



**Marcos Aurelio Pinto Marzano Jr.**

**Sistema Robótico para Monitoramento  
da Qualidade da Água em Ambientes Lênticos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco

Co-Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro

Abril de 2016



**Marcos Aurelio Pinto Marzano Jr.**

**Sistema Robótico para Monitoramento da Qualidade da Água  
em Ambientes Lênticos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco**

Orientadora

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa**

Co-Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Profa. Karla Tereza Figueiredo Leite**

Co-Orientadora

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Paulo Fernando Ferreira Rosa**

IME

**Prof. Eduardo Costa da Silva**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Profa. Izabel Cristina Reis Mendes**

Fundação de Apoio à Escola Técnica do Estado do Rio de Janeiro

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico

Rio de Janeiro, 15 de abril de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

**Marcos Aurélio Pinto Marzano Júnior**

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2011.

Ficha Catalográfica

Marzano Jr., Marcos Aurelio Pinto

Sistema Robótico para Monitoramento da Qualidade da Água em Ambientes Lênticos / Marcos Aurelio Pinto Marzano Jr.; orientadora: Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco; co-orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. – 2016.

102 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Robô. 3. Eletrônica Embarcada. 4. Ambiente Aquático. 5. Sistema de Controle. 6. Sensores Físico-Químicos. I. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi. II. Barbosa, Carlos Roberto Hall. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Rita de Cássia Guilherme Marzano e Marcos Aurélio Pinto Marzano, pela educação, atenção, exemplo de vida, carinho e todo apoio nos momentos difíceis.

A minha querida esposa por compartilhar desta minha trajetória lado a lado, proporcionando uma âncora em minha vida.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam e me ajudaram.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

## Resumo

Marzano, Marcos. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Orientadora). **Sistema Robótico para Monitoramento da Qualidade da Água em Ambientes Lênticos**. Rio de Janeiro, 2016. 102p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nas últimas décadas, a crescente conscientização ambiental levou ao reconhecimento da necessidade do uso responsável dos recursos hídricos. Para garantir isso, a boa gestão de reservatórios hídricos requer um monitoramento ambiental adequado, com medições confiáveis dos parâmetros de qualidade da água em vários pontos do reservatório, permitindo o controle da qualidade da água e seus impactos na fauna, flora e comunidades ribeirinhas dos reservatórios. O monitoramento das variáveis ambientais dos reservatórios é atualmente realizado por processo tradicional de coleta manual. Infelizmente, no Brasil, as iniciativas de produzir um sistema robótico aquático com tecnologia nacional e de baixo custo, quando comparado a equivalentes importados, são ainda raras e se restringem a algumas poucas instituições acadêmicas, não tendo sido localizado nenhum fabricante comercial deste tipo de veículo no país. Visando preencher esta lacuna, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento do protótipo de um sistema robótico aquático capaz de se locomover autonomamente em lagoas, lagos e reservatórios, coletando informações físico-químicas da água e armazenando estes dados na memória. Além disso, foi incluído no protótipo uma câmera de vídeo, sistema de iluminação e um sistema de controle remoto, objetivando o controle pela equipe em terra. Nos testes realizados em dias ensolarados e chuvosos, o robô apresentou boa dirigibilidade, estabilidade e manobrabilidade. O vaso de pressão do sistema robótico resistiu às pressões necessárias durante os testes, a eletrônica conseguiu atender as especificações de projeto e o *software* conseguiu estabelecer um controle de navegação, cumprindo o trajeto de uma rota estabelecida.

## Palavras-chave

ROV; Robô; Autônomo; Ambiente Aquático; Qualidade Água; Sistema de Controle; Remotamente Controlado; Sensores Físico-Químicos; Eletrônica Embarcada.

## Abstract

Marzano, Marcos. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Advisor). **Robotic System for Monitoring Water Quality in Lentic Environments**. Rio de Janeiro, 2016. 102p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In recent decades, the growing environmental awareness has led to the recognition of the need for responsible use of water resources. To ensure this, the good management of water reservoirs requires adequate environmental monitoring, with reliable measurements of water quality parameters in various parts of the reservoir, allowing the control of water quality and its impacts on fauna, flora and riverine communities of the reservoirs. Monitoring environmental variables of the reservoirs is currently performed by traditional process of manual collection. Unfortunately, in Brazil, initiatives to produce a water robotic system with national and low cost technology, compared to imported equivalents, are still rare and restricted to a few academic institutions, and no commercial manufacturer of this type of vehicle was found in the country. Aiming to fill this gap, the main objective of this study was to develop a prototype of a water robotic system capable of autonomously navigate in ponds, lakes and reservoirs, collecting physicochemical information of water and storing this data in memory. Moreover, a video camera, illumination and a remote control system were included in the prototype, allowing the team on the ground to control the prototype. In tests conducted in sunny and rainy days, the robot presented good handling, stability and maneuverability. The robotic system pressure vessel resisted pressures required during testing, the electronics met the design specifications and the software was able to establish a navigation control, fulfilling the path of an established route.

## Keywords

ROV; Autonomous robot; Aquatic environment; Water quality; Control system; Remotely controlled; Physico-chemical sensors; Embedded electronics.

# Sumário

1. Introdução	13
1.1. Motivação	13
1.2. Objetivos	14
1.3. Descrição do Trabalho	15
1.4. Organização da Dissertação	16
2. Fundamentação Teórica	18
2.1. Introdução	18
2.2. Robôs Autônomos	18
2.3. Sistemas Robóticos Aquáticos e Subaquáticos	19
3. Desenvolvimento do Protótipo do Sistema Robótico	27
3.1. Introdução	27
3.2. Componentes Estruturais e Vaso de Pressão	27
3.3. Componente de Vetorização de Empuxo e Propulsão	32
3.4. Componente de Emersão, Submersão, Visão Subaquática e Iluminação	38
4. Projeto Eletrônico	42
4.1. Introdução	42
4.2. Sensores	44
4.2.1. Sensores de Navegação	45
4.2.2. Sensores Físico-Químicos	49
4.2.3. Sensores de Segurança	55
4.3. Eletrônica de Controle e Software	57
4.3.1. Microcontroladores	57
4.3.2. PWM – Pulse With Modulation	60
4.3.3. Controlador de Velocidade dos Motores	61
4.3.4. Controlador de Brilho do Sistema de Iluminação	62
4.3.5. Software	63
4.4. Hardware Desenvolvido	68
4.4.1. Regulador de Tensão	68
4.4.2. Mala de Controle	70
5. Estudo de Casos	75
5.1. Introdução	75
5.2. Metodologia	76
5.3. Resultados Obtidos	77
5.3.1. Sistema de Visão e Transmissão de Vídeo	77
5.3.2. Sistema de Iluminação	79
5.3.3. Sistema Remotamente Controlado	80
5.3.4. Sistema no Modo Autônomo	82
5.3.5. Teste na Baía de Guanabara	83
5.3.6. Teste na Lagoa Rodrigo de Freiras	84
5.3.7. Teste dos Sensores Físico-Químicos	86

<b>6. Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>87</b>
6.1. Conclusões	87
6.2. Trabalhos Futuros	89
<b>7. Referências bibliográficas</b>	<b>90</b>
<b>Apêndice</b>	<b>94</b>
1. Princípio de Funcionamento dos Sensores	94
1.1. GPS	94
1.2. Central Inercial	95
1.3. Acelerômetro ADXL 345	96
1.4. Giroscópios	97
1.5. Sensor Oxigênio Dissolvido	99
1.6. Sensor de PH	100
2. Leitura Sensores Físico-Químicos	102



## Lista de Figuras

Figura 1 - Página do Código Atlântico.....	20
Figura 2 - Modelos de ROV's Utilizados na Indústria do Petróleo. O da Esquerda é o <i>ALive 1</i> da Cibernétix e o da Direita o <i>Stealth</i> da HITEC. Fonte: (Magalhães, 2007).....	21
Figura 3 - ROV Tiburon na Esquerda e ROV Kaiko na Direita. Fonte: (Magalhães, 2007).....	22
Figura 4 - Exemplo de Glider Oceânico.....	22
Figura 5 - Ilustração do Projeto da Boia PIRATA.....	23
Figura 6 - Ilustração do Projeto PNBOIA.....	23
Figura 7 - Ilustração projeto YARA.....	24
Figura 8 - Imagens de Sistemas Robóticos em Formatos de Barcos. Imagem Superior Representa o Projeto LEMUSV e as Inferiores o Projeto AutoNaut.....	25
Figura 9 - Imagem do Projeto Lake Wivenhoe ASV.....	25
Figura 10 - Fluxo de planejamento.....	28
Figura 11 - Construção e montagem da estrutura em PVC.....	29
Figura 12 - Imagem virtual da estrutura do protótipo para validação do conceito.....	30
Figura 13 - Estrutura real do protótipo montado.....	30
Figura 14 - Simulação de deformação nas peças de PVC utilizadas para fabricação da estrutura do robô.....	31
Figura 15 - Teste hidrostático no compartimento da eletrônica.....	32
Figura 16 - Motor Jhonson 500 GPH (31,55 l/min).....	33
Figura 17 - Montagem final do propulsor.....	35
Figura 18 - Descrição das partes do hélice.....	35
Figura 19 - Diâmetro x passo do hélice.....	36
Figura 20 - Sistema diferencial de locomoção.....	38
Figura 21 - Equilíbrio hidrostático.....	39
Figura 22 - Primeiro teste de flutuabilidade do sistema robótico.....	39
Figura 23 - Processo de resinagem dos componentes.....	40
Figura 24 - Resultado final após a utilização de resina.....	40
Figura 25 - Sistema de iluminação.....	41
Figura 26 - Diagrama de alto nível de funcionamento do <i>hardware</i> do veículo no modo 1.....	43
Figura 27 - Diagrama de alto nível de funcionamento do <i>hardware</i> do veículo no modo 2.....	44
Figura 28 - Módulo de GPS utilizado (LS20031).....	45
Figura 29 - Sensor IMU 6DOF Digital Combo Board.....	46
Figura 30 - Início do Protocolo I2C.....	47
Figura 31 - Término do Protocolo I2C.....	48

Figura 32 - Funcionamento Global do Protocolo I2C.....	48
Figura 34 - Sensor de temperatura DS18B20.....	51
Figura 35 - D.O. kit da Atlas Scientific (sensor de oxigênio dissolvido na água). ....	52
Figura 36 - ORP kit da Atlas Scientific.....	54
Figura 37 - pH kit da Atlas Scientific.....	54
Figura 38 - Kit de condutividade elétrica da Atlas Scientific.....	55
Figura 39 - Sensor de corrente do motor. ....	56
Figura 40 - Sensor AT Dev Board (detector de água). ....	56
Figura 41 - Sensor Spartan G4. ....	57
Figura 42 – Arduino Mega 2560 R3.....	59
Figura 43 - Esquema da ligação dos sensores no arduino. ....	60
Figura 44 - Sinal PWM.....	61
Figura 45 - Controlador de Velocidade Sabertooth 2x12A.....	62
Figura 46 - Controlador Wasp. ....	63
Figura 47 - Placa ArduPilot. ....	64
Figura 48 - Imagem do planejamento da missão. ....	65
Figura 49 - Imagem do display do horizonte artificial. ....	66
Figura 50 - Tela para ajustes dos ganhos das constantes do PID. ....	67
Figura 51 - Esquema geral da eletrônica. ....	67
Figura 52 - Esquema do circuito regulador de tensão 3.3V. ....	69
Figura 53 - Layout do desenvolvimento do hardware de regulador de tensão (3.3 V).....	69
Figura 54 - Vista 3D do hardware do regulador de tensão (3.3 V). ....	70
Figura 55 – Na imagem da esquerda a mala de polipropileno utilizada, e na imagem da direita o sistema de controle remoto desenvolvido.....	71
Figura 56 - Demonstração do sistema de monitoramento da bateria. ....	71
Figura 57 - Ilustração dos acionamentos. ....	72
Figura 58 - Esquema de ligação da mala de controle.....	72
Figura 59 - Lago utilizado para os testes.....	75
Figura 60 - Praia da Freguesia situada na Ilha do Governador - RJ.....	77
Figura 61 - Imagem com os motores desligados. ....	78
Figura 62 - Imagem com os motores ligados. ....	78
Figura 63 - Teste sistema de iluminação. ....	79
Figura 64 - Imagem do código de barras debaixo d'água. ....	80
Figura 65 - Distância da câmera para o código de barras da garrafa plástica. ....	80
Figura 66 - Teste em dia chuvoso.....	81
Figura 67 - Teste dia com sol. ....	81
Figura 68 - Comparação de <i>waypoints</i> no modo autônomo e no modo remotamente controlado. ....	83
Figura 69 - Teste na Baía de Guanabara.....	84
Figura 70 - Testes realizados na lagoa Rodrigo de Freitas.....	85

Figura 71 - Trilateração 2D (Bidimensional). ....	95
Figura 72 - Esquema geral utilização de uma central inercial.....	96
Figura 73 - Princípio de funcionamento de um acelerômetro eletrônico. ....	97
Figura 74 - Estrutura interna de um acelerômetro da família ADXL.....	97
Figura 75 - Estrutura interna do giroscópio com estrutura em forma de pente. ....	98
Figura 76 - Girômetro com rotor oscilante.....	99
Figura 77 - Detalhes da estrutura de um Girômetro ressonador Wine Glass. ....	99
Figura 78 - Estrutura do sensor de oxigênio dissolvido. ....	100
Figura 79 - Estrutura do sensor de pH.....	101

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Componentes utilizados para montagem da estrutura em PVC. ....	29
Tabela 2 - Características do Motor Jhonson 500 GPH. ....	33
Tabela 3 - Descrição dos valores gastos para componentes do capítulo 3. ....	41
Tabela 4 - Parâmetros de qualidade da água do IQA e respectivo peso.....	49
Tabela 5 - Faixa de valores IQA.....	50
Tabela 6 - Nível de ORP e aplicações. Fonte: <a href="http://www.ozoneapplications.com/info/orp.htm">http://www.ozoneapplications.com/info/orp.htm</a> .....	53
Tabela 7 - Relação nível ORP e coliformes. Fonte: <a href="http://www.ozoneapplications.com/info/orp.htm">http://www.ozoneapplications.com/info/orp.htm</a> .....	53
Tabela 8 - Descrição dos valores gastos para os componentes do capítulo 4. ....	73

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Motivação

É notório o avanço da tecnologia de um modo geral nas últimas décadas. Diversas tendências, com o passar dos anos, têm se consolidado nos diversos setores, tais como: médico, industrial, aeroespacial, militar, dentre outros. De um modo geral, uma das áreas que recebeu um enfoque maior é a robótica, devido às diversas aplicações e benefícios que a tecnologia deste setor pode trazer aos seus usuários.

De forma geral, os serviços que dependem de um bom monitoramento e vigilância ambiental sofrem muito com as técnicas empregadas atualmente, pois, além do difícil acesso humano a alguns locais, existem tarefas bastante repetitivas, perigosas e em alguns casos nocivas ao ser humano, tais como: o monitoramento e a manutenção de usinas nucleares e termoeletricas, grandes extensões de terra como florestas e matas, ambientes aquáticos, submersos, aéreos, dentre outros. Portanto, a robótica é considerada atualmente uma excelente alternativa para estas aplicações, auxiliando o desenvolvimento de projetos mecânicos e eletrônicos voltados para as áreas de inspeção não destrutiva, monitoramento ambiental e demais áreas afins (Secchi, 2008).

No âmbito do meio ambiente, associado a grande necessidade de monitoramento ambiental, há inúmeras intervenções humanas significativas no ciclo hidrológico como, por exemplo, a construção de represas. Nas últimas décadas, a crescente conscientização ambiental levou ao reconhecimento da necessidade do uso responsável dos recursos hídricos e da mitigação de impactos negativos. Além de todo este aspecto ambiental, o monitoramento dos reservatórios, utilizados para aproveitamento hidrelétrico, auxilia no prolongamento da vida útil dos equipamentos e sistemas das usinas. Controlando-se, por exemplo, o PH d'água, reduz-se a corrosão de equipamentos.

A boa gestão de reservatórios hídricos requer um monitoramento ambiental adequado, com medições confiáveis dos parâmetros de qualidade da água em vários pontos do reservatório, permitindo o controle da qualidade da água e seus impactos na fauna, flora e comunidades ribeirinhas do reservatório.

A crescente deterioração da qualidade das águas afeta diretamente a vida aquática, tendo levado à busca de estratégias para proteção e manutenção da qualidade dos ecossistemas aquáticos. Neste cenário, o monitoramento surge como ferramenta importante para avaliação de ecossistemas aquáticos (Hanisch; Souza, 2015). Em geral, o objetivo do monitoramento de parâmetros qualitativos e quantitativos da qualidade da água é fornecer uma avaliação do ambiente aquático (Psilovikos, 2005).

O monitoramento das variáveis ambientais dos reservatórios é atualmente realizado em sua grande maioria por um processo tradicional de coleta manual, demandando uma grande quantidade de tempo, mobilização de grandes recursos como, por exemplo, mão de obra para realização da coleta, e acarretando um maior custo financeiro de modo geral.

## 1.2

### Objetivos

Em função do exposto na seção anterior, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento prático do protótipo de um sistema robótico aquático capaz de se locomover autonomamente em lagoas, lagos e reservatórios, coletando e armazenando informações físico-químicas da água, visando posteriormente uma análise dos mesmos. Assim, um operador externo, ao final da jornada de trabalho e da rotina programada, pode realizar a manutenção no sistema robótico e copiar os dados armazenados. É importante ressaltar que este sistema foi projetado focando no baixo custo de seu desenvolvimento, além de possuir dois modos de operação: controlado remotamente pelo operador e autônomo. No modo autônomo, o controle é capaz de:

- Atuar nos motores de forma a seguir uma rota pré-estabelecida;
- Realizar a leitura e armazenar os dados dos sensores responsáveis por monitorar a qualidade da água;

- Ser capaz de interagir com o ambiente externo, desviando de possíveis obstáculos ao longo da rota traçada; e
- Monitorar o sistema de forma a identificar previamente possíveis problemas no *hardware* que o compõe.

Uma vez que a proposta deste trabalho é apenas o desenvolvimento de um protótipo, torna-se importante outro aspecto: o custo. Assim, todo o trabalho aqui desenvolvido foi realizado visando a soluções práticas, simples, eficazes e funcionais. Por meio de algumas soluções inovadoras, espera-se atingir um valor de prototipagem relativamente baixo para a proposta aqui apresentada.

É esperado que este sistema robótico contribua para um aprimoramento substancial do sistema atual de monitoramento de ambientes de águas lânticas, modernizando parte do processo. Como a finalidade deste projeto é a melhoria e refino da coleta de informações sobre a qualidade ambiental da água, este pode servir de auxílio à pesquisa científica, ecologia e colaboração com órgãos governamentais para finalidades específicas em lagoas, reservatórios e lagos, especialmente quando localizados em ambientes urbanos ou reservatórios de centrais hidrelétricas.

### 1.3

#### Descrição do Trabalho

Este trabalho foi elaborado seguindo as seguintes etapas:

- Estudo sobre a área de robótica, sistemas robóticos remotamente controlados e autônomos;
- Estudo específico de modelos aplicáveis em ambientes aquáticos;
- Definição conceitual e desenvolvimento do protótipo robótico; e
- Avaliação e testes.

Na primeira etapa do trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico referente aos diversos sistemas robóticos, analisando as vantagens e desvantagens do emprego destes sistemas.

Além disso, foi realizado um estudo detalhado dos diferentes sistemas robóticos aquáticos, suas respectivas aplicações, métodos de construção, métodos de controle e das variáveis envolvidas no trabalho de monitoramento ambiental. A partir das análises detalhadas desses trabalhos, foram definidas as principais características importantes e necessárias a serem consideradas no desenvolvimento do sistema robótico proposto neste trabalho.

Na etapa de construção do protótipo, o foco principal foi a utilização de materiais de fácil acesso e baixo custo, além da confiabilidade e facilidade dos controles do sistema, tanto no modo autônomo, quanto no modo remotamente controlado pelo operador.

Na etapa de estudo de casos foram realizados diversos testes, focando em diferentes ambientes, de forma a permitir a comprovação da robustez do sistema e a coleta dos dados referentes a qualidade da água pelos sensores físico-químicos.

## 1.4

### Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em mais 5 (cinco) capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 2 descreve os sistemas existentes, ou seja, os sistemas robóticos aquáticos já desenvolvidos, suas respectivas funcionalidades e técnicas utilizadas, destacando suas vantagens e desvantagens. Todos os conceitos básicos necessários para o entendimento das técnicas aplicadas no protótipo desenvolvido são descritos neste capítulo.

Visando a um melhor entendimento deste trabalho, o desenvolvimento do sistema robótico foi dividido em dois capítulos consecutivos – capítulo 3 e capítulo 4. No Capítulo 3 são apresentadas características e conceitos importantes do protótipo desenvolvido, focando no método de construção mecânica, locomoção utilizada e modelo virtual. Já no capítulo 4, todo o projeto eletrônico é descrito, ressaltando a eletrônica embarcada no sistema robótico, os sensores e o hardware desenvolvido. Além disso, este capítulo aborda o *software* desenvolvido e o respectivo controle autônomo do sistema.



O Capítulo 5 apresenta os testes e os estudos de caso realizados, no qual se utiliza o protótipo para realizar a coleta de informações físico-químicas da água, destacando os resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 6 estão descritas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

## 2

## Fundamentação Teórica

### 2.1

#### Introdução

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre robôs, especificando principalmente as características fundamentais dos autônomos. Além disso, diversos sistemas robóticos aquáticos são apresentados, os quais são referências para o protótipo desenvolvido neste trabalho.

### 2.2

#### Robôs Autônomos

O termo "robô" vem da palavra tcheca "robota", que significa "trabalho forçado". Uma das ideias mais antigas que se conhecem sobre dispositivos automáticos ou autômatos, foi criada pelo matemático grego Arquitas de Tarento em 350 A.C.. Ele criou um pássaro de madeira que batizou de "O Pombo", sendo este dispositivo propulsionado por vapor e jatos de ar comprimido (Maliuk, 2009).

Um **robô** é um dispositivo automático e reprogramável, projetado para executar movimentos variados e programados com o intuito de realizar diversas tarefas. De maneira geral, os robôs podem ser parcialmente ou totalmente controlados por seres humanos, havendo ainda sistemas autônomos, ou seja, sem nenhuma intervenção humana. Robôs autônomos devem ser capazes de realizar tarefas em ambientes desestruturados sem a ajuda humana, graças a uma autonomia para tomada de decisões (Cazangi, 2008).

Há diferentes tipos de níveis e formas de autonomia para um robô. Uma das formas de aumentar o grau de autonomia do robô é dotá-lo com a característica de inteligência, agregando, por exemplo, a capacidade de aprendizado. A automatização de um robô pode envolver inclusive aprendizado automático, através da utilização de algoritmos específicos. Um dos mais altos níveis de autonomia é particulamente desejado em campos como a exploração espacial,

onde a comunicação possui atrasos e as interrupções são inevitáveis. De maneira geral, um robô totalmente autônomo no mundo real tem as seguintes habilidades (Klipp, 2013):

- Receber informações do seu ambiente;
- Trabalhar por um período sem nenhuma interferência humana;
- Deslocar-se sem assistência de navegação humana;
- Evitar situações que são perigosas para as pessoas;
- Reparar-se sem ajuda externa, apesar de que, grande parte dos robôs autônomos ainda requer manutenção com intervenção humana regularmente, assim como de outras máquinas.

Como mencionado anteriormente, um robô também pode ser capaz de aprender autonomamente. O aprendizado autônomo inclui a habilidade de:

- Aprender e/ou ganhar novas capacidades sem assistência externa, ou seja, sem intervenção humana;
- Ajustar suas estratégias baseando-se em informações do ambiente.

## 2.3

### **Sistemas Robóticos Aquáticos e Subaquáticos**

Uma das primeiras pessoas a empreender esforços para projetar um veículo subaquático foi Leonardo da Vinci (Antonelli, 2006). Em sua obra: Código Atlântico (Codex Atlanticus), escrito entre 1480 e 1518, é apresentado o esboço de uma máquina subaquática para fins militares. Esta ideia teria sido abandonada, pois Leonardo da Vinci a considerou muito perigosa. A Figura 1 ilustra o projeto do suposto equipamento.

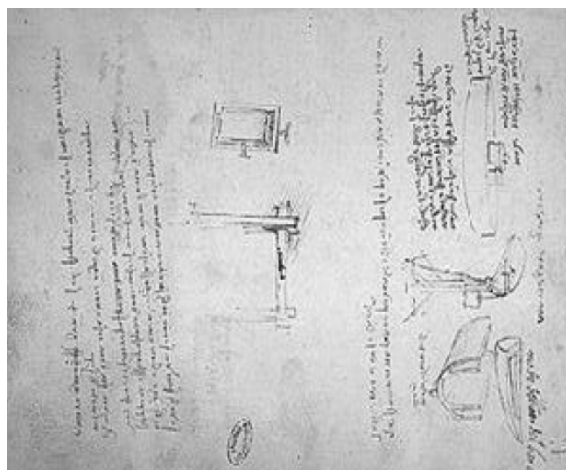


Figura 1 - Página do Código Atlântico.

O primeiro veículo capaz de operar submerso foi desenvolvido em 1771 (Santos; Mori, 2010) e foi batizado de *The American Turtle* (Tartaruga Americana), tendo finalidade militar e funcionamento por meio da força braçal dos tripulantes, os quais rapidamente tornavam-se exaustos. Assim, somente depois da invenção dos motores de combustão interna e dos motores elétricos é que este tipo de veículo se tornou viável, sendo a construção do Nautilus o ápice desta tecnologia (Santos; Mori, 2010), uma vez que estes veículos começaram a funcionar com energia nuclear. Em comum, todos estes veículos possuem a necessidade de uma tripulação.

Por sua vez, a maior parte da bibliografia divide os veículos subaquáticos não tripulados em dois grupos (Centeno, 2007):

- Veículos operados remotamente (*Remotely Operated Vehicles* – ROVs): Sua alimentação e comunicação se dão através de um cabo umbilical, o qual está ligado a um painel de controle do operador. Assim, este pode realizar as manobras do veículo por meio de um *joystick* e realizar a leitura de dados por um painel acoplado.
- Veículos autônomos (*Autonomous Underwater Vehicles* – AUVs): Como já foram definidos robôs autônomos e o próprio nome deste veículo sugere sua aplicação, estes veículos não sofrem intervenção humana durante sua operação. Assim, a fonte de alimentação normalmente é embarcada no veículo junto com a eletrônica de controle.

Robôs subaquáticos têm sido uma área de destaque nos últimos anos, devido ao simples fato de reduzirem o alto custo e risco de veículos tripulados em ambientes hostis. Dentre suas aplicações, pode-se citar:

- Missões de reconhecimento no fundo do mar;
- Manutenções de gasodutos, cabos e estruturas *offshore*;
- Inspeções de equipamentos *offshore*; e
- Coleta de dados para pesquisas biológicas.

Diversos modelos de ROVs submersíveis são extremamente utilizados e conhecidos na indústria do petróleo. Entretanto, mesmo o Brasil sendo um grande produtor deste insumo, existem poucos trabalhos e pesquisas experimentais com estes equipamentos, de acordo com Centeno (2007). A Figura 2 ilustra alguns modelos de ROVs normalmente utilizados na indústria do petróleo.



Figura 2 - Modelos de ROV's Utilizados na Indústria do Petróleo. O da Esquerda é o *ALive 1* da Cibernétix e o da Direita o *Stealth* da HITEC. Fonte: (Magalhães, 2007).

Uma classe de ROVs especiais são os projetados para realizar missões em profundidades acima de 3000 metros. Estes veículos são utilizados especialmente para pesquisas oceânicas e atividades ligadas à ciência de modo geral, como, por exemplo, o Tiburon do Monterey Bay Aquarium Research Institute dos Estados Unidos (MBARI) (Magalhães, 2007). Este ROV auxilia o trabalho de observação da vida nas profundezas do oceano por períodos de tempos prolongados. Já o ROV KAIKO, desenvolvido no Japão, alcançou um dos pontos mais profundos da Terra, a 10911,4 metros em 1995 (Magalhães, 2007), tendo realizado mais de 250 mergulhos, colhendo 350 espécies biológicas, incluindo 180 espécies de bactérias. Em 2003 o ROV KAIKO perdeu-se no mar, quando o cabo que o ligava ao seu lançador se partiu. A Figura 3 ilustra os ROVs descritos anteriormente.



Figura 3 - ROV Tiburon na Esquerda e ROV Kaiko na Direita. Fonte: (Magalhães, 2007).

Um outro tipo especial de sistemas submersos são os “*gliders oceânicos*” como, por exemplo, o RU-27 ilustrado na Figura 4, sendo este sistema desenvolvido para ser um veículo autônomo subaquático (AUV) com o objetivo de coletar dados oceânicos.

Ao invés de usar motores e hélices, a propulsão é realizada por tanques de submersão que utilizam a diferença de temperatura da água do mar em diferentes profundidades para impulsioná-lo. Atualmente, existem mais de 100 sondas oceânicas usando este princípio. O RU-27 foi considerado o primeiro AUV controlado capaz de cruzar o oceano (Shapiro, 2010), embora seus criadores tenham precisado viajar até o veículo no meio do oceano para limpar crustáceos que estavam impedindo o AUV de continuar a viagem. A Figura 4 ilustra um exemplo de *glider* oceânico.



Figura 4 - Exemplo de Glider Oceânico.

No âmbito de sistemas robóticos capazes de realizar o monitoramento ambiental sem realizar a submersão do veículo, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) possui diversos exemplos. Além de utilizar satélites de sensoriamento remoto, o INPE possui diversos projetos de boias equipadas com sensores como, por exemplo, o projeto PIRATA e PNBOIA ilustrados nas Figuras 5 e 6 respectivamente (Aroca & Gonçalves, 2010).



Figura 5 - Ilustração do Projeto da Boia PIRATA.



Figura 6 - Ilustração do Projeto PNBOIA.

Além destas boias, na literatura nacional encontra-se um projeto, denominado YARA da empresa Tractebel Energia S.A, voltado para o monitoramento de reservatórios de hidrelétricas (Cobra D; Yamashita, M; Silva, C; Piekar, D; Dupuy, E; Santos, R; Silva, L; Gomes, I; Souza, S; Varela, F; Geszychter, M; 2014). Esta boia é dotada de sonda multiparamétrica que integra sensores para dez parâmetros de qualidade da água e possui também sensores para seis parâmetros atmosféricos, cujas medições são transmitidas para uma base de dados ambientais via rede celular ou canal de satélite. O sistema permite a medição automatizada em tempo real de parâmetros de qualidade da água, de maneira mais eficiente que o processo tradicional de coleta manual. A Figura 7 ilustra a boia YARA descrita anteriormente.



Figura 7 - Ilustração projeto YARA.

Há na literatura outros tipos de projetos de embarcações robóticas para monitoramento ambiental. Entretanto, um dos problemas identificados pelos próprios autores destes projetos é a escassez de estudos visando à detecção de obstáculos durante a navegação destas embarcações (Munhoz & Roda, 2009). De forma geral, no panorama internacional, este tipo de pesquisa é muito mais intensificada, existindo diversos projetos em desenvolvimento dentro de universidades e centros de pesquisas. A seguir, alguns destes projetos serão brevemente descritos e discutidos, objetivando ressaltar suas particularidades e aplicações.

Com relação ao monitoramento oceânico sistemático, o uso de barcos robóticos para substituir as boias de deriva com maior controle, precisão e maior quantidade de sensores é proposto por Briere (2008). Um projeto interessante nesta linha de pesquisa é o “*Aluminum Autonomous Navigator for Intelligent Sampling*” (ALANIS), que consiste de um veículo não tripulado de superfície para monitoramento oceânico. Os autores mencionam que é possível utilizar tal plataforma para monitoramento de costas e oceanos, porém apontam como principais problemas a baixa largura de banda UHF e a falta de sistemas para detecção de obstáculos (Aroca & Gonçalves, 2010).

A fonte de energia mais adotada para tais veículos é a energia solar, entretanto existem projetos que utilizam fontes de energia híbridas, como no projeto descrito em (Rynne & Ellenrieder, 2008), que pode utilizar tanto energia solar quanto o vento para gerar eletricidade, com o objetivo de permanecer no mar por um período de cerca de seis meses.



Com relação à longa permanência no mar e ao desafio de cruzar o oceano Atlântico, existem diversas iniciativas como, por exemplo, os projetos Roboat e o Avalon. O projeto Roboat também alia a eletricidade convertida por painéis solares com a energia proveniente de uma célula de combustível (Aroca & Gonçalves, 2010). Além destes projetos, pode-se citar os projetos LEMUSV, AUTONAUT e LAKE WIVENHOE ASV, ilustrados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

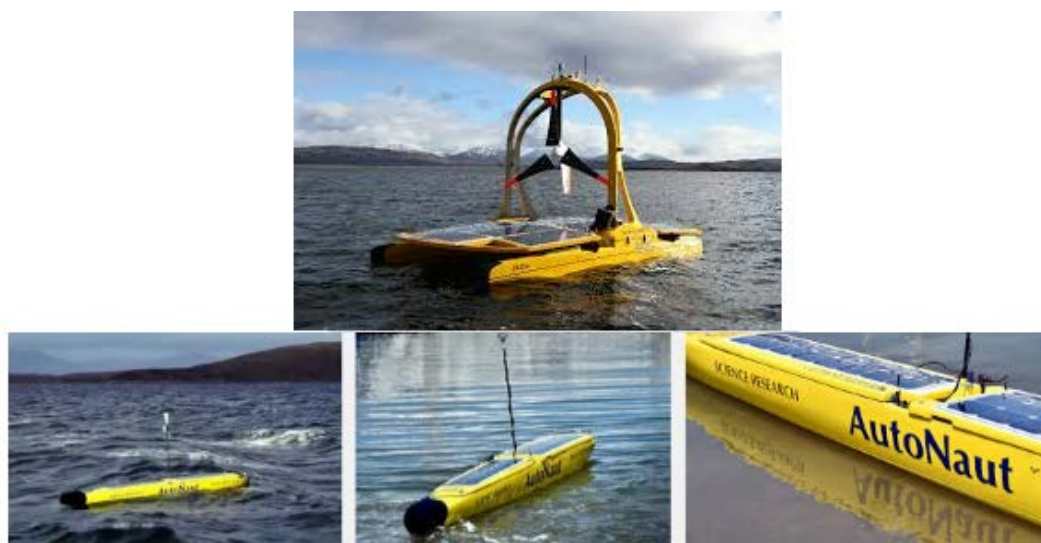


Figura 8 - Imagens de Sistemas Robóticos em Formatos de Barcos. Imagem Superior Representa o Projeto LEMUSV e as Inferiores o Projeto AutoNaut.



Figura 9 - Imagem do Projeto Lake Wivenhoe ASV.

Finalmente, nenhum dos modelos de sistemas robóticos apresentados neste capítulo contemplam uma solução viável para o monitoramento de ambientes lânticos. Esta afirmação tem como base o alto custo financeiro dos sistemas apresentados, a elevada complexidade de operação e desenvolvimento dos sistemas descritos, e, a inviabilidade de locomoção de alguns modelos quando inseridos nos ambientes propostos.

## 3

### Desenvolvimento do Protótipo do Sistema Robótico

#### 3.1

##### Introdução

Além desta seção, este capítulo está subdividido em mais três seções relacionadas somente com o processo mecânico de desenvolvimento do sistema robótico. A primeira seção descreve todos os componentes estruturais utilizados no projeto mecânico e no vaso de pressão. A segunda seção aborda os componentes de vetorização de empuxo e propulsão. Finalmente, a terceira seção menciona a componente de emersão, submersão, sistema de visão subaquática e iluminação no âmbito de suas respectivas construções mecânicas.

#### 3.2

##### Componentes Estruturais e Vaso de Pressão

Com o intuito de se avaliar os requisitos necessários para se atingir o objetivo principal, desenvolveu-se uma metodologia de projeto com o intuito de suprir as exigências necessárias para atender uma dada missão. Logo, no início do projeto se fez necessário responder a uma série de perguntas que determinaram as características do robô, e, delimitaram o seu projeto mecânico e sistemas embarcados, a saber:

- Por quanto tempo o veículo irá operar durante uma dada missão?
- Quais são os sensores e demais equipamentos que o veículo deverá transportar?
- Com qual velocidade o veículo deverá operar?
- O material utilizado para fabricação é robusto e de baixo custo?

As respostas destas perguntas foram fundamentais para a definição de parâmetros importantes do projeto, os quais são listados abaixo e descritos durante este trabalho:

- As dimensões mínimas do compartimento da eletrônica/sistemas embarcados;
- O dimensionamento dos atuadores e a propulsão do robô; e
- A potência consumida pelo sistema.

A Figura 10 apresenta o fluxo do planejamento adotado para a definição dos parâmetros mencionados:

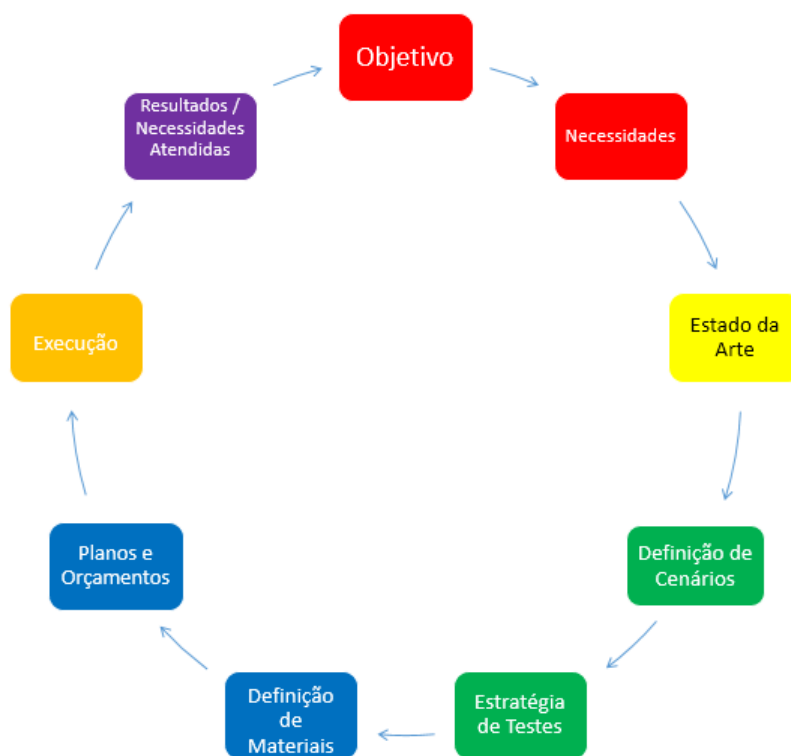


Figura 10 - Fluxo de planejamento.

O tipo de material empregado na construção do sistema influencia diretamente em sua massa e consequentemente, no dimensionamento dos seus atuadores, sistema de potência e sua autonomia. Normalmente, os sistemas existentes utilizam fibra de carbono reforçada com resinas epóxi, tubulações de alumínio, materiais como titânio e cerâmica para a construção dos seus componentes estruturais, dentre outros. Além disso, no âmbito do *layout* é notória a predominância da utilização de gaiolas estruturadas, uma vez que esta solução

reduz o peso, e facilita a fixação de sensores e outros componentes embarcados no sistema (Magalhães, 2007).

Com o intuito de desenvolver um projeto estruturalmente resistente, leve e que permitisse uma flexibilidade de montagem da estrutura, visando uma fácil manutenção e transporte, optou-se por implementar a plataforma utilizando o conceito de uma gaiola tubular. Toda a estrutura do protótipo foi desenvolvida utilizando material hidráulico, ou seja, tubulações de PVC de ½ polegada e conexões de mesmo tamanho. A Tabela 1 indica a respectiva quantidade de cada componente empregado na montagem da estrutura:

Tabela 1 - Componentes utilizados para montagem da estrutura em PVC.

COMPONENTE	QUANTIDADE
Seções de 127 mm de cano PVC ½"	28
Conexão T de PVC ½"	12
Conexão joelho de PVC ½"	12

É importante salientar que, visando uma robustez ainda maior e uma total vedação do sistema, todas as conexões foram devidamente coladas com cola epóxi. Assim, desenvolveu-se uma estrutura bastante robusta, de custo relativamente baixo e bastante prática, uma vez que qualquer alteração na estrutura é facilmente posta em prática alterando somente as conexões dos tubos. Visando ilustrar o processo descrito acima, a Figura 11 demonstra o processo de montagem da estrutura. Por último, toda a estrutura foi pintada com tinta *spray* da cor preta, visando dar acabamento à mesma e esconder imperfeições.



Cola Epóxi / Cola Adesiva Plástica

Figura 11 - Construção e montagem da estrutura em PVC.

Para auxiliar o projeto mecânico, a simulação estrutural e o desenvolvimento das plantas do protótipo, o *software* SolidWorks foi utilizado com o intuito de simular um desenvolvimento virtual do robô, minimizando assim os custos e os desperdícios de materiais envolvidos no projeto. As Figuras 12 e 13 ilustram respectivamente as estruturas do protótipo virtual e a final do sistema experimentalmente montado.

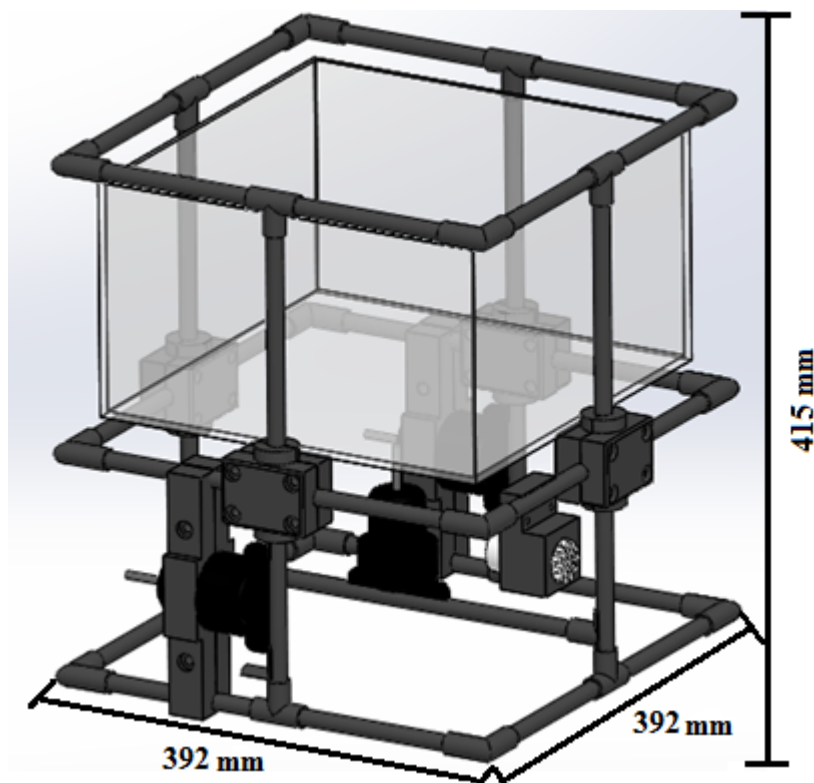


Figura 12 - Imagem virtual da estrutura do protótipo para validação do conceito.



Figura 13 - Estrutura real do protótipo montado.

Foram realizadas algumas simulações estruturais, visando assegurar a robustez da estrutura do robô. Para este fim, utilizou-se o programa Solidworks, *software* também utilizado para o desenvolvimento da concepção virtual do robô. Para as simulações demonstradas abaixo, fixou-se as extremidades da peça de PVC, aplicando sempre uma força homogeneamente distribuída equivalente a 1000 N. Este valor foi estabelecido de forma qualitativa, tendo como premissa que não haverá nenhuma força na estrutura com valor superior a este, uma vez que o sistema tem como objetivo atuar somente em águas lânticas. Por meio da simulação da deformação estrutural do robô, pode-se concluir que uma carga de 100 kg deformaria o centro da peça aproximadamente 8 milímetros, ou seja, a estrutura do robô praticamente não sofre flexão com as forças empregadas durante a operação, uma vez que as forças em questão são menores do que a simulada, já que o robô navega somente na superfície da água em ambientes lânticos.

A Figura 14 ilustra a simulação realizada no SolidWorks.

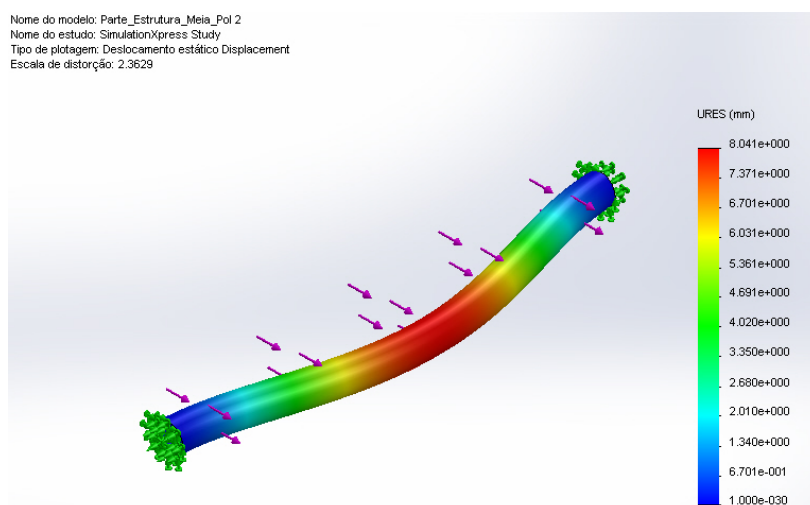


Figura 14 - Simulação de deformação nas peças de PVC utilizadas para fabricação da estrutura do robô.

Outro quesito relevante é o compartimento da eletrônica, uma vez que este deve ser capaz de isolar todos os componentes eletrônicos e as células de bateria do contato com a água. Logo, um módulo de acrílico foi projetado visando blindar os componentes sensíveis, tendo sido dimensionado a fim de auxiliar na flutuabilidade do sistema. Assim, uma caixa foi fabricada nas dimensões máximas do robô, e sua vedação foi realizada com cola epóxi e silicone, uma vez que o compartimento não fica totalmente submerso, ou seja, não está exposto a grandes



pressões. A Figura 15 ilustra o teste hidrostático realizado no módulo da eletrônica, visando verificar a existência de algum vazamento.



Figura 15 - Teste hidrostático no compartimento da eletrônica.

É importante ressaltar que algumas peças estruturais foram fabricadas utilizando UHMW – *Ultra High Molecular Weight*. O polietileno de ultra alto peso molecular é um termoplástico nobre de propriedades notadamente avançadas com excepcional resistência ao impacto, alta resistência à abrasão, excelente resistência química, auto lubrificante, com baixo coeficiente de atrito, extremamente leve e com grande resistência a ocorrência de trincas, conforme especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante. Este plástico tem superado outros materiais em termos de desempenho para algumas aplicações, pois as peças usinadas neste material possuem maior durabilidade mesmo quando muito exigidas e podem substituir peças que precisem de reposição frequente. Os suportes dos motores, da câmera, do sistema de luz e de alguns sensores foram fabricados com este material.

### 3.3

#### Componente de Vetorização de Empuxo e Propulsão

De acordo com (Santos; Mori, 2010), no dado momento que um veículo submerso se movimenta com velocidade constante, a propulsão gerada é igual à força de arrasto produzida pelo veículo:

$$F_p = F_a = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (1)$$



**Onde:**  $F_p$  – Força de propulsão (N)  
 $F_a$  – Força de arrasto (N)  
 $V$  – velocidade (m/s)  
 $C_D$  – coeficiente de arrasto  
 $A$  – área de referência (área frontal) (m<sup>2</sup>)  
 $\rho$  – massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

A potência requerida para o propulsor pode ser calculada por meio da equação a seguir:

$$P_{propulsor} = F_p V = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_D \quad (2)$$

de praticidade, foi utilizar propulsores bombas de água para baixa profundidade. Este modelo de atuador está ilustrado na Figura 16.



Figura 16 - Motor Jhonson 500 GPH (31,55 l/min).

Este motor é relativamente barato e já foi testado em projetos de sistemas subaquáticos similares, podendo portanto ser considerado de grande robustez para esta aplicação. Abaixo segue uma tabela com algumas características encontradas deste motor:

Tabela 2 - Características do Motor Jhonson 500 GPH.

<b>Tensão</b>	12 V
<b>Corrente</b>	2.5 A

Há poucas informações técnicas fornecidas pelo fabricante sobre este motor, sendo desconhecido algumas características, tais como: a constante de torque e a resistência elétrica do motor. Após uma intensa pesquisa sem sucesso por tais parâmetros, optou-se por estimar estes parâmetros de forma experimental. Tais informações são de suma importância para especificação da eletrônica de potência

e escolha do hélice para otimização do empuxo. Portanto, de acordo com Meggiolaro (2009), um motor de corrente contínua pode ser definido por meio de quatro parâmetros, sendo eles:

- $V_{input}$  : Tensão aplicada no motor (volts);
- $K_t$ : Constante de torque do motor, ou seja, razão entre o torque gerado pelo motor e a corrente elétrica (N.m/A);
- $R_{motor}$ : Resistência elétrica do motor;
- $I_{noLoad}$  : Corrente elétrica necessária para o motor girar sem carga no eixo (A).

Por meio destes parâmetros pode-se definir as seguintes equações:

$$\tau = K_t \times (I_{input} - I_{noLoad}) \quad (3)$$

$$\omega = K_v \times (V_{input} - R_{motor} \times I_{input}) \quad (4)$$

$$K_v = \omega_{noLoad} / (V_{input} - R_{motor} \times I_{noLoad}) \quad (5)$$

**Onde:**

$\tau$ : Torque aplicado no motor em um dado instante (N.m);

$\omega$ : Velocidade angular do motor (rad/s)

$I_{input}$ : Corrente elétrica atuante no motor (Amperes);

$K_v$ : Constante de velocidade do motor, ou seja, a razão entre a velocidade do motor e a tensão nele aplicada ((rad/s)/V). Pode ser obtida por meio da equação:

$$K_v = 1/K_t \quad (6)$$

Uma vez definidas tais equações, pode-se de forma experimental realizar a medição da resistência do motor, a medição da corrente elétrica sem carga no motor e a medição da velocidade angular. O primeiro parâmetro medido foi a resistência do motor ( $R_{motor}$ ), onde por meio de um multímetro conectado aos terminais do motor, constatou-se a resistência no valor de 5,7  $\Omega$ . O segundo parâmetro estabelecido foi a corrente elétrica do motor sem carga ( $I_{noLoad}$ ), onde por meio de um amperímetro, constatou-se a corrente no valor de 2,10 A.

Por último, utilizando um tacômetro óptico de efeito estroboscópico, a rotação máxima do motor sem carga foi medida. Finalmente, uma vez tendo todos os parâmetros definidos, pode-se extrair a curva característica do sistema motor - bateria utilizando as equações apresentadas anteriormente.

Acoplado aos motores descritos anteriormente, uma hélice de aeromodelismo foi adaptada para gerar o empuxo necessário para a locomoção do sistema. A Figura 17 ilustra a montagem final do propulsor.

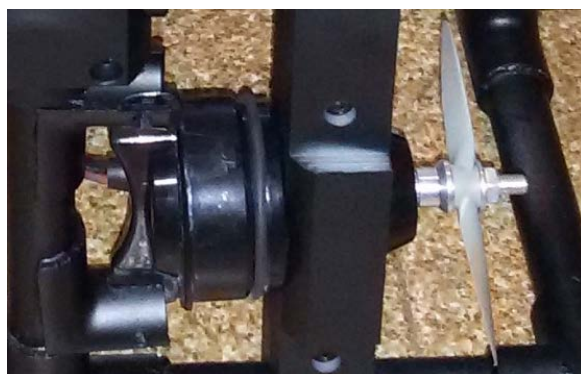


Figura 17 - Montagem final do propulsor.

De acordo com (Landiva & Sergio, 2010) os hélices são constituídos por um núcleo, o cubo ao redor do qual estão dispostas e regularmente distribuídas, um determinado número de pás. A Figura 18 ilustra a descrição das partes do hélice.

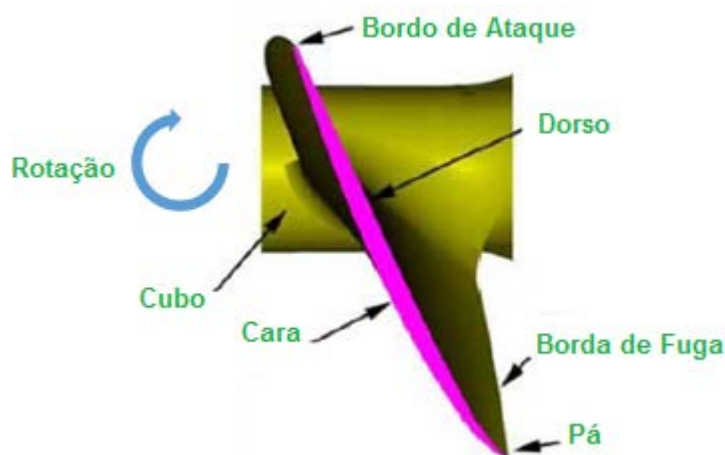


Figura 18 - Descrição das partes do hélice.

A pá do hélice compreende uma superfície ativa, a cara (superfície externa), que geralmente é um helicóide simples. Esta superfície está disposta na parte de trás, em relação ao movimento do hélice. A superfície oposta, o dorso (superfície interna), é geralmente arqueado. A seção transversal da pá se aproxima a dos perfis de mínima resistência à penetração em fluidos. A pá está limitada por um contorno cuja borda dianteira é denominada de bordo de ataque e a borda posterior de bordo de fuga. A seção longitudinal da pá é constituída por uma espessura decrescente do centro para a periferia. A união das pás com o cubo acontece através das superfícies de adesão, que constituem um ponto de alta resistência dos hélices.

Visando otimizar os parâmetros de corrente do motor e empuxo, diversas configurações de hélices foram testadas. Duas grandezas são muito relevantes em se tratando de hélices, o diâmetro e o passo. Normalmente, estes valores são medidos em polegadas, uma vez que a maior parte dos fabricantes são ingleses ou americanos. Como o próprio nome se refere, o diâmetro é a distância entre as pontas das pás, ou mais especificamente, o diâmetro é a média entre as distâncias das pontas das pás ao centro multiplicado por dois, sendo essa forma de referenciar-se ao diâmetro devida ao caso de hélices com números ímpares de pás. Já o passo é uma medida do quanto o hélice avança para a frente a cada rotação. A Figura 19 ilustra o passo e o diâmetro do hélice.

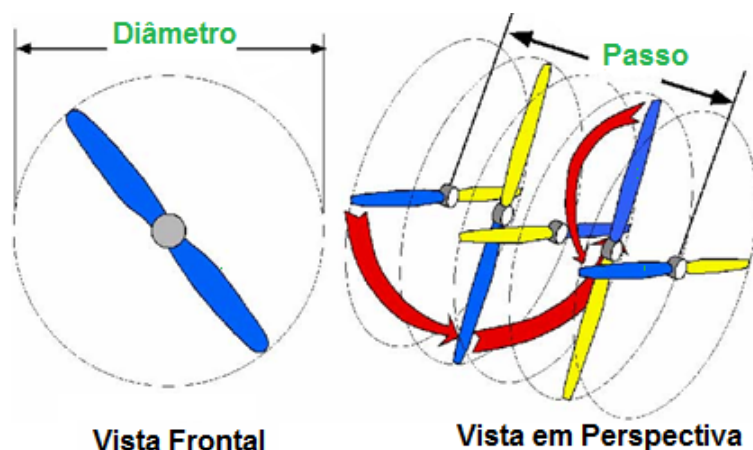


Figura 19 - Diâmetro x passo do hélice.

O funcionamento dos hélices não é muito complexo, embora haja inúmeros estudos sobre o seu funcionamento, principalmente no que se diz respeito à sua eficiência. Atualmente, a dinâmica dos fluidos é uma das áreas amplamente estudadas no campo da física clássica, sendo que as informações mais relevantes são descobertas empiricamente. Basicamente, o trabalho do hélice é puxar o fluido ao seu redor, no caso desta dissertação a água, e empurrá-la para uma direção orientada. No caso do sistema robótico em questão, os hélices deverão puxar a água na frente do robô e empurrar no sentido oposto, gerando assim, uma força que faz com que o sistema se desloque.

Dado um mesmo valor de rotação do motor, quanto maior for o raio do hélice, mantidos todos os outros parâmetros, maior será a quantidade de água deslocada por volta, então maior a força. Deve-se notar que, por não se alterar o passo do hélice, não se altera a quantidade de água por tempo por área, ou seja, a velocidade da água ao passar pela hélice não se altera. Se, para uma mesma rotação, aumentar-se o passo do hélice, uma quantidade maior de água passará por tempo por área e assim, a velocidade da água torna-se maior. Por último, pode-se concluir que, aumentando o passo do hélice, a velocidade da água que passa pela hélice do robô poderá ser maior e vice-versa. Quando se aumenta o diâmetro do hélice há uma diminuição na rotação, então a velocidade da água que passa pela hélice será menor.

Outro aspecto importante é descrever o sistema de deslocamento do robô, uma vez que optou-se por não utilizar nenhum tipo de leme, simplificando assim o sistema mecânico através da utilização de um sistema por diferencial com dois motores independentes. Este tipo de locomoção é bastante utilizada em tanques de guerra, nos quais, com a diferença de rotação das lagartas, o veículo consegue girar em seu próprio eixo para direção desejada. Assim, todo o lado esquerdo do robô é acionado de forma independente do lado direito. Neste caso, como não há atrito de rodas ou lagartas com o solo, mas sim o empuxo gerado de cada conjunto motor e hélice, para andar em linha reta é preciso que ambos os lados tenham a mesma velocidade, sendo que, se a velocidade de um lado for contrária e de mesma intensidade que a do outro lado, o robô gira em torno do seu próprio eixo. Por último, se a velocidade de um lado for maior do que a do outro lado, o robô tenderá a girar para o lado de menor rotação.

A Figura 20 ilustra o sistema de diferencial de locomoção do robô descrito anteriormente, onde a variável  $x$  expressa a velocidade de rotação do motor e o sinal negativo a mudança no sentido de rotação do hélice. Dobrando a velocidade em um único motor ( $2x$ ), o sistema realiza um giro para o lado de menor rotação. Além disso, invertendo o sentido de rotação do motor, ocorre o deslocamento do robô para frente ou para atrás.

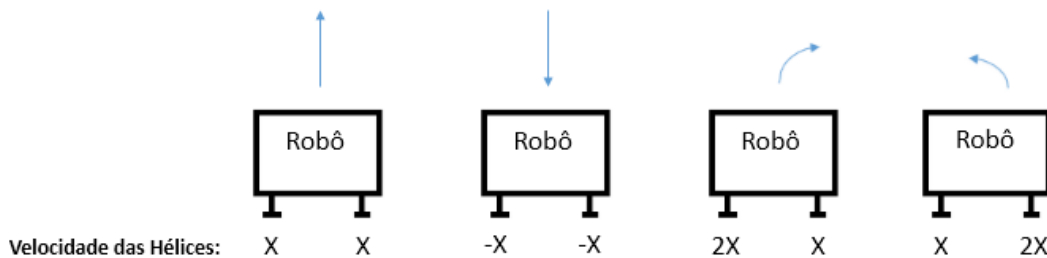


Figura 20 - Sistema diferencial de locomoção.

### 3.4

#### Componente de Emergência, Submersão, Visão Subaquática e Iluminação

Os subsistemas de emergência e submersão são de suma importância no controle e posicionamento do veículo. De acordo com (Santos & Mori, 2010) pode haver três situações diferentes de flutuabilidade em um veículo submersível:

**Flutuabilidade Positiva:** Ocorre toda vez que a força de empuxo do veículo é superior ao peso do mesmo, realizando assim um processo de emergência;

**Flutuabilidade Neutra:** Ocorre toda vez que a força de empuxo do veículo é igual ao peso do mesmo, denominado ponto de equilíbrio. Assim, o ponto de equilí

brio consiste no ponto de estabilidade no qual qualquer força atuante sobre o veículo faz este se mover no sentido da força. Vale a pena salientar que este ponto pode ser obtido em qualquer profundidade;

**Flutuabilidade Negativa:** Ocorre toda vez que a força de empuxo do veículo é menor que o peso do mesmo, realizando assim um processo de submersão.

A Figura 21 resume de forma ilustrativa as 3 situações descritas:

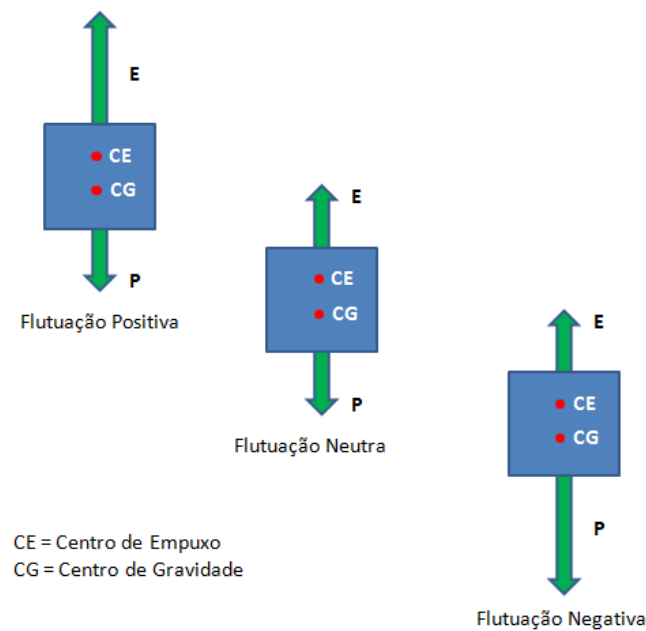


Figura 21 - Equilíbrio hidrostático.

Os veículos subaquáticos devem ser projetados de forma a garantir que o CG esteja sempre abaixo do CE, uma vez que tal medida de projeto permite a formação de um conjugado de forças que tende a estabilizar o veículo. Assim, tipicamente o componente responsável pela flutuação é estrategicamente localizado na parte superior dos veículos, enquanto que toda eletrônica embarcada é projetada em um compartimento hermeticamente fechado, localizado abaixo dos flutuadores. Tal procedimento garante que o centro de empuxo permaneça acima do centro de massa. A Figura 22 demonstra o primeiro teste de flutuabilidade realizado no sistema desenvolvido. Na imagem A temos uma visão da lateral direita do robô, e, nas imagens B e C temos uma visão da lateral esquerda do robô.



Figura 22 - Primeiro teste de flutuabilidade do sistema robótico.

Durante o primeiro teste de flutuabilidade do robô realizado em uma piscina, percebeu-se que o sistema tinha uma tendência de ficar levemente inclinado para frente. Esta característica foi contornada por meio de uma nova distribuição das baterias no interior do módulo da eletrônica, uma vez que estas estavam concentradas em um único lado (lado que ficava inclinado), e pela fixação de um pequeno contrapeso de chumbo preso à estrutura de PVC.

Todos os componentes externos do sistema robótico, com exceção dos sensores e motores, sofreram modificações de forma que pudessem ficar expostos ao ambiente aquático. Assim, os sistemas de iluminação e câmera do robô foram incorporados em moldes de alumínio, visando o preenchimento dos mesmos com resina. Depois da total cura da mistura, os moldes foram removidos e os equipamentos totalmente protegidos do contato com a água, graças ao corpo de resina que se formou ao redor dos componentes. As Figuras 23 e 24 ilustram o processo descrito anteriormente. Na imagem A o processo da mistura da resina pode ser visto, na imagem B o derramamento da resina no molde de alumínio é exibido e, por último, na imagem C a resina está em processo de endurecimento, ou seja, de total cura para posterior desmoldagem.



Figura 23 - Processo de resinagem dos componentes.



Figura 24 - Resultado final após a utilização de resina.



No caso do sistema de iluminação, este foi desenvolvido no âmbito desta dissertação e utiliza diversos *leds* de alto brilho ligados em paralelo. Por sua vez, o sistema de visão é baseado em uma simples câmera CCD (*Charge Coupled Device*) a qual também foi recoberta por resina. A Figura 25 mostra o resultado final de construção do sistema de iluminação. Na imagem A temos uma vista superior do sistema de iluminação, na imagem B uma visão frontal dos *leds* de alto brilho e na imagem C uma vista inferior do sistema.



Figura 25 - Sistema de iluminação.

Os respectivos projetos eletrônicos do sistema de iluminação e visão subaquática serão descritos no Capítulo 4, uma vez que, como descrito anteriormente, nesta seção é tratado somente o aspecto da estrutura mecânica dos mesmos.

Por último, a Tabela 3 descreve os valores gastos com todos os componentes descritos neste capítulo, visando uma futura análise e verificação do custo total do protótipo.

Tabela 3 - Descrição dos valores gastos para componentes do capítulo 3.

ITEM	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO
Material Hidráulico (Tubulação ½" vara de 3m)	2	R\$ 18,90
Conexão Joelho em PVC ½"	12	R\$ 2,50
Conexão T em PVC ½"	12	R\$ 5,99
Motor Jhonson 500 GPH	2	\$ 22,49 = R\$ 73,09 Conversão do dólar: \$ 1,00 = R\$ 3,25
Câmera CCD	1	R\$ 45,00
Placa de Acrílico 2m x 1m x 6.35 mm	2	R\$ 250,00
Sistema de Iluminação	1	R\$ 50,00
Hélices	2	R\$ 15,00
Materiais Diversos (Cola, tinta, parafusos, dentre outros).	---	R\$ 195,00
TOTAL:		<b>R\$ 1.105,86</b>

## 4

### Projeto Eletrônico

#### 4.1

##### Introdução

Como já mencionado anteriormente, o projeto em questão atende a dois modos de operação distintos. No modo 1, o robô está configurado para operar como veículo de inspeção remotamente controlado por uma mala de controle desenvolvida e descrita mais adiante neste capítulo. Neste modo o operador, a partir de um *joystick*, pode controlar a trajetória e a velocidade do veículo, bem como todas as funções da câmera e sistema de iluminação, utilizando um *hardware* de controle de baixo custo, baixo consumo e pequeno volume, propiciando desta forma, o uso do equipamento alimentado por uma bateria de chumbo-ácida de 12V com capacidade de 17 Ah.

Além disso, neste modo o robô armazena continuamente os dados da água obtidos pelos sensores físico-químicos. É importante ressaltar que a mala de controle apresenta, como recurso, um carregador de bateria para recarregar as baterias do robô (2 baterias de Lipo 3S 5000mAh), e um monitoramento do *status* da capacidade atual da bateria de chumbo-ácida da mala de controle. Finalmente, destaca-se que este modo também foi utilizado para realizar o teste de conceito mecânico, o teste de alguns sistemas de leitura dos sensores físico-químicos e para auxiliar em algum eventual resgate do robô.

No modo 2, com algumas modificações na eletrônica e a inclusão de mais um microcontrolador, o robô pode ser utilizado para coleta de dados e testes de algoritmos de controle, empregando para isso um sistema de navegação autônomo. As Figuras 26 e 27 demonstram os esquemas mencionados:

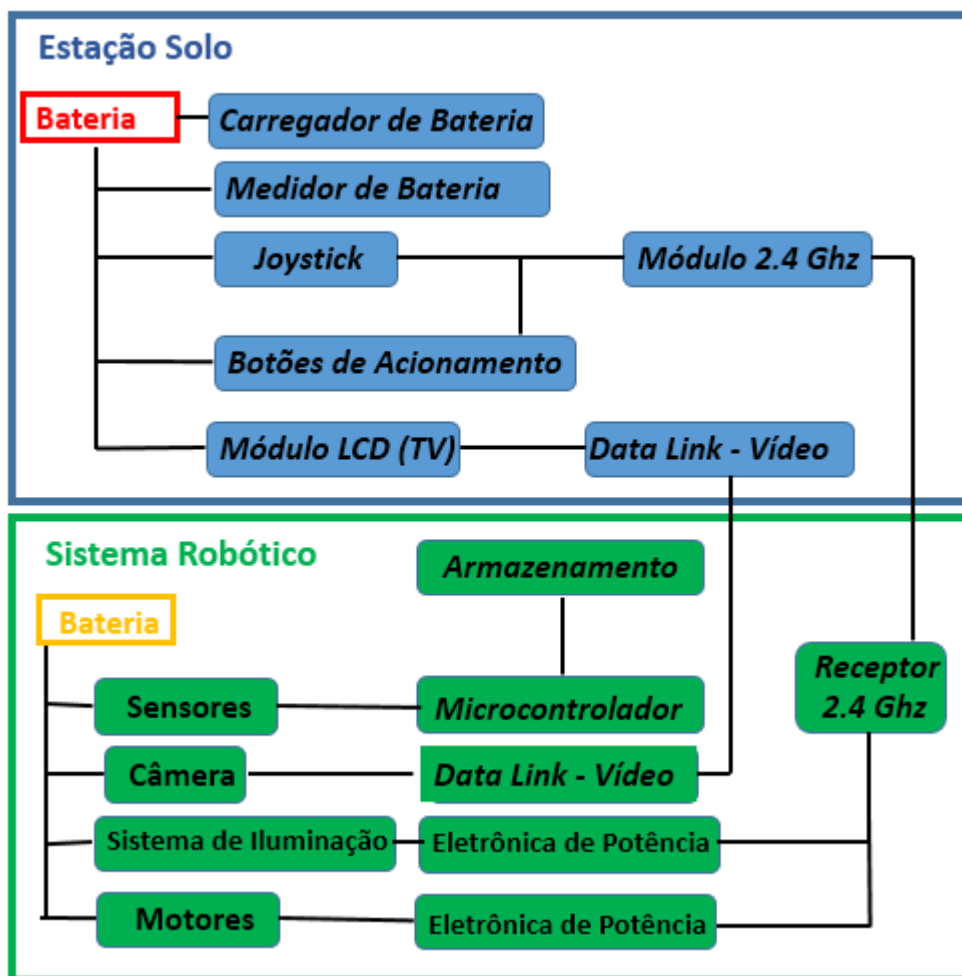


Figura 26 - Diagrama de alto nível de funcionamento do *hardware* do veículo no modo 1.

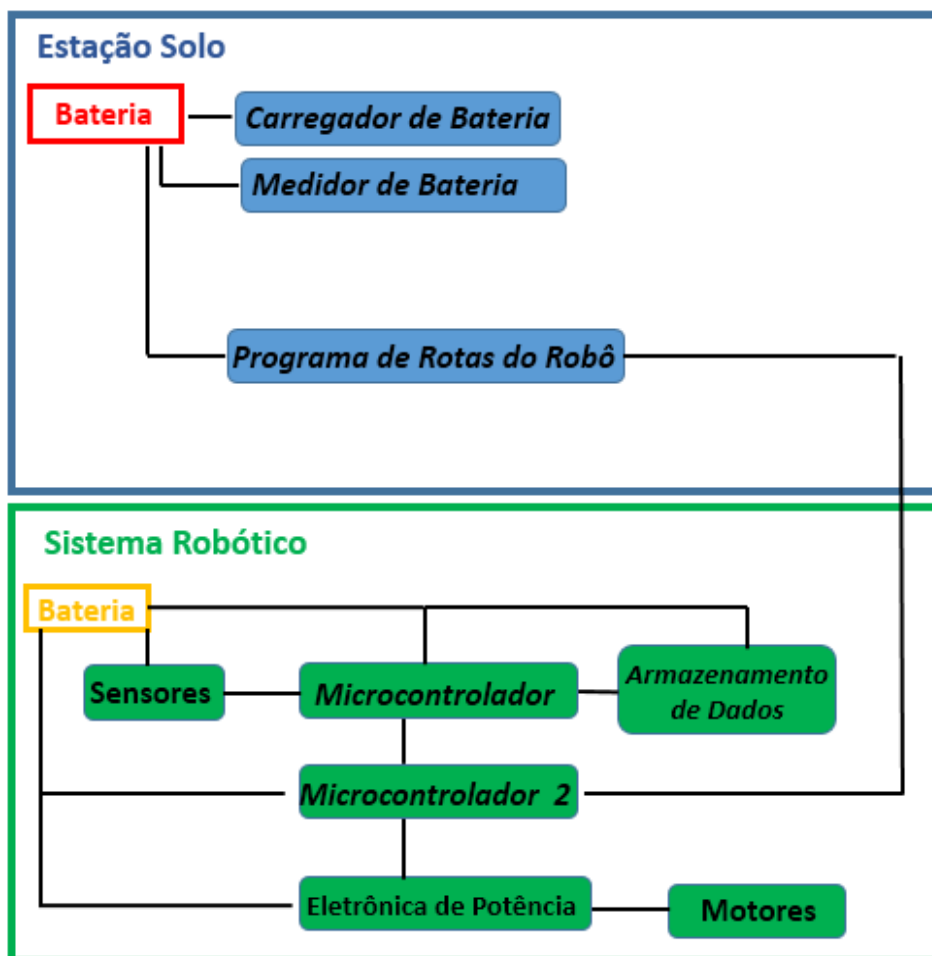


Figura 27 - Diagrama de alto nível de funcionamento do *hardware* do veículo no modo 2.

Além desta seção, este capítulo está subdividido em mais três seções relacionadas com o projeto eletrônico do sistema robótico, descrevendo de forma detalhada os modos 1 e 2, ou seja, o modo remotamente controlado e o modo autônomo respectivamente. A primeira seção descreve todos os sensores utilizados e os divide em categorias de operação; a segunda aborda todo o projeto eletrônico no âmbito de controle e *software* do robô, e, finalmente, a terceira seção descreve os *hardwares* desenvolvidos, tais como: mala de controle remoto do sistema robótico, sistema de iluminação, reguladores de tensão, dentre outros.

## 4.2

### Sensores

Os sensores embarcados no sistema robótico podem ser agrupados em três respectivos grupos:

- Sensores de Navegação: Todo sensor que por sua natureza tenha como finalidade alimentar o sistema com alguma informação que auxilie em sua locomoção, navegação e controle está inserido neste grupo.
- Sensores Físico-Químicos: Todo sensor responsável por fornecer alguma informação física ou química sobre a qualidade da água está contido neste grupo.
- Sensores de Segurança: Os sensores responsáveis por monitorar o sistema robótico de forma a prevenir possíveis problemas e erros no equipamento.

#### 4.2.1

##### Sensores de Navegação

Um dos sensores mais relevantes na navegação é um sensor capaz de fornecer a informação da atual posição do sistema robótico, visando auxiliar o seu controle a determinar as atuações nos motores para que o sistema siga uma rota estabelecida. Portanto, adotou-se um módulo de GPS - *Global Positioning System* para este fim, sendo o modelo do módulo utilizado o LS20031 de 66 canais com antena embutida, da fabricante Locosys. A Figura 28 ilustra o componente descrito acima:

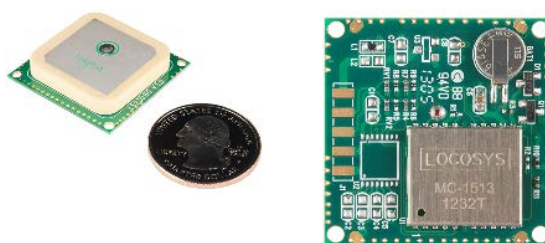


Figura 28 - Módulo de GPS utilizado (LS20031).

Trata-se de um excelente módulo, uma vez que além de possuir dimensões reduzidas, este modelo apresenta uma boa resolução (3 metros), uma linha de comunicação serial e uma taxa de amostragem de 10 Hz. Uma desvantagem deste módulo é o fato dele precisar de uma fonte de alimentação de 3.3V, uma vez que a alimentação do sistema robótico é muito superior a do módulo. Logo, um circuito

de alimentação para este sensor teve que ser desenvolvido, e será detalhado mais adiante em outra seção deste capítulo. Uma vez que este módulo possui uma antena de cerâmica integrada, não se faz necessário uma antena externa. Além disso, este módulo normalmente determina uma posição em 35 segundos a partir de uma partida "a frio", e, por meio do armazenamento de informações sobre os satélites pode adquirir uma posição em 2 segundos a partir de uma partida "a quente", conforme informações do fabricante na folha de características do referido módulo. O princípio de funcionamento do GPS pode ser visto nos anexos desta dissertação.

Outro sensor de suma importância é a central inercial IMU 6DOF Digital Combo Board, mostrada na Figura 29.



Figura 29 - Sensor IMU 6DOF Digital Combo Board.

Este sensor aqui descrito funciona utilizando os princípios básicos das Leis de Newton. Por isso, este também pode ser chamado de Navegação Inercial ou Navegação Newtoniana. Esta central inercial é uma simples placa contendo o acelerômetro ADXL345 e o giroscópio ITG-3200, fornecendo no total 6 graus de liberdade. O ADXL345 é um sensor completo de 3 eixos, tendo a faixa de operação selecionável:  $\pm 2$  g,  $\pm 4$  g,  $\pm 8$  g, ou  $\pm 16$  g, onde g é a aceleração da gravidade, e dois modos de operação: fixo e *full*. No modo fixo, a leitura tem sempre 10 bits e a escala varia conforme a faixa de operação. No modo full, a escala é fixa (3,9mg) e o número de bits varia conforme a faixa de operação. Para este projeto foi utilizado a faixa de operação de 8g e o modo *full*.

Conforme informações do fabricante na folha de características do referido módulo, este acelerômetro mede tanto aceleração dinâmica resultante do movimento ou choque, quanto aceleração estática, permitindo que o dispositivo também seja usado como um sensor de inclinação.

De acordo com informações do fabricante, o giroscópio ITG-3200 da referida central inercial tem três conversores analógicos digitais de 16 bits, sendo

um para cada eixo (x, y, z), e uma largura de banda do filtro passa-baixa interno selecionável pelo o usuário de 5 Hz até 256 Hz, sendo utilizado o modo *default* neste projeto. O seu princípio de funcionamento é baseado em uma massa de polissilício que ressoa quando o objeto é sujeito a uma rotação. O princípio detalhado de funcionamento do giroscópio e do acelerômetro podem ser vistos nos anexos desta dissertação.

Os sensores desta central inercial IMU 6DOF Digital Combo Board, se comunicam por meio de um protocolo de I2C e um pino do tipo INT de cada sensor na placa. O protocolo I2C de comunicação foi originalmente desenvolvido pela Philips em meados de 1996. Atualmente este protocolo está amplamente difundido na indústria e interconecta uma ampla gama de dispositivos eletrônicos. O procedimento de comunicação do protocolo I2C é extremamente simples e pode ser descrito pelos seguintes passos:

1. O dispositivo MASTER envia para o barramento I2C um sinal de START. Com isso o dispositivo MASTER tem a atenção de todos os dispositivos conectados ao barramento. A Figura 30 ilustra o início do protocolo I2C.

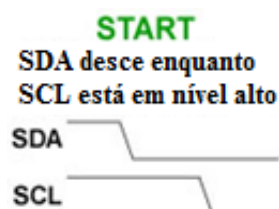


Figura 30 - Início do Protocolo I2C.

2. O dispositivo MASTER envia um registro com o endereço que deseja acessar (7 bits). Todos os dispositivos irão receber este registro, sendo que aqueles que não tiverem o endereço requisitado irão ignorar o registro e aguardar o sinal de STOP.
3. O dispositivo MASTER envia o 8º bit, especificando se deseja escrever ou ler no dispositivo selecionado.
4. O dispositivo que tiver o endereço enviado responderá com um sinal de ACKNOWLEDGE.

5. Assim que o MASTER receber o sinal de ACKNOWLEDGE, poderá iniciar a transmissão ou recepção dos dados (pacotes de 8 bits) sempre seguidos de um sinal ACK, enviado pelo dispositivo confirmando a recepção.
6. Assim que a transferência terminar, o MASTER enviará um sinal de STOP, que liberará o barramento para que outros dispositivos possam então atuar como MASTER. A Figura 31 ilustra o término do protocolo I2C.



Figura 31 - Término do Protocolo I2C.

Finalmente, a Figura 32 ilustra o funcionamento global do protocolo I2C.

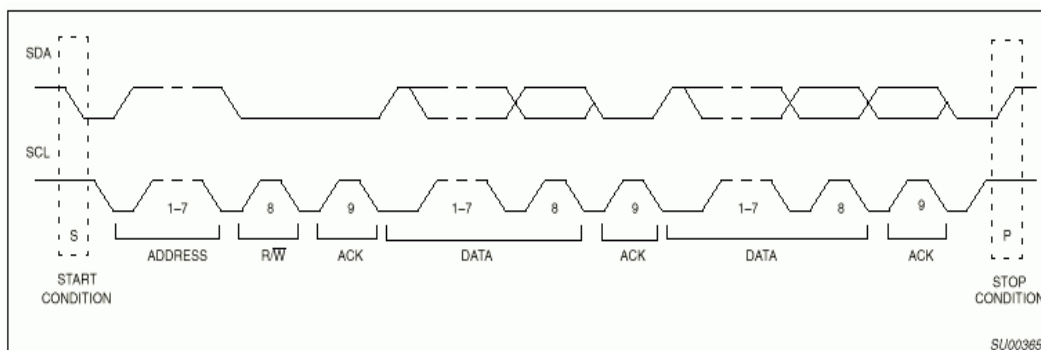


Figura 32 - Funcionamento Global do Protocolo I2C.

Por último, ressalta-se que, de forma análoga ao sensor de GPS, uma eletrônica reguladora de tensão teve que ser desenvolvida, uma vez que a tensão de alimentação deste sensor é 3.3V e o mesmo não possui regulador interno. Tal eletrônica reguladora será detalhada mais adiante neste capítulo, conforme já mencionado anteriormente.



### 4.2.2

#### Sensores Físico-Químicos

Primeiramente, antes da seleção dos sensores utilizados neste projeto, definiram-se os atributos relevantes, visando compor os indicadores da qualidade da água. Dentre os atributos destacam-se: temperatura, nível de pH, condutividade elétrica, nível de oxigênio dissolvido na água e clorofila. Tais atributos foram escolhidos a partir do índice de qualidade da água (IQA) criado 1970, nos Estados Unidos, pela *National Sanitation Foundation*, sendo utilizado a partir de 1975 pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). A avaliação da qualidade da água obtida pelo IQA apresenta limitações, já que este índice não analisa vários parâmetros importantes para o abastecimento público, tais como substâncias tóxicas (ex: metais pesados, pesticidas, compostos orgânicos), protozoários patogênicos e substâncias que interferem nas propriedades organolépticas da água. Entretanto, este é um índice bastante relevante, conforme a ANA – Agência Nacional de Águas.

O IQA é composto por nove parâmetros com seus respectivos pesos ( $w$ ), que foram fixados em função da sua importância para a conformação global da qualidade da água, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de qualidade da água do IQA e respectivo peso

PARÂMETRO DE QUALIDADE DA ÁGUA	PESO ( $w$ )
<a href="#">Oxigênio dissolvido</a>	0,17
<a href="#">Coliformes termotolerantes</a>	0,15
<a href="#">Potencial hidrogeniônico - pH</a>	0,12
<a href="#">Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO5,20</a>	0,10
<a href="#">Temperatura da água</a>	0,10
<a href="#">Nitrogênio total</a>	0,10
<a href="#">Fósforo total</a>	0,10
<a href="#">Turbidez</a>	0,08
<a href="#">Resíduo total</a>	0,08

O cálculo do IQA é feito por meio do produtório ponderado dos nove parâmetros, segundo a seguinte fórmula:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (7)$$

Onde:

IQA = Índice de Qualidade das Águas. Um número entre 0 e 100;

$q_i$  = qualidade do  $i$ -ésimo parâmetro. Um número entre 0 e 100, obtido do respectivo gráfico de qualidade, em função de sua concentração ou medida (resultado da análise);

$w_i$  = peso correspondente ao  $i$ -ésimo parâmetro fixado em função da sua importância para a conformação global da qualidade, isto é, um número entre 0 e 1, de forma que:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (8)$$

Sendo  $n$  o número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

Os valores do IQA são classificados em faixas, que variam entre os estados brasileiros, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Faixa de valores IQA

Faixas de IQA utilizadas nos seguintes Estados: AL, MG, MT, PR, RJ, RN, RS	Faixas de IQA utilizadas nos seguintes Estados: BA, CE, ES, GO, MS, PB, PE, SP	Avaliação da Qualidade da Água
91-100	80-100	<b>Ótima</b>
71-90	52-79	<b>Boa</b>
51-70	37-51	<b>Razoável</b>
26-50	20-36	<b>Ruim</b>
0-25	0-19	<b>Péssima</b>

É importante ressaltar que no âmbito deste trabalho, alguns atributos do IQA não foram selecionados para análise da qualidade da água, uma vez que por falta de recursos financeiros, não foi possível adquirir todos os sensores necessários.

O sensor de temperatura escolhido para este projeto foi o DS18B20, o qual, graças à confecção selada, permite fazer medições confiáveis da temperatura em ambientes úmidos e molhados. Este sensor permite leituras configuráveis com 9, 10, 11 e 12 bits através de sua conexão com um microcontrolador, correspondendo

a uma resolução de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , de  $0,25^{\circ}\text{C}$ ,  $0,125^{\circ}\text{C}$ , ou  $0,0625^{\circ}\text{C}$ . Quanto maior a resolução escolhida, também maior é o tempo de conversão. Além disso, a sua faixa de medição é bastante ampla, podendo realizar leituras de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ . A sua alimentação de 3.0V DC a 5.5V DC, os quais são níveis de tensões compatíveis com os microcontroladores. A Figura 34 ilustra este sensor.



Figura 33 - Sensor de temperatura DS18B20.

De acordo com a folha de características do fabricante Dallas, o sensor digital de temperatura DS18B20 tem ainda incorporado funções não-voláteis, programáveis pelo utilizador, para alarme de temperatura máxima e mínima. Além disso, a comunicação com este sensor é do tipo One-Wire que, por definição, requer apenas uma linha de dados para a comunicação com um microprocessador central, no pressuposto de haver linhas de alimentação ligando os dois dispositivos. Este protocolo de comunicação foi desenvolvido pela “Dallas Semiconductor Corp”, que é um fabricante de componentes eletrônicos, incluindo uma grande variedade de sensores. Consiste num BUS de dados (dois fios), partilhado por vários sensores a ele ligados, um dos fios designado por “ground” e outro onde fluem simultaneamente os dados e a alimentação. Os dispositivos One-wire têm como principal característica, necessitarem de uma corrente de alimentação muito reduzida. Desta forma, conseguem alimentar-se do próprio BUS de dados, carregando um capacitor interno quando o BUS está com nível de tensão alto. Este modo de operação é chamado modo parasita, podendo assim evitar o uso de fontes de alimentação externas.

Este protocolo é viável para a utilização de diversos sensores para funções diferentes como, por exemplo, medição de temperaturas, acelerações, umidade, entre outros. O protocolo de comunicação entre os dispositivos e o

microcontrolador é do tipo mestre/escravo. Os dispositivos, uma vez ligados por intermédio de um BUS, funcionam como escravos de um sistema, existindo no mesmo BUS um dispositivo microcontrolador mestre que efetuará a identificação de todos os dispositivos ligados, por intermédio da leitura dos endereços internos. Esta identificação dos sensores é única e é composta por 64 bits, sendo gravada em uma ROM durante a fabricação. É possível instalar até 127 dispositivos no mesmo BUS.

O kit do sensor de oxigênio dissolvido (D.O) da fabricante Atlas Scientific foi o escolhido para medir a oxigenação da água, ou seja, o nível de oxigênio dissolvido na mesma. Conforme a folha de características fornecida pelo referido fabricante, há uma simples calibração de aproximadamente 5 segundos, a qual é realizada por meio de uma solução que já vem inclusa no próprio kit. Esta calibração deve ser feita antes da implantação da sonda e utilização da mesma pelo sistema. É importante salientar que tal calibração deve ser refeita a cada 12 meses, visando manter a sonda calibrada. Além da sonda de medição e da solução de calibração, o kit dispõe de um circuito eletrônico que retorna dados na forma de mg/L com dois algarismos significativos através de uma saída serial, a qual pode ser ligada diretamente a um microcontrolador. A sonda deste kit permite leituras tanto em água doce quanto salobra, sendo sua temperatura de operação até 50 °C, faixa de leitura entre 0 e 20 mg/L e pressão máxima de operação 690 kPa (100PSI), faixas de operação adequadas para esta aplicação.

A Figura 35 ilustra o kit detalhado anteriormente.



Figura 34 - D.O. kit da Atlas Scientific (sensor de oxigênio dissolvido na água).

Sensores ORP (Oxidation Reduction Potential) trabalham medindo o oxigênio dissolvido na água, uma vez que quanto menor a quantidade de oxigênio dissolvido, mais contaminantes há na mesma. Com o aumento de oxigênio

dissolvido, eleva-se a capacidade da água em destruir contaminantes como, por exemplo, micróbios ou contaminantes com base de carbono.

O sensor escolhido para esta função foi o ENV-40-ORP do fabricante Atlas Scientific. Este sensor, de forma análoga ao anterior, vem com a opção de um kit composto de uma solução de calibração e um módulo eletrônico que fornece uma leitura por meio de uma saída serial que pode ser ligada diretamente ao microcontrolador. A sonda deste kit tem uma temperatura de operação até 80 °C e pressão máxima de operação 690 kPa (100PSI). A Tabela 6 exemplifica alguns níveis de ORP e possíveis aplicações.

Tabela 6 - Nível de ORP e aplicações.

Nível de ORP (mV)	Exemplos de Aplicações
0-150	Sem aplicação
150-250	Agricultura
250-350	Torres de refrigeração
400-475	Piscinas
450-600	Tubulações quentes
600	Desinfecção da água
800	Esterilização da água

Fonte: <http://www.ozoneapplications.com/info/orp.htm>.

O nível de ORP também pode ser visto como o nível de atividade bacteriana da água, uma vez que há uma ligação direta entre o nível de ORP e contagem de coliformes na água. A Tabela 7 lista os níveis de ORP e contagens de coliformes relativos.

Tabela 7 - Relação nível ORP e coliformes.

Nível ORP (mV)	Contagem de Coliformes em 100ml de Água
200	300
300	36
400	3
600	0

Fonte: <http://www.ozoneapplications.com/info/orp.htm>.

A Figura 36 ilustra o kit de medição de ORP da Atlas Scientific descrito anteriormente.



Figura 35 - ORP kit da Atlas Scientific.

De forma análoga aos kits anteriores, visando à medição do pH da água, optou-se por utilizar um kit de medição de pH também da fabricante Atlas Scientific. Igualmente aos demais kits, este possui soluções de calibração da sonda, tendo uma pressão máxima de operação de 690 kPa (100PSI), faixa de temperatura de trabalho entre 1°C e 99°C e circuito eletrônico com saída serial para um microcontrolador. O tempo de resposta desta sonda é de aproximadamente 1 segundo, conforme especificações do fabricante. A Figura 37 refere-se ao kit de pH descrito acima.



Figura 36 - pH kit da Atlas Scientific.

Finalmente, o último dos sensores utilizados para o monitoramento da qualidade da água é o sensor de condutividade elétrica, sendo fabricado de forma análoga pela Atlas Scientific. Assim como os demais, há um kit com solução de calibração e eletrônica com saída serial para o microcontrolador. Conforme a folha de características fornecida pelo fabricante, a sonda deste kit possui uma pressão máxima de operação 1379 kPa (200 PSI) e faixa de temperatura de trabalho entre 0 °C e 70 °C. Quando esta sonda é conectada ao módulo da eletrônica do kit (EZOTM Scientific Atlas), esta tem uma gama de valores de 5

mS/cm a 200.000 uS/cm e uma acurácia de  $\pm 2\%$ . A Figura 38 a seguir ilustra este kit.



Figura 37 - Kit de condutividade elétrica da Atlas Scientific.

#### 4.2.3

#### Sensores de Segurança

Como dito anteriormente, os sensores que fazem parte deste grupo são aqueles que, de forma preventiva, realizam o monitoramento de possíveis problemas durante a operação do sistema robótico. Primeiramente, visando à preservação dos motores e que os mesmos venham a sofrer dano permanente, utilizou-se um sensor de corrente modelo ACS714, de -30A e +30A. Este sensor de corrente é uma placa para o chip da Allegro ACS714LLCTR-30A-T, sendo um sensor de efeito Hall linear. Este sensor é alimentado por 5 V e tem uma saída com sensibilidade de 66mV/A, suportando entrada de corrente bidirecional, com uma faixa de medição de -30A a +30A.

Além disso, conforme informações do fabricante, o circuito integrado do sensor é robusto o suficiente para suportar até 5 vezes a condição de sobre corrente por um pequeno período de tempo. Outro aspecto relevante é que possui uma banda de 80 kHz, que pode opcionalmente ser diminuída adicionando um capacitor na placa. Por último, este sensor possui grande exatidão com incerteza típica na saída de 1.5% em temperatura ambiente com as calibrações de fábrica, possui tensão de *offset* extremamente estável, apresenta histerese magnética quase nula e temperatura de operação de -40 °C a 150 °C. A Figura 39 ilustra o sensor detalhado anteriormente.



Figura 38 - Sensor de corrente do motor.

Outro sensor utilizado no sistema de segurança é o ATtiny Dev Board H2OhNo do fabricante Sparkfun, o qual funciona como um alarme que detecta a presença de água. Este sensor está colocado de forma estratégica no compartimento blindado, ou seja, o compartimento onde os sistemas, que não podem estar em contato direto com a água estão fixados. Assim, consegue-se monitorar se existe algum problema de infiltração no compartimento, além de realizar como medida de ação a paralisação da missão, e o retorno do sistema robótico para o ponto inicial de partida. A Figura 40 ilustra o sensor descrito anteriormente.



Figura 39 - Sensor AT Dev Board (detector de água).

No âmbito do monitoramento da alimentação do sistema, visando detectar quando este necessita ser carregado ou por algum motivo apresentar alguma falha na bateria, utilizou-se o sensor modelo Sapartan G4 Lipo Guard. Este sensor monitora a bateria através de um microcontrolador para obter medições confiáveis de tensão, por meio de técnicas de processamento digital de sinais, oferecendo assim uma operação totalmente configurável. Este sensor pode ser configurado para funcionar com os diversos tipos de baterias como, por exemplo, as baterias de Li-Po (3S e capacidade 5000 mAh) utilizadas no robô. Tanto o número de células como a tensão que dispara o alarme (V / célula), pode ser programado em alguns segundos por meio de uma interface de usuário amigável.



Entretanto, algumas alterações tiveram que ser realizadas para o uso deste sensor, uma vez que seu alarme era apresentado por uma indicação visual, ou seja, um *led* de 1 watt – 44 lumens. Portanto, retirou-se o *led* que funcionava como indicador de alarme, direcionando o sinal que ia do mesmo para uma entrada do Arduino Mega 2560 R3, responsável pela leitura deste grupo de sensores.

Na nomenclatura das baterias de Li-Po o “S” significa quantas células em série possui a bateria. Cada célula Li-Po tem uma voltagem nominal de 3,7V, portanto quando se multiplica o número de “S” por 3,7V, sabe-se a voltagem do *pack* de bateria. A voltagem mínima das baterias de Li-Po é de 3,0V por célula, e estão totalmente carregadas com 4,2V. Por tal motivo, adotou-se o valor de tensão de 10V para o disparo do alarme, uma vez que a bateria do robô estaria totalmente descarregada com 9V. Vale a pena ressaltar que a incerteza deste sensor é de 0.05%. A Figura 41 ilustra o sensor responsável pelo monitoramento da bateria descrito anteriormente.

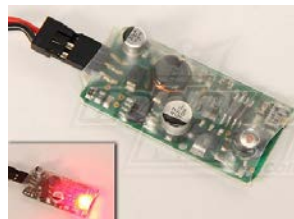


Figura 40 - Sensor Spartan G4.

## 4.3

### Eletrônica de Controle e Software

#### 4.3.1

##### Microcontroladores

Os microcontroladores (também denominados MCU) são *chips* que têm um processador, pinos de entradas/saídas e memória, ou seja, são verdadeiros computadores em um chip. Por meio da programação dos microcontroladores é possível controlar suas saídas, tendo como referência as entradas ou um programa interno. Estes dispositivos são embarcados no interior de algum outro dispositivo (geralmente um produto comercializado) para que possam controlar as funções ou ações deste determinado produto (Barbosa, 2008).

Os microcontroladores se diferenciam dos microprocessadores, pois além dos componentes lógicos e aritméticos usuais de um microprocessador de uso geral, o microcontrolador integra elementos adicionais em sua estrutura interna, como memória de leitura e escrita para armazenamento de dados, memória somente de leitura para armazenamento de programas, EEPROM para armazenamento permanente de dados, dispositivos periféricos como conversores analógico/digitais (ADC), conversores digitais/analógicos (DAC) em alguns casos e interfaces de entrada e saída de dados (Barbosa, 2008).

Os microcontroladores operam a uma frequência muito baixa se comparados com os microprocessadores atuais, no entanto são adequados para a maioria das aplicações usuais como: controlar uma máquina de lavar roupas, uma esteira de chão de fábrica ou até mesmo no desenvolvimento de um sistema robótico como é o caso desta dissertação. O seu consumo, em geral, é relativamente pequeno e podem possuir modo de espera (*Sleep* ou *Wait*), aguardando por uma interrupção ou evento externo, como por exemplo, o acionamento de uma tecla, ou um sinal que chega via uma interface de dados. O que diferencia os diversos tipos de microcontroladores são as quantidades de memória interna (programa e dados), velocidade de processamento, quantidade de pinos de entrada/saída (I/O), alimentação, periféricos, arquitetura e instruções.

Após uma vasta pesquisa e avaliação da relação custo/benefício que os diversos microcontroladores disponíveis no mercado oferecem, além da facilidade de encontrar os modelos existentes no mercado, optou-se por utilizar um microcontrolador visando embarcar o controle do sistema robótico e outro para realizar a leitura dos sensores físico-químicos. Assim, espera-se otimizar o processamento e tornar o sistema mais robusto à falhas como, por exemplo, em caso de falhas na leitura dos sensores físico-químicos e sua eletrônica o robô não fica à deriva, uma vez que o seu sistema de controle continua operando.

Assim, visando a leitura dos sensores optou-se pelo microcontrolador ATmega 2560. Dentre os fatores decisivos para esta escolha, o fato deste microcontrolador ser encontrado em placas já desenvolvidas e testadas – Arduino reduz o tempo de projeto. O Arduino é uma plataforma de computação *open-source* baseado em um microcontrolador com entradas e saídas tanto digitais como analógicas. Possui um ambiente próprio de desenvolvimento que utiliza a linguagem C. O Arduino atualmente tem sido bastante usado para desenvolver

objetos interativos autônomos, uma vez que seu ambiente de desenvolvimento *open-source* pode ser obtido gratuitamente para os sistemas OS X, Windows, e Linux.

O Arduino Mega 2560 R3 é uma placa que utiliza o microcontrolador Atmega 2560. Devido às características deste microcontrolador, esta placa possui 54 pinos digitais (entrada/saída), sendo que 15 podem ser utilizados como saídas do tipo PWM, que serão detalhadas mais adiante. Além disso, esta placa oferece 16 pinos analógicos de entrada, 4 USARTs (Portas Seriais de Hardware) essenciais para realizar as leituras dos sensores físico-químicos deste projeto, um cristal oscilador de 16 MHz, entrada USB, entrada de alimentação e soquete de comunicação ICSP. Assim, esta placa oferece todo o ferramental necessário para utilização de todos os recursos do microcontrolador ATmega 2560, sendo uma ótima opção de utilização. A Figura 42 ilustra a placa do Arduino Mega 2560 R3.

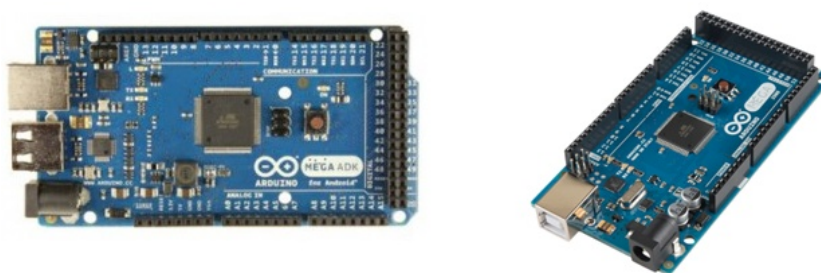


Figura 41 – Arduino Mega 2560 R3.

Finalmente, a Figura 43 ilustra o esquema de ligação do sensor de pH que é análogo ao esquema de ligação dos sensores de oxigênio dissolvido, condutividade elétrica da água e ORP.

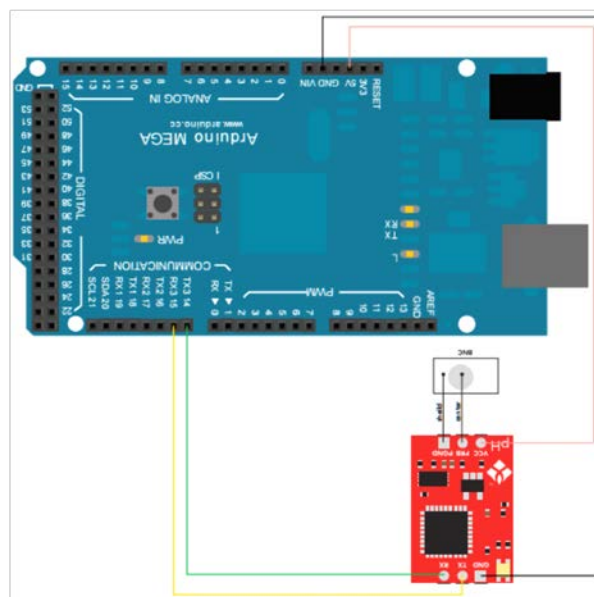


Figura 42 - Esquema da ligação dos sensores no arduino.

### 4.3.2

#### PWM – Pulse With Modulation

A modulação por largura de pulso (MLP) também conhecida pela sigla em inglês "PWM" (*Pulse Width Modulation*), envolve em manter um período fixo de sinal e a variação da largura de um pulso (fração do período durante o qual o sinal permanece em nível alto), com o objetivo de transportar qualquer informação sobre um canal de comunicação, ou controlar o valor da alimentação entregue a um determinado componente.

A técnica de PWM é empregada em diversas áreas da eletrônica como, por exemplo, no controle de velocidade dos motores, controle de luminosidade e controle de servo motores. Pode-se realizar uma analogia entre o PWM e uma simples chave liga e desliga. Para tal, considera-se uma simples chave liga e desliga, onde quando ligada, 100% da tensão e da potência é aplicada na carga, e quando aberta, a tensão é nula e assim a potência é zero. Através do controle do tempo em que a chave fica aberta ou fechada, pode-se controlar a potência média entregue na carga. Se a chave encontra-se 50% do tempo ligada e 50% do tempo desligada, isso quer dizer que em média há 50% do tempo com corrente e 50% do tempo sem corrente elétrica. Portanto, a potência média aplicada na carga é a própria tensão média, ou seja, 50%. Logo, quanto maior o tempo que o pulso se

manter em nível lógico alto, maior é a potência entregue a carga, e, quanto menor o tempo que o pulso se manter em nível lógico alto, menor é a entrega de potência na carga.

Muitos pesquisadores como, por exemplo, (Meggiolaro, 2009), utilizam este recurso como modo de controle dos atuadores. No caso deste projeto, o PWM é um sinal que tem como função ligar e desligar os motores do robô através de uma chave (transistor bipolar ou MOSFET), fazendo com que o motor gire em uma velocidade proporcional à relação entre o intervalo de tempo ligado e a largura do pulso. A Figura 44 ilustra o princípio de funcionamento do PWM.

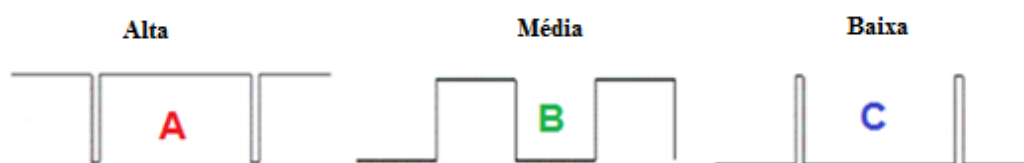


Figura 43 - Sinal PWM.

Este tipo de técnica é utilizado pelo controlador de velocidade modelo Sabertooth 2x12A utilizado no projeto para controlar os motores, e pelo controlador Wasp Single-Channel utilizado para controlar a intensidade do brilho do sistema de iluminação do robô.

#### 4.3.3

#### Controlador de Velocidade dos Motores

Como dito anteriormente, o controlador de velocidade dos motores escolhido para projeto foi a Sabertooth 2x12A, do fabricante Dimension Engineering. Após uma pesquisa realizada no mercado, pode-se dizer que este é um dos módulos mais versáteis, eficientes e de baixa complexidade dentre os controladores de motores com escovas. Por meio deste controlador, pode-se controlar dois motores CC com escova independentes, podendo fornecer 12A contínuos por canal (suporta picos de até 25A por canal por alguns segundos). De acordo com as especificações do fabricante, este controlador possui também proteção de corrente e térmica, o que previne contra danos na placa caso a mesma seja conectada a um motor acima de sua capacidade, ou caso ocorra algum

problema durante a operação. Esta versão possui as opções de controle exponencial, auto-calibração e mixer na placa. O modo de operação descrito é escolhido por meio dos *switches* presentes na placa, portanto não existem *jumper*s que poderiam ser perdidos durante a operação. No caso deste projeto, adotou-se para o uso o modo RC.

Além disso, a Sabertooth é um driver para motores com sistema síncrono regenerativo. Isto significa que, quando ocorre a diminuição da velocidade do robô, ou ainda com ele operando no modo reverso, as baterias são recarregadas automaticamente. Por último, esta placa possui fornecimento de alimentação de 5 V, o que significa que ela pode alimentar, por exemplo, um microcontrolador ou um receptor de rádio controle pelos cabos de sinal. Há também um modo *cutoff* de lítio, que permite que a Sabertooth opere de modo seguro com baterias de Lítio-Ion e Lítio-Polímero (Li-Po). Por último, os transistores desta placa chaveiam em velocidade ultrassônica (32 kHz), visando operar em silêncio.

Este controlador selecionado é adequado ao sistema aqui proposto, tendo em vista que o mesmo emprega dois motores DC (Jhonson 500 GPH) de corrente nominal no valor de 2,5A. A Figura 45 ilustra o referido controlador.



Figura 44 - Controlador de Velocidade Sabertooth 2x12A.

#### 4.3.4

#### Controlador de Brilho do Sistema de Iluminação

A Wasp é uma placa controladora de baixo custo e alto desempenho, destinada a controlar a velocidade e o sentido de um motor, ou a tensão aplicada em uma carga. Esta placa é normalmente utilizada para controlar válvulas pneumáticas, solenoides, relés, *coolers* termoelétricos e dispositivos de torque magnético que requerem controle bidirecional. Com pequenas dimensões, possui função de calibração para parear os limites da placa com os limites do *stick* do

rádio controle, sendo as configurações salvas na memória não volátil EEPROM presente na placa.

A Tensão de Operação para a carga é de 6.5 V a 28 V e a corrente suportada é de 10 A (contínuo) / 30 A (pico), que são parâmetros adequados aos valores demandados pelo sistema de iluminação desenvolvido (12V e 600 mAh). Por último, esta eletrônica ainda apresenta como característica de suma importância o limitador de corrente e de temperatura. A Figura 46 ilustra o controlador do sistema de iluminação descrito nesta seção.

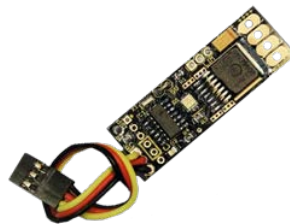


Figura 45 - Controlador Wasp.

#### 4.3.5

##### Software

O *software* responsável pela a leitura dos dados e consequente armazenamento dos mesmos foi desenvolvido com base na linguagem de programação C, utilizando o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE. Este programa é responsável por converter o código escrito na linguagem C para linguagem de máquina, ou seja, ele tem a função de um compilador.

No âmbito do controle de navegação do sistema robótico, optou-se pelo *hardware* comercial ArduPilot APM 2.6, que é uma placa controladora para veículos multimotores, tais como: aviões, carros ou helicópteros. Este *hardware* já vem sendo bastante utilizado em diversos projetos de pesquisa, tornando tais sistemas totalmente autônomos (Barato, 2014) e (Benemann, 2013).

O ArduPilot 2.6 é um sistema de piloto automático de código aberto, permitindo ao usuário transformar qualquer veículo em um veículo totalmente autônomo, capaz de realizar missões baseadas em coordenadas GPS programadas por *waypoints*, ou seja, pontos no globo terrestre precisamente definidos por coordenadas geográficas através do sistema GPS. Disponível com conectores de

topo ou laterais, esta versão da placa não tem bússola a bordo, sendo projetada para veículos *rovers* (veículos para qualquer tipo de terreno), onde a bússola deve ser colocada tão longe de fontes de alimentação e do motor quanto possível, para evitar interferências magnéticas. A placa possui todos os componentes SMD já soldados, devendo-se apenas soldar os conectores. Esta placa pode ser programada com a IDE do Arduino.

Este controlador é baseado no processador Atmega1280 de 16 MHz e, o *hardware* embarcado possui proteção contra falhas, uma vez que utiliza um circuito separado (*chip* multiplexador ou processador ATmega328) para transferir o controle do sistema de rádio controle para o *autopilot* e vice-versa. Além disso, ele oferece a habilidade de realizar um *boot* no processador principal durante uma trajetória. Destaca-se ainda que este *hardware* possui 16 entradas analógicas adicionais (com um ADC em cada), 40 entradas e saídas digitais para sensores adicionais e quatro portas seriais dedicadas a telemetria de mão dupla (utilizando módulos XBee opcionais). A placa pode ser alimentada tanto pela recepção de RF, como por uma bateria separada. A Figura 47 ilustra a placa Ardupilot APM 2.6.



Figura 46 - Placa ArduPilot.

Uma vez que o objeto desta dissertação não é o desenvolvimento de uma interface gráfica amigável para o operador, utilizou-se do fato do ArduPilot ser capaz de se comunicar facilmente com o *software* Mission Planner. Este *software* permite planejar facilmente uma missão, ou fazer *upload* de um novo *firmware* com apenas alguns cliques do *mouse*, minimizando o tempo de desenvolvimento do sistema robótico, além de permitir a qualquer usuário facilmente começar operar o sistema. Além deste *software* ser totalmente gratuito, ele possui os seguintes recursos:



- Uso do Google Maps para selecionar os *waypoints*;
- Seleção de comandos de missões já existentes;
- Downloads de arquivos do log da missão e análise dos mesmos;
- Configuração de sensores acoplados no Ardupilot;
- Análise das saídas do Ardupilot como, por exemplo, giroscópio e acelerômetro, através de portas seriais;
- Possibilidade de refinamento dos valores dos ganhos de PID (técnica de controle utilizado para navegação), na aba “*configuration*” do respectivo *software*; e
- Horizonte artificial.

A Figura 48 ilustra as telas do *software* Mission Planner responsável por determinar os *waypoints* desejados, por meio do clique do mouse, além do horizonte artificial que será descrito mais adiante.



Figura 47 - Imagem do planejamento da missão.

No âmbito da orientação do sistema robótico, esta é exibida com o auxílio do horizonte artificial do Mission Planner e de marcas indicadoras de ângulo de rolamento (*roll*) e arfagem (*pitch*). A Figura 49 detalha o *display* dos componentes visuais mencionados, o qual foi baseado no design de *displays* de aviões. O indicador esquerdo exibe a velocidade atual do robô (em relação ao solo ou ao ar, dependendo dos sensores utilizados), e a velocidade de referência desejada do controlador de navegação, por meio de uma barra verde. O estado da bateria, ou seja, a tensão e a corrente sendo consumida, bem como o percentual de carga remanescente, são exibidos em um elemento textual na parte superior esquerda. Informações sobre a trajetória que será executada, como por exemplo: a distância do próximo *waypoint*, são exibidas abaixo do indicador de altitude, o qual, para

este projeto específico, não tem aplicação. Acima deste indicador é exibido o *status* do sistema de GPS, que consiste em: tipo de coordenadas obtidas, número de satélites e diluição horizontal da coordenada obtida. Por sua vez, o eixo de guinada é exibido na parte superior.

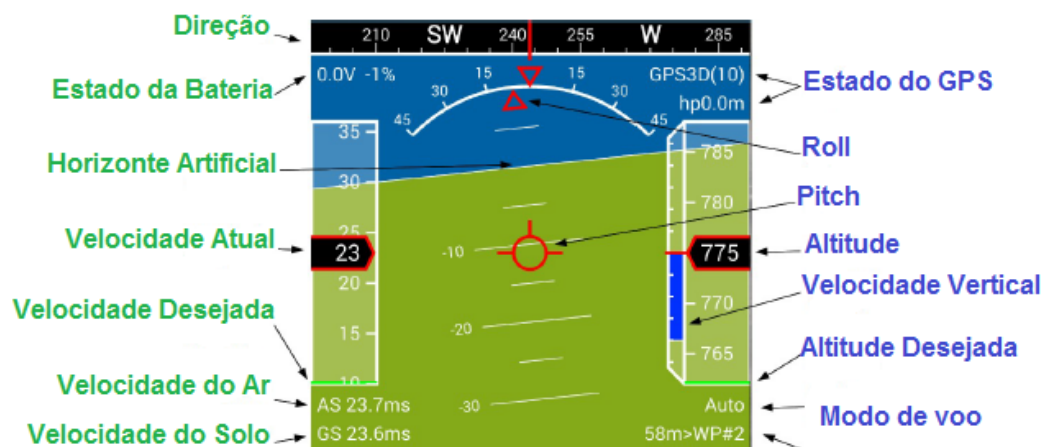


Figura 48 - Imagem do display do horizonte artificial.

O *software* Mission Planner permite também configurar de maneira prática e fácil os parâmetros do algoritmo do controle PID (Proporcional Integral Derivativo), ou seja, os parâmetros das constantes de ganho do controle PID). O controle PID é uma técnica utilizada na maior parte da indústria, visando comparar um valor medido de um processo (VP, variável de processo) com um valor de referência (SP, *setpoint*). A diferença destes valores (erro) é usada para calcular um novo valor, desta vez para a variável manipulada, que levará o processo ao valor desejado, ou seja, para o *setpoint*. O algoritmo do PID ajusta as saídas do processo baseado no histórico e na taxa de variação do erro do sinal, o que confere ao controlador mais precisão e estabilidade (OGATA, 2011).

No controle proporcional, o controlador utiliza a variável para diminuir o erro segundo o erro atual. No controle integral, o controlador tenta chegar ao valor desejado utilizando o conjunto de erros passados, diminuindo assim o tempo até chegar ao valor desejado. No controle derivativo o controlador, segundo o conjunto dos vários erros, tenta prever erros futuros. Por vezes pode-se dispensar o uso de certos termos, ficando apenas com controladores: PI, PD, P ou I, sendo o mais comum o PI, pois o termo da derivada é suscetível a ruído nas medições.

Na aba “configuration” do Mission Planner é possível fazer um ajuste fino dos parâmetros do controlador PID, conforme ilustra a Figura 50.



Figura 49 - Tela para ajustes dos ganhos das constantes do PID.

Todo o código fonte do controlador PID foi escrito na linguagem de programação C. Os ajustes dos parâmetros do controlador PID foram realizados empiricamente, tendo como base o método de Ziegler Nichols. Assim, partiu-se da premissa que o modelo individual da malha não é conhecido. Finalmente, a Figura 51 ilustra o esquema geral de ligação da eletrônica.

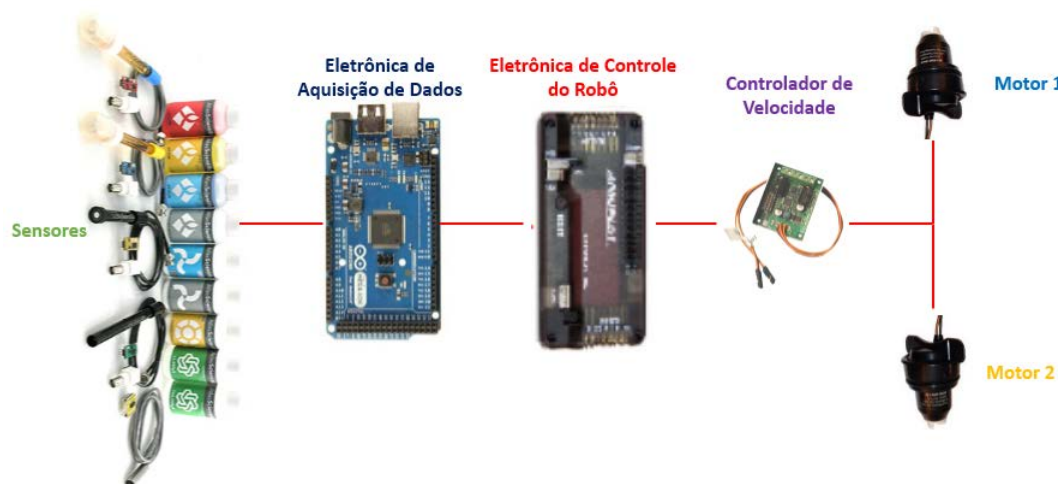


Figura 50 - Esquema geral da eletrônica.

## 4.4

### Hardware Desenvolvido

Todo o *hardware* necessário foi projetado com auxílio *software* Proteus, o qual agrega o ambiente de simulação de circuitos eletrônicos do programa ISIS ao programa ARES para desenho de circuito impresso. Logo este tópico será subdividido em duas etapas: o desenvolvimento do *layout* do circuito para fabricação da placa e a simulação computacional do circuito.

#### 4.4.1

##### Regulador de Tensão

Como mencionado anteriormente, o sensor IMU 6DOF Digital Combo Board requer uma tensão de alimentação de 3.3 V e a bateria utilizada no projeto possui 3 células de lítio polímero (3.3 V nominais e 4.2 V para cada célula carregada), havendo portanto uma necessidade de relugar a tensão da bateria. O giroscópio do sensor IMU 6DOF possui uma corrente normal de operação de 6,5 mA e o acelerômetro deste mesmo sensor 40  $\mu$ A, totalizando 6,54 mA. Além disso, o módulo GPS UP-501 necessita de uma tensão de operação de 3 V a 4.2 V, tendo um baixo consumo de 75 mW operando a 3V, e, conseqüentemente, demandando uma corrente de operação de 25 mA. Assim, a soma das correntes destes sensores totaliza menos de 100 mA, justificando a escolha do regulador de tensão linear LM2937-3.3 do fabricante Texas Instruments, que é de fácil acesso no mercado e possui capacidade de fornecer até 0.5 A, para esta função. Além disso, utilizaram-se alguns capacitores entre a saída e o terra do regulador com o objetivo de realizar um filtro passa baixa, diminuindo assim possíveis ruídos. A Figura 52 ilustra a representação esquemática do circuito projetado e simulado no *software* ISIS:

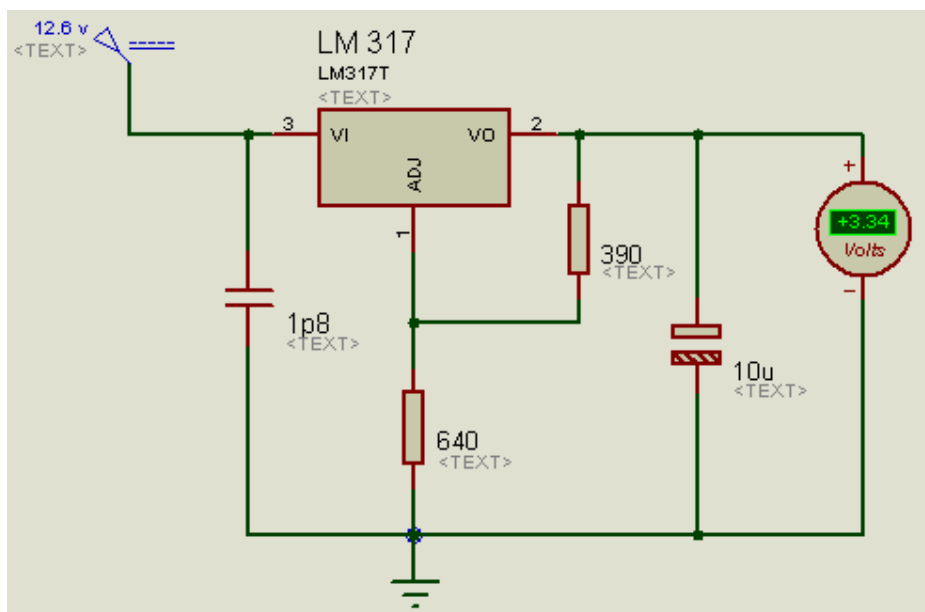


Figura 51 - Esquema do circuito regulador de tensão 3.3V.

O desenvolvimento do *layout* do circuito para fabricação da placa, apresentado na Figura 53, foi realizado no software ARES, como já mencionado anteriormente.

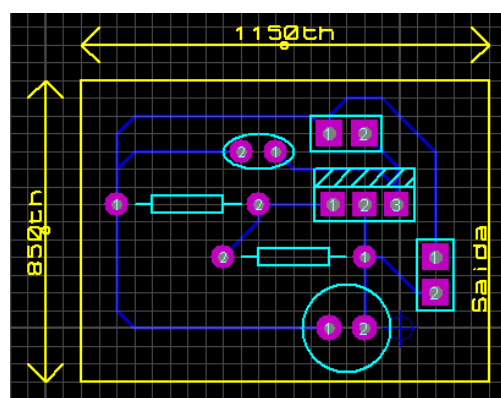


Figura 52 - Layout do desenvolvimento do hardware de regulador de tensão (3.3 V).

Após a confecção de todo o layout da placa de fabricação, desenvolveu-se o desenho da placa em 3D com o mesmo programa, com o intuito de gerar todas suas vistas para verificação de possíveis erros e otimizações, além de servir como guia na hora de realizar a soldagem de todos os componentes, conforme ilustrado na Figura 54.

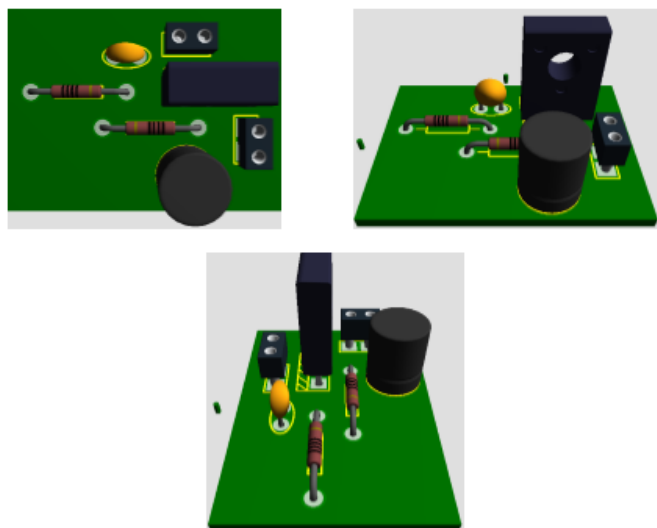


Figura 53 - Vista 3D do hardware do regulador de tensão (3.3 V).

#### 4.4.2

##### Mala de Controle

Visando uma maior facilidade nos testes mecânicos preliminares e na locomoção do sistema robótico, optou-se por desenvolver um sistema remotamente controlado que pudesse auxiliar ainda no resgate do robô, em caso do sistema autônomo apresentar problemas durante operação. Além disso, este sistema auxilia nas inspeções esporádicas e nas que necessitam a visualização de alguma imagem em tempo real. Neste modo, o operador, a partir de um *joystick*, pode controlar a trajetória e a velocidade do veículo, bem como todas as funções da câmera e sistema de iluminação, utilizando um *hardware* mínimo de baixo custo, pequeno volume e baixo consumo, propiciando, desta forma, o uso do equipamento alimentado por uma bateria de 12 V de chumbo.

Assim, esta unidade de controle foi desenvolvido utilizando uma mala fabricada em polipropileno que é um material altamente resistente e leve. Além desta característica, a mala escolhida é à prova d'água, poeira, umidade, corrosão e impacto, possuindo fechos especiais com travamento duplo de fácil uso, que garantem o travamento sob alta pressão. O sistema ainda conta com uma saída para a despressurização da mala, facilitando sua abertura, e furos nas laterais que permitem o uso de cadeados ou lacres de segurança em casos de despachos aéreos ou terrestres. A Figura 55 ilustra uma visão geral do sistema desenvolvido.



Figura 54 - Na imagem da esquerda a mala de polipropileno utilizada, e na imagem da direita o sistema de controle remoto desenvolvido.

O sistema remoto abrange o *joystick* utilizado para controle do robô, um monitor de 7 polegadas que apresenta imagens em tempo real da câmera acoplada ao sistema robótico, um sistema de carregador para as baterias do robô, acionamentos do sistema de iluminação embarcado por meio de botões de segurança e um monitoramento da capacidade restante da bateria formado por uma carreira de *leds* indicadores. A Figura 56 ilustra o sistema de monitoramento da bateria de chumbo-ácida 12 V da mala de controle.



Figura 55 - Demonstração do sistema de monitoramento da bateria.



Visando à proteção contra acionamento acidental, optou-se por utilizar as chaves do tipo *toggle*, uma vez que este tipo de chave dispõe de uma capa protetora que deve ser levantada para efetivamente acionar o comando. A Figura 57 ilustra o modelo de chave utilizada.

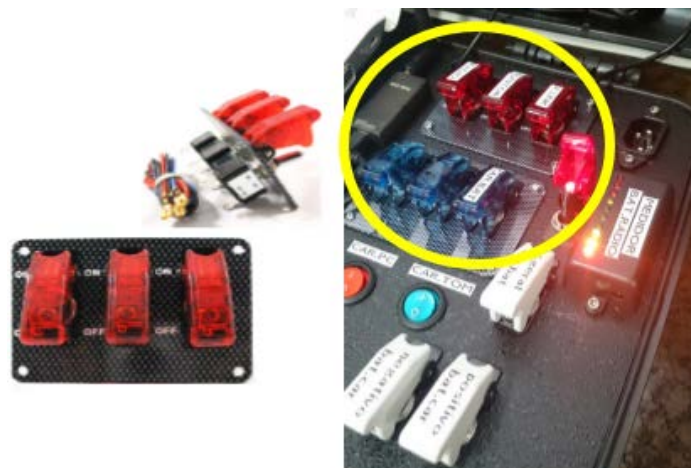


Figura 56 - Ilustração dos acionamentos.

Por último, de forma análoga ao circuito regulador de tensão de 3.3V, desenvolvido e mencionado anteriormente, o *software* ISIS foi utilizado visando à elaboração e teste do esquema elétrico/eletrônico da mala de controle. A Figura 58 ilustra o esquema de ligação da referida mala:

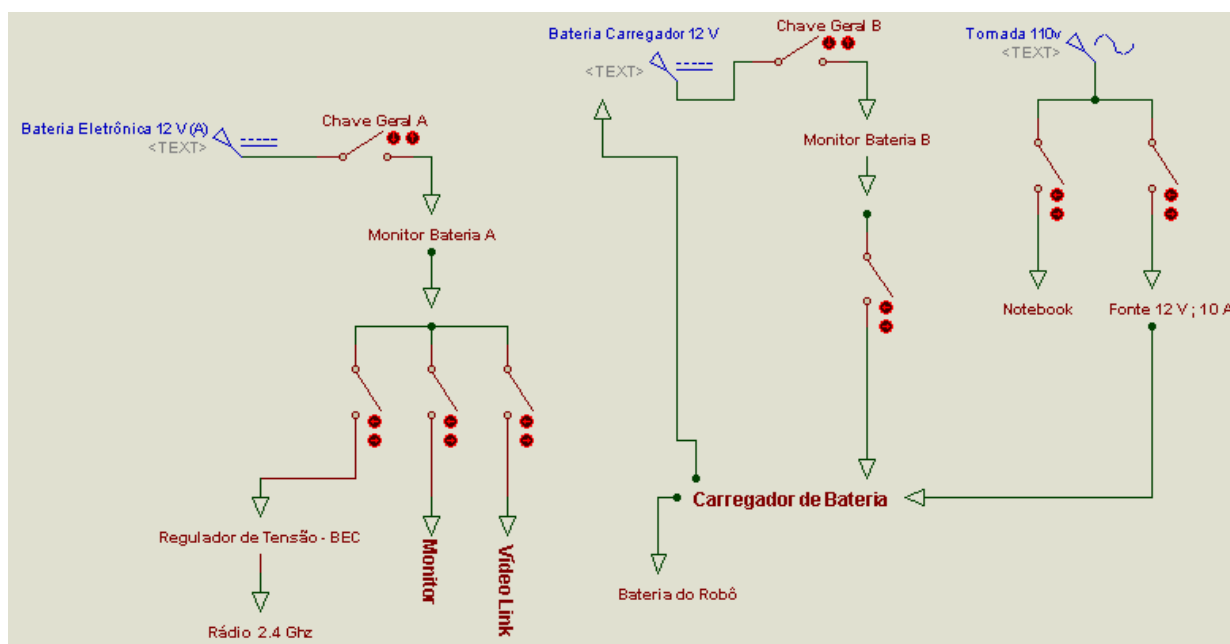


Figura 57 - Esquema de ligação da mala de controle.



É importante ressaltar que a bateria do robô pode ser recarregada através da rede elétrica, ou da própria bateria de chumbo contida na mala de controle, uma vez que esta tem a capacidade suficiente para recarregar 1 ciclo das baterias do robô em atividades de campo. Já as baterias de chumbo da mala de controle, estas devem ser exclusivamente recarregadas através da rede elétrica.

Por último, a Tabela 8 descreve os valores gastos com todos os componentes descritos neste capítulo, visando futura análise e verificação do custo total do protótipo.

Tabela 8 - Descrição dos valores gastos para os componentes do capítulo 4.

ITEM	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO
Kit Atlas Sensor PH	1	\$ 149,15 = R\$ 484,73 Conversão do dólar: \$ 1,00 = R\$ 3,25
Kit Atlas Sensor ORP	1	\$ 174,81 = R\$ 568,13 Conversão do dólar: \$ 1,00 = R\$ 3,25
Kit Atlas Sensor Oxigênio Dissolvido	1	\$ 257,45 = R\$ 836,71 Conversão do dólar: \$ 1,00 = R\$ 3,25
ITEM	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO
Kit Atlas Sensor Condutividade Elétrica	1	\$ 217,55 = R\$ 707,03 Conversão do dólar: \$ 1,00 = R\$ 3,25
Sensor de Temperatura DS18B20	1	R\$ 69,00
Arduino Mega 2560 R3	1	R\$ 249,00
Controlador de Velocidade Sabertooth 2x12A	1	R\$ 379,00
Vídeo Link 2.4 ghz 500 mW	1	R\$ 450,00
Controlador de Velocidade Wasp	1	\$ 29,99 = R\$ 97,46 Conversão do dólar: \$ 1,00 = R\$ 3,25
Monitor de LCD 7"	1	R\$ 149,90
Mala de Controle de Polipropileno	1	R\$ 619,40

Bateria de Lipo Zippy 3S 5000 mAh 40C	2	R\$ 249,99
Controle 2.4 Ghz Turnigy 6 Canais	1	R\$ 349,00
Monitoramento Analógico de Bateria 12 V	1	R\$ 25,00
Bateria de Chumbo 12 V 17Ah	2	R\$ 179,50
Carregador de Bateria Turnigy	1	R\$ 189,00
Fonte Chaveada de 12V 20A	1	R\$ 98,50
Netbook LG X-140-1100 Atom N470	1	R\$ 979,00
Kit Ardupilot	1	R\$ 859,00
Componentes Eletrônicos Diversificados (Botões, resistores, dentre outros)	---	R\$ 343,85
<b>TOTAL:</b>		<b>R\$ 8.312,69</b>

## 5

### Estudo de Casos

#### 5.1

##### Introdução

Após a finalização do desenvolvimento dos *hardwares* e da montagem do sistema robótico, este foi avaliado com relação às funcionalidades desejáveis, assim como quanto a eficácia dos modelos de operação desenvolvidos nesta dissertação. Para isto selecionou-se um conjunto de lagoas onde fosse possível a realização dos testes propostos, tendo como foco principal a lagoa Rodrigo de Freitas, situada na cidade do Rio de Janeiro. Entretanto, por motivos da demora na liberação dos órgãos públicos em fornecer a autorização para utilização da lagoa Rodrigo de Freitas, os testes foram realizados no lago do Quitandinha, situado na cidade de Petrópolis – RJ. A Figura 59 ilustra uma imagem aérea do lago utilizado para os testes.



Figura 58 - Lago utilizado para os testes.

A seção 5.2, a seguir, descreve a metodologia adotada nos testes e a seção 5.3 os resultados obtidos.

## 5.2

### Metodologia

Para cada modo de operação, ou seja, tanto no modo remotamente controlado quanto no modo autônomo, foram realizados testes em diferentes condições climáticas, ou seja, em dias ensolarados e chuvosos. Ao final dos testes, os resultados obtidos foram avaliados para as diferentes configurações. Em vista do número elevado de testes que poderiam ser realizados, uma vez que poderiam ser planejadas diversas trajetórias, uma única rota foi determinada objetivando como traçado o perímetro do lago. Assim foi possível analisar os resultados do sistema robótico e realizar um eventual resgate do robô de maneira simples e fácil, dada a localização do robô estar próxima à margem do lago.

De forma análoga aos testes de manobrabilidade e navegação em diversas condições climáticas, realizaram-se diversos testes no sistema de iluminação e visão subaquática, objetivando analisar os resultados em diferentes ambientes. Logo, além dos testes diurnos, testes noturnos foram realizados com o intuito de testar a capacidade e eficiência do sistema de iluminação e a imagem de vídeo no modo remotamente controlado. Outro aspecto importante que deve ser analisado é o ruído de imagem. Portanto, realizou-se um teste com o sistema de visão ligado isoladamente e outro teste ligado em conjunto com os demais sistemas do robô, visando a verificar o surgimento de algum ruído na imagem.

Por último, após todos os testes realizados, um teste final foi incorporado no escopo, objetivando analisar a resposta do sistema em águas mais dinâmicas, ou seja, águas não lânticas. É importante novamente ressaltar que o sistema não foi desenvolvido para este tipo de ambiente, contudo a ideia era apenas verificar a robustez e as possíveis adaptações necessárias para uma eventual mudança de ambiente. Para tal, optou-se por testar o robô na Baía de Guanabara, situada no Rio de Janeiro – RJ, sendo a praia da Freguesia na Ilha do Governador o ponto escolhido para o teste na referida baía, uma vez que este local reconhecidamente não apresenta uma água de boa qualidade e ao mesmo tempo possui uma dinâmica da água não tão intensa. A Figura 60 ilustra o ponto escolhido para este teste.



Figura 59 - Praia da Freguesia situada na Ilha do Governador - RJ.

Finalmente, após um grande tempo demandado, ocorreu a liberação para utilização da lagoa Rodrigo de Freitas, através de autorização formal expedida pelos órgãos públicos. Apesar desta liberação ter ocorrido ao final dos testes pré-estabelecidos, decidiu-se realizar um único teste na lagoa, com o intuito de verificar possíveis observações até então não percebidas.

### 5.3

#### Resultados Obtidos

##### 5.3.1

#### Sistema de Visão e Transmissão de Vídeo

Os testes realizados no sistema de visão foram qualitativos, como descrito anteriormente, visando a verificação da qualidade da imagem transmitida e recebida em duas situações: motores ligados com os demais sistemas, e motores desligados. A Figura 61 apresenta a qualidade da imagem recebida no monitor LCD através dos sistema de vídeo *link* com os motores desligados e a Figura 62 apresenta a imagem recebida com os motores ligados. As imagens foram geradas após uma transmissão a uma distância de 10 metros do ponto de captura. Alguns testes indicam que em um campo totalmente aberto, a distância máxima de transmissão do sistema é de 2 Km.

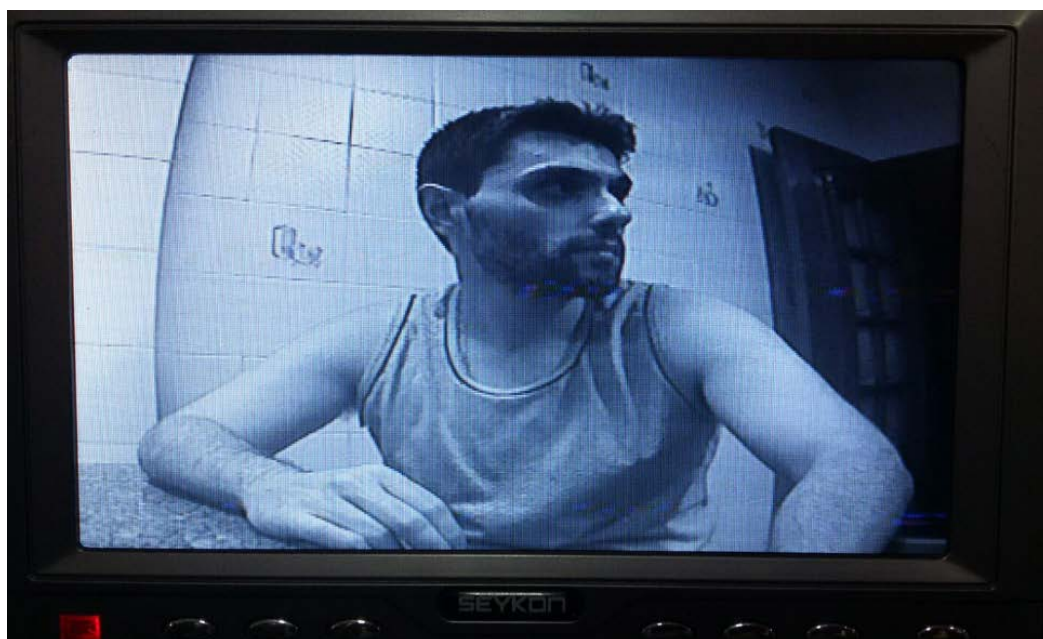


Figura 60 - Imagem com os motores desligados.

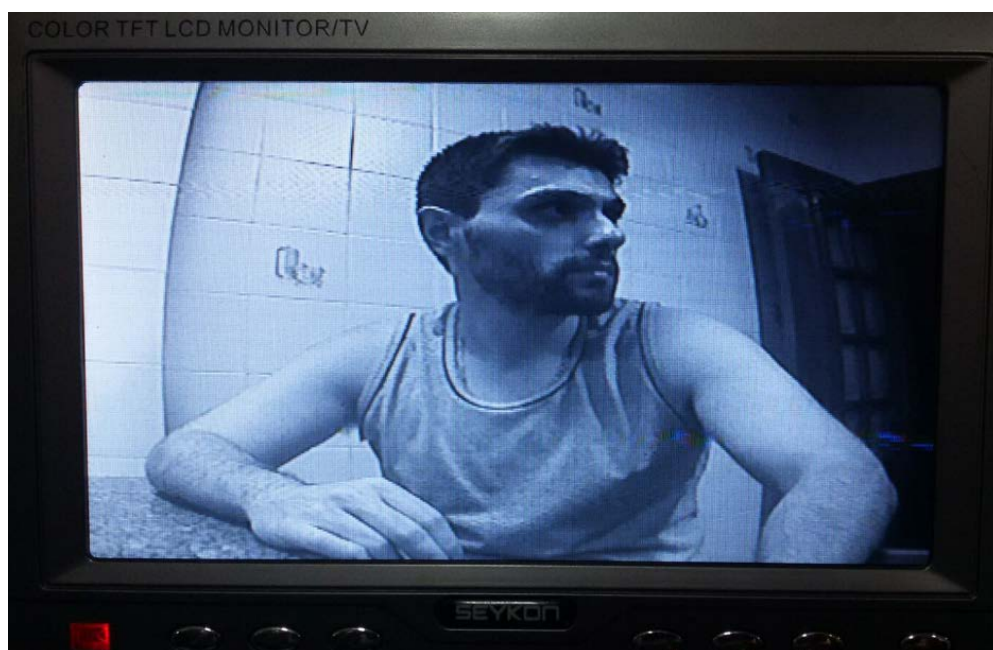


Figura 61 - Imagem com os motores ligados.

No que tange à qualidade da primeira imagem, esta aparentemente apresenta uma qualidade ligeiramente inferior à gerada com os motores ligados. Este comportamento ocorre provavelmente devido ao fato de ambas terem sido capturadas por uma câmera de celular. Na foto com os motores desligados, provavelmente as frequências de captura da câmera do celular e apresentação do monitor LCD eram diferentes, provocando uma distorção da imagem no ato da



captura. Na segunda foto estas frequências podem ter se igualado devido ao acionamento dos motores, gerando uma imagem aparentemente mais nítida e de melhor qualidade.

É importante ressaltar que o teste com os motores ligados foi realizado sem a utilização do sistema de rádio controle remoto, uma vez que, apesar das frequências distintas utilizadas entre o vídeo *link* e o transmissor do rádio controle, estes dois equipamentos apresentaram interferência quando ligados simultaneamente. Isto ocorre provavelmente pelo fato de que, apesar de frequências distintas, estes equipamentos utilizam frequências muito próximas. Além disso, uma vez que a potência de transmissão do vídeo *link* é bem superior à potência de transmissão do rádio controle, quando ligados ao mesmo tempo a transmissão da imagem continua sendo gerada no monitor pelo vídeo *link*, enquanto há perda de sinal somente do rádio controle. Este fato pode ser facilmente explicado pelo princípio de superposição.

### 5.3.2

#### Sistema de Iluminação

O sistema de iluminação em testes noturnos, em água relativamente turva, demonstrou-se adequado a tal ponto que permitiu a leitura do código de barras de uma garrafa plástica colocada em uma piscina, a uma distância de aproximadamente 17 cm. Nas Figuras 63 (A) e (C) a visão frontal do teste do sistema de iluminação é ilustrada, enquanto na Figura 63 (B) e (D) a capacidade de iluminância dos *leds* é representada de forma qualitativa por meio do ambiente iluminado pelo sistema.

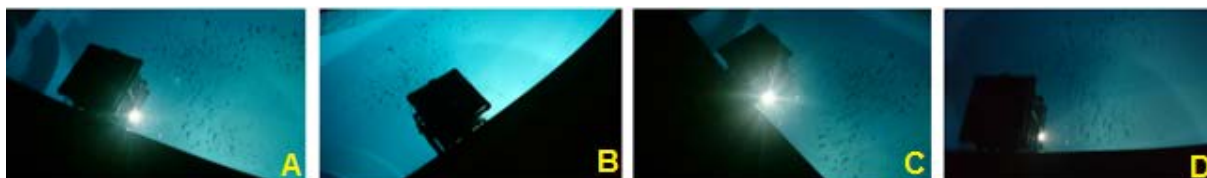


Figura 62 - Teste sistema de iluminação.

As Figuras 64 e 65 abaixo demonstram o teste de iluminação realizado com o código de barras da garrafa plástica já debaixo d'água.



Figura 63 - Imagem do código de barras debaixo d'água.

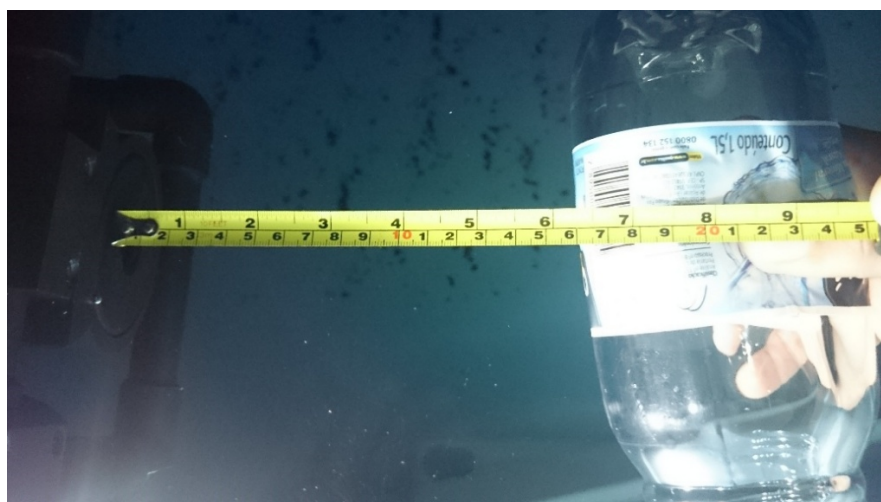


Figura 64 - Distância da câmera para o código de barras da garrafa plástica.

### 5.3.3

#### Sistema Remotamente Controlado

As Figuras 66 e 67 ilustram os testes realizados em condições climáticas distintas, uma vez que em dias chuvosos, o lago apresenta águas mais turbulentas quando comparadas com as águas dos dias ensolarados. É importante ressaltar que na Figura 66, as elipses em vermelho destacam as condições climáticas no dia do teste. Por último, destaca-se que utilizou-se o perímetro do lago como trajetória realizada em ambos os casos.





Figura 65 - Teste em dia chuvoso.



Figura 66 - Teste dia com sol.

No que tange aos testes no modo remotamente controlado, os resultados tanto em boas condições climáticas quanto em dias chuvosos foram satisfatórios, uma vez que o sistema robótico apresentou excelente manobrabilidade e dirigibilidade. A estrutura tubular de PVC demonstrou-se robusta, suportando todos os esforços exercidos sobre ela, incluindo o torque exercido pelo motor. Entretanto, após alguns testes realizados, o vaso de pressão apresentou vazamentos em determinados locais, os quais foram solucionados aplicando novamente cola epóxi nas junções das paredes e do fundo do vaso de pressão. No futuro, sugere-se laminar um compartimento em fibra de vidro ou carbono, visando o desenvolvimento do compartimento em uma única peça, evitando assim problemas com eventuais vazamentos.

Outro aspecto importante é que para longas distâncias do ponto de operação, tornava-se difícil saber onde encontrava-se a parte da frente do robô, dada a

simetria do sistema robótico e a falta do auxílio da câmera devido à interferência desta com o transmissor do rádio. Assim, para longas distâncias, o controle manual era bastante complicado, uma vez que era difícil orientar o robô para um determinado ponto, sem saber com precisão onde estava situada a parte da frente. Logo, visando auxiliar a identificação da parte frontal do robô, este foi posteriormente pintado com duas cores distintas, facilitando a identificação dos respectivos lados (frente e trás). Além disso, com o intuito de ajudar a identificação durante operações noturnas, uma fita de *led* foi instalada na frente do sistema.

### 5.3.4

#### Sistema no Modo Autônomo

Nos testes utilizando o modo autônomo, foi utilizada a ferramenta denominada “*learning mission*”, disponível no *software* Mission Planner descrito anteriormente no capítulo 5. Este recurso, permite adicionar *waypoints* de uma maneira bastante simples, conduzindo o sistema robótico previamente em uma trajetória por meio do modo remotamente controlado e, armazenando os *waypoints* desejados para o uso posterior no modo autônomo. Assim, pôde-se armazenar de maneira bastante prática as posições do GPS desejadas, visando à utilização na trajetória da missão autônoma.

É importante ressaltar que durante o processo de armazenamento de cada posição no modo controlado, uma instrução de espera foi utilizada, visando realizar uma marcação manual da referida posição com uma boia (bola de isopor) associada com um lastro. Tal ação teve como intuito comparar qualitativamente se no modo autônomo, o robô passaria exatamente pelo o mesmo ponto anterior, uma vez que pela incerteza do GPS o sistema poderia passar somente próximo ao local. A Figura 68 ilustra uma comparação da trajetória autônoma com a trajetória realizada no modo remotamente controlado, sendo os pontos azuis os *waypoints* armazenados no modo remotamente controlado e os pontos vermelhos os *waypoints* registrados no modo autônomo.



Figura 67 - Comparação de *waypoints* no modo autônomo e no modo remotamente controlado.

Os resultados foram satisfatórios, demonstrando de forma prática que o sistema desenvolvido obteve os critérios técnicos desejados, sendo estes:

- Visualização dos dados obtidos pelo robô;
- Facilidade de planejamento de uma missão;
- Capacidade de realizar uma trajetória de forma autônoma.

A diferença obtida entre os respectivos pontos pode ser atribuída pela incerteza do GPS (3 metros) e, o fato de poder ter ocorrido um deslocamento das boias devido à movimentação da água, sendo esta a principal razão da diferença entre as posições no ponto Q.

### 5.3.5

#### Teste na Baía de Guanabara

No caso particular do teste realizado na baía de Guanabara, somente o modo remotamente controlado foi avaliado, sendo os resultados obtidos satisfatórios, uma vez que o sistema robótico não foi projetado para este tipo de ambiente. O robô foi capaz de realizar uma trajetória remotamente controlada, entretanto este

não apresentou o mesmo grau de manobrabilidade e dirigibilidade dos ambientes lênticos.

O sistema apresentou diversas dificuldades de locomoção, principalmente contra a correnteza, realizando um deslocamento de forma bastante lenta. Outro aspecto importante a salientar foram as ondas, uma vez que o sistema robótico era arremessado para trás, prejudicando ainda mais a sua locomoção e, conseqüentemente, atrasando ainda mais o seu percurso. De forma qualitativa pôde-se observar que o hélice apresentava uma grande velocidade angular e relativamente pouco empuxo, realizando em determinados momentos um processo de cavitação o qual não ocorria em ambientes lênticos.

Além disso, os problemas descritos anteriormente não se refletiram no robô quando este girava em torno do seu próprio eixo, apresentando a mesma dirigibilidade de quando inserido em águas mais calmas.

Por último, cabe ressaltar que a estrutura mecânica e o vaso de pressão suportaram as pressões e os impactos provenientes das ondas, mesmo tendo sido desenvolvidos de forma simples e rudimentar. A Figura 69 ilustra o teste realizado na baía.



Figura 68 - Teste na Baía de Guanabara.

### 5.3.6

#### Teste na Lagoa Rodrigo de Freitas

Foi realizado somente um único teste na Lagoa Rodrigo de Freitas, sendo este feito sob boas condições climáticas. Durante o teste, o sistema robótico apresentou boas condições de manobrabilidade em ambos os modos de operação (autônomo e rádio controlado). Apesar dos resultados apresentados serem



análogos ao do lago Quitandinha em Petrópolis-RJ, em determinados momentos a navegação foi prejudicada devido ao travamento dos propulsores.

O travamento dos propulsores está relacionado com o acúmulo de algas que ficavam presas ao sistema de propulsão, uma vez que eventualmente os hélices ao girar, capturavam algas que encontravam-se em suspensão na água. Assim, quando o robô passava em determinadas regiões, onde o acúmulo destas algas que se desprenderam do fundo da lagoa era maior, estas se enrolavam no hélice ocasionando o travamento do motor e a paralisação da navegação. Neste momento, apesar dos motores estarem em uma condição de *stall*, estes não sofreram nenhum tipo de dano, uma vez que a eletrônica de controle dos motores (Sabertooth 2x12) possui proteção de corrente, conforme descrito anteriormente no Capítulo 4. A Figura 70 ilustra os testes realizados na lagoa Rodrigo de Freitas.



Figura 69 - Testes realizados na lagoa Rodrigo de Freitas.

### 5.3.7

#### Teste dos Sensores Físico-Químicos

No que tange os testes dos sensores de monitoramento da qualidade da água, estes apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que diversas medições foram realizadas nos *waypoints* selecionados. Entretanto, uma vez que não se teve recursos suficientes para adquirir o sensor de condutividade elétrica da água, este atributo para o indicador de qualidade da água não pode ser calculado. Além disso, uma vez que a análise e a interpretação dos dados não fazem parte desta dissertação, todos valores obtidos foram respectivamente armazenados para uma futura análise de algum especialista. É importante salientar que somente foram armazenados os dados do lago do Quitandinha, pois o escopo dos demais testes era simplesmente para verificar a manobrabilidade e navegação do sistema em outros ambientes. Por último, todos os valores obtidos de cada sensor estão detalhados no apêndice deste trabalho.

## 6

### Conclusões e Trabalhos Futuros

#### 6.1

##### Conclusões

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema robótico aquático de baixo custo, visando o monitoramento da qualidade da água em ambientes lênticos. Além disso, foram definidos procedimentos de ensaio e metodologia de testes.

O protótipo desenvolvido dispõe de dois modos de operação: remotamente controlado e autônomo. O modo remotamente controlado apresenta um amigável sistema de controle através de um painel capaz de transmitir imagens em tempo real do robô; realizar o monitoramento da bateria e realizar a recarga da mesma; realizar o controle de iluminação e manobrabilidade do sistema; e, principalmente, coletar as informações físico-químicas da água. De forma análoga, o modo autônomo dispõe de uma interface gráfica simples e intuitiva já disponível no mercado, visando facilitar o uso por usuários que não sejam especialistas em programação no momento de planejar e inserir a rota desejada no sistema robótico. Em ambos os modos de operação, o robô apresentou boa dirigibilidade e confiabilidade, sendo facilmente operado sem nenhum problema durante todos os testes.

Realizou-se um projeto mecânico robusto e de baixo custo, obtendo um ótimo desempenho estrutural. Foi concebida uma estrutura em tubos e conexões de PVC de modo a incorporar os propulsores, o compartimento da eletrônica embarcada, uma câmera de vídeo, um sistema de iluminação e os sensores. Todo o projeto foi elaborado de forma a garantir fluidez positiva.

O vaso de pressão desenvolvido, apesar de não ser estruturalmente adequado para suportar grandes pressões, suportou as pressões necessárias durante os testes. Entretanto, o vaso de pressão necessita de uma reconfiguração capaz de agregar melhorias ao projeto, tais como: o desenvolvimento de um projeto no qual os pontos de maiores tensões sejam menos susceptíveis à ruptura.

Toda a parte eletrônica foi projetada de maneira a atender às especificações dos equipamentos incorporados e aos dois modos de operação, estando inclusa a comunicação com os sensores e a calibração dos mesmos. No âmbito do sistema de iluminação, este necessitará de uma nova especificação, visto que o atual sistema de iluminação, apesar de funcionar dentro de suas limitações, não atenderá às necessidades futuras de inspeção visual. No que tange ao sistema de visão, este, de forma análoga ao de iluminação, deverá ser novamente especificado, uma vez que o vídeo *link* gera interferência no sinal do rádio controle, pois ambos apresentam frequências próximas com uma grande discrepância de potência entre os sinais.

É importante ressaltar que o desenvolvimento completo de um sistema robótico aquático utilizando recursos de baixo custo não é um trabalho trivial. O processo de definição, desenvolvimento, construção e testes de cada subsistema é demorado e exaustivo, mas extremamente compensador quando finalizado com êxito. As dificuldades enfrentadas para construção do protótipo foram muitas como, por exemplo:

- A importação demorada dos propulsores e de alguns sensores para análise da água;
- Locais de fácil acesso para maior quantidade de testes;
- Recursos financeiros; e
- Problemas mecânicos de vazamento.

Outro aspecto de suma importância foi o monitoramento dos recursos financeiros utilizados neste projeto, uma vez que um dos objetivos específicos foi a prototipação de um sistema de baixo custo. O montante financeiro utilizado para a protipação do robô foi inferior ao valor de R\$ 10.000,00 (dez mil) reais, conforme a soma dos memoriais de cálculo apresentados no final do Capítulo 3 e Capítulo 4. Logo, conclui-se que o sistema robótico desenvolvido atingiu um custo relativamente baixo, uma vez que sistemas similares, como os apresentados no Capítulo 2, podem variar com valores de mercado entre 5 e 7 dígitos.

Finalmente, espera-se que este trabalho, por ter alcançado sucesso na maioria dos objetivos a que se propôs, venha a contribuir para o desenvolvimento de futuros protótipos de sistemas robóticos para monitoramento da água.



## 6.2

### Trabalhos Futuros

As seguintes oportunidades de trabalhos futuros podem ser destacadas a partir desta dissertação:

- Adaptar ao sistema robótico desenvolvido sensores capazes de gerar estímulos para o controle, permitindo o desvio de obstáculos de forma autônoma;
- Adequação do sistema robótico e desenvolvimento de um novo controle para águas não lânticas, objetivando a utilização do robô no monitoramento dos oceanos, visando aprender mais sobre as transformações climáticas no planeta, uma vez que o oceano é um elemento chave nas mudanças climáticas;
- Implementar sistema de painéis solares, visando auxiliar a alimentação da eletrônica embarcada restringindo as baterias somente aos motores, maximizando assim o tempo atual de operação de 4 horas;
- Adequação do sistema de navegação com a leitura dos sensores físico-químicos, visando a detecção de emissários de esgoto em lagos e lagoas;
- Substituição do sistema de transmissão de imagens, visando realizar a troca da frequência de transmissão de 2.4Ghz para 5.8Ghz. Assim, espera-se mitigar os problemas de interferência detectados neste trabalho;
- Adequação mecânica do suporte dos motores de propulsão, visando evitar que algas fiquem presas nos hélices travando assim os motores;
- Realizar a modelagem dinâmica do sistema robótico desenvolvido neste trabalho;
- Aquisição de todos os sensores necessários para verificar na totalidade os atributos do IQA – Índice de Qualidade da Água;
- Adequação hermética do módulo de controle e adaptação de mais um atuador, visando à coleta das informações em diferentes profundidades.

## Referências bibliográficas

ALLEN, B.; AUSTIN, T.; FORRESTER, N.; GOLDSBOURGH, R.; KUKULYA, A.; PACKARD, G.; PURCELL, M.; STOCKEY, R. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology. *IEEE Ocean Conference Proceedings*, 2006.

ALMEIDA, J.L.A. Eletrônica Industrial, 10ª edição - São Paulo: ÉRICA, 1991, 245p.

ALT, C.; ALLEN, B.; AUSTIN, T.; FORRESTER, N.; FREITAG, L.; GOLDSBOURG, R.; GRUND, M.; PURCELL, M.; STOCKEY, R. Semi-Autonomous Mapping Systems. *IEEE Ocean Conference Proceedings*, 2006.

ALTSHULER, R.C.; APGAR, J.F.; EDELSON, J.F.; GREENSPAN, D.L.; ORCA: VII: An Autonomous Underwater Vehicle, Massachusetts Institute of Technology, Project ORCA, Cambridge, 2003.

AOKI, T.; MURASHIMA T.; TSUKIOKA S.; NAKAJYOH H.; IDA M., 1999. Development of Deep Sea Free Swimming ROV "UROV7K". *IEEE, Oceans '99 MTS*, v. 3, p. 1307-1311.

AROCA, R.V.; GONÇALVES, L.M.G. Monitoramento Remoto de Oceanos e Ambientes Aquáticos, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal - RN, 2010.

BARBOSA, A.O.G. Controle de Robô Usando Técnicas Inteligentes, UERJ, 2008.

BARATO, B. Projeto de um Sistema de Controle para Veículos Aéreos Não Tripulados, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.

BARROS, E.A.; SOARES, F.J.A. Desenvolvimento de um Robô Submarino de Baixo Custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XIV, 2002, Natal-RN. p. 2121-2126.

BASHOUR, R. Prowler II, International Autonomous Underwater Vehicle Competition, U.S Naval Academy, Annapolis, 2001.

BENEMANN, A. Estação de Controle para Veículos Aéreos Não Tripulados, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

CALDAS, A.C.I.L. Validação Metrológica de um Sistema de Aquisição de Dados para Reconstrução de Traçados de Veículos Terrestres, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio, 2008

CAZANGI, R.R. Síntese de Controladores Autônomos em Robótica Móvel por Meio de Computação Bio-inspirada, Tese da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2008.

CENTENO, M.L. Projeto e Construção de um Veículo Subaquático Não Tripulado de Baixo Custo, Dissertação Pós-Graduação, UFRG, 2007.

CHARDARD, Y.; COPROS, T. SWIMMER: Final Sea Demonstration of this Innovative Hybrid AUV/ROV System. *IEEE, International Symposium on Underwater Technology*, 2002, p.17-23.

COBRA, D.; YAMASHITA, M.; SILVA, C.; PIEKAR, D.; DUPUY, E.; SANTOS, R.; SILVA, L.; GOMES, I.; SOUZA, S.; VARELA, F.; GESZYCHTER, M.; 2014. Desenvolvimento de Boia Instrumentada para Monitoramento da Qualidade da Água, VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL), 2013.

CUNHA, J.P.V.S. Projeto e Estudo de Simulação de um Sistema de Controle a Estrutura Variável de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro, 1992. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DUNBADIN, M.; GRINHAM, A.; UDY, J. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring, Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia

DOMINGUEZ, R.B. Simulação e Controle de um Veículo Submarino de Operação Remota. Rio de Janeiro, 1989. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FOSSEN, T.I.; BALCHEN, J.G. The NEROV Autonomous Underwater Vehicle. OCEANS '91. 'Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's'. FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D. and EMAMI-NAEINI, A. Feedback control of dynamic systems. Addison-Wesley, New York, 1994.

FERREIRA, M.A.C. Desenvolvimento de Sensores de Oxigênio Dissolvido Utilizando Métodos Eletroquímicos e Ópticos para Monitoramento Real da Qualidade da Água, Tese Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

FOSSEN, T.I.; FJELLSTAD, O.E. Nonlinear Modeling of Marine Vehicles in Six Degrees of Freedom. *Journal of Mathematical Modeling of Systems*, 1995, v. 1, no. 1, p. 19-26, May.

GIOZZA, W.F. Redes locais de Computadores. São Paulo: McGraw-Hill, 1986 399p.

GOMES, S.C.P.; BIER, C.C. Estudo sobre trajetórias de controle para robôs manipuladores. In: XII Congresso Brasileiro de Automática, 1998, Uberlândia, MG. Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática, 1998.

GOMES, S.C.P.; DINIZ, C.M.; MOREIRA, T.G.; VELLOSO, B. “A guideline to construct a very low cost underwater vehicle” - 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), 2005, Ouro Preto (MG). 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), 2005.

GOMES, S.C.P.; MORAES, C.E.M.; DREWS JR, P.L.; MOREIRA, T.G.; TAVARES, A.M. Underwater vehicle dynamic modeling. In: 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005), 2005, Ouro Preto (MG). 18<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2005). 8 páginas, ABCM, 2005.

HANISCH, W.; SOUZA, C. 2015. Monitoramento Remoto em Tempo Real de Mananciais Visando às Florações de Cianobactérias, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, capítulo 14.

HSU, L.; CUNHA, J.P.V.S.; LIZARRALDE, F.; COSTA, R.R. 2000. Avaliação Experimental e Simulação da Dinâmica de um Veículo Submarino de Operação Remota. *Revista Controle & Automação*, vol. 11, n. 2, p. 82-93.

KLIPP, T.S. Proposta de uma Arquitetura para Alocação de Tarefas em Grupos de Robôs Móveis Baseada em Acordo Bizantino, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

KOH, T.H.; LAU, W.S.; LOW, E.; SEET, G.; SWEI, S.; CHENG, P. 2002. A Study of the Control of an Underactuated Underwater Robotic. In: Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 2049-2054.

McCARTHY, K. REMUS – a role model for AUV technology transfer. *International Ocean Systems*, 2006.

MAGALHÃES, P.H.V. Desenvolvimento de um Submersível Remotamente Operado de Baixo Custo e Caracterização dos Sistemas de Propulsão e Vetorização de Empuxo por Hélice, Tese de Pós-Graduação, UFMG, 2007.

MALIUK, K.D. Robótica Educacional como Cenário Investigativo nas Aulas de Matemática, Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Matemática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

MEGGIOLARO, M.A. Riobotz Combat Robot Tutorial, 2009.

MILLER, D.P. Design of a Small Cheap UUV for Under-Ship Inspection and Salvage. In: IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Monterey CA, June 1996.

MORAES, C.E. ROVFURG-I: Projeto e construção de um veículo subaquático não tripulado de baixo custo. Rio Grande, 2005. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Fundação Universidade Federal de Rio Grande.

MUNHOZ, A.; RODA, V. Detecção de Obstáculos em Embarcações. (2009).

NEAL, M. (2006). A hardware proof of concept of a sailing robot for ocean observation. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 31(2):462 –469.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno, 5º Edição, Editora Pearson, 2011.

OHATA, S.; ISHII, K.; SAKAI, H.; TANAKA, T. and URA, T. (2005). Development of an autonomous underwater vehicle for observation of underwater structures. pages 1928 – 1933 Vol. 3.

PSILOVIKOS, A. Contribution of monitoring in sustainable management and prevention of environmental hazards in the transboundary river Nestos. The perspective application of directive 2000/60. Hydrotechnica, p. 87-102, 2005.

SAMPAIO, G.C. Sensores Eletroquímicos para Detecção de íons e Medida de PH Baseados em Filmes de Silício Poroso, Dissertação, Politécnica de São Paulo, 2007.

SANTOS, E.H.; MORI, W.S. Estrutura do ROV Subaquático, UNIFAE, Curso de Engenharia da Computação, São João da Boa Vista, 2010.

SECCHI, H. Uma Introdução aos Robôs Móveis, Universidade Nacional de San Juan, UNSJ, 2008.

SHAPIRO, A. Yellow submarine. Spectrum, 2010, IEEE, 47(3): 40-45.

TAVARES, A.M.; GOMES, S.C.P.; CUNHA, M. A. B. Um estudo sobre o comportamento dinâmico de diferentes tipos de veículos subaquáticos não tripulados. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2004, Belém. CONEM2004, 2004b.

YUH, J. 2000. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, Int'l J. of Autonomous Robots.

# Apêndice

## 1

### Princípio de Funcionamento dos Sensores

#### 1.1

##### GPS

O GPS é um sistema de rádio navegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (Caldas, 2008), com objetivo de ser seu principal sistema de navegação. Sua concepção permite que um usuário em qualquer lugar da superfície terrestre, ou próxima dela, tenha a sua disposição no mínimo 4 satélites para serem rastreados, permitindo que se realize um posicionamento em tempo real. O princípio básico de navegação consiste na medição de distâncias entre o usuário (antena – satélite e receptor – usuário) e pelo menos quatro satélites, como mencionado anteriormente. Se as coordenadas dos satélites são conhecidas, em um sistema de referência adequado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Esta operação é baseada no princípio matemático chamado trilateração (Caldas, 2008).

A trilateração é um método de determinação das posições relativas de objetos usando a geometria dos triângulos de modo similar à triangulação, só que a trilateração 2D utiliza as posições conhecidas de pelo menos dois pontos de referência e a distância medida entre o objeto e cada ponto de referência. Já a triangulação usa medidas de ângulos junto com pelo menos uma distância conhecida, para calcular a posição do objeto. A trilateração 3D pode parecer um pouco complicada, então fica mais fácil entender explicando primeiro a trilateração 2D. Ela é o fruto da interseção entre distâncias conhecidas (distâncias até os satélites) para se obter o ponto desejado desconhecido. A trilateração 3D, ao invés de círculos de raios conhecidos, é formada por esferas com esses raios. Para melhor entender, fazendo uma trilateração 2D, como ilustrada na Figura 71, pode-se analisar que os centros dos círculos A, B e C, formados pelos raios  $r_a$ ,  $r_b$  e  $r_c$

são as posições de cada satélite e, portanto, achando os pontos de interseção desses círculos, acha-se o ponto P desejado onde está o usuário do GPS.

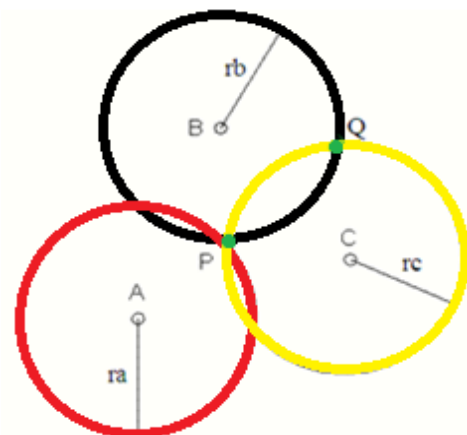


Figura 70 - Trilateração 2D (Bidimensional).

Porém, mesmo o GPS tem suas limitações e é preciso conhecer no mínimo duas informações para a determinação de uma posição GPS tridimensional (latitude, longitude e altitude): a posição de pelo menos quatro satélites próximos do usuário e a distância entre o usuário e cada um desses satélites.

## 1.2

### Central Inercial

O preceito fundamental da Navegação Inercial reside no fato de que a segunda integral da aceleração é a posição. Ela se baseia em medições das acelerações e velocidades angulares do corpo em movimento em relação a um determinado sistema de referência. Ou seja, a Navegação Inercial é o processo pelo qual se estabelecem informações sobre posição, velocidade, atitude (posição de um corpo que é determinada pela inclinação dos seus eixos com relação a algum sistema de referência) e direção de um veículo com relação a um referencial, utilizando informações fornecidas por sensores inerciais, tais como acelerômetros e giroscópios (Caldas, 2008).

Giroscópios e acelerômetros medem respectivamente as rotações em torno dos eixos coordenados (ângulos) e as acelerações em cada eixo. Por meio de processos de integração, torna-se possível obter velocidade e posição, bem como determinar a orientação do corpo. Já o GPS pode medir a posição, como

mencionado anteriormente e, por meio de sucessivas medições de posição, pode-se avaliar medidas derivadas como: o deslocamento e a velocidade do veículo. Com isso pode-se comparar a velocidade medida pelo GPS com a velocidade integrada a partir dos dados coletados pela central inercial e verificar se estão compatíveis, confirmando assim o funcionamento dos componentes. A Figura 72 ilustra um esquema do que é possível se obter utilizando uma central inercial.

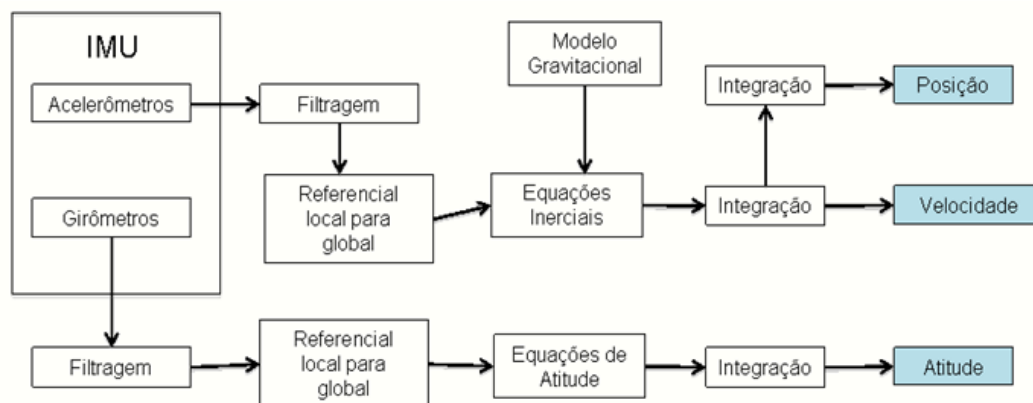


Figura 71 - Esquema geral utilização de uma central inercial.

### 1.3

#### Acelerômetro ADXL 345

Esses acelerômetros são micro-usinados em superfície utilizando poli-silício para os elementos estruturais e para o corpo de prova. Uma camada de 2  $\mu\text{m}$  de espessura é depositada sobre uma camada de sacrifício de dióxido de silício, que é removida em uma etapa final com ácido fluorídrico. O princípio de funcionamento do acelerômetro ADXL345 é baseado no efeito de variação da capacitância a partir do movimento relativo entre placas. Quando há aceleração nula as capacitâncias não variam no tempo, e quando há aceleração a placa móvel dos capacitores se desloca em relação às demais, alterando a capacitância dos capacitores 1 e 2. A Figura 73 ilustra o princípio de funcionamento descrito anteriormente:



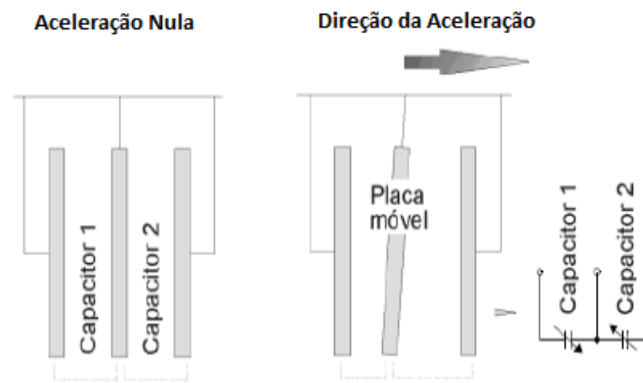


Figura 72 - Princípio de funcionamento de um acelerômetro eletrônico.

Em outras palavras, quando ocorre o movimento do conjunto sensor, ocorre a flexão das travessas de fixação do corpo de prova, variando a distância entre as placas e, conseqüentemente, ocorrendo a variação das capacitâncias. Com a movimentação da massa uma capacitância aumentará com a aproximação a uma das placas e diminuirá em relação à outra, devido ao distanciamento simultâneo. Para se ter uma noção das grandezas envolvidas nesta estrutura, as placas capacitivas dos acelerômetros podem ter comprimento em torno de  $10^{-4}\text{m}$ , com distância entre placas em torno de  $10^{-6}\text{m}$ , sendo que as menores variações de capacitância detectáveis estão na ordem de  $10^{-18}\text{F}$ . Um corpo de prova típico possui massa em torno de  $10^{-9}\text{kg}$  (Caldas, 2008). A Figura 74 ilustra a micro estrutura interna de um acelerômetro.

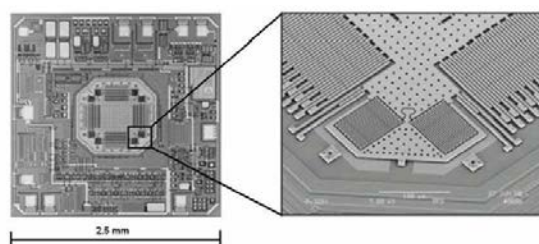


Figura 73 - Estrutura interna de um acelerômetro da família ADXL.

## 1.4

### Giroscópios

Considerando os giroscópios, os principais tipos de giroscópios são os seguintes (Caldas, 2008):

- *Tuning-fork* (sintonizados);
- *Vibrating-Wheel* (com disco vibrante);
- Ressonador *Wine Glass*;
- Pêndulo de *Foucault*.

Os giroscópios *tuning-fork* contêm um par de massas (corpo de prova) que podem ser levadas a oscilar com mesma amplitude, mas em direções opostas. Quando estas massas são rotacionadas, a força de Coriolis cria uma vibração ortogonal que pode ser medida. Uma estrutura usual para detecção deste tipo de movimento é um mecanismo em forma de pente, similar à estrutura representada na Figura 75.

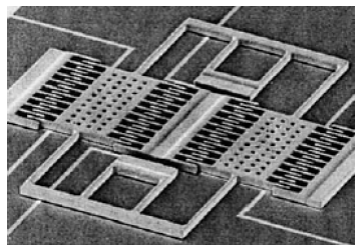


Figura 74 - Estrutura interna do giroscópio com estrutura em forma de pente.

Uma rotação desta estrutura faz com que as massas vibrem e este movimento é percebido devido à variação capacitiva dos elementos da estrutura. Pode-se considerar que a determinação dos modos de vibração de um sensor inercial MEMS é fundamental para a caracterização dos valores dos sinais de saída. Em um girômetro existe normalmente um modo de vibração que estimula ou conduz a oscilação do sensor e um segundo modo que permite a determinação do movimento de rotação do sensor. Para que a detecção do movimento de rotação seja eficiente é importante que não existam outros modos próximos destes dois principais.

Nos giroscópios *vibrating-wheel* um rotor (disco) é levado a oscilar em torno do seu eixo de simetria e uma rotação em torno dos eixos do plano de oscilação resulta em uma inclinação do rotor. Esta mudança de posição pode ser detectada por eletrodos capacitivos colocados embaixo do rotor. É possível estabelecer dois eixos ortogonais de medição com um único rotor oscilante. Um girômetro MEMS com rotor oscilante e micro-usinado (usinagem em superfície cristalina) em poli-silício é representado na Figura 76.

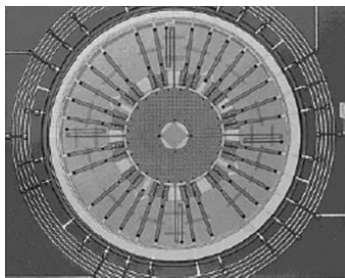


Figura 75 - Girômetro com rotor oscilante.

Os giroscópios do tipo ressonador *wine glass* possuem um anel onde pontos nodais indicam o ângulo de rotação. Os modos de ressonância são bem separados, mas mesmo assim alguma sintonia fina pode ser necessária devido às imperfeições geradas durante o processo de fabricação. O sinal de saída deste sensor se comporta como um indicador de velocidade angular. Tal tipo de sistema pode ser observado na Figura 77 a seguir:

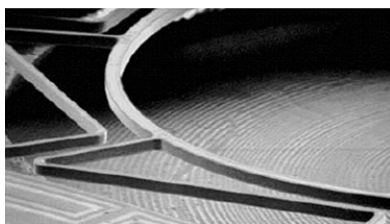


Figura 76 - Detalhes da estrutura de um Girômetro ressonador Wine Glass.

Por último, os giroscópios do tipo pêndulo de Foucault são baseados em hastes oscilantes que são orientadas, em geral, no sentido ortogonal ao plano da base do substrato cristalino de usinagem. Tais dispositivos tornam-se difíceis de fabricar com tecnologia de usinagem de superfície, devido à espessura reduzida de tais substratos cristalinos.

## 1.5

### Sensor Oxigênio Dissolvido

O princípio de funcionamento é que o fluxo de oxigênio atravessa uma membrana permeável ao gás, alcançando a superfície de um eletrodo polarizado negativamente em relação ao anodo, ambos os eletrodos imersos em um eletrólito. A corrente gerada pela redução do oxigênio sobre o catodo é proporcional à pressão absoluta de oxigênio fora da membrana. A membrana faz a separação dos

eletrodos e o eletrólito da solução de teste, e ao mesmo tempo mantém uma fina camada de eletrólito em contato com o catodo (Ferreira, 2007). A Figura 78 demonstra tal sistema de medição por meio do desenho esquemático da pioneira patente de Clark em 1959.

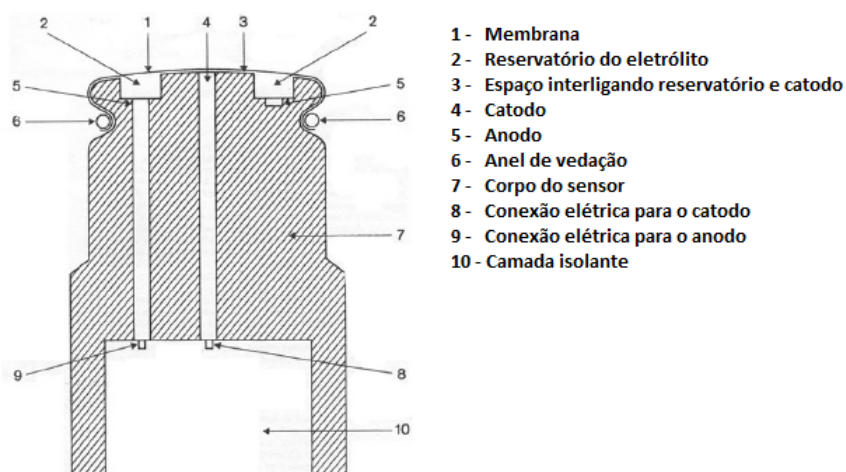


Figura 77 - Estrutura do sensor de oxigênio dissolvido.

## 1.6

### Sensor de PH

O princípio de funcionamento deste sensor consiste em 2 eletrodos, um de medição (eletrodo de vidro) imerso na solução testada e outro de referência imerso em uma solução de concentração hidrogeniônica constante e conhecida. Estes eletrodos estão separados por uma membrana, a qual permite a passagem da corrente eletroquímica. A diferença de potencial entre os dois eletrodos indica o valor da solução testada, variando linearmente com o valor do pH. Estes eletrodos estão numa câmara de fluxo, cuja finalidade é mantê-los constantemente imersos na solução testada. Normalmente é incluído um terceiro eletrodo (resistência) na câmara de fluxo, cuja finalidade é compensação da variação de temperatura.

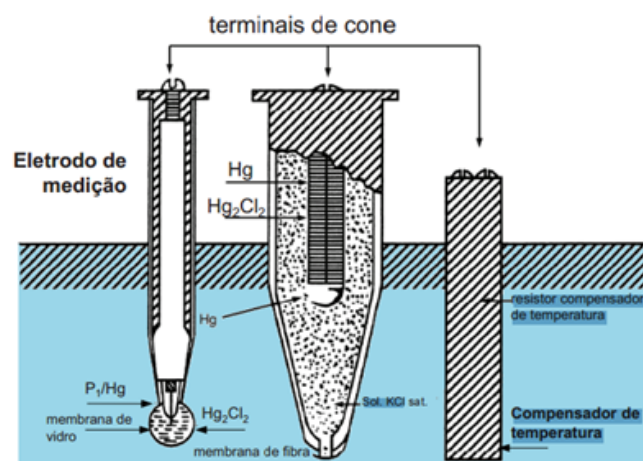


Figura 78 - Estrutura do sensor de pH.

## 2

## Leitura Sensores Físico-Químicos

TESTE LAGO DO QUITANDINHA

TESTE 1 – Dia com Sol						
	Waypoint1	Waypoint2	Waypoint3	Waypoint4	Waypoint5	Waypoint6
<b>Sensor PH</b> (-Log H+)	7.1	7.5	7.2	6.8	8.1	7.6
<b>Sensor O.D</b> (mg/l)	9.0	8.5	7.3	7.5	7.2	7.3
<b>Sensor ORP</b> (mV)	225	230	234	240	232	238
<b>Sensor de Temp.</b>	23°C	22.5°C	22.5°C	22°C	22°C	22°C
<b>Sensor Cond. E.</b>	--	--	--	--	--	--

TESTE 2 – Dia Chuvoso						
	Waypoint1	Waypoint2	Waypoint3	Waypoint4	Waypoint5	Waypoint6
<b>Sensor PH</b> (-Log H+)	7.8	7.9	7.8	7.8	8.1	7.7
<b>Sensor O.D</b> (mg/l)	9.5	9.5	9.3	9.5	9.0	9.3
<b>Sensor ORP</b> (mV)	225	220	228	232	230	223
<b>Sensor de Temp.</b>	18°C	18.5°C	18.5°C	18.5°C	18°C	18°C
<b>Sensor Cond. E.</b>	--	--	--	--	--	--