

Nathan Luan Dutra Sarmiento

Relatório de Estágio

Campina Grande, Brasil

17 de março de 2016

Nathan Luan Dutra Sarmento

Relatório de Estágio

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

Univesidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Orientador: Alexandre Cunha Oliveira

Campina Grande, Brasil

17 de março de 2016

Nathan Luan Dutra Sarmento

Relatório de Estágio/ Nathan Luan Dutra Sarmento. – Campina Grande,
Brasil, 17 de março de 2016-

32 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Alexandre Cunha Oliveira

Relatório de Estágio – Univesidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE , 17 de março de 2016.

Nathan Luan Dutra Sarmiento

Relatório de Estágio

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

Trabalho aprovado. Campina Grande, Brasil, 17 de março de 2016:

Alexandre Cunha Oliveira
Orientador

Professor
Convidado

Campina Grande, Brasil
17 de março de 2016

Este trabalho é dedicado à minha família.

Agradecimentos

Os principais agradecimentos são direcionados:

- A Deus, pela força e perseverança, pela capacidade e sabedoria, por este mundo incrível... por tudo.
- À Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade de estágio.
- Ao professor Alexandre Oliveira, pela orientação e pela confiança.
- Ao técnico Simões, por sua ajuda com os circuitos eletrônicos.
- A Jonas Rodrigo, pela inestimável ajuda com a confecção das placas de circuito impresso.
- 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.

"Tenham bom ânimo. O futuro é tão brilhante quanto sua fé."

Thomas S. Monson

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação em diagrama de blocos do sistema computacional do VASAR	5
Figura 2 – Visão superior do modelo do VASAR	6
Figura 3 – Visão frontal do modelo do VASAR	6
Figura 4 – Esquema da construção mecânica desenvolvida.	7
Figura 5 – Foto do propulsor esquerdo.	8
Figura 6 – Foto do propulsor direito.	9
Figura 7 – Diagrama de blocos do sistema eletrônico.	10
Figura 8 – Diagrama Elétrico do acionamento dos motores.	11
Figura 9 – Representação dos sinais de comando das chaves da ponte H	12
Figura 10 – Detalhe do atraso entre os sinais de controle	12
Figura 11 – Foto do modelo miniaturizado	13
Figura 12 – Foto do modelo miniaturizado, visão frontal	13
Figura 13 – Foto do modelo miniaturizado, visão superior	14
Figura 14 – representação do uso do teorema de Pitágoras para cálculo da distância	16
Figura 15 – Representação da diferença entre norte magnético e norte geográfico . .	17
Figura 16 – Declinações Magneticas	18
Figura 17 – Representação do sistema de Referência para orientação	18
Figura 18 – Obtenção do ângulo de referência	19
Figura 19 – Exemplo do cálculo da variação do ângulo e determinação do sentido da curva	20
Figura 20 – Curvas no sentido contrário quando $ \Delta\theta > 180^\circ$	21
Figura 21 – Ambiente de Simulação V-REP	25
Figura 22 – Comparação da trajetória do robô e da trajetória de referência	25

Lista de abreviaturas e siglas

PAQTCPB	Parque Tecnológico da Paraíba
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
VASAR	Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios
IHM	Interface Homem Máquina
GPS	Global Positioning System
INS	Inertial Navigation System
CC	Corrente Contínua
NM	Norte Magnético
NG	Norte Geográfico
PWM	Pulse Width Modulation
ED	Enorme Distância
GD	Grande Distância
MD	Média Distância
PD	Pequena Distância
ID	Ínfima Distância
TC	Grande Contrário
MC	Muito Contrário
PC	Pouco Contrário
P	Perpendicular
PA	Pouco Alinhado
MA	Meio Alinhado
QA	Quase Alinhado

Lista de símbolos

ΔLat_{min}	Variação de Latitude em minutos
$\Delta Long_{min}$	Variação de Longitude em minutos
ΔLat_m	Variação de Latitude em metros
$\Delta Long_m$	Variação de Longitude em metros
$Dist$	Distância do barco ao ponto de referência
θ_{ref}	Ângulo de referência do trajeto
θ_{barco}	Ângulo de orientação do barco
Lat_{ref}	Latitude do ponto de referência
$Long_{ref}$	Longitude do ponto de referência
Lat_{barco}	Latitude do barco
$Long_{barco}$	Longitude do barco
$\Delta\theta$	Erro angular de trajetória
v_d	Velocidade do motor direito
v_e	Velocidade do motor esquerdo
v_p	Velocidade de translado do barco
s	Variável de controle de orientação
Δv	Diferencial de velocidade
PWM_d	Duty Cycle do motor direito
PWM_e	Duty Cycle do motor esquerdo
PWM_p	Duty Cycle base do barco
ΔPWM	Diferencial de Duty Cycle

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	VASAR	3
2.1	Projeto Sistema Automático de Análise Liminológica das Águas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas	3
2.2	Veículo Autônomo de Sensoriamento de Águas de Reservatórios	4
3	MATERIAIS UTILIZADOS	7
3.1	Construção Mecânica do modelo em escala reduzida do protótipo do VASAR	7
3.2	Equipamentos Eletrônicos	9
4	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS - IMPLEMENTAÇÃO DOS SENSORES	15
4.1	Medição da distância	15
4.2	Cálculo da Orientação	17
5	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS - SISTEMA DE CONTROLE	22
5.1	Velocidade de translado do barco	23
5.2	Diferencial de velocidade dos motores	24
5.3	Simulação Computacional	24
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
7	ANEXO - CÓDIGO MATLAB DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO VREP	27
	REFERÊNCIAS	32

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 assoreamentos 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 Nathan Luan Dutra Sarmiento, 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](#) são descritos os equipamentos

utilizados para a construção mecânica e os equipamentos eletrônicos necessários para a implementação dos sensores e controle do modelo em miniatura do barco. No [Capítulo 4](#) é descrito como os equipamentos de localização espacial (GPS e bússola) são usados para implementar sensores de distância ao ponto desejado e erro de orientação do modelo do barco. No [Capítulo 5](#), é a apresentado o desenvolvimento do modelo e do sistema de navegação e controle do VASAR. No [Capítulo 7](#), 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 Liminológica 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. Neste capítulo, será apresentada uma breve descrição do projeto e das especificações do VASAR, e mais especificamente, do sistema de navegação e controle do mesmo.

2.1 Projeto Sistema Automático de Análise Liminológica 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, fornecendo informações que permitam antecipar condições de degradação da qualidade da água para uma ação corretiva mais rápida e eficaz.

Os objetivos 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.

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

Dentre todos os objetivos dispostos, cabe neste projeto o aperfeiçoamento do sistema de propulsão e direção do veículo autônomo aquático, que permita o seu deslocamento para locações de análise pré-programadas, atualizáveis remotamente; dando assim continuidade a trabalho desenvolvido anteriormente por Eduardo Gomes Pereira.

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

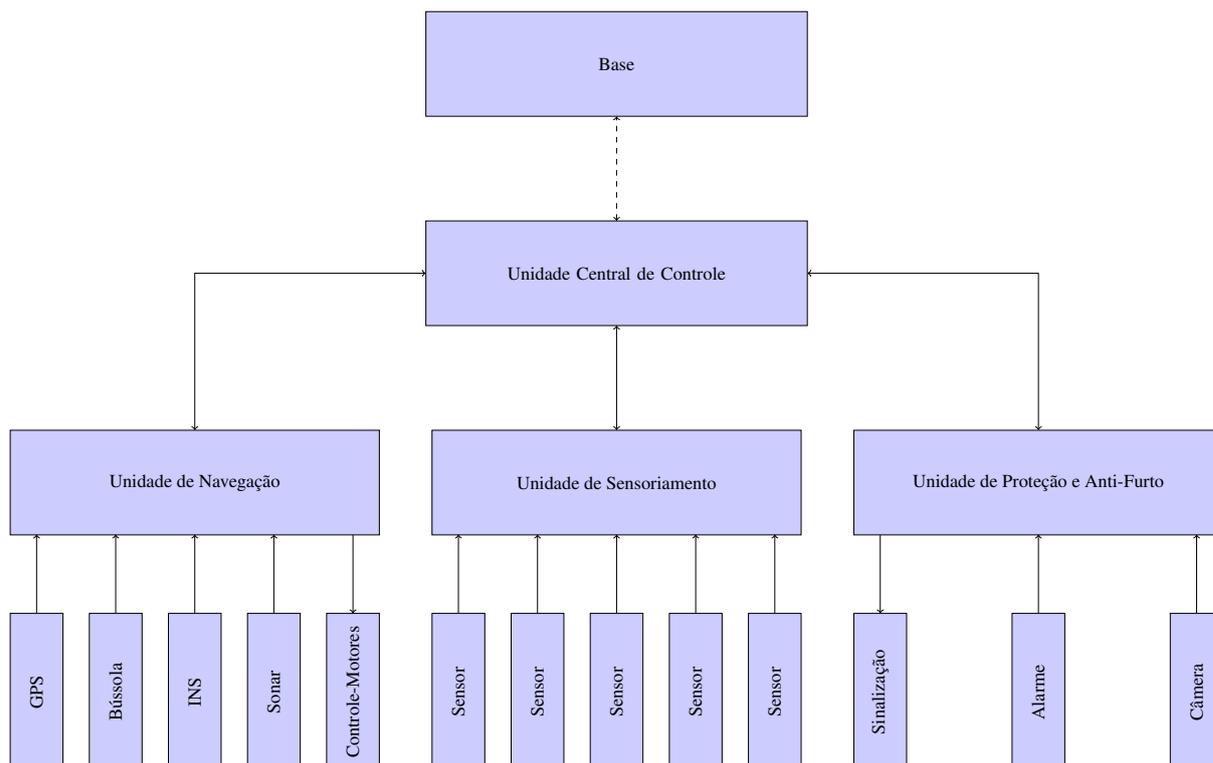


Figura 1 – Representação em diagrama de blocos do sistema computacional do VASAR .

continuamente missões automáticas de verificação de qualidade da água de um reservatório. Para isso, o veículo deverá contar com um sistema de baterias com alimentação baseada em painéis solares, garantindo assim sua autonomia. Nas Figuras 2 e 3, são exibidas, respectivamente, as visões superior e frontal do barco. Na visão superior, destacam-se os painéis solares, que devem ser responsáveis pela alimentação dos equipamentos eletrônicos do VASAR. Na visão frontal destacam-se os flutuadores e o suporte para os sensores do barco.

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

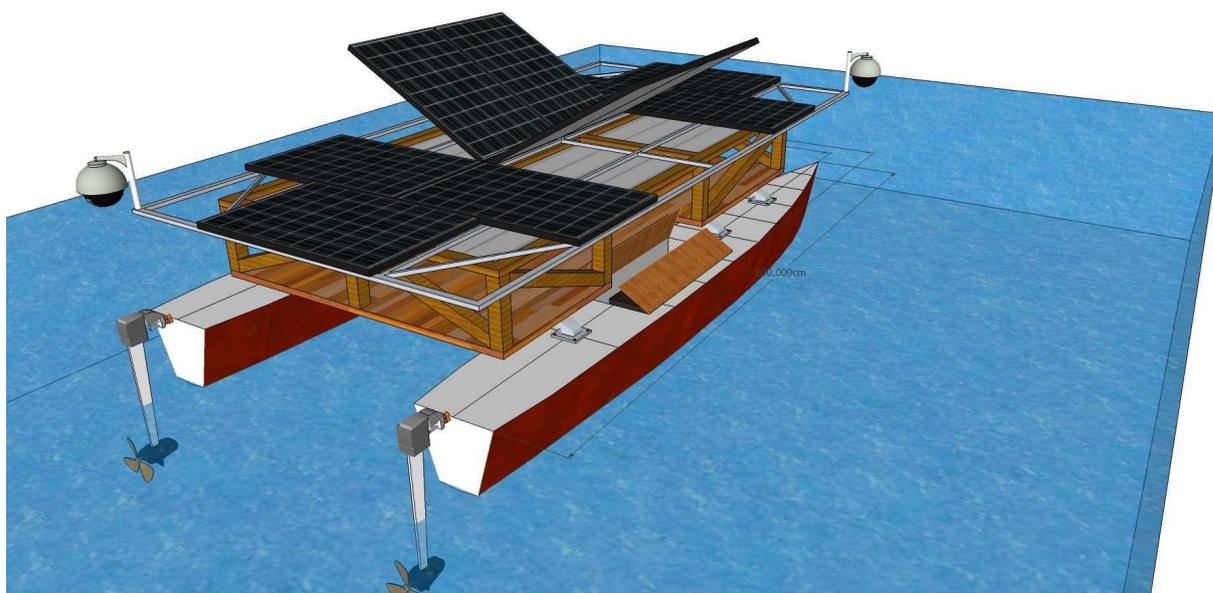


Figura 2 – Visão superior do modelo do VASAR

Fonte: Mikael Pereira Belo Themoteo

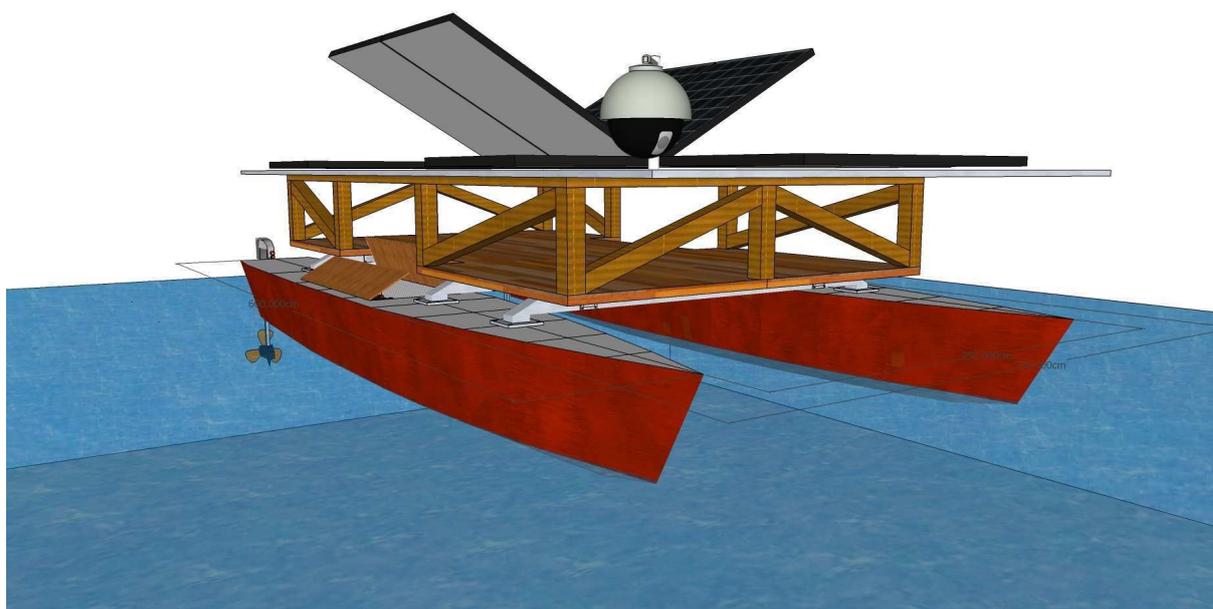


Figura 3 – Visão frontal do modelo do VASAR

Fonte: Mikael Pereira Belo Themoteo

para correção de um fator que provoca grande erro no sistema GPS, resultando assim em um sistema GPS diferencial.

3 Materiais Utilizados

3.1 Construção Mecânica do modelo em escala reduzida do protótipo do VASAR

Para desenvolver uma estratégia de controle para o VASAR, um modelo miniaturizado do mesmo foi 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 e os diversos sensores de monitoramento da água. Um esquema simplificado da estrutura mecânica desenvolvida é exibido na [Figura 4](#). Os elementos que compõe a estrutura são suficientes para garantir flutuação, rigidez e suporte aos componentes eletrônicos usados para o controle do barco.

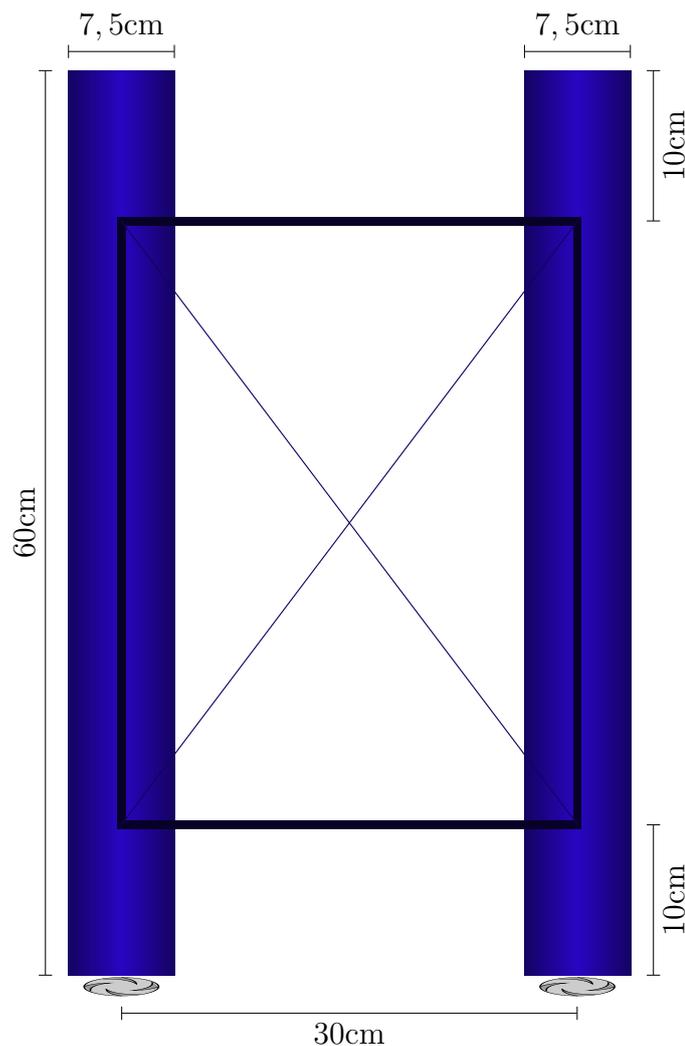


Figura 4 – Esquema da construção mecânica desenvolvida.

A estrutura do casco foi construída a partir de canos PVC com 60cm de comprimento e 7,5cm de diâmetro. Estas canos são vedados com duas tampas também feitas de PVC, impedindo, assim, a entrada de água e garantindo a flutuação da estrutura. Os flutuadores 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 flutuadores. Uma estrutura de PVC fixada na parte traseira de cada flutuador 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 minimizar a possibilidade 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. Na [Figura 5](#) e [Figura 6](#) são mostradas as estruturas de suporte do motor e de transmissão do movimento para as hélices.

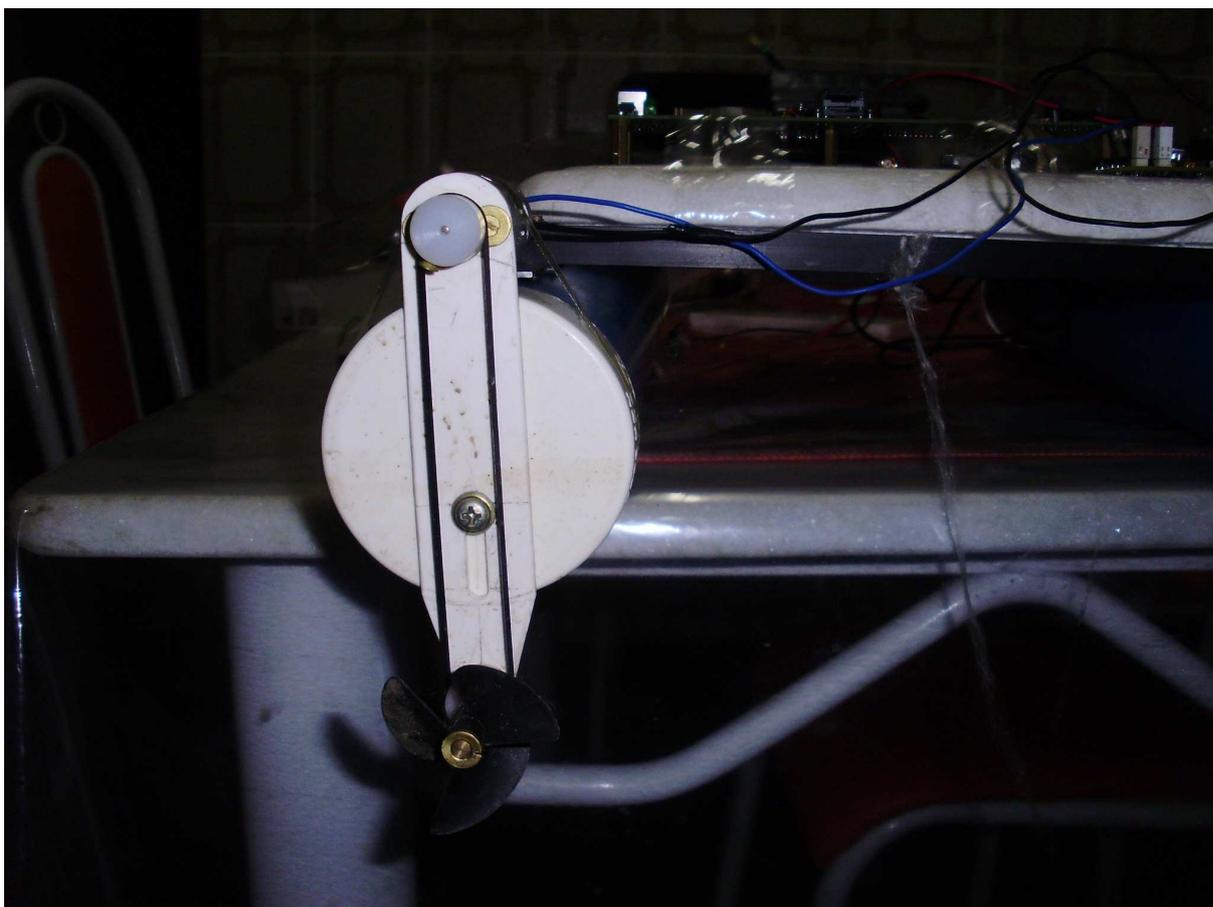


Figura 5 – Foto do propulsor esquerdo.

A construção mecânica têm uma massa total de 1kg e suporta uma massa de até

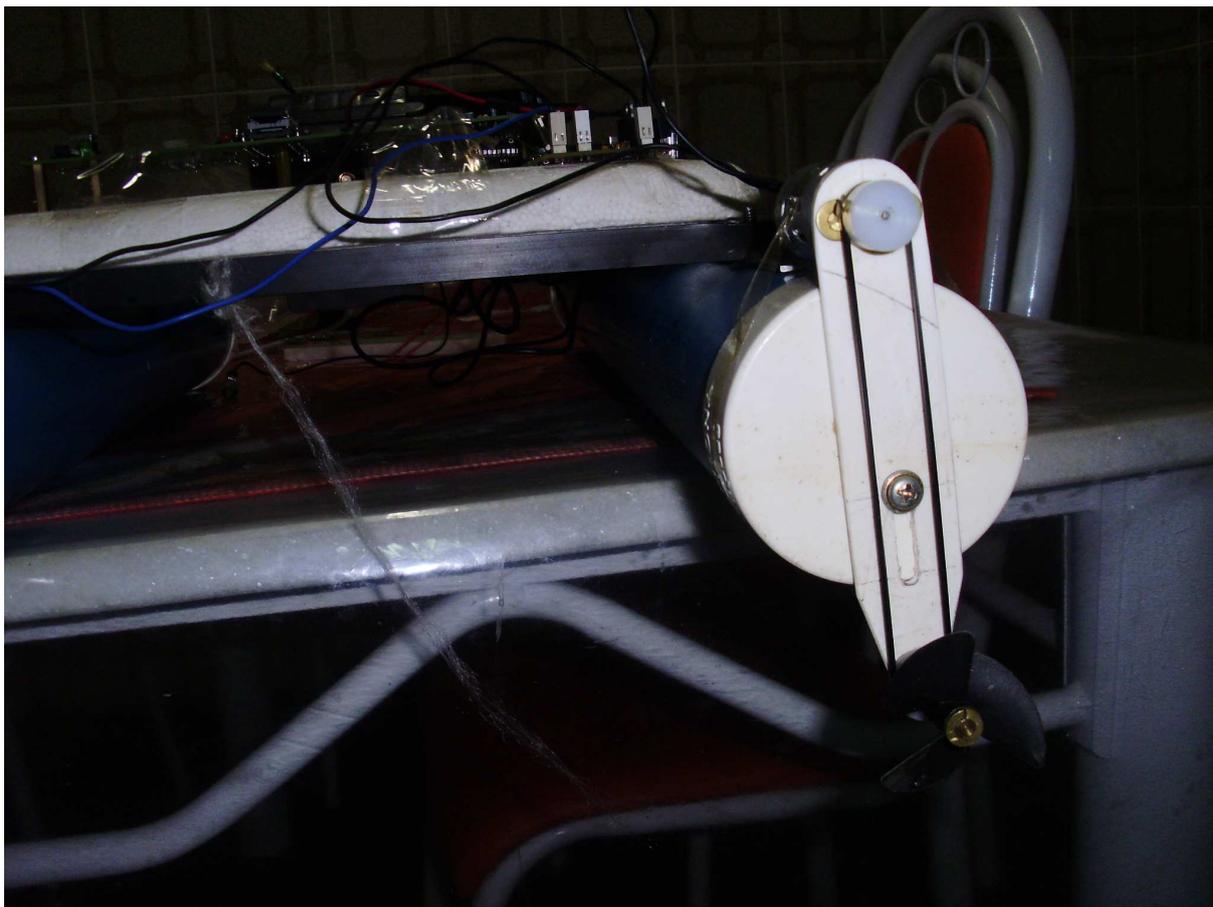


Figura 6 – Foto do propulsor direito.

4kg sobre ela sem afundar.

3.2 Equipamentos Eletrônicos

Um sistema eletrônico envolvendo sensores, atuadores, interfaces de comunicação e controladores é utilizado para implementar a estratégia de controle. Um diagrama de blocos deste sistema eletrônico é exibido na [Figura 7](#). O módulo de controle do sistema é composto por um microcontrolador PIC18F4525A (4). O algoritmo de controle é implementado neste microcontrolador, ao qual são integrados um dispositivo AT-65 GPS Active Antenna, por meio de uma interface de comunicação ET-112 (5), para determinação da posição; uma bússola eletrônica HMC5883L (6), fabricada pela *Honeywell*, para determinação da orientação do barco; e um circuito de acionamento dos motores, desenvolvido pelo próprio estagiário. No [Capítulo 5](#) será descrito, com mais detalhes, como se deu a configuração e integração desses diferentes componentes.

O circuito de alimentação do sistema eletrônico é composto por uma bateria Konder, provendo uma tensão de 12V e uma corrente máxima de 2,5A; e uma bateria Panasonic, provendo uma tensão de 9V. A bateria Konder é utilizada para alimentação dos

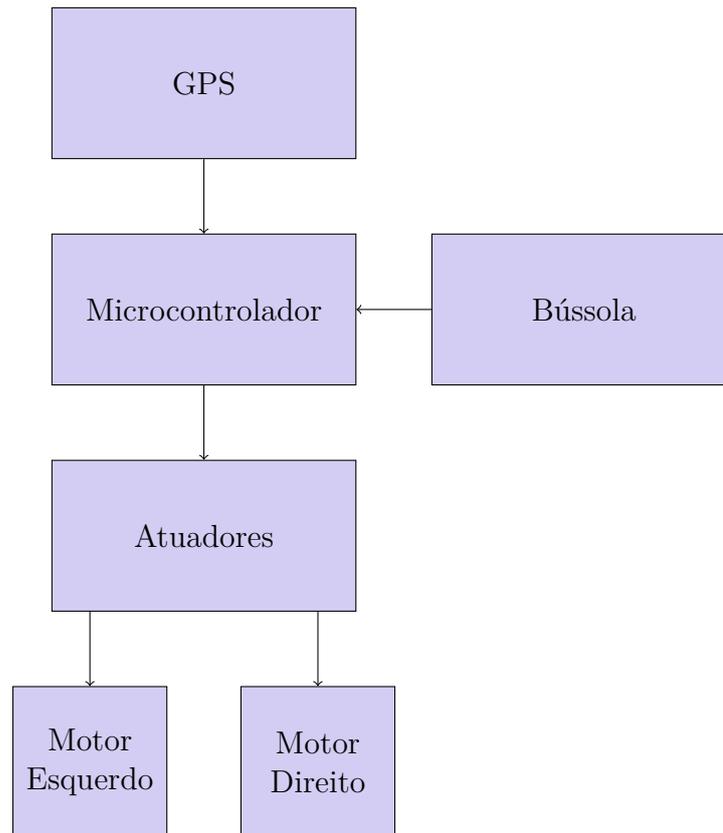


Figura 7 – Diagrama de blocos do sistema eletrônico.

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 potência (microcontrolador, GPS e bússola) após passar por um regulador de tensão 7805, proporcionando uma regulação de tensão de 9V para 5V.

A troca de dados entre o GPS e o microcontrolador é realizada por meio de comunicação serial em nível TTL. Alguns parâmetros da interface podem ser configurados, tais como taxa de dados e especificação das mensagens transmitidas. O período de amostragem para determinação da posição é de 1 segundo. Já a comunicação com a bússola se dá através da interface I2C, e sua taxa de transmissão é setada em 0,33 segundos. O tempo de amostragem da bússola é menor que o do GPS devido ao fato de que a orientação angular do barco é uma variável de maior importância para que o mesmo siga uma determinada trajetória definida, além de ser uma variável mais suscetível a influências externas, tais como velocidade do vento e ondulações. De fato, a precisão do GPS e o próprio sistema mecânico em si não permitem variações tão bruscas na posição medida do barco em face de variações no ângulo de direção do mesmo.

O circuito de acionamento dos motores é composto de duas pontes H, construídas com transistores e outros componentes eletrônicos. O uso desse sistema de acionamento permite que os motores possam rotacionar em diferentes sentidos, resultando em maior

facilidade para realização de curvas pelo barco, bem como a possibilidade de haver deslocamento em marcha ré. Além disso, é possível controlar a velocidade do barco variando a tensão aplicada nos motores variando a largura do pulso PWM. Na [Figura 8](#), é exibido o circuito de acionamento dos motores.

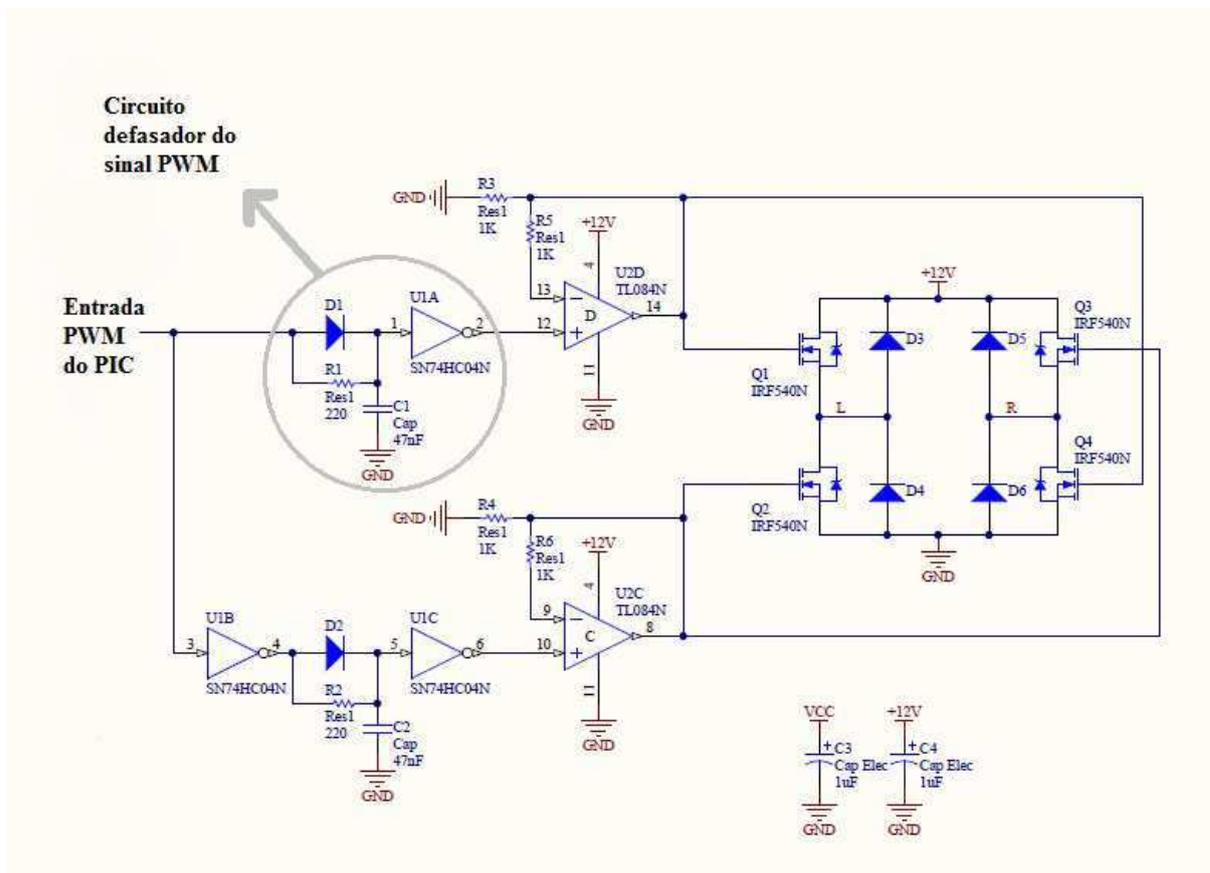


Figura 8 – Diagrama Elétrico do acionamento dos motores.

O circuito defasador destacado na [Figura 8](#) é de essencial importância para o acionamento. O PIC 18F4525 possui apenas duas saídas de PWM, enquanto que uma ponte H normalmente utiliza dois sinais de acionamento para as chaves, complementares um ao outro. Como foi utilizada uma ponte H para cada motor, seriam necessários 4 canais PWM para gerar esses sinais complementares. Porém, dispõe-se apenas de dois canais PWM. Assim, uma solução encontrada foi usar o circuito defasador, em conjunto com inversores. Na [Figura 9](#) é ilustrado o funcionamento desse circuito. O sinal PWM que vem do PIC é, para o circuito defasador de cima, inicialmente defasado e após passar pelo inversor, cria-se um pequeno gap em relação à onda original. Procedimento semelhante é feito no outro defasador, porém com o sinal PWM inicialmente invertido. Ao fim do processo, obtém-se dois sinais de comando das chaves que são complementares entre si, e possuem um pequeno gap, de modo que o sinal 1 só fica alto quando o 2 ficar baixo, e vice-versa. Esse comportamento evita curto-circuitos nos braços da ponte, visto que uma chave do braço só é fechada quando a outra for aberta, e vice-versa.

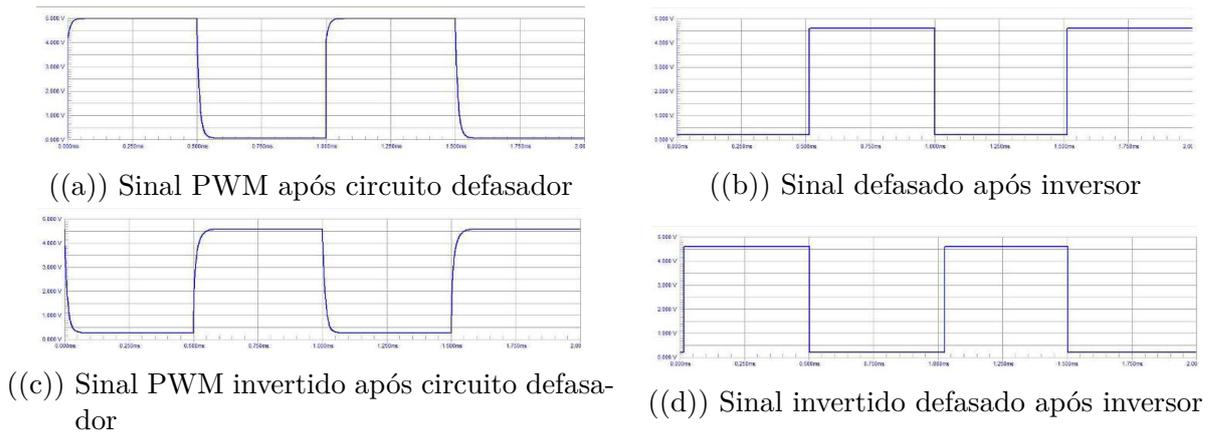


Figura 9 – Representação dos sinais de comando das chaves da ponte H

Na figura [Figura 10](#) é mostrado com maior detalhamento o atraso gerado pelo circuito eletrônico proposto, circulado na mesma.

Com toda a estrutura eletrônica sobre o barco, a massa total do barco chegou a aproximadamente 2,5kg. Da [Figura 11](#) à [Figura 13](#), são exibidas fotos do modelo miniaturizado desenvolvido.

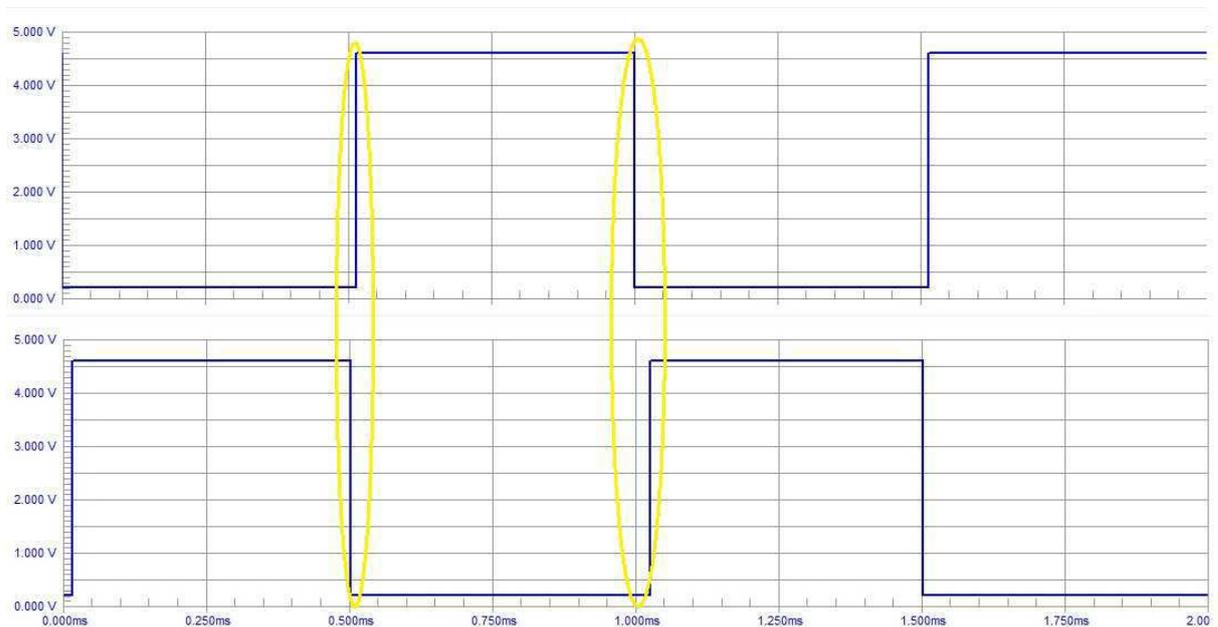


Figura 10 – Detalhe do atraso entre os sinais de controle

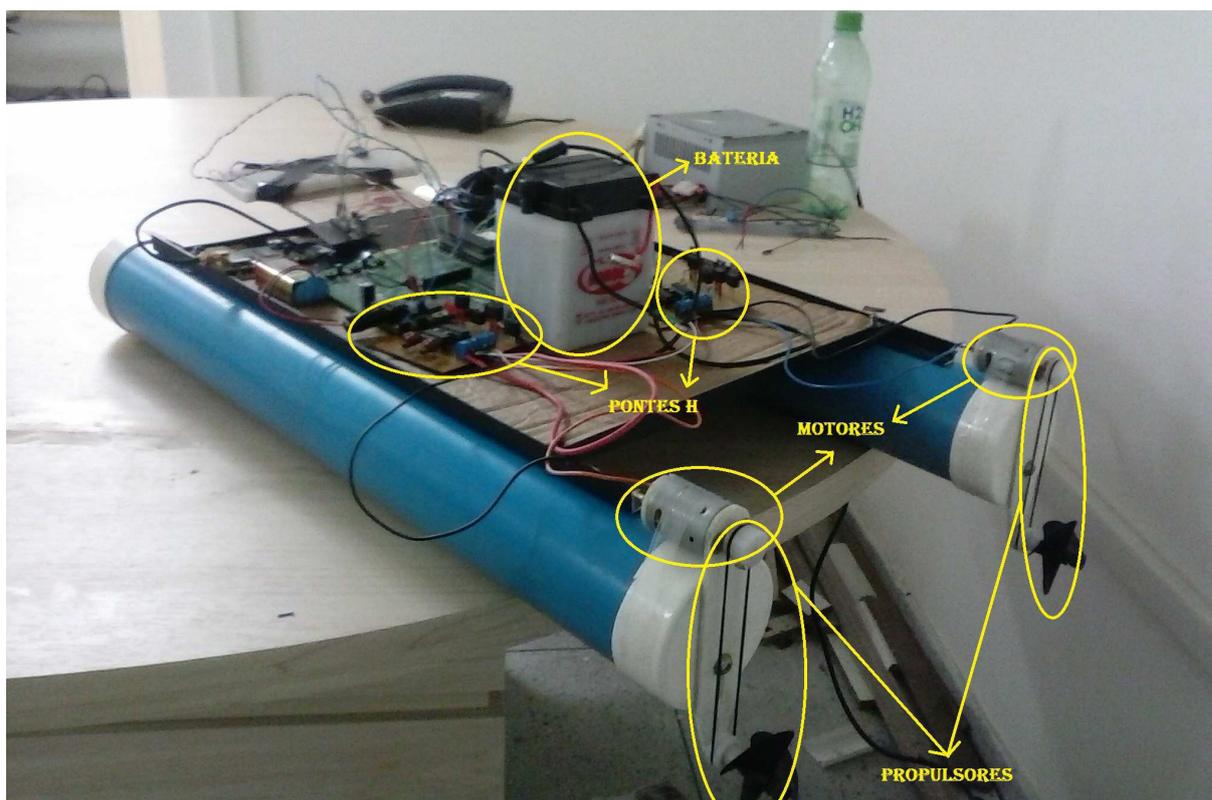


Figura 11 – Foto do modelo miniaturizado

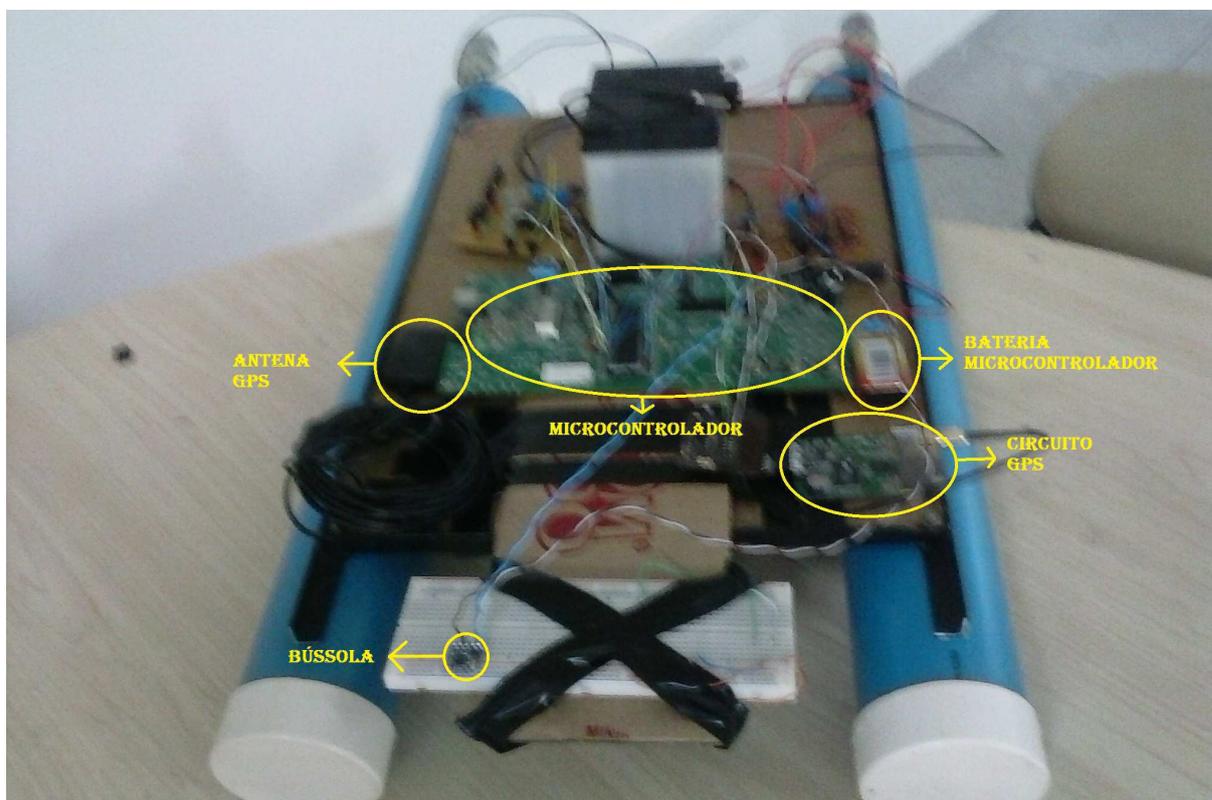


Figura 12 – Foto do modelo miniaturizado, visão frontal

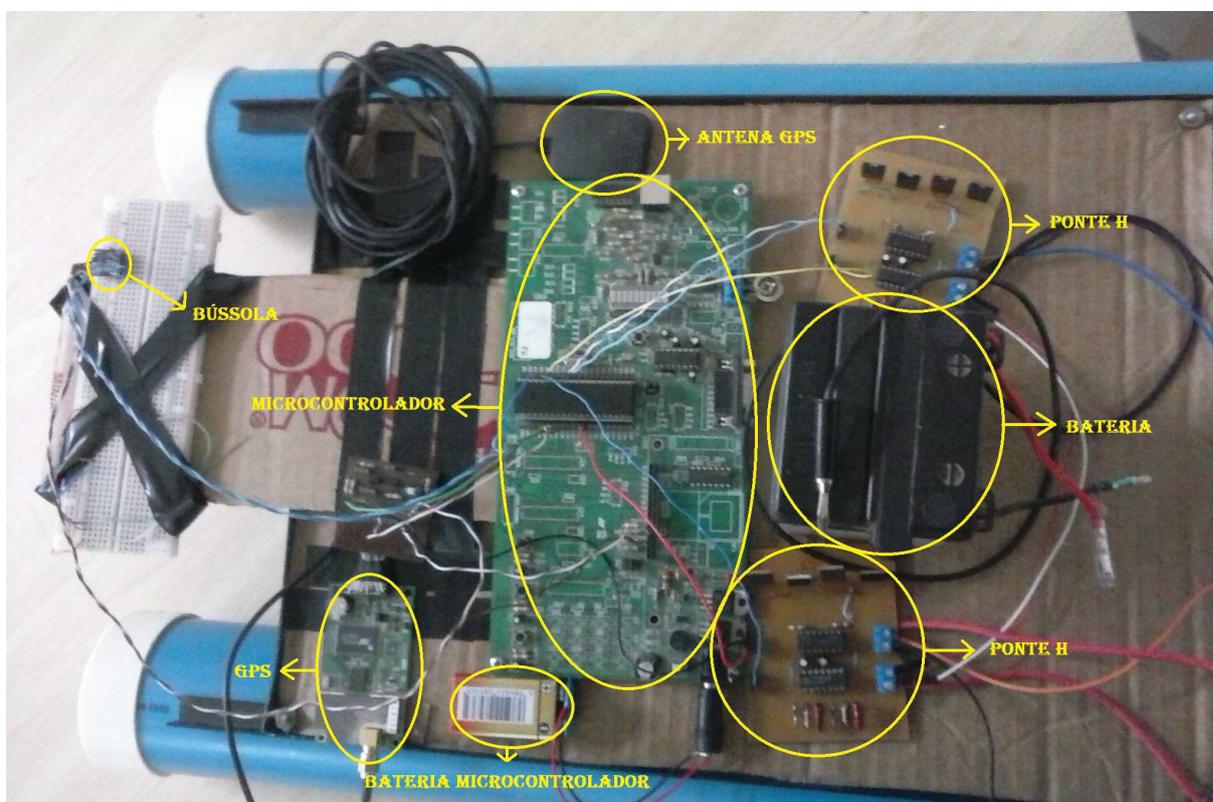


Figura 13 – Foto do modelo miniaturizado, visão superior

4 Atividades Desenvolvidas - Implementação dos Sensores

Uma parte importante do sistema de posicionamento espacial do VASAR é a implementação dos sensores que serão responsáveis pelos dados necessários para o movimento. Mais especificamente para o caso abordado, duas variáveis são de fundamental importância: a distância ao ponto desejado e a orientação em relação a uma trajetória de referência que se deseja seguir. Neste capítulo será apresentado como esses sensores foram implementados a partir da instrumentação disponível.

4.1 Medição da distância

O GPS fornece a latitude e longitude atuais do barco. É informado ao sistema o ponto de chegada do mesmo, ou seja, para onde o barco deve se deslocar. Assim, possuindo as informações geográficas de uma localização desejada e da localização atual do VASAR, é possível calcular a distância a ser percorrida no trajeto, bem como determinar a orientação a ser seguida até atingir a posição de destino. Essa distância é uma informação útil para o cálculo da velocidade que o barco deve desenvolver, bem como para informar se o local desejado foi alcançado.

Uma unidade importante para sistemas de navegação é a milha náutica. Milha náutica, ou milha marítima, é uma unidade de medida de comprimento ou distância, equivalente a 1 852 metros, utilizada quase exclusivamente em navegação marítima e aérea e na medição de distâncias marítimas. A milha náutica corresponde ao valor aproximado de 1' (minuto) de grande círculo, isto é de um ângulo de 1' medido sobre o equador ou ao longo de um meridiano. Embora o uso desta unidade de medida seja imperfeito devido à curvatura irregular da Terra, para pequenas distâncias, tais como as trabalhadas em represas e lagos, o uso da milha náutica provê uma excelente aproximação da distância a ser calculada.

Uma vez determinada a localização atual e definida a localização desejada, procede-se da seguinte forma para o cálculo da distância:

- Encontra-se as variações de latitude e longitude entre a localização do barco e a localização do ponto de referência
- Transforma-se as unidades de latitude e longitude para metros através do uso da milha náutica

- Usa-se o teorema de pitágoras para o cálculo da distância. O procedimento fica mais claro ao analisar a [Figura 14](#).

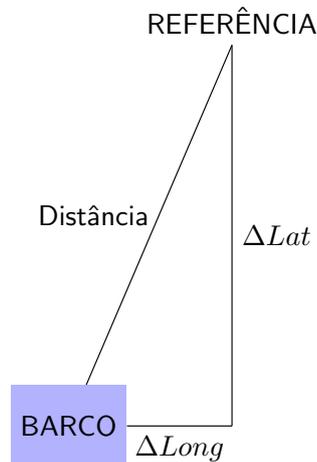


Figura 14 – representação do uso do teorema de Pitágoras para cálculo da distância

Por exemplo, sejam as coordenadas dadas pelo GPS $7^{\circ}12,54' S$, $35^{\circ}54,55' W$; e as coordenadas do ponto de referência $7^{\circ}12,50' S$, $35^{\circ}54,56' W$, podemos calcular a distância a ser percorrida da seguinte forma:

Inicialmente calculamos as variações de latitude e longitude em metros.

$$\Delta Long_m = 1852 * \Delta Long_{min} \quad (4.1)$$

$$\Delta Lat_m = 1852 * \Delta Lat_{min} \quad (4.2)$$

De posse desses valores, calculamos a distância desejada.

$$Dist^2 = (\Delta Lat_m)^2 + (\Delta Long_m)^2 \quad (4.3)$$

$$Dist = \sqrt{(\Delta Lat_m)^2 + (\Delta Long_m)^2} \quad (4.4)$$

Por fim, define-se um intervalo dentro do qual considera-se que o barco atingiu seu objetivo. Tendo em vista as dimensões de represas e reservatórios, além da precisão do GPS, o intervalo aceitável de distância foi definido em 5 metros.

4.2 Cálculo da Orientação

O uso do magnetômetro HMC5883L fornece a medição do campo magnético em três eixos. Uma observação importante a se fazer é que, por experimentação durante os testes realizados em laboratório, deve-se deixar a bússola a pelo menos 30cm de distância de qualquer objeto metálico para evitar interferência nas medições dos campos. Uma vez que a bússola trabalha com campos magnéticos, sua orientação real é dada em relação ao norte magnético da terra. Isso significa que para trabalhar com a bússola digital, devemos fazer uma correção para adequar a medição do norte magnético da Terra ao norte geométrico. Esse valor de adequação é chamado de declinação magnética, conforme mostrado na [Figura 15](#).

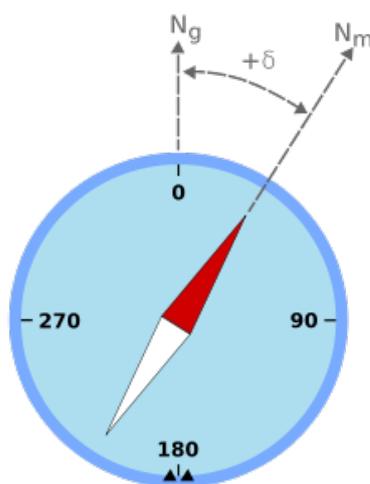


Figura 15 – Representação da diferença entre norte magnético e norte geográfico

Na [Figura 16](#) são mostradas, por exemplo, as diferentes declinações existentes para diversas localidades ao redor do mundo. Para a cidade de Campina Grande a declinação magnética é de $-22,09^\circ$. A declinação magnética varia de acordo com a localidade e durante o tempo, de forma que para a correta orientação neste sistema é importante que os valores da declinação sejam atualizados periodicamente.

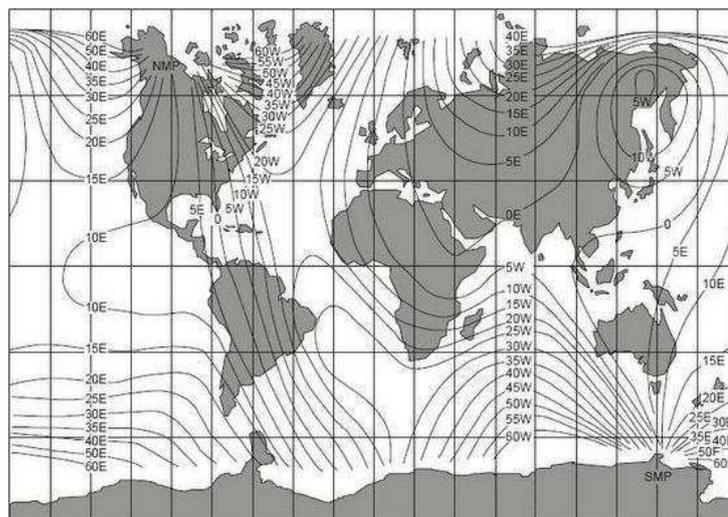


Figura 16 – Declinações Magnéticas

Uma vez corrigida a medição do ângulo de orientação, definimos um sistema de referência para medição dos ângulos. Esse sistema é mostrado na [Figura 17](#).

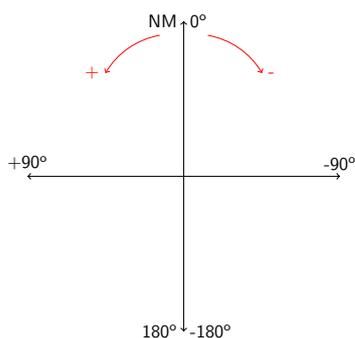


Figura 17 – Representação do sistema de Referência para orientação

Pelo sistema de referência adotado, ângulos à direita do norte geográfico variam de 0° a 180° . Ângulos à esquerda do norte geográfico variam de 0° a -180° .

Além da orientação do barco em si, é necessário calcular o ângulo de referência dado o ponto onde se quer chegar. Esse ângulo pode ser calculado a partir das coordenadas geográficas do barco, provenientes do GPS, e da localização desejada. A [Figura 18](#) ajuda a ter uma melhor compreensão de como calcular este ângulo.

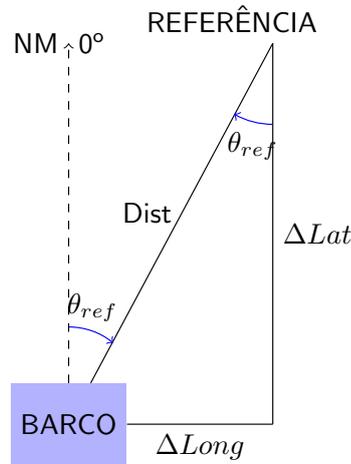


Figura 18 – Obtenção do ângulo de referência

Sejam θ_{ref} o ângulo de referência que se deseja encontrar. Sejam ainda ΔLat_m e $\Delta Long_m$ as diferenças entre as coordenadas de latitude e longitude, em metros, conforme já definido anteriormente. Além disso, sejam Lat_{barco} e $Long_{barco}$ as coordenadas do barco e Lat_{ref} e $Long_{ref}$ as coordenadas do ponto de referência. Podemos, então, calcular θ_{ref} da seguinte forma:

$$\theta_{ref} = \theta_{ref} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Long_m}{\Delta Lat_m} \right) \quad (4.5)$$

$$\theta_{ref} = \theta_{ref} = \tan^{-1} \left(\frac{Long_{ref} - Long_{barco}}{Lat_{ref} - Lat_{barco}} \right) \quad (4.6)$$

Na programação do microcontrolador, é importante tratar da exceção quando as latitudes do barco e do ponto de referência são iguais, ou seja, o ângulo de referência é de 90° . Neste caso, pode haver problema pelo fato que há uma divisão por zero na [Equação 4.6](#). Portanto, trata-se este caso particular em separado, atribuindo ao ângulo 90° ou -90° dependendo da variação de longitude.

Uma vez encontrado o ângulo de referência, e recebendo a orientação do barco através do GPS, podemos calcular o erro angular associado ao sistema, conforme a [Equação 4.7](#).

$$\Delta\theta = \theta_{ref} - \theta_{barco} \quad (4.7)$$

Se $\Delta\theta$ é positivo, isso significa que a orientação do barco precisa ser ajustada ao realizar uma curva para esquerda. Se $\Delta\theta$ é negativo, isso significa que a orientação do

barco precisa ser ajustada realizando uma curva para direita. Na [Figura 19](#) é mostrado esse princípio. Para os vetores de orientação azuis, percebe-se que $\Delta\theta > 0$ e o barco deve curvar para esquerda. Para os vetores em vermelho, percebe-se que $\Delta\theta < 0$ e o barco deve curvar para direita.

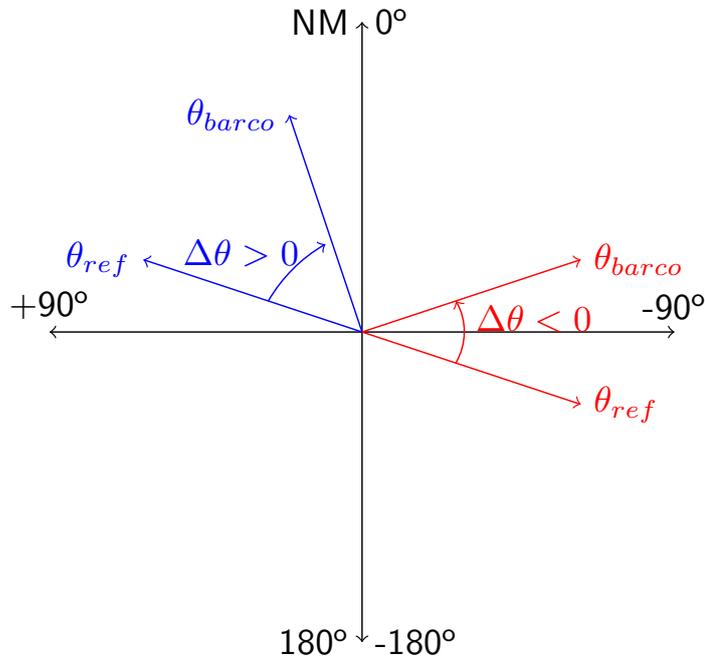


Figura 19 – Exemplo do cálculo da variação do ângulo e determinação do sentido da curva

Por fim, se o módulo de $\Delta\theta$ é maior que 180° , isso significa que é mais vantajoso para o barco fazer a curva no sentido contrário ao indicado pelo sinal de $\Delta\theta$. Esse princípio é ilustrado na [Figura 20](#). Como $\Delta\theta > 0$, normalmente a curvatura seria feita à esquerda. Mas, pelo fato de $|\Delta\theta| > 180^\circ$, a curva à direita será mais vantajosa.

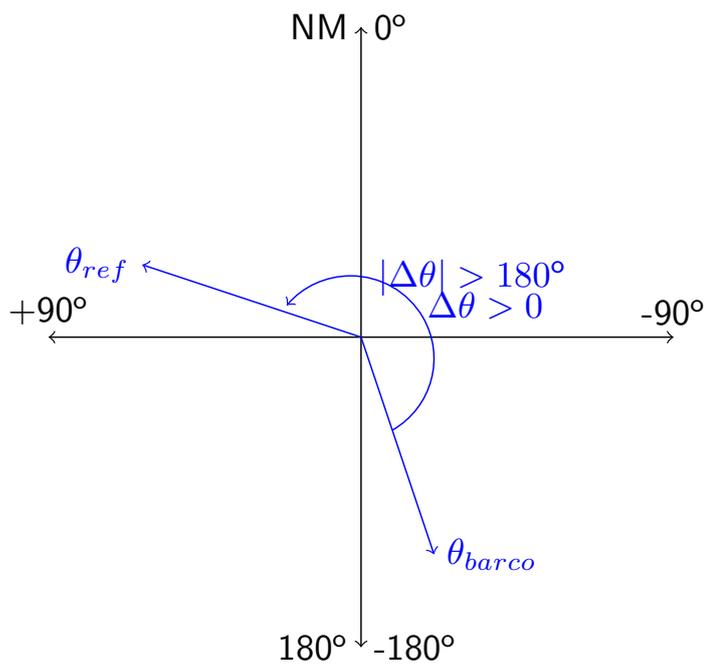


Figura 20 – Curvas no sentido contrário quando $|\Delta\theta| > 180^\circ$

5 Atividades Desenvolvidas - Sistema de Controle

Baseado nos dados dos sensores anteriormente implementados, é possível fazer o controle do protótipo. Um modelo para o barco não foi levantado devido falta de tempo para realização de experimentos de identificação. Dessa forma, o controle a ser implementado baseia-se apenas nas variáveis cinemáticas de posição e orientação. Embora a princípio esta pareça uma solução não viável, o fato de que o uso de um sistema microcontrolado é muito mais rápido que a resposta mecânica do barco faz com que um controle *on-off* funcione de forma satisfatória para o caso em estudo.

O VASAR funciona por tração diferencial. Dessa forma, a velocidade de rotação dos motores define a velocidade linear do barco, enquanto que a diferença de velocidade de rotação dos motores define a velocidade angular do barco. Esse tipo de sistema é simples de ser implementado e eficiente para a aplicação proposta.

O controle da velocidade dos motores usados nos propulsores, conforme descrito no [Capítulo 5](#) é feito através de um microcontrolador e de pontes H. Uma dificuldade encontrada para realização desse projeto é o fato de que o estagiário não dispôs de sensores de velocidade para o motor. Dessa forma, a atuação sobre os motores não é realimentada por velocidade de rotação dos mesmos, mas apenas pelo desvio angular da trajetória padrão e pela distância ao ponto desejado. Como os motores usados nos propulsores são do mesmo modelo, fez-se a suposição que sob determinada tensão, e sendo as características do meio no qual ele está inserido muito parecidas para ambos, as máquinas responderão de forma semelhante à mesma tensão aplicada. Embora a suposição não seja real, a lógica proposta para o controle visa suplantiar essa imperfeição.

Para as velocidades dos motores direito e esquerdo, propôs-se as seguintes equações:

$$v_d = v_p + s\Delta v \quad (5.1)$$

$$v_e = v_p - s\Delta v \quad (5.2)$$

Onde v_d e v_e são as velocidades dos motores direito e esquerdo, respectivamente, v_p é a velocidade de translado do barco, s é uma variável de controle do sentido de rotação, que é definida de acordo com o desvio angular do barco em relação à trajetória de referência, e Δv é a velocidade diferencial que será aplicada com o propósito de realização

de curvas.

Como não é possível a medição da velocidade do barco, podemos definir novas variáveis manipuláveis, baseadas no *duty cycle* das entradas PWM dos motores. Sejam PWM_d e PWM_e as variáveis de entrada dos motores direito e esquerdo (valores de *duty cycle* para os atuadores dos motores), PWM_p o *duty cycle* base para alcance da velocidade de translado, e ΔPWM o diferencial de *duty cycle* a ser aplicado com o propósito de realização de curvas. As leis de controle das velocidades ficam, então, definidas da seguinte maneira:

$$PWM_d = PWM_p + s\Delta PWM \quad (5.3)$$

$$PWM_e = PWM_p - s\Delta PWM \quad (5.4)$$

5.1 Velocidade de translado do barco

Nesta seção, será discutido a forma de controle da velocidade de translado do barco. A variável base para o cálculo dessa velocidade é a distância ao ponto de referência. Quanto mais longe estiver o barco do ponto desejado, maior será sua velocidade de translado. A velocidade é aumentada ou diminuída através do *duty cycle* aplicado ao circuito atuador dos motores. Definimos 5 diferentes conjuntos: Enorme Distância (ED); Grande Distância (GD); Média Distância (MD); Pequena Distância (PD) e Ínfima Distância (ID). São definidos intervalos de pertinência do barco em cada conjunto de acordo com a distância atual medida, e cada conjunto possui um valor especificado de *duty cycle* a ser aplicado. A [Tabela 1](#) detalha os conjuntos, suas leis de pertencimento e seus valores de *duty cycle*.

Conjunto	Regra de pertencimento	PWM_p
ED	$Dist > 100m$	90
GD	$Dist \leq 100m$ ou $Dist > 70m$	85
MD	$Dist \leq 70m$ ou $Dist > 45m$	75
PD	$Dist \leq 45m$ ou $Dist > 20m$	65
ID	$Dist \leq 20m$ ou $Dist > 10m$	60

Tabela 1 – Valores de *duty cycle* de acordo com o pertencimento a um conjunto

Estando a distância abaixo de 10 metros do ponto desejado, definimos que o barco chegou ao local desejado. Este valor se deve pelo fato de que em grandes represas, este é um intervalo aceitável de erro, além do fato de considerar a imprecisão do GPS em obter o local exato. Por exemplo, a represa de Sobradinho, componente do conjunto de represas nas quais a CHESF opera, possui 320 km de extensão. Um erro de 10 metros na localização representaria, em porcentagem, aproximadamente 0,003%, valor irrisório nesta situação.

5.2 Diferencial de velocidade dos motores

Nesta seção, será discutida a forma de controle da velocidade diferencial dos motores do barco. A variável base para o cálculo dessa velocidade é o erro de orientação em relação ao ponto de referência. Quanto mais longe estiver o barco do ponto desejado, maior será o diferencial de velocidade dos motores. O diferencial de velocidade é aumentado ou diminuído através do *duty cycle* aplicado ao circuito atuador dos motores. Definimos 7 diferentes conjuntos: Totalmente Contrário (TC); Muito Contrário (MC); Pouco Contrário (PC); Perpendicular (P); Pouco alinhado (PA); Meio Alinhado (MA) e Quase Alinhado (QA). São definidos intervalos de pertinência do barco em cada conjunto de acordo com o erro de direção atual medido, e cada conjunto possui um valor especificado de *duty cycle* a ser aplicado. A Tabela 2 detalha os conjuntos, suas leis de pertencimento e seus valores de *duty cycle*.

Conjunto	Regra de pertencimento	ΔPWM
TC	$\Delta\theta \leq 180$ ou $\Delta\theta > 155$	$1,5 * PWM_p$
MC	$\Delta\theta \leq 155$ ou $\Delta\theta > 130$	$1,2 * PWM_p$
PC	$\Delta\theta \leq 130$ ou $\Delta\theta > 105$	$1,1 * PWM_p$
P	$\Delta\theta \leq 105$ ou $\Delta\theta > 75$	$1,0 * PWM_p$
PA	$\Delta\theta \leq 75$ ou $\Delta\theta > 50$	$0,5 * PWM_p$
MA	$\Delta\theta \leq 50$ ou $\Delta\theta > 25$	$0,25 * PWM_p$
QA	$\Delta\theta \leq 25$ ou $\Delta\theta > 5$	$0,125 * PWM_p$

Tabela 2 – Valores de ΔPWM de acordo com o pertencimento a um conjunto

O intervalo permitido de desvio angular foi definido como 5° , ou seja, se o erro de orientação for menor que 5° , $\Delta PWM = 0$. Embora para grandes distâncias esse erro possa ser considerável, o algoritmo de controle do barco não permite que desvios consideráveis sejam feitos na trajetória, uma vez que a orientação e o ângulo de referência são constantemente medidos e recalculados de acordo com a posição atual do VASAR.

5.3 Simulação Computacional

Ambientes de simulação computacionais são ferramentas importantes aos engenheiros. O uso de simuladores serve tanto para verificação das estratégias a serem adotadas em um projeto, quanto para economia de tempo no mesmo, visto que as montagens e testes experimentais demandam certo tempo precioso dos trabalhos de engenharia. De fato, ter uma ideia simulada que funcione significa meio passo andado no alcance de um objetivo. Nesta ótica utilizamos um ambiente de simulação de robótica, o V-REP. Este ambiente possui diversos tipos de modelos comerciais de robôs que podem ser usados. Além disso, o V-REP integra dinâmicas essenciais ao funcionamento de robôs, como tração, transmissão de movimento, atrito com o solo, entre outros fatores.

A ideia do uso dessa ferramenta é a verificação da estratégia de controle para um robô de tração diferencial. Embora o ambiente não possua modelos de robôs aquáticos, a simulação de um robô terrestre de tração diferencial em suas rodas pode ser aproximado do funcionamento do modelo do barco, que também possui tração diferencial. Essa aproximação só é possível pelo fato de o controle implementado não depender de modelos dinâmicos dos veículos. Em outras palavras, se o veículo a ser utilizado possuir tração diferencial de modo que seus movimentos e curvas restrinjam-se ao controle de dois motores, a estratégia de controle desenvolvida deve ser funcional.

Na [Figura 21](#) é mostrado o ambiente computacional do V-REP, com uma trajetória definida a ser seguida pelo robô. Além disso, na [Figura 22](#) é mostrada a trajetória seguida pelo robô na simulação em comparação com a trajetória de referência definida anteriormente, ilustrando que o sistema de controle mostra-se eficiente para esse tipo de robôs, podendo ser estendido para o caso do modelo de barco desenvolvido.

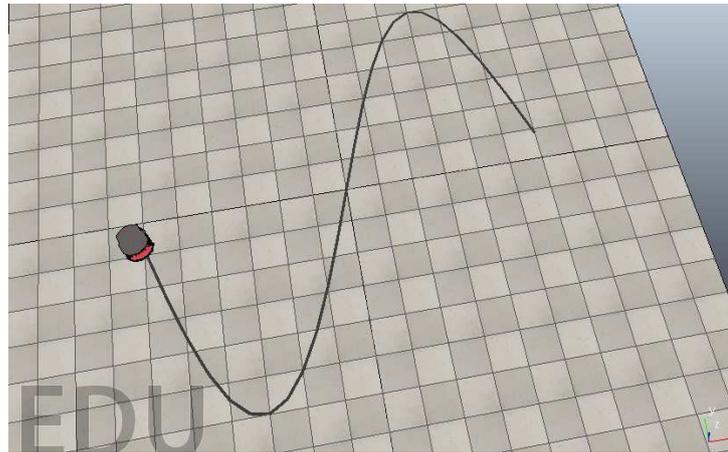


Figura 21 – Ambiente de Simulação V-REP

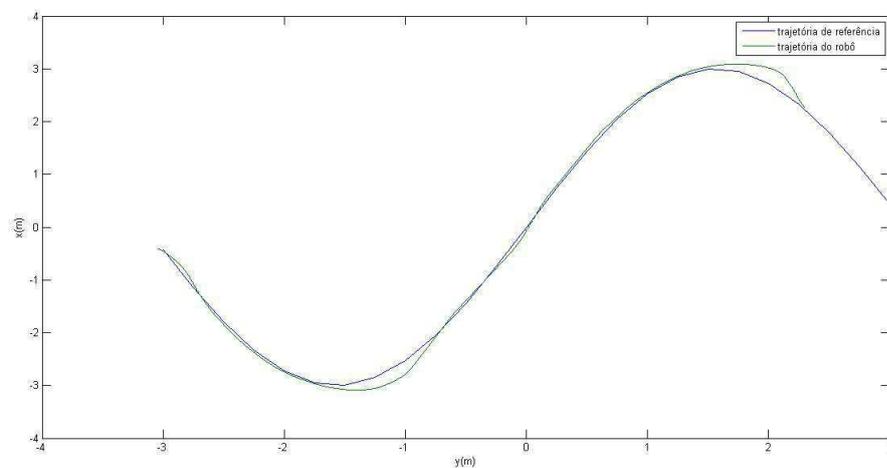


Figura 22 – Comparação da trajetória do robô e da trajetória de referência

6 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. Dentre os conhecimentos necessários para a realização do projeto e aprendidos ao longo do curso de Engenharia Elétrica, destacam-se o conhecimento em eletrônica, eletrônica de potência, microcontroladores, além de outros conhecimentos informais adquiridos ao longo dos trabalhos e projetos nos quais o estagiário participou ao longo do curso.

O projeto de desenvolvimento do VASAR mostrou-se um excelente teste de projeto de engenharia, uma vez que os recursos para construção do protótipo eram limitados e muitas soluções criativas tiveram de ser desenvolvidas, como por exemplo, os circuitos eletrônicos de acionamento dos motores, nos quais uma limitação do microcontrolador foi imposta e uma solução foi proposta. Além disso, é um projeto multidisciplinar, onde diversos conhecimentos da física e engenharia são abordados simultaneamente.

As expectativas tanto do estagiário quanto da empresa cedente do estágio foram, assim, alcançadas. O estagiário pôde colocar em prática os conteúdos aprendidos ao longo da graduação em um projeto prático de engenharia, enquanto a empresa ganha uma solução para o problema de posicionamento e controle de trajetória do barco.

Trabalhos futuros devem ser desenvolvidos para a evolução do projeto do VASAR, dentre os quais destacam-se:

- Integração de um acelerômetro para monitoramento de velocidade;
- Integração de sensores de velocidade dos motores;
- Comunicação em rádio-frequência para leitura remota de posição e escrita remota de referências;
- Integração de um dispositivo ultrassônico para detecção de obstáculos.

7 Anexo - Código MATLAB da simulação computacional no VREP

```

        while 1 new_clk = clock;
if(new_clk(5) == clk(5)+4)
break
end

```

```

        [resp,position] = vrep.simxGetObjectPosition(clientID,handle_p3dx,-1,2);
while resp = 0
resp,position = vrep.simxGetObjectPosition(clientID,handle_p3dx,-1,2);
end

```

```

        [g,orientation] = vrep.simxGetObjectOrientation(clientID,handle_p3dx,-1,2);
orientation = orientation*(180/pi);
while g = 0

```

g, orientation

```

= vrep.simxGetObjectOrientation(clientID,handle_p3dx,-1,2);
orientation = orientation*(180/pi);
end

```

```

        x_rob = position(1);
y_rob = position(2);
theta_rob = orientation(3);

```

```

        x_ref = vetor_posicao_segmento(contador,1);
y_ref = vetor_posicao_segmento(contador,2);

```

```

        distancia = sqrt((position(1) - vetor_posicao_segmento(contador,1))^2 + (posi-

```

```
tion(2) - vetor_posicao_segmento(contador,2))2);
Gamma = abs(a(contador)*x_rob + b(contador)*y_rob + c(contador))/sqrt(a(contador)2
+ b(contador)2);
if y_rob > y(contador)
Gamma = - Gamma;
end

    ang_ref = (180/pi)*atan2((y_ref - y_rob),(x_ref - x_rob));
erro_ang = ang_ref-theta_rob;

    if erro_ang > pi
erro_ang = erro_ang - 180;
end
if erro_ang <-pi
erro_ang = erro_ang + 180;
end

    localizaoy(contador_d) = y_rob;
localizacox(contador_d) = x_rob;

    if(distancia >= 2)
Vp = 5.0;
end

    if(distancia < 2 && distancia >= 1)
Vp = 4.0;
end

    if(distancia < 1 && distancia >= 0.5)
Vp = 3.0;
end
```

```
        if(distancia < 0.5 && distancia >= 0.25)
Vp = 2.0;
end
```

```
        if(distancia < 25 && distancia >= 0.1)
Vp = 1.0;
end
```

```
delta_ang = ang_ref - theta_rob;
```

```
        if(abs(delta_ang) <= 180)
if(delta_ang > 0)
s = 1;
else
s = -1;
end
else
if(delta_ang > 0)
s = -1;
else
s = 1;
end
end
```

```
        if(abs(delta_ang)<180 && abs(delta_ang) >= 155)
delta_w = 1.5*Vp;
end
```

```
        if(abs(delta_ang)<155 && abs(delta_ang) >= 130)
delta_w = 1.2*Vp;
```

```
end
```

```
    if(abs(delta_ang)<130 && abs(delta_ang) >= 105)
delta_w = 1.1*Vp;
end
```

```
    if(abs(delta_ang)<105 && abs(delta_ang) >= 75)
delta_w = Vp;
end
```

```
    if(abs(delta_ang)<75 && abs(delta_ang) >= 50)
delta_w = 0.5*Vp;
end
```

```
    if(abs(delta_ang)<50 && abs(delta_ang) >= 25)
delta_w = 0.25*Vp;
end
```

```
    if(abs(delta_ang)<25 && abs(delta_ang) >= 5)
delta_w = 0.125*Vp;
end
```

```
    if(abs(delta_ang)< 5)
delta_w = 0;
end
```

```
    if(abs(distancia) < 0.2)
contador = contador + 1;
if(contador == length(vetor_posicao_segmento))
contador = 1;
```

```
end  
end
```

```
    Vd = Vp + s*delta_w;  
Ve = Vp - s*delta_w;
```

```
    e = vrep.simxSetJointTargetVelocity(clientID,handle_motor_direito,Vd,0);  
while e = 0  
e = vrep.simxSetJointTargetVelocity(clientID, handle_motor_direito,Vd,0);  
end
```

```
    f = vrep.simxSetJointTargetVelocity(clientID, handle_motor_esquerdo,Ve,0);  
while f = 0  
f = vrep.simxSetJointTargetVelocity(clientID, handle_motor_esquerdo,Ve,0);  
end
```

```
    velocidades_motor_esquerdo(contador_e) = Ve;  
velocidades_motor_direito(contador_d) = Vd;  
distancias(contador_d) = Gamma;  
angulos(contador_d) = erro_ang;  
contador_e = contador_e + 1;  
contador_d = contador_d + 1;
```

```
    end  
  
    figure(4)  
plot(x,y,localizacaox,localizacaoy), legend('trajetória de referência','trajetória do robô'),xlabel('y(m)')
```

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, p. 57–67, 2010.
- 2 CARVALHO, N. de O. *Guia de Práticas Sedimentométricas*. 2000. ANEEL.
- 3 CONAMA. *CONAMA nº 357/2005*. Brasil, 2005.
- 4 MICROCHIP. *PIC18F2525/2620/4525/4620 Data Sheet*. USA, 2004.
- 5 GLOBALSAT TECHNOLOGY CORPORATION. *GPS Engine Board ET-112/ER-112*. USA.
- 6 HONEYWELL. *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L*. USA.