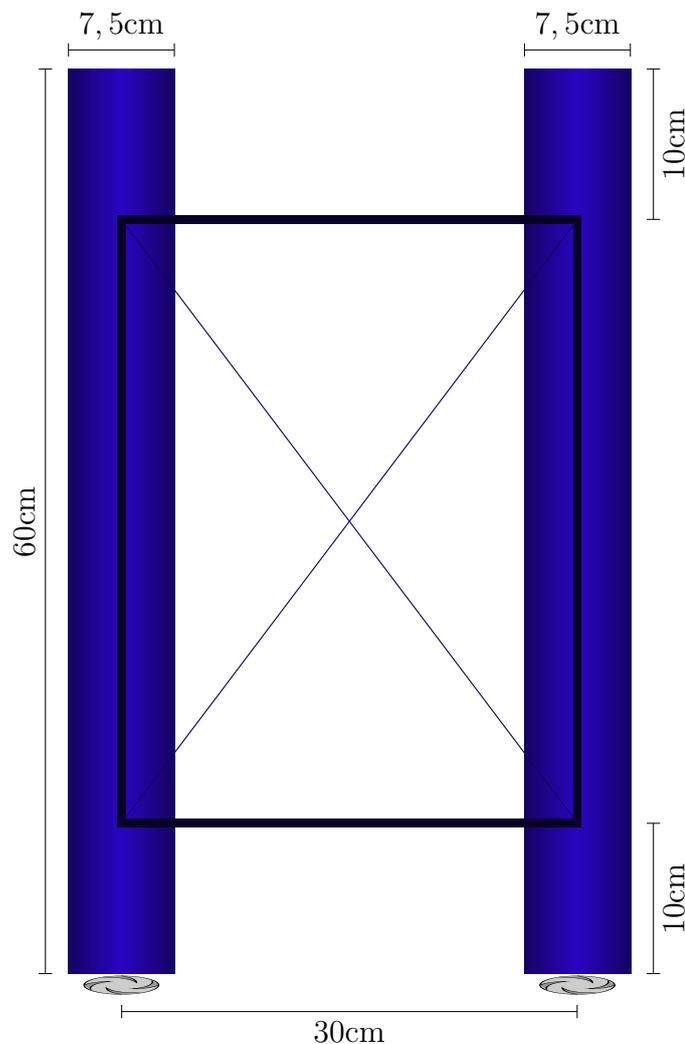


Figura 7 – Esquema da construção mecânica desenvolvida.

Dois pedaços de cano feitos de PVC com 60cm de comprimento e 7,5cm de diâme-

tro são utilizados para compor a estrutura flutuante do veículo. Estas canos são vedados com duas tampas também feitas de PVC, impedindo, assim, a entrada de água e garantindo a flutuação da estrutura. Os dois pedaços de cano são ligados por meio de duas hastes de alumínio garantindo uma distância fixa entre seus eixos de 30cm. Outras duas hastes de alumínio, bem como duas varas de arame são utilizadas para garantir a rigidez da estrutura e servir de suporte para outras partes.

Para garantir a capacidade de locomoção do barco, uma hélice propulsora acoplada a um motor CC é colocada em cada parte traseira dos canos. Uma estrutura de PVC fixada na parte traseira de cada cano é utilizada para realização do acoplamento dos motores e propulsores. Em cada estrutura, uma hélice propulsora está conectada à parte inferior para ficar em contato com a água, e um motor CC está fixado na parte superior para garantir a não existência de contato com a água. Os propulsores são acoplados aos motores por meio de correias para garantir a transmissão de energia mecânica do motor ao propulsor.

A construção mecânica têm uma massa total de 1kg e suporta uma massa de até 4kg sobre ela sem afundar.

4.2 Implementação Eletrônica

Um sistema eletrônico envolvendo sensores, atuadores, interfaces de comunicação e controladores é utilizado para realizar a estratégia de controle. Um diagrama de blocos deste sistema eletrônico é exibido na [Figura 8](#). O centro do sistema eletrônico é um microcontrolador PIC16F877A (7), desenvolvido pela Microship. O algoritmo de controle é implantado neste microcontrolador, ao qual são integrados: um dispositivo AT-65 GPS Active Antenna, por meio de uma interface de comunicação ET-112 (8), para determinação da posição; uma bússola eletrônica, para determinação da orientação do barco; uma unidade de navegação inercial, para medição da velocidade do barco; e um circuito de acionamento dos motores.

O circuito de alimentação do sistema eletrônico é composto por uma bateria Konder, provento uma tensão de 12V e uma corrente máxima de 2,5A; e uma bateria Panasonic, provento uma tensão de 9V. A bateria Konder é utilizada para alimentação dos motores, que requerem uma corrente relativamente alta quando comparada com a corrente requerida pelos diversos elementos que compõem o sistema eletrônico. A bateria Panasonic é utilizada para alimentação dos dispositivos eletrônicos de pouca potencia (microcontrolador, interface do GPS, GSP) após passar por um regulador de tensão 7805, proporcionando uma regulagem de tensão de 9V para 5V.

A interface de comunicação com o dispositivo GPS controla a aquisição de dados do GPS e o envio destes dados ao microcontrolador. A troca de dados com o microcontrolador é realizada por meio de comunicação serial RS232. Alguns parâmetros da interface podem

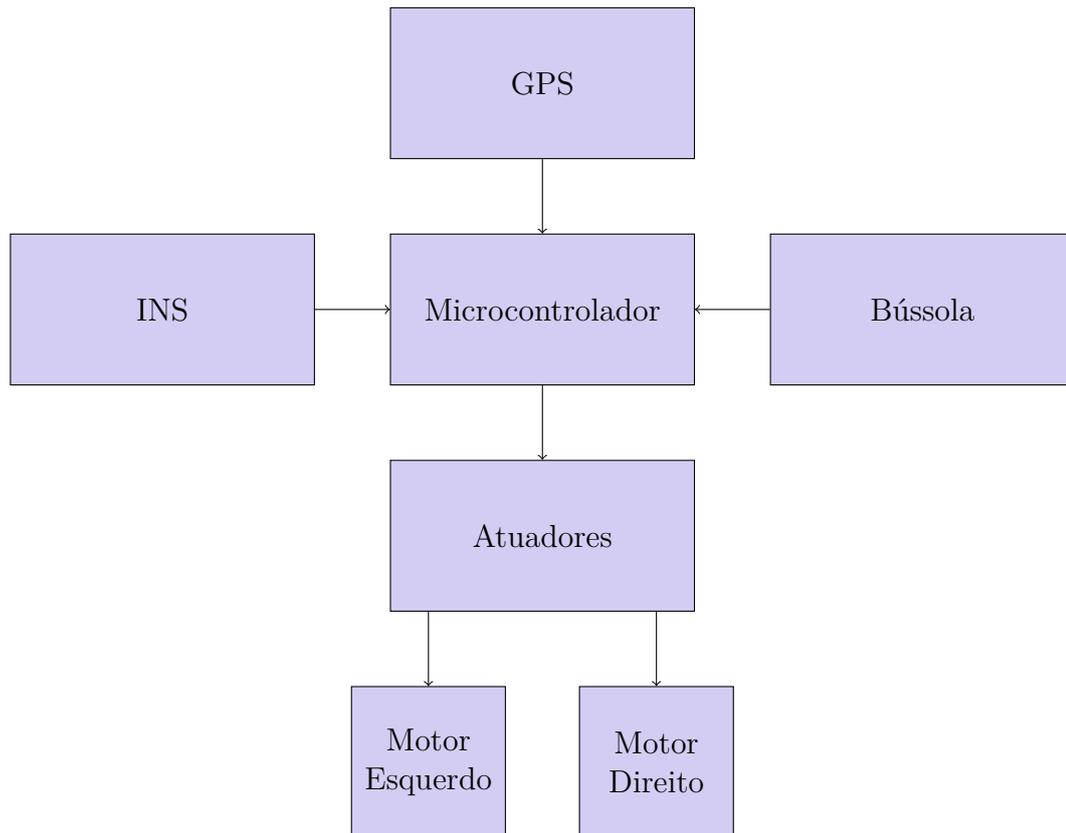


Figura 8 – Diagrama de blocos do sistema eletrônico.

ser configurados, tais como taxa de dados e especificação das mensagens transmitidas. O período de amostragem para determinação da posição é de 1 segundo.

O circuito de acionamento dos motores é composto de dois transistores npn TIP122 conectados aos pinos RC1 e RC2 do PIC, que correspondem às saídas de PWM e aos motores CC. A aplicação de sinais de PWM com larguras distintas em cada canal possibilita mudar a direção do barco. Além disso, é possível controlar a velocidade do barco variando a largura do PWM. Na [Figura 9](#), é exibido o circuito de acionamento dos motores.

Infelizmente, a unidade inercial e a bússola eletrônica não foram adquiridas até a data de conclusão deste trabalho, não estando disponíveis para integração ao sistema e realização de testes, ficando, portanto, de fora da implementação.

Com toda a estrutura eletrônica sobre o barco, a massa total do barco chegou a aproximadamente 2,5kg. Da [Figura 10](#) à [Figura 16](#), são exibidas fotos do modelo miniaturizado desenvolvido.

4.3 Algoritmo

Com a ausência da bússola, todo o controle de trajetória foi baseado no dispositivo GPS, que apresenta baixa precisão e acrescenta uma dificuldade na determinação da

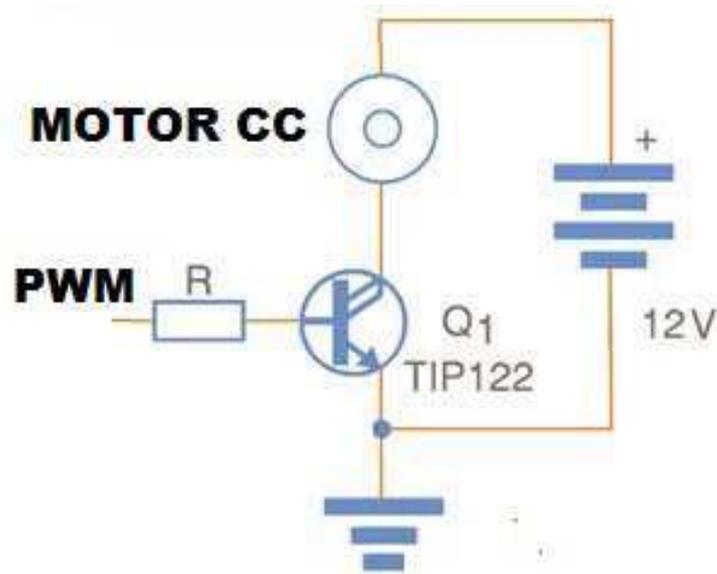


Figura 9 – Circuito de acionamento dos motores.

direção do veículo. A interface de comunicação com o GPS usa protocolo serial para comunicação. São enviadas diversas informações ao microcontrolador, sendo efetivamente utilizadas apenas as informações de latitude e longitude recebidas.

O algoritmo de funcionamento do barco foi controle seguindo uma sequência de estados com dois segundos de duração. No primeiro estado, um pulso com 50% de comprimento é aplicado a ambos os motores e a diferença entre os pontos atual e passado é utilizada para determinar a direção do barco. No segundo estado, um pulso com 0% de comprimento é aplicado a ambos os motores e a diferença entre a posição atual e a posição desejada é utilizada para determinar a direção de referência. No terceiro estado, é determinada a diferença entre o ângulo de referência e o ângulo atual. Se a diferença for negativa, é aplicado um pulso com 25% de comprimento ao motor direito e um pulso com 25% mais um valor proporcional ao módulo da diferença é aplicado ao motor esquerdo. Se a diferença for positiva, é aplicado um pulso com 25% de comprimento ao motor esquerdo e um pulso com 25% mais um valor proporcional à diferença é aplicado ao motor direito.

Para calcular o ângulo ou direção (tanto de referência quanto em curso atual), era utilizada a subtração de dois pontos (ponto destino menos ponto atual para o caso de ângulo de referência e ponto final menos ponto inicial para o caso de direção atual) da seguinte forma

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (4.1)$$

com

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_2 - x_1 \\ \Delta y &= y_2 - y_1 \end{aligned} \quad (4.2)$$



Figura 10 – Foto do modelo miniaturizado, visão frontal.

sendo x_i correspondente à longitude e y_i correspondente à latitude.

4.4 Realização Experimental

Testes experimentais foram realizados para verificação do funcionamento do modelo miniaturizado, bem como da comunicação do microcontrolador com outros dispositivos e da implementação da estratégia de controle.

Para verificação prática do sistema de controle, os testes experimentais foram realizados em um pequeno açude nos arredores da cidade de Picuí, Paraíba. O objetivo dos testes é fazer o barco chegar em um lugar específico partindo de lugares distintos e a diferentes direções.

Um local foi estabelecido para aportagem do barco. A posição estabilizada retornada pelo dispositivo GPS foi utilizado como posição de referência. As coordenadas da posição destino determinada foram $\{-6.4898, -36.3652\}$. Na ausência da bússola, o dispositivo GPS foi utilizado para determinação do ângulo tomando como base a diferença entre as posições medidas atual e passada.

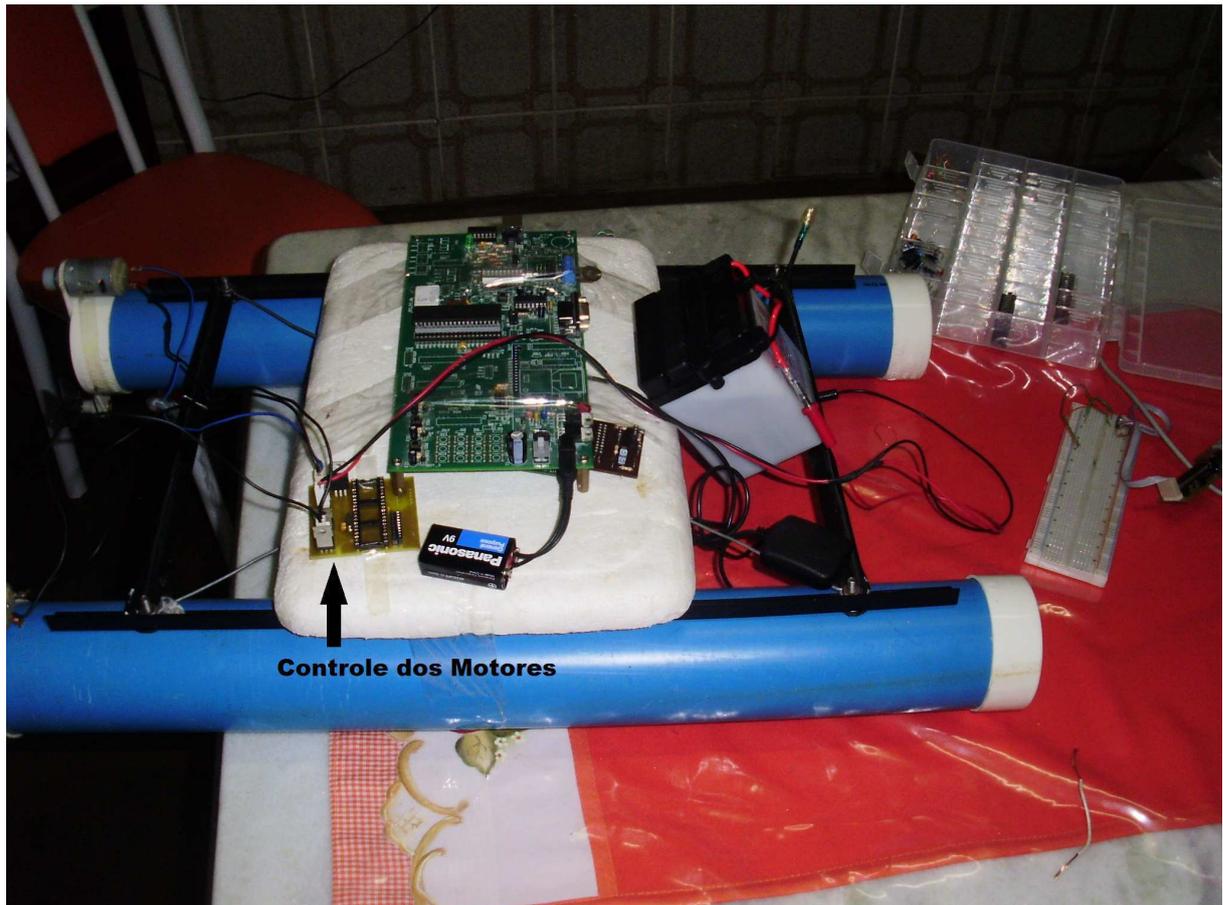


Figura 11 – Foto do modelo miniaturizado, visão lateral direita.

Foram realizados testes partindo de vários lugares e comprovado que o algoritmo realmente muda a direção do barco para uma direção voltada ao ponto definido. No entanto, na presença de perturbações, o sistema de controle não funcionava muito bem. Isso pode ser explicado pela baixa precisão do dispositivo GPS, associado a uma determinação pouco precisa da direção do barco devido aos efeitos do vento e da correnteza. Estes problemas podem ser contornados usando outros dispositivos (bússola e INS) para determinar as variáveis de estado do barco associados a técnicas avançadas de processamento, a exemplo do Filtro de Kalman.

Infelizmente, devido a memória limitada do PIC, dados experimentais não puderam ser obtidos para uma análise mais detalhada do desempenho do sistema. Porém, gravações em vídeo foram realizadas para comprovar o seu funcionamento. Da [Figura 17](#) à [Figura 19](#), são exibidas fotos da realização experimental.



Figura 12 – Foto do modelo miniaturizado, visão lateral esquerda.

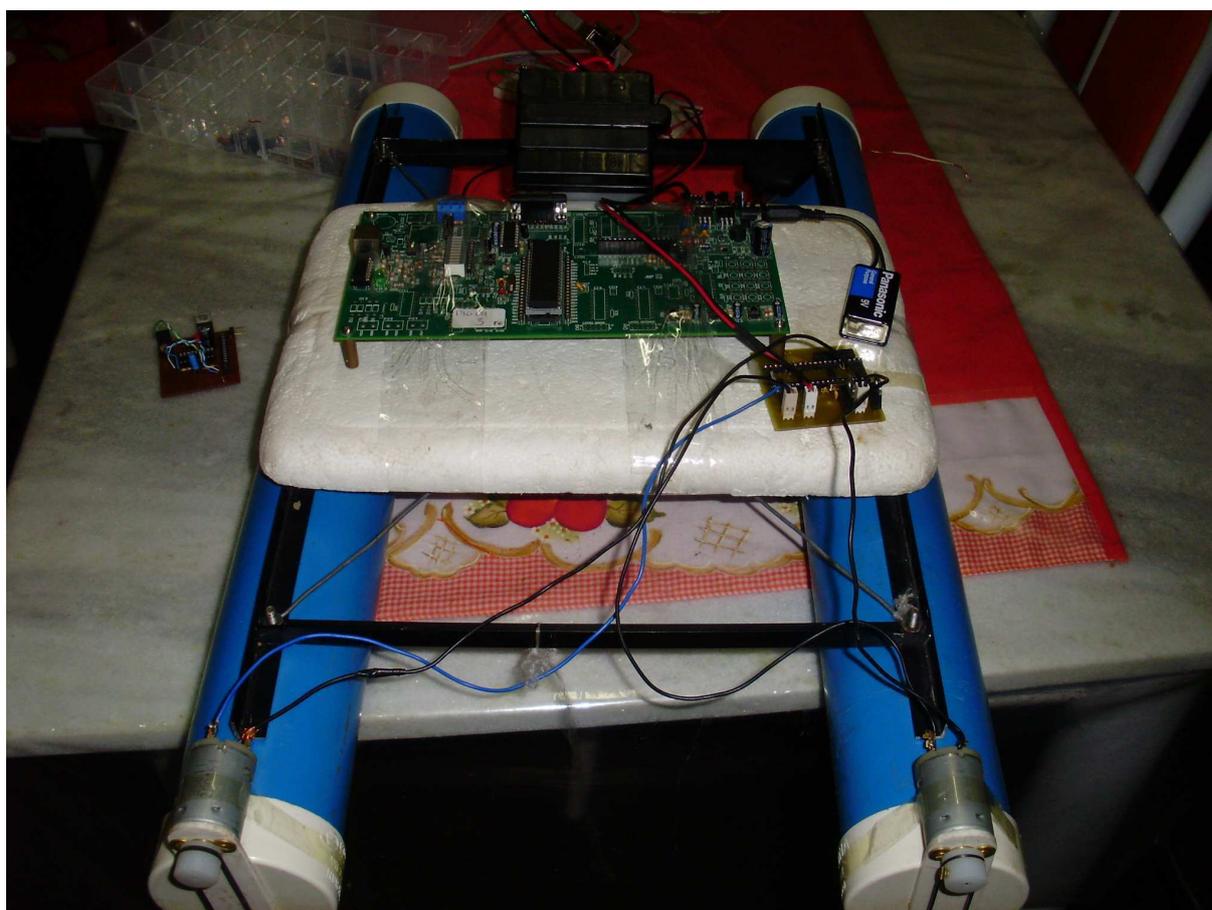


Figura 13 – Foto do modelo miniaturizado, visão traseira.

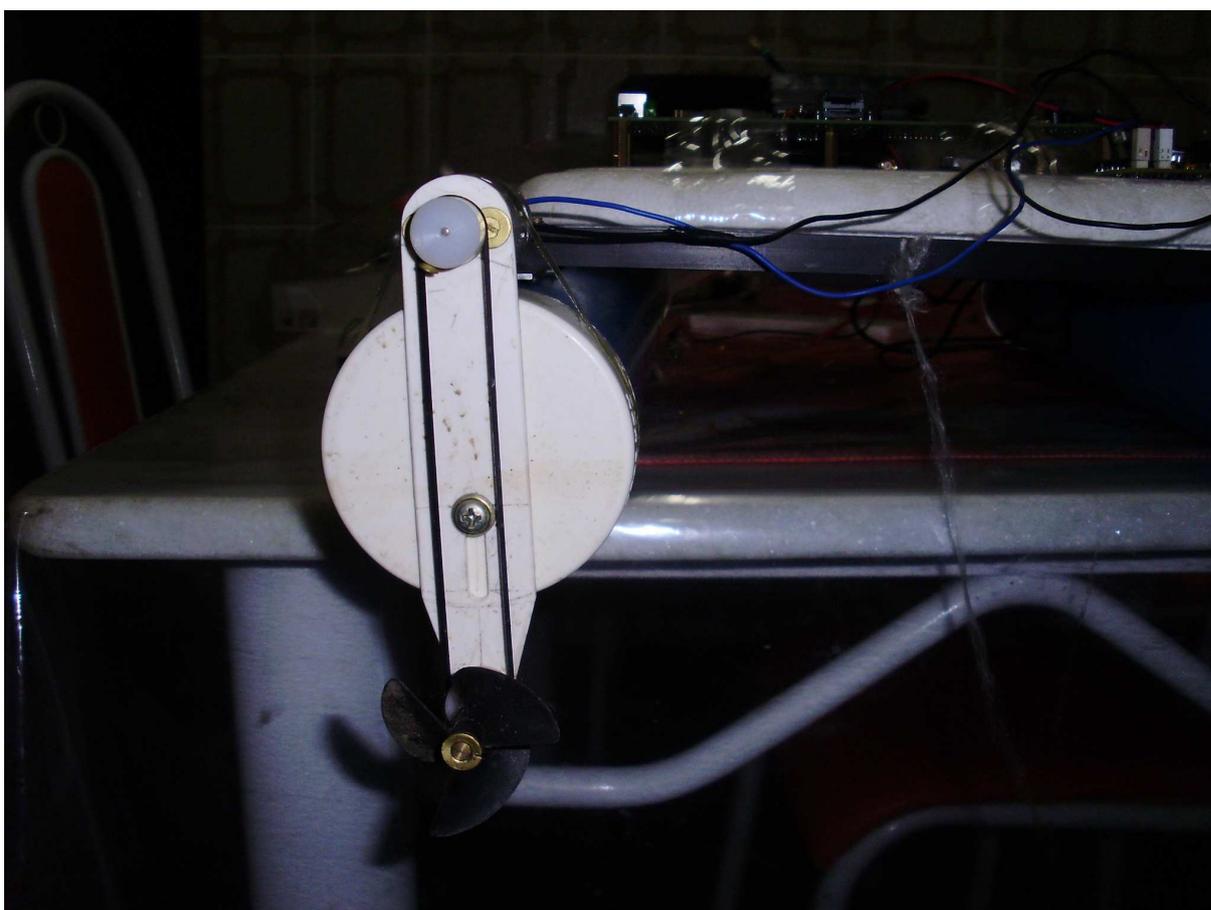


Figura 14 – Foto do propulsor esquerdo.

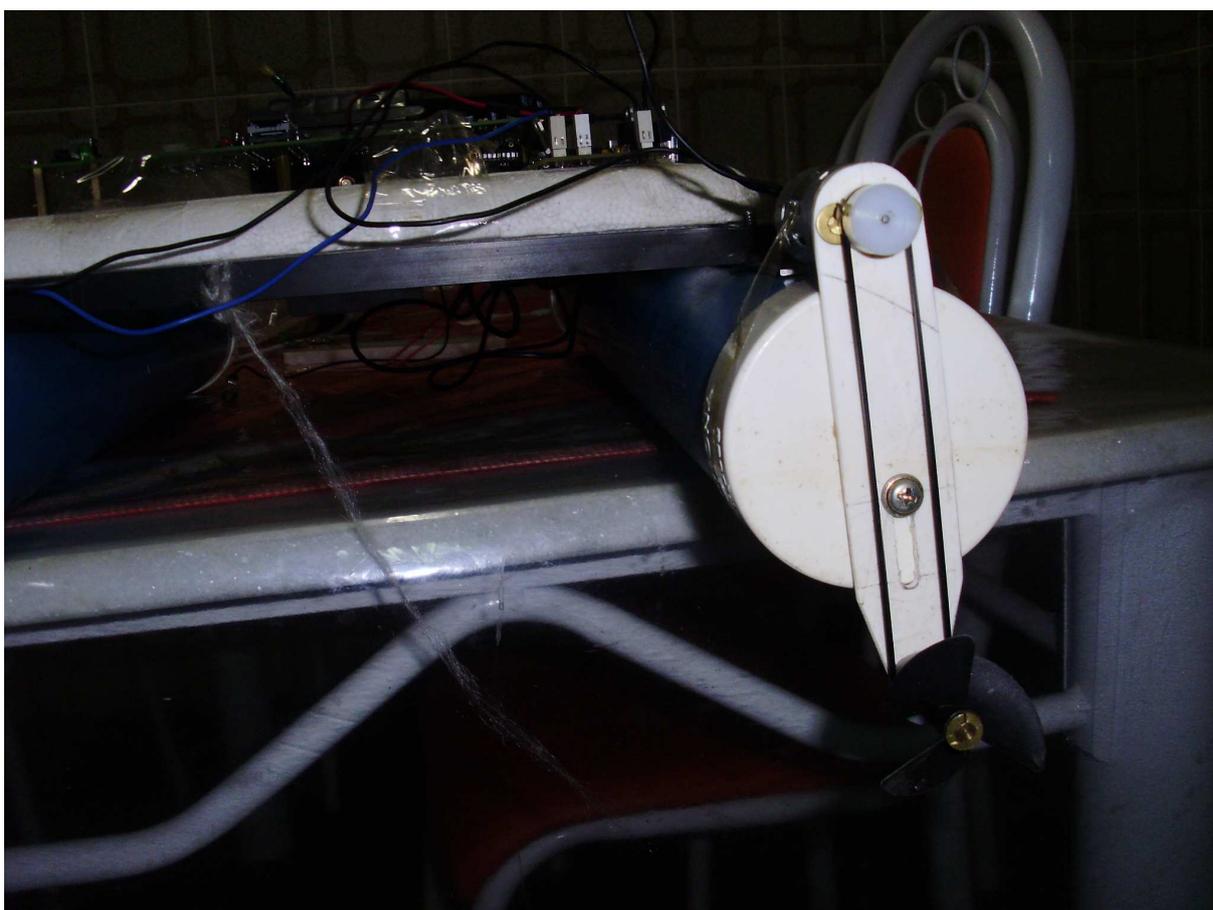


Figura 15 – Foto do propulsor direito.

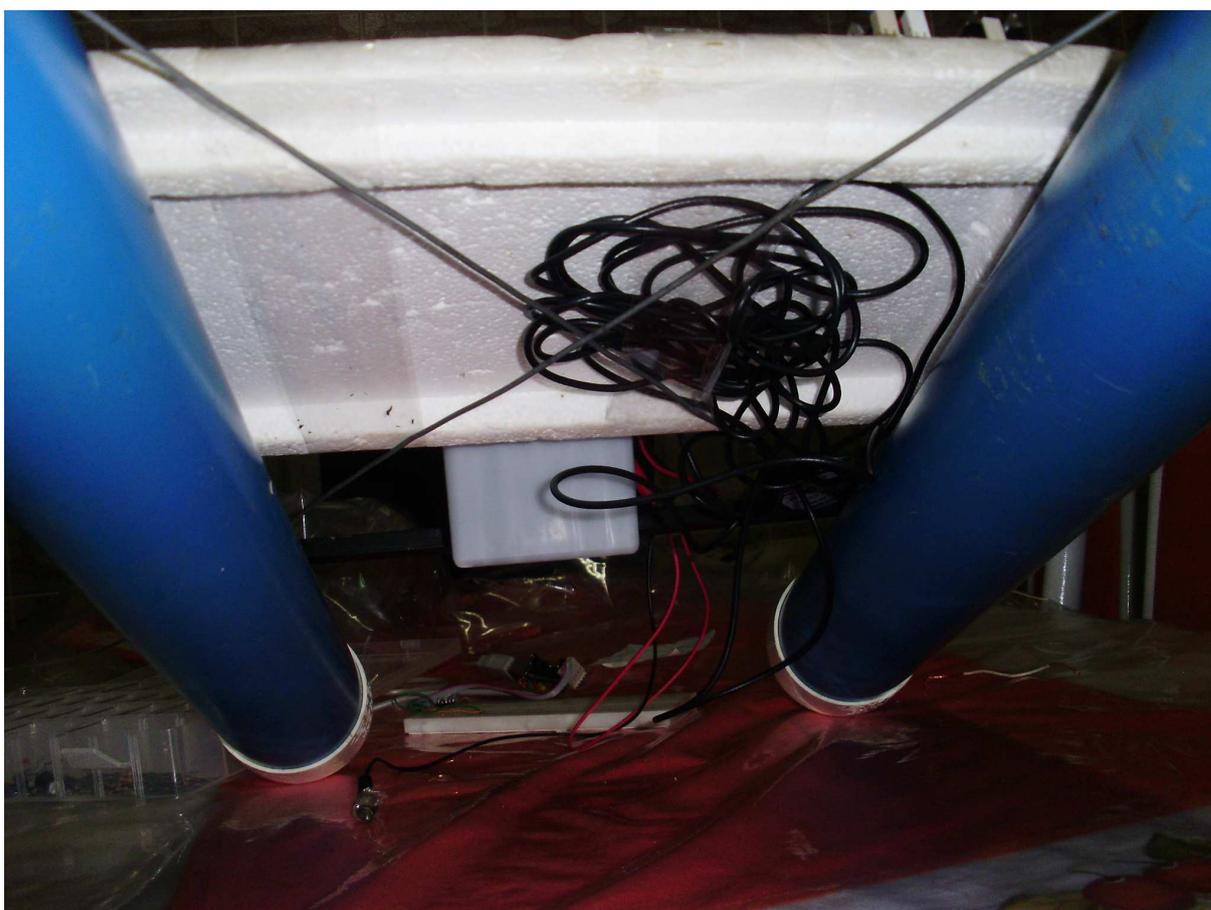


Figura 16 – Foto do modelo miniaturizado, visão inferior.



Figura 17 – Foto do barco em operação.

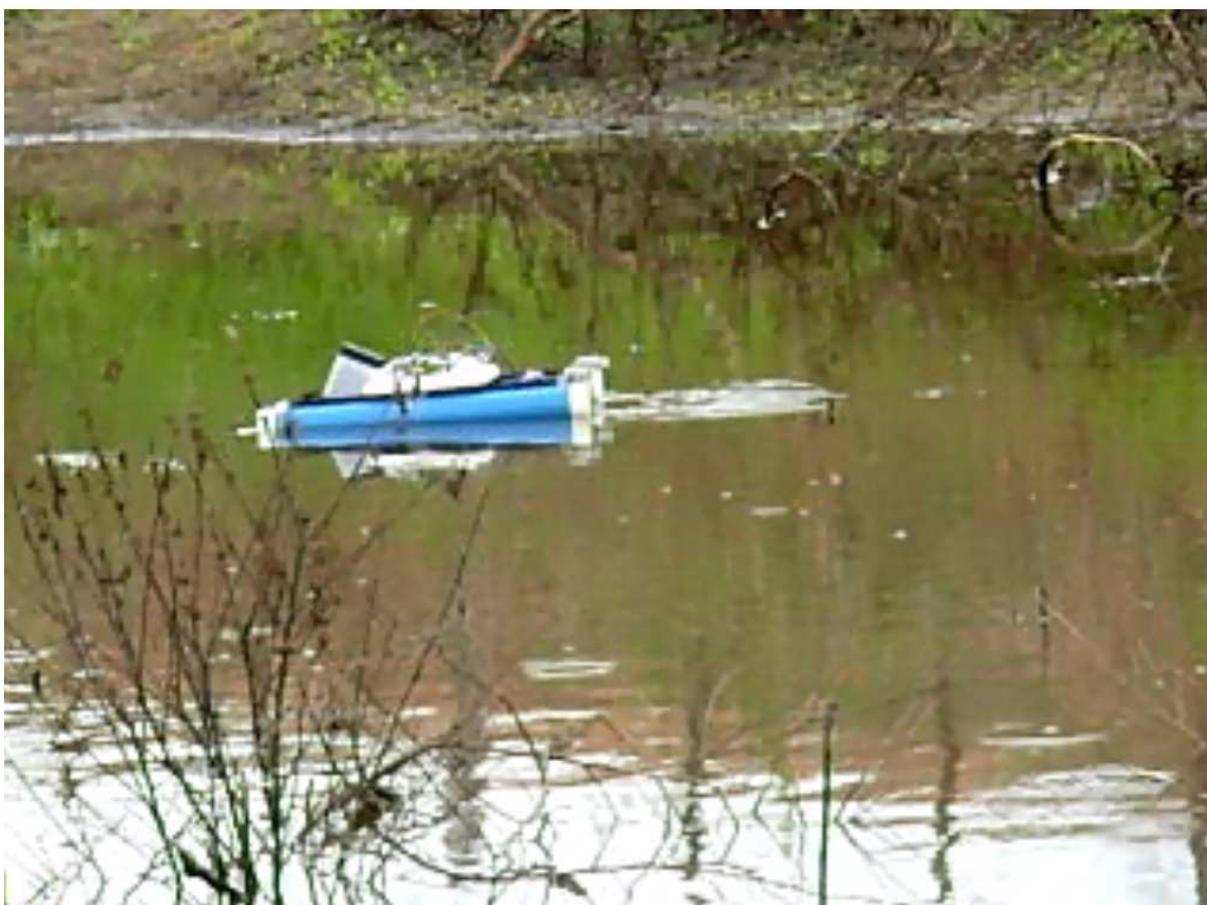


Figura 18 – Foto do barco em operação.



Figura 19 – Foto do barco em operação.

5 Considerações Finais

Neste trabalho, foi criado um modelo miniaturizado de um barco e desenvolvidas estratégias de navegação e controle para comandar a trajetória do barco. Nas seções seguintes: é apresentada uma breve síntese do trabalho desenvolvido; são levantadas algumas considerações importantes; e elencadas atividades futuras para conclusão do projeto.

5.1 Síntese do Trabalho

Neste trabalho, um sistema de navegação e controle para um veículo aquático autônomo foi apresentado. O sistema utiliza dados adquiridos para as variáveis de referência (direção e velocidade) do barco de forma a guiá-lo para o destino desejado. Usando os valores de referência, controladores são utilizados para levar as variáveis controladas aos valores de referência.

Também foi construído um modelo miniaturizado do barco, possibilitando testar o sistema desenvolvido e servindo de plataforma de testes para alguns dispositivos e estratégias dependendo das necessidades de projeto.

Testes experimentais foram realizados para verificar o funcionamento do sistema implementado. Os testes experimentais foram executados em um açude nos arredores da cidade de Picuí, Paraíba. Dados experimentais em forma de valores não puderam ser obtidos devido às limitações em memória do PIC. Porém gravações em vídeo foram realizadas para comprovar o funcionamento do sistema implementado.

5.2 Considerações

Infelizmente, devido à indisponibilidade dos equipamentos, a integração da bússola e da INS, bem como sua aplicação na estratégia de controle não pode ser realizada.

5.3 Trabalhos Futuros

Para dar continuidade ao trabalho desenvolvido e concluir a etapa de controle do barco algumas tarefas devem ser realizadas. A lista destas tarefas é apresentada a seguir:

- Integração com uma bússola eletrônica e uma INS para uma implementação mais precisa da estratégia de controle.

- Integração com um dispositivo ultrasônico para detectar obstáculos e desenvolver a estratégia de desvio de obstáculos.

Referências

- 1 ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Cálculo do volume e análise da deposição de sedimentos do reservatório de três irmãos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n. 4, p. 57, 67 2010. Citado na página 1.
- 2 CARVALHO, N. de O. et al. *Guia de práticas sedimentométricas*. [S.l.]: Aneel, 2000. Citado na página 1.
- 3 CONAMA. *Resolução CONAMA Nº 357/2005*. [S.l.], 2005. Citado na página 1.
- 4 FOSSEN, T. I. *Guidance and control of ocean vehicles*. [S.l.]: Wiley, 1994. ISBN 0471941131. Citado na página 7.
- 5 DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern Control Systems*. [S.l.]: Prentice Hall, 2011. Citado na página 9.
- 6 LJUNG, L. *System Identification: Theory for the User*. 2. ed. Upper Saddle River, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA: Prentice Hall, 1999. ISBN 0138816409. Citado na página 9.
- 7 MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PIC16F87XA Data Sheet*. [S.l.], 2003. Citado na página 15.
- 8 GLOBALSAT TECHNOLOGY CORPORATION. *GPS Engine Board ET-112/ER-112*. [S.l.]. Citado na página 15.