



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECATRÔNICA



N-Boat: Projeto e Desenvolvimento de um Veleiro Robótico Autônomo

Álvaro Pinto Fernandes de Negreiros

Orientador: Prof. Dr. Luiz Marcos Garcia Gonçalves

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica da UFRN (área de concentração: Engenharia de Computação) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de ordem PPGEMECA: M019
Natal, RN, Julho de 2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Negreiros, Álvaro Pinto Fernandes de.

N-Boat: projeto e desenvolvimento de um veleiro robótico autônomo / Álvaro Pinto Fernandes de Negreiros. - 2019.

67f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Luiz Marcos Garcia Gonçalves.

1. Veículo autônomo de superfície - Dissertação. 2. Veleiro robótico - Dissertação. 3. Hardware distribuído - Dissertação. I. Gonçalves, Luiz Marcos Garcia. II. Título.

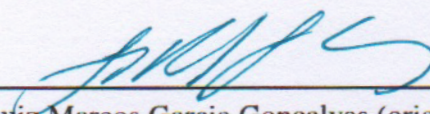
RN/UF/BCZM

CDU 004.436.2

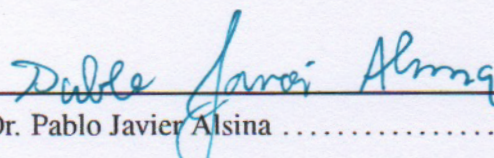
N-Boat: Projeto e Desenvolvimento de um Veleiro Robótico Autônomo

Álvaro Pinto Fernandes de Negreiros


Dissertação de Mestrado aprovada em 01 de Julho de 2019 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Luiz Marcos Garcia Gonçalves (orientador) DCA/UFRN



Prof. Dr. Pablo Javier Alsina DCA/UFFN



Prof. Dr. João Moreno Vilas Boas de Souza Silva IFRN

*"What we know is a drop, what we
don't know is an ocean."*

Isaac Newton

*"We ourselves feel that what we are
doing is just a drop in the ocean. But
the ocean would be less because of
that missing drop."*

Mother Teresa

Agradecimentos

Ao meu orientador professor Luiz Marcos sou grato pela orientação e conselhos.

Aos professores Pablo Javier e João Moreno sou grato pela participação e ensinamentos compartilhados.

À equipe do N-Boat e Natalnet que contribuíram e contribuem para o sucesso do projeto.

À minha família pelo apoio durante esta jornada.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo

Propomos o projeto e desenvolvimento do veleiro autônomo N-Boat II, construído pelos laboratórios associados Natalnet (UFRN) e LAICA (IFRN). Introduzimos o projeto eletromecânico, desde a concepção e construção até a fase de controle do mesmo. Seu grande diferencial é hardware distribuído por afinidade ao longo de compartimentos estanques isolados entre si. Com premissa de ser um protótipo passível de replicação e de possuir código aberto, este modelo robótico será utilizado, a princípio, no monitoramento da qualidade da água. No entanto, essa plataforma pode ser utilizada em inúmeras tarefas de diversas naturezas. Dessa forma, espera-se, ao final deste trabalho, disponibilizar à comunidade uma infraestrutura completa com potencial para ser utilizada de forma científica, comercial ou militar, em propostas que necessitem de um veículo robótico de superfície aquática com autonomia suficiente para missões de média e longa duração.

Palavras-chave: Veículo autônomo de superfície, Veleiro robótico, Hardware distribuído.

Abstract

We propose the design and development of the autonomous sailboat, named N-Boat II, which is being built by the associated laboratories Natalnet (UFRN) and LAICA (IFRN). We introduce the electromechanical design, from design and construction to the control phase. Its great differential is distributed hardware by affinity along isolated watertight compartments. With the premise of being a prototype capable of replication and complete open source, this robotic model will be used, in principle, to monitor water quality. However, this platform can be used in numerous tasks of various natures. Thus, it is expected, at the end of this work, provide the community a complete infrastructure with potential to be used scientifically, commercially or militarily, in proposals that require a robotic water surface vehicle with sufficient autonomy for medium and long missions.

Keywords: Self-propelled surface vehicle, Aquatic robotics, Distributed hardware.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
Lista de Símbolos e Abreviaturas	v
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Tema, Problema e Hipótese de Pesquisa	3
1.3 Contribuições	4
2 O Velejo Autônomo	6
2.1 Partes de um veleiro autônomo	6
2.1.1 Modelos de Vela	8
2.1.2 Modelos de cascos	9
2.2 Como velejar	10
2.3 Controle de um veleiro autônomo	12
2.3.1 Atuadores	12
2.3.2 Sensores	14
2.3.3 Microcontroladores	15
2.3.4 Sistemas embarcados	15
2.4 Eletrônica	16
2.4.1 Fontes de energia	16
2.4.2 Circuitos eletrônicos	17
2.4.3 Comunicação	18
3 Trabalhos relacionados	20
3.1 Artigos de modelagem, simulação e controle	20
3.2 Trabalhos Estritamente Relacionados	23
4 Projeto de Hardware e Software Distribuído	25
4.1 Características de Projeto Esperadas	25
4.2 Questões e Dificuldades da Solução	26
4.3 Solução de Projeto Proposta	27

5	Solução Implementacional (Hardware e Software)	28
5.1	O projeto da estrutura do veleiro	28
5.2	<i>Hardware</i> e sistemas eletrônicos	30
5.3	Sensores escolhidos	32
5.4	Atuadores	35
6	Experimentos e Resultados	36
6.1	Teste de bancada dos atuadores	37
6.2	Teste de bancada dos equipamentos de comunicação	37
6.3	Teste laboratorial do N-Boat	38
6.4	Teste de interligação do N-Boat II	39
7	Conclusão	41
	Referências bibliográficas	44
A	Arquivos do projeto estrutural do veleiro	48
B	Arquivos do projeto eletrônico do veleiro	53
C	Características gerais do veleiro	56

Lista de Figuras

2.1	Partes do veleiro	8
2.2	Modelos de cascos de embarcações.	10
2.3	Direções do vento e técnicas de velejo.	11
2.4	Curva de máxima potência.	17
2.5	Exemplo de uma porta MUX.	18
5.1	Planta baixa com as funcionalidades do N-Boat II.	29
5.2	Placa principal de integração entre dispositivos.	31
5.3	Caixa estanque com controlador de carga, disjuntor geral e fusíveis.	32
5.4	Planta baixa com o projeto elétrico do N-Boat II.	33
5.5	Biruta e anemômetro utilizados no projeto.	34
6.1	Veleiro N-Boat II.	36
6.2	Teste dos atuadores em <i>hardware-in-the-loop</i> do N-Boat II.	37
6.3	Teste de telemetria do N-Boat II.	38
6.4	Teste laboratorial do N-Boat II em <i>software-in-the-loop</i>	39
6.5	Teste interligação do N-boat II.	40
7.1	Solução proposta metodológica unindo arquitetura <i>subsumption</i> e aprendizado de máquina.	42
A.1	Renderização em 3D do N-boat II com vista lateral	48
A.2	Renderização em 3D do N-boat II aberto com vista superior	49
A.3	Renderização em 3D do N-boat II aberto com vista lateral	49
A.4	Renderização em 3D do N-boat II com vista livre	50
B.1	Caixa de elétricos do N-boat II	53
B.2	Placa central de circuitos o N-boat II	55

Lista de Tabelas

3.1	Trabalhos sobre modelagem, simulação e controle de veleiros.	21
3.2	Características complementares sobre os trabalhos relacionados	22
5.1	Tabela com as correntes utilizadas por cada equipamento	31
C.1	Características gerais do N-Boat II	56

Lista de Símbolos e Abreviaturas

<i>ASV</i>	<i>Autonomous surface vehicles.</i>
<i>CAD</i>	Desenho assistido por computador.
<i>DRL</i>	<i>Deep Reinforcement Learning.</i>
<i>GPS</i>	Sistema de posicionamento global.
<i>Hz</i>	Unidade de frequência, por padrão em Hertz.
<i>IMU</i>	Unidade medição inercial.
<i>MHz</i>	Unidade de frequência megahertz, por padrão em $MHz = 10^6 \times Hz$.
<i>TEDA</i>	<i>Typicality and eccentricity based data analytics.</i>
<i>USV</i>	<i>Unmanned surface vehicles.</i>
<i>Wh</i>	Potência gerada ou consumida em uma hora.
<i>Wp</i>	Unidade <i>Watt-peak</i>
<i>lb</i>	Unidade de peso, por padrão $1 \text{ lb} = 0,4535 \text{ Kg}$.
<i>rpm</i>	Sigla de rotações por minuto.

Capítulo 1

Introdução

A robótica é uma das mais complexas áreas da pesquisa científica, porém, ao mesmo tempo, uma das mais empolgantes. Sua complexidade deve-se à necessidade de amplos conhecimentos, científicos e tecnológicos de diversas áreas, como computação, controle, instrumentação, modelagem, mecânica, eletrônica, visão computacional e inteligência artificial, entre outras. Apesar de complexo, o ramo da robótica é empolgante no sentido de que é muito palpável, visível e aplicável (prática), além de ser desafiante. Atualmente, as pesquisas em robótica têm avançado bastante, já existindo robôs humanoides similares aos seres humanos, como é o caso do Atlas (Kuindersma et al. 2016) da Boston Dynamics. Em linhas de fabricação, os braços robóticos já demonstraram ser uma solução eficaz para a produção rápida (Markoff 2012), com qualidade e lucratividade, a médio e longo prazo.

Contudo, existem muitos casos onde a autonomia energética é um grande problema, ainda contestando a sua confiabilidade diante de missões no dia a dia (Alaiéri & Vellino 2016). Da mesma forma que existem carros híbridos, alguns projetos propõem uma solução (Dupriez-Robin et al. 2009) na qual combustíveis fósseis possam ser empregados no aumento da autonomia. No entanto, isto poder ser um gargalo, visto que o combustível fóssil vem de uma fonte finita, logo não é renovável. Uma alternativa para a produção de energia elétrica não apenas para a robótica, mas para equipamentos e outros aparatos que possam usar a eletricidade de uma forma geral, seria a utilização de fontes renováveis, tais como o sol, vento, marés, entre outras; ou até mesmo uma combinação dessas fontes.

Nesta direção, uma solução que alguns pesquisadores estão empregando, para veículos autônomos aquáticos de superfície (USV ou ASV), é a utilização de propulsão pelo vento, isto é, com o uso de uma vela. Esta fonte natural tem sido aplicada também para geração direta de energia elétrica e na locomoção de veículos terrestres, além de aquáticos. Neste trabalho, de modo similar, utilizamos um veículo aquático robótico de superfície movido a vento, ou veleiro robótico, denominado de N-Boat, que já possui duas versões, I e II. Esta última, nossa proposta, como será vista a seguir.

Um dos entraves encontrados na elaboração de uma solução para o problema de projetar e desenvolver o veleiro robótico N-Boat foi a escassez de projetos relacionados que atendam às características almejadas. No desenvolvimento do N-Boat, até então, as bases para pesquisa bibliográfica têm sido as chamadas **competições de benchmarking**, ou seja, projetos de pesquisa internacionais do tipo competição de veleiros que, por mais que tenham um objetivo bem prático (vencer as competições), descrevem muito pouco a me-

metodologia usada e como as características do projeto são escolhidas e, menos ainda, como replicá-las. Outro problema importante a ser tratado ao se trabalhar com veículos aquáticos é a própria água, principalmente quando se trata de água salgada. Quando em contato com equipamentos eletromecânicos, se não os destruir instantaneamente, danificam os metais dos circuitos e atuadores por eletrólise, e acaba diminuindo significativamente a vida útil dos mesmos. O próprio grupo dos Laboratórios Associados Natalnet já enfrentou consequências desse problema com o N-boat I, em que a água salgada acabou infiltrando no compartimento dos circuitos e baterias, ocasionando a perda quase total dos componentes.

Por conseguinte, nesta dissertação, propomos um novo paradigma para o projeto e desenvolvimento de um veleiro autônomo, o N-Boat (na sua versão II), que tem por objetivo operar durante semanas e até mesmo meses em missões de longa duração. Uma estratégia inovadora é adotada neste projeto do N-Boat II, onde, além de colocar os circuitos dentro de caixas estanques, os compartimentos são projetados para dividi-los em categorias diferentes, culminando em um projeto novo, com 4 compartimentos e hardware (eletromecânico e eletrônico) distribuídos.

Assim, o presente trabalho possui dupla contribuição científica. Uma para a comunidade que pesquisa veículos aquáticos autônomos por proporcionar um projeto replicável e *opensource*; e outra para a comunidade de Biólogos e Ecólogos, que pesquisam sobre a natureza e meio-ambiente aquáticos, com a disponibilização de um veículo autônomo de superfície para servir de base à pesquisas nessas áreas. De fato, o N-Boat e os sensores resultantes de pesquisas realizadas no grande projeto que envolveu a construção e uso do N-Boat deverão servir de suporte para várias aplicações, como por exemplo medir a qualidade da água, replicável de imediato, entre outras a serem planejadas e realizadas no futuro. Assim, ressaltamos que as pesquisas que serão relatadas no presente texto que tornaram o veleiro N-Boat II uma realidade encaixam-se em um projeto maior, que deverá disponibilizar à comunidade meios para poder proteger e até mesmo controlar o meio-ambiente.

1.1 Motivação

Uma das principais motivações e justificativas do presente trabalho baseia-se no fato de que a superfície do globo terrestre, em seus 2/3 aproximadamente, é composta por água. Assim, toda essa vastidão de corpos d'água acaba se tornando uma grande área ainda pouco explorada em pesquisas científicas, o que incentiva o desenvolvimento de estudos e pesquisas de mais longo termo, visando medir suas propriedades e características, além de outros tópicos. Além do que, o seu mau uso, a poluição e a escassez implicam diretamente na transformação da água em um recurso altamente estratégico, fomentando assim ainda mais pesquisas nesta linha.

Neste contexto, os veleiros autônomos acabam se tornando uma opção viável no cenário atual, propiciando que pesquisas em todas as tecnologias desenvolvidas na robótica sejam aqui também realizadas e também se configurando como uma plataforma autossustentável para as pesquisas que estudem os aspectos científicos da água e clima, além da

Oceanografia e Limnologia, incluindo aqui as plantas e animais aquáticos, entre outros temas, que possam se beneficiar do uso de tal plataforma.

Ainda, como foi citado acima, este trabalho faz parte de um portfólio maior do grupo de pesquisa (Laboratórios Associados Natalnet) que atua nesta linha. Juntando a UFRN e o IFRN, este projeto interinstitucional possui uma bagagem científica substancial entre os vários trabalhos de graduação e de pós-graduação, que começaram a ser desenvolvidos com a primeira versão como o N-boat I (Santos et al. 2013) (Dantas et al. 2013) (Júnior et al. 2013) e sendo fruto de muitos outros projetos além do presente, tais como o controle de baixo nível (Santos 2016), eficiência energética (Souza e Silva et al. 2016), qualidade da água (Silva Junior et al. 2016), modelagem de veículos aquáticos (em desenvolvimento), entre outros. O N-boat II configura-se como uma embarcação de uso comum, robusta, reutilizável, autossustentável, e de grande autonomia que pode ser usado para pesquisas relacionadas propriamente a veículos autônomos e também a demais pesquisas que possam ser classificadas como cargas embarcadas (pagas).

1.2 Tema, Problema e Hipótese de Pesquisa

A elaboração deste trabalho partiu da ideia de se construir uma plataforma aquática na qual pudesse estar embarcado um *payload* para realização de testes referentes à qualidade da água, bem como permitir realização de estudos e pesquisas referentes à automação de viaturas aquáticos. Durante o desenvolvimento, ainda na fase inicial do estudo, visando buscar pela melhor solução, ficou evidenciado que muitas das plataformas existentes atualmente não proporcionam a autonomia desejada para missões de longa duração. As plataformas propelidas por motores, sejam eles elétricos ou a combustão, possuem tempo de missão igual à duração da bateria ou do tanque de combustível.

Assim, a solução adotada neste trabalho foi utilizar um veleiro robótico que atende perfeitamente aos requisitos das aplicações de longa duração visionadas, uma vez que o esforço maior necessário para seu deslocamento é proveniente do vento. Com isso, tal plataforma dispense pouca energia, sendo esta apenas utilizada para realizar eventuais ajustes na direção do leme, e na orientação da vela, bem como para o funcionamento dos demais equipamentos eletrônicos embarcados, tais como sensores e eventuais atuadores do *payload*. Isso justifica a definição tema de pesquisa desta dissertação como sendo:

- Tema: "*Veículo aquático autônomo movido a vela*"

Ainda, algumas indagações e entraves surgiram no decorrer do trabalho relacionados ao fato de que as pesquisas envolvendo veleiros autônomos ainda é incipiente, sendo este um tópico pouco explorado pela comunidade. Apenas alguns poucos grupos de pesquisa desenvolveram seus projetos com todo o processo documentado. Muitas vezes, nem comparações com outros projetos foram realizadas. A partir disso, elaboramos e definimos os problemas e/ou questões de pesquisa principais a serem respondidos nesta dissertação como sendo:

- *"Como projetar e desenvolver uma plataforma de navegação aquática autônoma e quais são suas necessidades e requisitos?"*
- *"Como escolher as características do projeto e construir tal plataforma?"*
- *"Como comparar a sua eficiência com outros projetos?"*

Para atender as características almeçadas, algumas estratégias foram adotadas. Com relação a autonomia que se espera que essa embarcação tenha, foi adotada a alternativa de propulsão à vela. Entretanto, uma vez que os componentes eletrônicos e eletromecânicos embarcados fariam uso de energia provida de apenas duas baterias embarcadas, que por sua vez são um recurso finito, a utilização de painéis solares consegue proporcionar a produção de toda energia necessária para a completa autonomia do veículo.

A respeito de características como robustez, espaço para *payload* de outros experimentos, versatilidade e segurança é proposta a construção de um veleiro com compartimentos estanques distribuídos e isolados, cada um deles. Isto confere uma característica única ao projeto, que é a distribuição dos compartimentos, sendo esta organizada em grupos, por afinidade, de todo o hardware ao longo desses compartimentos. Dessa maneira, assegura-se que não ocorra a perda total dos equipamentos e hardware em casos de colisão, vazamento, curto circuito, entre outros imprevistos que podem ocorrer durante a operação. Assim, a demonstração da hipótese de pesquisa formulada a seguir é discutida neste trabalho, mostrando o projeto e desenvolvimento do N-Boat II.

- Hipótese de Pesquisa:
"É possível um veículo robótico aquático autônomo de superfície com propulsão a vela ser aplicável a tarefas de longo termo, tais como a travessia de corpos d'água (lagos, rios e oceanos), ou monitoramento e vigilância aquática, com utilização de uma arquitetura eletromecânica distribuída e energia renovável."

1.3 Contribuições

A contribuição principal deste trabalho é o desenvolvimento da arquitetura eletromecânica distribuída do veleiro robótico N-Boat II, incluindo todo o projeto eletromecânico e de hardware necessário para propiciar ao veleiro a execução de tarefas de longo termo. O trabalho desenvolvido envolve desde o projeto do veleiro até a fase de desenvolvimento de software de controle de baixo nível para deixar a plataforma robótica em condições de executar os algoritmos de navegação de mais alto nível. No decorrer dos desenvolvimentos, segmentamos este objetivo inicial em várias metas, com várias contribuições, que estão descritas a seguir:

1. **Proposta e desenvolvimento de um novo modelo de arquitetura eletromecânica distribuída:** compartimentos estanques que isolam por categoria e função todos componentes eletromecânicos do veículo;

2. **Projeto replicável e criação/construção da plataforma aquática para pesquisa:** onde qualquer projeto pode solicitar o embarque no veículo para realização destes sobre controle ou sobre rios, lagos, mares; água no geral;
3. **Desenvolvimento de algoritmos e técnicas de baixo nível para suportar o velejo:** descrevendo métricas e estratégias empregadas no controle de alto nível.
4. **Documentação do projeto do veleiro autônomo N-Boat:** contribuindo para evolução científica desse meio;

Durante o desenvolvimento dessas soluções, o projeto sempre foi comparado com projetos de outros grupos de pesquisa e em relação ao N-Boat I. Este último é a versão anterior deste projeto, na qual foi utilizado um nautimodelo (miniveleiro). A partir dele, o novo projeto foi totalmente reestruturado para poder suportar as necessidades das tarefas diversas, que iremos discutir no decorrer do texto.

Capítulo 2

O Velejo Autônomo

Neste capítulo será formalizada a teoria envolvida na concepção, projeto e construção de um veleiro autônomo. Serão apresentadas as minúcias das técnicas e metodologias geralmente utilizadas para que se possa, assim, compreender todos os outros conceitos introduzidos nos próximos capítulos, como contribuição desta dissertação.

2.1 Partes de um veleiro autônomo

O principal mecanismo para a propulsão de um veleiro é, sem dúvida, a sua vela que, acionada pelo vento, proporciona o movimento. Sem ela, o movimento fica comprometido e o veleiro ou não sai do lugar ou é levado em movimento ao sabor da corrente atuando na parte submersa do casco ou se move muito devagar sendo empurrado pela própria força do vento que neste caso atua na parte emersa do casco, impulsionando este de forma lenta pela combinação dessas duas forças. Quando as velas são utilizadas e são reguladas corretamente, geralmente em combinação com o leme, é possível prover forças controladas que são utilizadas para gerar o vetor deslocamento, notadamente, com muito mais intensidade (norma) do que sem ela. Por exemplo, com apenas uma vela e um prancha de *surf* já se torna possível navegar, tal como ocorre com o *kitesurf*. Existem diversos modelos de velas, que serão discutidos à frente, na Seção 2.1.1. Para completar, faz-se necessário utilizar uma estrutura (o barco em si) que ofereça um empuxo hidrodinâmico (flutuação), com o mínimo de resistência à água, e também que seja o local onde outros equipamentos possam ser instalados, seja para o controle do veleiro ou para aplicações diversas geralmente conhecidos como *payload*. Esta plataforma de base é, na maioria das vezes, denominada de casco. Os dois equipamentos principais (vela e casco) já são suficientes (mesmo sem o leme), levando à formulação de teoremas no mínimo interessantes sobre a arte de velejar, tais como:

- Quem controla o veleiro não é o leme, mas sim a vela. Aqui nota-se que forças extremas proporcionadas por uma vela mal regulada em relação ao objetivo prevalecem sobre o controle do leme, sendo esse último equipamento considerado, em alguns casos, para propiciar uma regulagem média ou fina em relação ao curso do veleiro. De fato, até sem o leme seria possível guiar um barco. Neste caso, apenas a regulagem das velas e disposição do centro de massa do barco já seriam suficientes, tal como é descrito por Joel e Brand (Brand 2013).

- Outra descoberta interessante é que o casco não precisa, necessariamente, flutuar. A flutuação pode ser proveniente de uma estrutura auxiliar, tal como ocorre com o uso de hidrofólio ou da própria estrutura em si, mediante a aplicação de um certo ângulo de ataque em relação à água. Isto confere uma força de empuxo igual à força do peso, e em sentido contrário, sobre a superfície da água. Um exemplo é o veleiro Mirabaud LX que não possui o casco (*Mirabaud LX modifications declared a success* 2013).
- A união de velas rígidas, que são aquelas que se assemelham às asas de um avião, e hidrofólios pode resultar em veleiros que conseguem navegar mais rápido que o próprio vento (Anderson 2008).

Os componentes mais importantes acima citados e outros que também são considerados essenciais para a construção de um veleiro, além de seus termos náuticos, estão listados resumidamente a seguir, sendo a forma física de todos eles ilustrada na Figura Figura 2.1:

Vela: Equipamento aerodinâmico que proporciona as forças de deslocamento.

Retranca: Estrutura que proporciona a sustentação horizontal à vela.

Mastro: Estrutura que proporciona sustentação vertical à vela e a alguns outros equipamentos de navegação.

Estai: Cabos que sustentam o mastro na vertical através de sua ancoragem no casco.

Escota: Cabo utilizado para regular a angulação da retranca e, por sua vez, a vela.

Escotilha: Janela à prova d'água a qual fornece acesso a compartimentos e quando fechada proporciona total estanqueidade da passagem (em relação à água).

Casco: Estrutura que proporciona o empuxo hidrodinâmico e é onde são instalados os demais equipamentos.

Hidrofólio: Estrutura que proporciona o empuxo hidrodinâmico ao casco e muitas vezes é utilizado para levá-lo sobre a água, quando navegando em velocidade.

Leme: Estrutura que proporciona o controle médio e fino sobre a orientação hidrodinâmica do casco quando o mesmo está em movimento.

Cana do leme: Estrutura mecânica que proporciona o controle sobre orientação do leme.

Bolina: Estrutura, geralmente móvel, que proporciona a estabilidade vertical e de anti-arrasto lateral do casco.

Quilha: Estrutura, geralmente fixa, que proporciona estabilidade vertical e de anti-arrasto lateral do casco (função similar à bolina, mas são mecanismos distintos).

Meia-nau: Centro do casco.

Proa: Parte frontal da embarcação.

Popa: Parte traseira da embarcação.

Bombordo: Parte esquerda da embarcação (proa orientada para cima).

Boreste/Estibordo: Parte direita da embarcação (proa orientada para cima).

Orçar: Regular o barco para ir mais de encontro ao vento.

Arribar : Regular o barco para ir mais a favor do vento.

Cambar : Fazer uma curva que resulte na troca da orientação da vela em relação ao eixo do barco.

Bordo : Cambar em direção contrária ao lado da vela.

Gybe : Cambar em direção ao lado da vela.

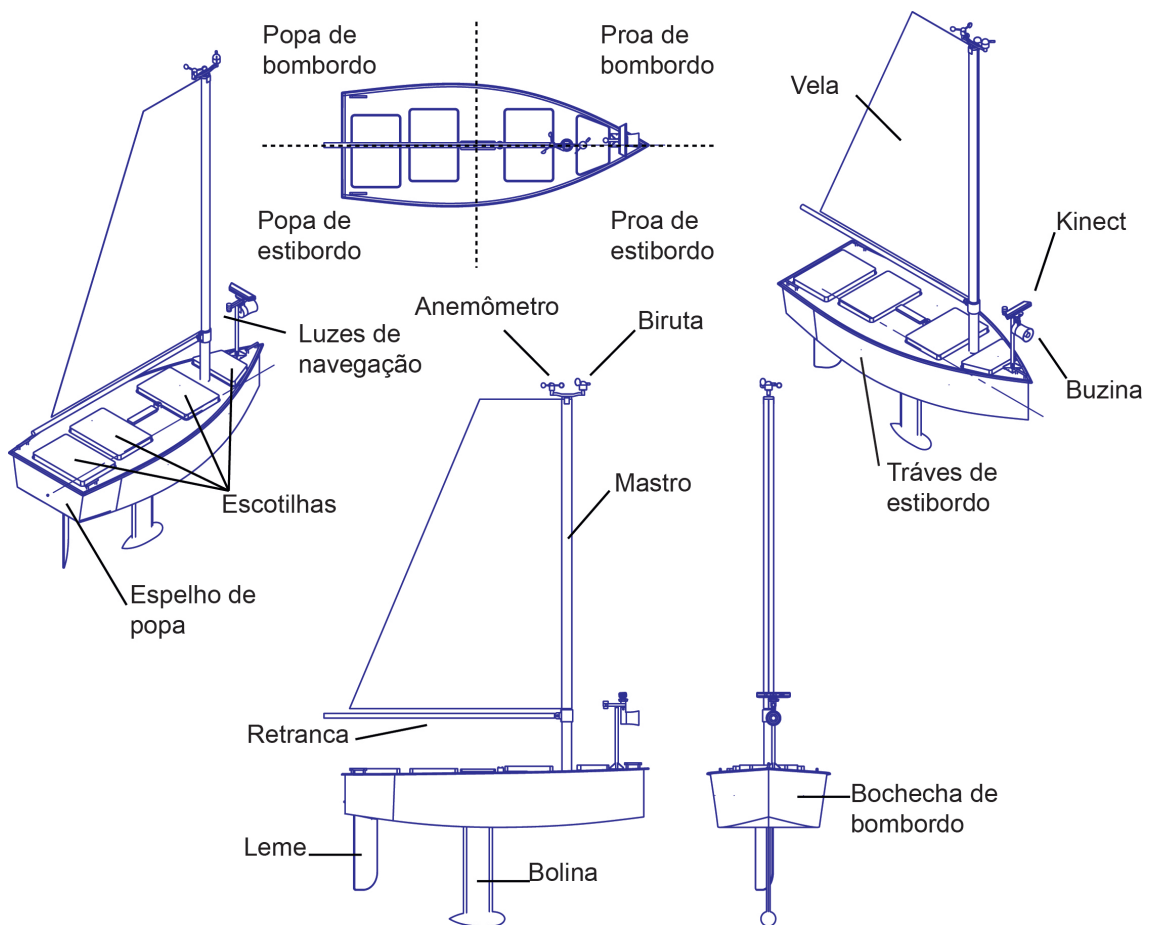
Panejar : Apontar vela na direção do vento fazendo com que a mesma perca sua sustentação aerodinâmica.

Adernar : Inclinação lateral do veleiro mediante as forças do vento.

Biruta : Mecanismo (sensor) que mede a direção do vento.

Anemômetro : Mecanismo que mede a velocidade do vento.

Figura 2.1: Veleiro N-boat II ilustrando as partes de um veleiro.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

2.1.1 Modelos de Vela

Como citado acima, existem vários tipos, formatos e funcionamentos para as velas. Desconsiderando as velas mais antigas, tais como as quadradas, nesta Seção será apresentada a teoria sobre as velas modernas. Alguns dos modelos de vela mais utilizados são:

Mestra: Vela que é montada na parte traseira do mastro, sendo geralmente regulada através da retranca e de sua respectiva escota.

Genoa: Vela que é montada à frente do mastro, mais especificamente no estai de proa. Geralmente é regulada por duas escotas, uma de bombordo e outra de estibordo.

Buja: Similar à genoa, porém sendo de menor tamanho e de geometria diferente.

Balão: Grande vela utilizada em situações com pouco vento. Há diversas geometrias para velocidades e direções de vento diferentes.

Rígida: Vela que se assemelha à construção e forma de uma asa de avião. Possuem a vantagem de não deformarem, mas são geralmente pesadas e de difícil controle.

A principal função das velas é captar a força dinâmica do vento e convertê-la em força de deslocamento para o veleiro como um todo. Pela geometria e disposição da vela, em certas situações ela atua apenas como um grande captador da energia cinética da massa gasosa (vento). Porém, em situações em que o veleiro precisa navegar em direção quase contra o vento, a vela atua de forma muito similar à asa de um avião. Nesses casos, o vento que é canalizado por detrás da vela possui uma velocidade menor do que o que passa por dentro da mesma, criando assim uma zona de baixa pressão, que a bolina, ou no caso a quilha que possui a mesma função, convertem em movimento frontal. Essa força junta-se à força da ejeção da massa gasosa de ar que passa pela vela e impulsiona o veleiro (Viola et al. 2013), somando-se ao movimento a força de arrasto da corrente aquática.

As forças acima da superfície, que atuam sobre a vela, fazem com que a mesma deforme, diminuindo o desempenho do veleiro. Logo, as velas rígidas demonstram-se mais eficientes para as situações em que se tem vento com velocidade muito intensa. Neste caso, geralmente se dispõe de algumas particularidades, tais como peso e controle, que podem ser considerados empecilhos para desenvolvimento de desempenho considerado suficiente. Entretanto, alguns sistemas de velas rígidas, quando combinados com aerofólios para controle balanceado (Tretow 2017), demonstram ser uma ótima alternativa, sendo leve e inteligente para resolver o problema de controle do veleiro.

2.1.2 Modelos de cascos

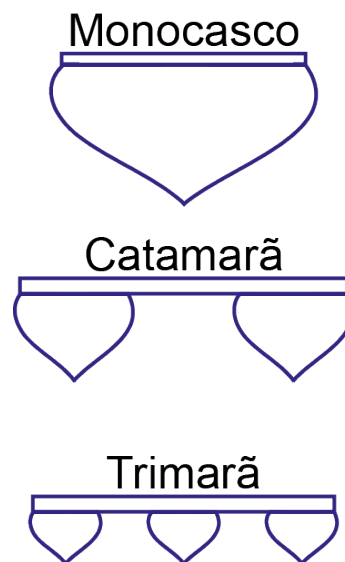
Todo a parte do corpo da embarcação que se situa, proporcionalmente, muito próxima e imersa na água, proferindo suporte aos demais equipamentos, e tripulantes no caso de veleiros tripulados, é denominado de denominado de casco, cuja principal função é ser impermeável e conferir empuxo hidrodinâmico. Mas note que o casco não precisa flutuar, necessariamente. Como citado acima na Seção 2.1 e repetido aqui, exemplos disso são os cascos do Mirabaud LX e da prancha de *surf*.

O denominado monocasco, como a prancha de surf, é o sistema de casco mais simples e antigo. Nele, apenas uma única superfície entra em contato com a água. Suas principais vantagens são a robustez, manobrabilidade e capacidade de desvirar; caso possua quilha ou tenha o centro de massa abaixo do nível da superfície da água.

Uma evolução desse modelo simples é o catamarã, que une dois cascos. Normalmente ele proporciona mais velocidade ao veleiro, pois apresenta menos atrito hidrodinâmico. Suas principais vantagens são mais espaço e maior velocidade. Porém, geralmente não são robustos quanto à capotagem e apresentam pouca manobrabilidade.

Outro modelo que evoluiu do catamarã foi o trimarã, que apresenta funcionalidades similares ao barco com dois cascos, mas proporcionando ainda mais performance. Todos esse modelos de cascos podem ser visualizados na Figura 2.2.

Figura 2.2: Modelos de cascos de embarcações.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

2.2 Como velejar

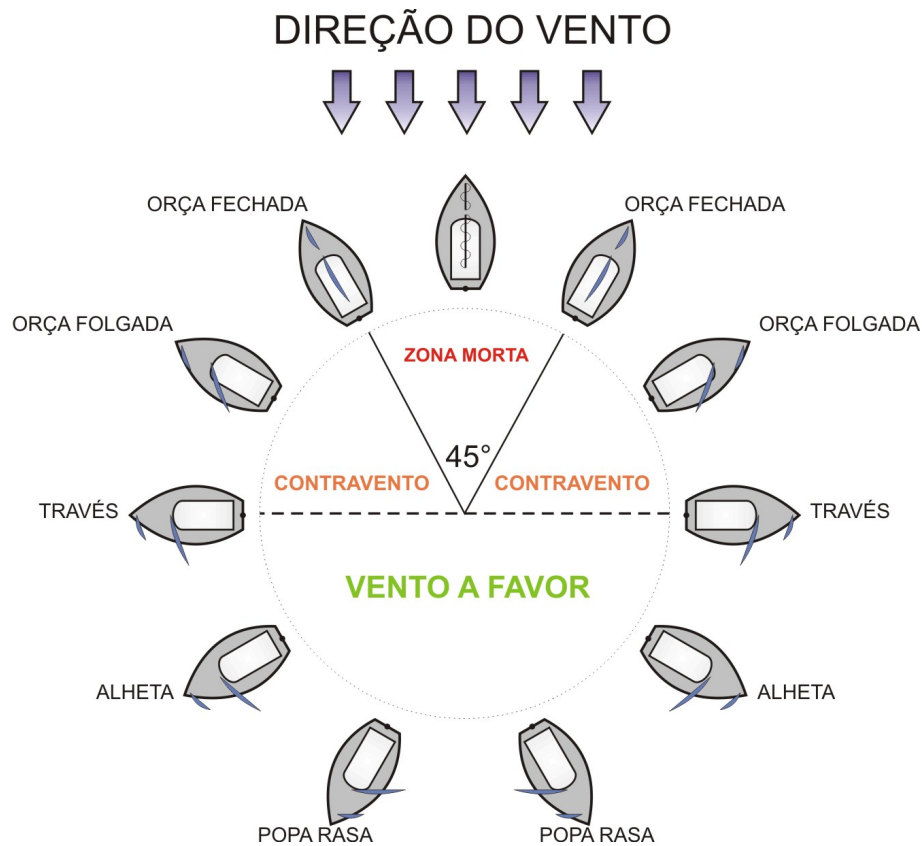
Em termos práticos, velejar é uma técnica de locomoção que utiliza a força do vento para promover o movimento. A seguir, serão introduzidas algumas habilidades ou técnicas básicas para o velejo e navegação, segundo a literatura a respeito (Barros 2014).

Na navegação à vela, o primeiro fator a se levar em consideração é a direção do vento. Dependendo da intensidade e direção do vento, pode-se utilizar técnicas e, em alguns casos, até velas diferentes, visando captar mais ou menos energia de propulsão para o barco.

Observando a Figura 2.3, com vento a favor, a vela encontra-se em ângulos mais abertos. Para esses casos, a vela está aberta e toda a escota, ou quase toda, é utilizada. Assim sendo, verifica-se que é relativamente simples navegar quando o vento está a favor dos objetivos almejados. Em uma analogia a um carro, seria como descer uma ladeira, mesmo sem propulsão alguma o mesmo se move ladeira à baixo.

Para um veículo terrestre, subir um aclive é uma tarefa mais complexa e dispendiosa em termos energéticos. Velejar contra o vento não é diferente neste caso, o casco aderna bem mais e todos esforços tendem a exigir ainda mais do veleiro. Mesmo assim, ainda

Figura 2.3: Direções do vento e técnicas de velejo.



Fonte: Cedida por Davi Henrique dos Santos, 2017.

é bem mais fácil se o objetivo se encontrar alcançável em linha reta a uma dada regulamentação, como em orça fechada. Mas, com o objetivo diretamente contra o vento, entrando na denominada zona morta de velejo, a situação é similar à de um veículo subindo um aclive muito acentuado onde, dependendo da inclinação, pode não haver torque suficiente para o deslocamento do mesmo. No velejo, o problema de navegar diretamente contra o vento é contornado fazendo-se um movimento em zigue-zagues, ou curvas, em direções que sejam o mais próximas da zona morta possível, mas que ainda permitam ao vento impulsionar o veleiro para a frente. Então, o velejador pode contar com esta estratégia para navegar contra o vento, não sendo isto diferente se o veleiro for um robô autônomo. Pode-se optar em fazer os trechos em zigue-zague mais curtos ou mais longos. Ambos possuem efeitos similares se o ato de fazer a curva não demandar muita complexidade operacional e não dispendem muito tempo de manobra.

Ao cambar numa curva, operação em que a vela troca de lado, existem duas opções a serem tomadas em relação à vela, e não em relação a direção de comando optada. Isso reforça ainda mais o teorema acima citado que, de forma surpreendente, afirma que o comando da direção do barco não é ditado pelo leme, e sim pela vela. Portanto, a primeira opção e a mais usual é cambar em direção contrária à posição da vela, manobra intuitiva.

lada de bordo. Esta é uma manobra mais lenta, onde em dada posição o veleiro aponta para o vento e as velas perdem a sustentação aerodinâmica sobre o mesmo e ficam panejando (batendo). Logo em seguida, elas passam para o outro lado e ganham sustentação novamente, concluindo a manobra.

A segunda opção é cambar indo de encontro ao lado em que as velas se encontram, essa manobra é conhecida como *gybe*. Assim, o vento passa rapidamente para o outro lado da vela pela parte de trás da mesma, ela não paneja e o veleiro em nenhum momento aponta para o vento. Porém, além de demandar muito esforço caso o vento esteja muito forte, esta última manobra é mais brusca e rápida que o bordo.

Note que fazer curvas onde as velas não trocam de posição são manobras mais simples. Quando se regula o barco para ir mais de encontro ao vento, a manobra é denominada de orçar. Ao contrário, quando se regula o barco para ir mais a favor do vento, dá-se o nome de arribar.

2.3 Controle de um veleiro autônomo

Esta seção é dedicada a explicar as tecnologias e métricas de desempenho usadas no processo de controle do veleiro, considerando que o projeto corrente é uma evolução de trabalhos anteriores dos Laboratórios Associados Natalnet, tais como os trabalhos de (Silva Junior et al. 2016) e (Santos, Silva Junior, Negreiros, Araujo, Souza e Silva, Aroca & Gonçalves 2016). Nas subseções seguintes, serão destacados alguns tópicos importantes desenvolvidos nesses trabalhos anteriores e algumas idiossincrasias complementares, necessárias ao entendimento do presente trabalho, também serão esclarecidas.

2.3.1 Atuadores

Atuadores são dispositivos mecatrônicos que possibilitam a interação com o meio físico através de um dado comando. Existem atuadores de vários tipos com relação ao tamanho, movimento, manipulação, força, entre outras características básicas. Como neste projeto só serão usados dois modelos de atuadores, o linear e o rotativo, será mantido o foco apenas nestes.

Um atuador linear tem a capacidade de movimentar cargas linearmente no espaço, para longe ou perto de um determinado ponto em que é fixado. Seu movimento inicial pode ser provido por um motor elétrico também linear. Nesse caso, sua força é dada pela quantidade de energia magnética que os eletroímãs do motor conseguem produzir em um embolo magnético. Mas, por conta de seu baixo rendimento, geralmente é substituído por um motor rotacional que, por sua vez, tem seu movimento angular transformado em linear através de um conjunto de engrenagens conhecidas como caixa de redução. A força e velocidade totais geradas são calculadas como uma razão entre essas variáveis e a constante de redução. As métricas de desempenho que podem ser empregadas para classificar sua eficiência são estabelecidas quanto a condições equivalentes mediante o uso de diferentes

testes. Assim, as condições de tensão e carga são sempre iguais. Procedimentos de testes de bancada são geralmente necessários para determinação dos seguintes parâmetros:

Velocidade: Dado que o total da quantidade deslocamento esteja medido, é realizado uma movimentação do seu curso total medindo o tempo gasto para tal. Como pode ser visualizado na Equação 2.1, a velocidade (v) é calculada a partir da razão entre os espaço percorrido (d) e o tempo gasto (t). Pode-se realizar os testes com e sem carga, desde que no teste esteja descrito como o mesmo foi realizado, e de acordo com a Equação:

$$v = d/t \quad (2.1)$$

Onde d representa o espaço, em metros (m), t é o tempo em segundos (s) e v é a velocidade calculada em (m/s).

Força: Com a parte do atuador que realiza o movimento apontando para o solo, são presas cargas previamente catalogadas. Assim, gradativamente, são realizados movimentos de curso total do equipamento e aumentos constantes do peso da carga. O limite de carga é estabelecido ao chegar no ponto máximo de levantamento. Sua força (f) então é igual ao produto entre a carga máxima (m) levantada e a aceleração da gravidade (g), como se pode notar na Equação 2.2. Sua unidade é em quilograma força (Kgf).

$$f = m \cdot g \quad (2.2)$$

Onde f é a força, por padrão em Newtons (N), m refere-se à massa de um objeto, por padrão em quilogramas (Kg), e g representa a aceleração gravitacional, por padrão em m/s^2 . Como dito acima, Kgf é a unidade de força (N) sendo aplicada em um kg de massa.

Consumo: Visto que o teste de consumo necessita das mesmas configurações do teste de velocidade, ambos podem ser realizados ao mesmo tempo. Para todas as configurações de teste, é utilizado um multímetro para aferir a tensão de trabalho do equipamento e a quantidade de corrente que o mesmo utiliza em determinadas situações. Seu gráfico de potência instantânea (P) consumida pode ser calculado por meio do produto dos dados de tensão (V) e corrente (i) sendo sua unidade em Watt (W) (como mostrado na Equação 2.3).

$$P = v \cdot i \quad (2.3)$$

Atuadores rotativos fornecem movimento angular e são amplamente utilizados por conta de sua simplicidade. Um simples motor de corrente contínua pode ser considerado um atuador rotativo. Efetivamente, na maior parte dos casos, faz-se uso de caixas de redução para obter as velocidades e forças desejadas. Neste projeto, uma das soluções vislumbradas para enrolar a escota proveniente da retranca é com o uso de um atuador rotativo e um carretel, no qual o cabo é enrolado. Alguns fatores, como o quanto de cabo esta enrolado no carretel, podem afetar em seu respectivo diâmetro e, por sua vez em variáveis provenientes dessa medida. Por questões de simplicidade isso não será considerado. Os procedimentos dos testes de bancada quanto a esse equipamento são:

Velocidade: Uma quantidade de cabo previamente medida é destinada para o teste. Então, cálculos similares ao do atuador linear são realizados para encontrar a velocidade linear sobre o cabo. Com a medida do diâmetro do carretel, poderia ser realizado o cálculo da velocidade angular do atuador como um todo. Mas esse dado não é necessário, visto que não representa uma relação direta com a regulagem do ângulo da vela. Suas unidades de medida podem ser em m/s ou em rotações por minuto (rpm).

Força: O cálculo da força que esse atuador pode empenhar é obtido colocando um cabo em seu carretel, para que assim seja possível acoplar pesos ao sistema. Então medições similares ao do atuador linear podem ser realizadas.

Consumo: O consumo desse atuador pode ser obtido de forma similar ao atuador linear.

2.3.2 Sensores

Existem dois tipos de sistemas de sensores a serem usados neste projeto, dependendo basicamente se o tipo de influência sobre o veleiro for externa ou interna. O primeiro deles visa atualizar os valores de variáveis (ou parâmetros) providas do ambiente (externo) e o outro visa atualizar os valores de parâmetros dos sistemas mecatrônicos que são relevantes para o controle do veleiro (interno). Este último conjunto de sensores deve fornecer informação proprioceptiva, propriamente dita, isto é, a que define o estado atual de variáveis internas do veleiro visando determinar a configuração atual de seus atuadores, auxiliando a calcular o movimento a ser realizado.

No primeiro caso, faz-se uso de dois sensores que são essenciais ao velejo autônomo, sendo eles a biruta e o anemômetro. No caso, os sensores usados neste projeto medem, respectivamente, a direção e a velocidade do vento, convertendo essa medida em sinais eletrônicos, que serão digitalizados, ao final da entrada. Como pode ser verificado em um trabalho anterior (Santos 2016), além dos sensores já citados, o N-Boat II usa um sistema de posicionamento global (GPS) para obtenção da posição atual em relação ao globo terrestre (em coordenadas geográficas) e também usa uma bússola para obtenção da orientação em relação ao norte magnético da terra e uma unidade de medida inercial (IMU) para determinar a orientação (relativa) em função de deslocamentos ocorridos nos três eixos cartesianos do sistema de coordenadas do veleiro. Com isso, torna-se possível realizar a navegação em espaços amplos. Porém, para a navegação em lugares mais restritos ou com obstáculos faz-se necessário utilizar outros tipos de sensores para obter informação acerca do ambiente físico, principalmente em curtas e médias distâncias. Nesses casos, configura-se como alternativa o uso de sistemas baseados em visão computacional, com utilização de sensores de profundidade, tais como a câmera ZED (Ortiz et al. 2018) e os sensores baseados em luz (LIDAR). Com esses, torna-se possível a navegação nesses ambientes.

Um dos principais problemas para construir o sistema proprioceptivo do barco associado aos dispositivos mecatrônicos do mesmo é como determinar a angulação da vela. Na versão corrente do N-Boat, opta-se por medir parâmetros relacionados aos seus atuadores, ou seja, mede-se dados do guincho da vela e do seu cabo de atuação que compõem em

conjunto o mecanismo de atuação. Usando dados referentes a este mecanismo, é possível chegar a uma equação matemática para a posição atual da vela. Por fim, a utilização de *encoders* lineares foi a alternativa escolhida neste trabalho para o sensoriamento do pistão do atuador do leme. A medição da posição absoluta do eixo do leme através do uso de um potenciômetro também seria uma alternativa, e isto será operacionalizado, a título de redundância, em missões de maior alcance após a operacionalização inicial do N-Boat II.

2.3.3 Microcontroladores

Microcontroladores podem ser compreendidos como pequenos computadores compostos de circuitos integrados que podem ser programados para realizar algumas funções específicas desejadas. São muito utilizados em testes de bancada pela praticidade, seja da parte eletrônica ou de *software*, mas também são muito usados para cumprir as funcionalidades de aquisição de dados e para o controle de baixo nível, configurando-se, acima de tudo, como uma alternativa para aliviar o processamento de computadores centrais.

Um dos microcontroladores mais utilizados em prototipagens é o AtMega328 (Badamasi 2014), que possui um formato de placa de circuito que foi popularizada no modelo do Arduino UNO, esta placa que é fabricada pela Atmel, tornou-se uma das arquiteturas mais utilizadas por pesquisadores que buscam plataformas do tipo *opensource*, tanto de *software* quanto de *hardware*, conferindo total liberdade de uso quanto aos seus projetos de circuitos e ambiente de desenvolvimento integrado (IDE).

O Arduino MEGA é uma versão com mais desempenho em comparação ao UNO, disponibilizando mais portas digitais e maior poder de processamento. Ambos são alternativas levadas em consideração no projeto desse veleiro autônomo pelas razões já introduzidas acima.

2.3.4 Sistemas embarcados

Sistemas embarcados são plataformas mistas nas quais um componente de *hardware* e outro de *software* operam em conjunto, estando encapsulados no mesmo dispositivo físico que controlam. Estas plataformas são normalmente designadas para terem algumas funcionalidade específicas, tais como compor um sistema de vigilância ou um sistema de controle autônomo, este último no caso do N-Boat II.

Em um projeto no qual pretende-se automatizar a prática de velejo, é fundamental a análise de todos requisitos para que resultem na escolha adequada às necessidades do escopo como um todo. Não há uma única escolha certa, pois além de cada projeto ter suas necessidades particulares, podem coexistir diversas alternativas para solução do mesmo problema, como será demonstrado nos próximos capítulos. Mesmo em casos bem similares, como os projetos do Fast (Alves & Cruz 2008) e do Avalon (Erckens, Büsser, Pradalier & Siegwart 2010), foram escolhidas alternativas bem distintas.

No caso do Fast, o sistema embarcado escolhido foi uma FPGA (Matriz de Portas Programáveis em Campo) para funcionar como circuito principal. Esta plataforma configura-se como ótima alternativa, pois possui *hardware* reprogramável e com rápido tempo de resposta. No Avalon, foi utilizado um computador embarcado do tipo SBC (*Single Board Computer*). Este necessita ter um sistema operacional embarcado com estratégias para gerir os recursos mediante as requisições realizadas por processos com diferentes funcionalidades no veleiro.

Esses dois casos são exemplos de soluções de alto nível e com certa complexidade. Mas nada impede, diante da requisitos de controle do sistema, que sejam usados micro-controladores, que são bem mais simples. Como por exemplo, no trabalho de Gomes et al (Gomes et al. 2015) buscaram-se alternativas de *hardware* para compor um modelo de controle para veleiros.

2.4 Eletrônica

Como se trata de um veleiro autônomo, toda uma eletrônica deve dar suporte para que a automação, de fato, tenha os recursos necessários para coexistir. Nesta Seção, serão introduzidos conceitos sobre as principais tecnologias consideradas e empregadas neste projeto.

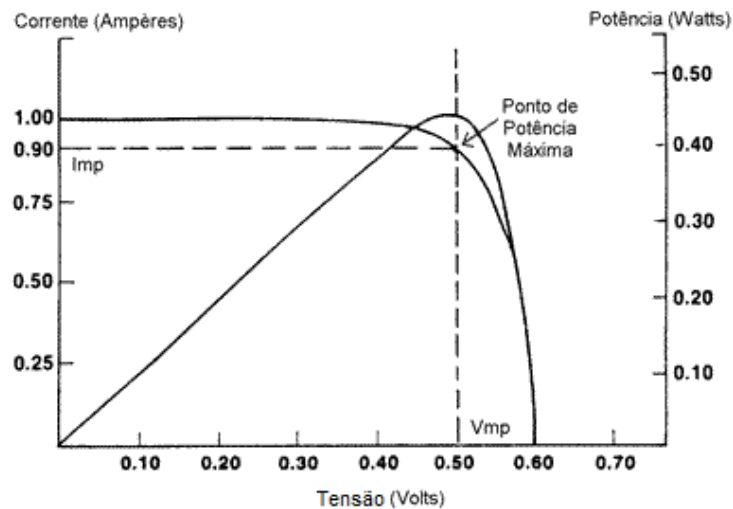
2.4.1 Fontes de energia

Toda a parte de eletrônica necessita de uma ou mais fontes de energia. Para garantir que o veleiro seja uma plataforma eletricamente auto-suficiente, considerações devem ser feitas quanto ao total de energia necessária e quanto tempo de operação será gasto nas missões. Normalmente, são utilizadas baterias recarregáveis como fontes primárias para o armazenamento de energia. É primordial considerar a produção de energia in-loco usando algum modelo auto-sustentável. Nas embarcações, existem várias maneiras de se obter energia. Uma das mais utilizadas são painéis solares, configurando-se esta como uma ótima alternativa de fonte de energia para sistemas embarcados em geral (Ragunathan et al. 2005).

Painéis solares são dispositivos que convertem energia proveniente da radiação solar em, de fato, energia elétrica. Entretanto, dependendo dos fatores que envolvem a natureza da placa, como a radiação direta, horas de luz solar e temperatura, podem ocorrer variações substanciais na quantidade de energia produzida por esses mecanismos. Faz-se necessário o uso de um controlador de carga, que estabiliza faixas variáveis de energia. Como ocorre em todo processo de transformação na natureza, uma parte da energia é perdida. Assim, o preço dessa estabilização é uma diminuição da taxa de eficiência energética do sistema como um todo. Como pode ser visualizado na Figura 2.4, essa taxa de conversão é baseada na busca pela relação máxima entre corrente e tensão, que o conversor pode fornecer.

Vale salientar que a escolha de uma embarcação movida a vela é um ponto estratégico e primordial. Uma vez que se possa optar por fontes de energia bem projetadas e também usar estratégias de consumo bem definidas (Dahl et al. 2015), veleiros conseguem

Figura 2.4: Curva de máxima potência.



Fonte: Secresb, 2018.

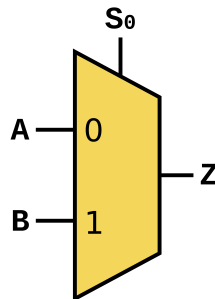
alcançar autonomia total, atuando de forma independente do ser humano, desde que bem programado para isso. Um veleiro robótico não necessita de paradas para recarga ou abastecimento. Nos casos em que essa autonomia não é total, pode-se fazer uso da recarga das baterias em cada missão ou uma abordagem híbrida com geradores a combustível fóssil (Dupriez-Robin et al. 2009).

2.4.2 Circuitos eletrônicos

A escolha do *hardware* não é trivial e pode resultar na necessidade de criação de placas de circuito integrados específicos para determinadas funções. Placas podem ser concebidas com intuito de ser uma opção que venha a substituir qualquer outra placa de produção industrial, ou apenas ser um agregador entre outras placas e dispositivos já no mercado. Nesse último caso, dá-se o nome de *shields*. Essas placas, no geral, como já introduzido, unem dispositivos já comumente disponíveis no mercado com intuito de serem um organizador, dispensando o uso de matrizes de contato (*breadboard*) e fios de ligação.

Outro ponto a se considerar é o chaveamento analógico entre funções de alto risco. Como o controle de servos de um barco, que não podem correr o risco de uma trava de programa no meio do mar. Nesse casos, pode-se fazer o uso de portas lógicas que venham a comutar sinais entre trilhas de circuito, garantindo que sempre possa haver o controle teleguiado dos servos de comando do barco. Esses dispositivos são conhecidos como multiplexadores e um exemplo de seu funcionamento pode ser visualizado na Figura 2.5. Na figura, se o sinal S_0 tiver o nível lógico 0, a porta A é ligada à saída Z e, caso contrário, se o nível lógico for 1, a porta B é ligada na saída.

Figura 2.5: Exemplo de uma porta MUX.



Fonte: Wikimedia Commons. Disponível em: 2018.

2.4.3 Comunicação

Uma alternativa para fazer todos componentes eletrônicos se comunicarem dentro de sistemas embarcados é a utilização de uma rede interna ou barramento de dados, comumente conhecidos como barramento do veículo (do inglês *Vehicle bus*). Existem diversas técnicas para provimento do barramento de dados em sistemas embarcados, sendo algumas delas:

I2C: É um protocolo de comunicação que utiliza um barramento serial de dados. Por designação, existe um dispositivo mestre que coordena a distribuição de mensagens entre si e demais dispositivos escravos. É de fácil prototipagem e uso, principalmente na adição de novos dispositivos, como sensores e sistemas embarcados como um todo.

TCP/IP: É um protocolo comumente utilizado para distribuição de rede de internet em edifícios. Mas também se configura como uma alternativa de rápida prototipagem em projetos que disponibilizam cabeamento adequado e pode-se fazer uso de toda aparelhagem demandada por esse protocolo, como por exemplo *switches* e roteadores.

CAN: É uma rede comumente utilizada em carros comerciais (Ran et al. 2010). Configura-se como uma alternativa robusta e de alta velocidade, mas sendo complexa quanto à prototipagem de novos sensores e sistemas embarcados.

Além da comunicação interna, eventualmente torna-se necessária a aquisição e o envio de dados do veículo como um todo, em um único pacote de dados, de tempos em tempos. Em outras palavras, neste caso, é necessário estabelecer um sistema de telemetria. A seguir, coloca-se algumas das opções de comunicação que podem ser levadas em consideração em projetos que demandem por esse tipo de tecnologia.

Wifi: Essa tecnologia é comumente utilizada quando já se faz uso de uma comunicação interna que utiliza o protocolo TCP/IP e, por consequência, o uso de roteadores. Também pode-se fazer o uso apenas de um equipamento de ponto de acesso *wifi*.

Sua principal vantagem é a simplicidade de uso, visto que vários aparelhos utilizam de dessa tecnologia. Um empecilho é o alcance, visto que comumente esses equipamentos tem o alcance de apenas 50 metros.

Telefonia: É uma alternativa quando se busca grandes alcances, visto que as tecnologias GSM, 3G, 4g e assim por diante são bem empregadas no meio urbano. Entretanto, apresenta certas dificuldades, uma vez que é necessário complementar esse protocolo com outro protocolo que venha a estabelecer comunicação com os equipamentos embarcados e não apresenta sinal em locais longe dos meios urbanos.

Rádio: Por utilizarem ondas de rádio amador, que funcionam no Brasil entre as frequências de 135,7 (kHz) até 250 GHz (*Radioamador 2015*), desfrutam de longo alcance. Limitados somente pela potência dos equipamentos, técnicas empregadas e protocolos para a comunicação.

Satélite: É uma alternativa quando busca-se enviar e receber dados de lugares inóspitos. Inclusive, pode apresentar dificuldades quanto a disponibilidade de satélites e criação de protocolo como os demais sistemas embarcados.

Capítulo 3

Trabalhos relacionados

Uma alternativa mais dinâmica para o processo de comparação entre veículos robóticos, em geral, acaba sendo as competições entre projetos, como ocorre com a competição mundial de futebol de robôs (Robocup). São exemplos de competições internacionais na linha de veleiros robóticos a *World Robotic Sailing Championship (WRSC)*, que foi derivada da *The Microtransat Challenge* que, por sua vez é uma competição entre veleiros autônomos visando atravessar o oceano atlântico. Essa alternativa acaba tendo mais participantes e sendo referencial na hora de construções de novos projetos.

Uma das motivações do desenvolvimento deste trabalho é a possibilidade de participar dessas competições. Nesta linha, pode-se emprestar e usar o termo *benchmarking*, do inglês, que significa avaliação comparativa ou comparação e pode ser entendido como uma técnica que compara o desempenho de produtos, comercialmente falando.

Porém, no mundo acadêmico, construir e utilizar um *benchmarking* é definir métricas utilizadas para comparar e classificar trabalhos. Textos que demonstram exemplos de métricas de desempenho para robótica móvel (*Benchmarking mobile robots motion* n.d.) acabam não sendo utilizados como *benchmarking* entre os pesquisadores de veleiros autônomos. Neste trabalho, preferimos usar algumas características para classificar os trabalhos encontrados na literatura, como exposto a seguir.

3.1 Artigos de modelagem, simulação e controle

O principal intuito do presente trabalho é desenvolver o projeto de um veleiro autônomo no qual os métodos científicos anteriores que levaram às escolhas de suas principais características sejam expostas. Assim, uma descrição dos principais métodos, a partir da compilação de projetos na literatura, será realizada nesta seção, sendo introduzidas as metodologias que se assemelham às do presente trabalho, bem como suas contribuições.

A Tabela 3.1 mostra os trabalhos encontrados na literatura, com suas respectivas citações, que possuem correlação com a presente proposta. A Tabela 3.2 descreve mais detalhes sobre cada projeto. Os tópicos citados nas tabelas, escolhidos para classificação desses trabalhos, foram:

- **Tipo:** Classifica quanto ao formato do trabalho, onde os três formatos encontrados foram artigo, dissertação de mestrado e tese de doutorado.
- **Foco do trabalho:** Classifica quanto ao principal objetivo do trabalho.

Tabela 3.1: Trabalhos sobre modelagem, simulação e controle de veleiros.

Trabalho	Tipo	Foco do trabalho	Citação
N-Boat II	Artigo	Testes de bancada	(Souza e Silva et al. 2016)
Fast	Artigo	Software e Hardware	(Alves & Cruz 2008)
Saildrone	Artigo	Usabilidade	(Meiniger et al. 2015)
SB-Met	Artigo	Comercial e usabilidade	(Sailbuoy 2019)
Avalon	Artigo	Software e Hardware	(Erckens, Beusser, Pradalier & Siegwart 2010)
Wasp	Artigo	Hardware e modelagem	(Rynne & Von Ellenrieder 2008)
Sailbot	Artigo	Hardware e controle	(Williams et al. 2014)
ASV Roboat	Tese de doutorado	Software e Hardware	(Stelzer 2013)
HyRa II	Tese de semestre	Controle de Hidrofólio	(Furrer & Gohl 2010)

- **Disponibiliza projeto:** Classifica quanto a disponibilização dos arquivos e plantas baixas do projeto.
- **Vela rígida:** Classifica se o projeto do veleiro utilizou vela rígida.
- **Hardware:** Classifica o tipo de *hardware* escolhido como sistema embarcado.
- **Compara:** Classifica se houve comparação com outros trabalhos.
- **Objetivos futuros:** Expõe os objetivos futuros dos pesquisadores.

Visto que nem todos os trabalhos relacionados encontrados na literatura são divulgados através de artigos, foi realizada uma comparação levando em consideração o formato (ou **tipo**) no qual o mesmo foi produzido. Ressalta-se que isso visa exclusivamente permitir uma comparação menos crítica entre artigos, que possuem espaço limitado, com dissertações ou teses, que têm espaço limitado apenas pelo bom senso. Por isso, faz-se uso de outros índices na escolha de algum trabalho que melhor se encaixe em uma comparação com estes últimos.

Muitos dos artigos encontrados focam em controle, modelagem do problema, software e hardware. Poucos autores tiveram a proatividade (ou oportunidade) de descreverem o trabalho como um todo. Logo, o **foco do trabalho** foi levado também em consideração. Como já citado acima, o desenvolvimento do presente trabalho é fruto de, e promove melhorias sobre, um trabalho anterior (Souza e Silva et al. 2016) do grupo de pesquisa em questão dos Laboratórios Associados Natalnet, apresentando assim muitos pontos semelhantes. Todavia, um dos trabalhos que mais se assemelha ao presente, quanto a essa classificação, é o de Stelzer (Stelzer 2013). Isso por considerar o projeto do veleiro em si e como um todo, descrevendo desde a escolha do casco ao *software* final de velejo.

Tabela 3.2: Características complementares sobre os trabalhos relacionados

Trabalho	Disponibiliza projeto	Vela rígida	Hardware	Compara	Objetivos futuros
N-Boat II	Sim	Não	Micro-controlador	Não	Finalizar projeto
Fast	Não	Não	FPGA Spartan3E	Não	Competição Microtransant
Saildrone	Não	Sim	Não informado	Não	Novos sensores / oceanografia
SB-Met	Não	Sim	Não informado	Não	Oceanografia / Mercado
Avalon	Não	Semi	Computador MPC21	Não	Oceanografia
Wasp	Não	Sim	Não informado	Não	Navegação inteligente/ previsão do tempo
Sailbot	Não	Não	Não informado	Não	Navegação automática/ otimização
ASV Roboat	Não	Não	Computador EPIA-MII	Sim	Vários
HyRa II	Não	Não	Computador intel D510	Não	Controle velejo/ sensoriamento

Um critério importante é se o pesquisador **disponibiliza o projeto** do veleiro publicamente, sendo um fator que incentiva diretamente quanto à replicação do método científico, contribuindo ainda mais para a comunidade. A falta da disponibilização pública pode acarretar na não comparação dos trabalhos, favorecendo trabalhos isolados e pouco cooperativos, o que pode ser preocupante, visto que apenas um dos trabalhos encontrados na literatura realiza esta comparação direta com outros.

A **vela rígida** foi outro critério escolhido empiricamente, no presente trabalho, como um apontador que refletisse o desempenho empregado na automatização e atualização (quanto à tecnologia de velejo). Com isso, espera-se separar e identificar o melhor entre essas duas tecnologias de vela (rígida e flexível).

A escolha do *hardware* é de grande importância na comparação da robustez e desempenho de *software*. Não seria justo comparar projetos com placas em categorias totalmente diferentes, como a comparação entre um Arduino e uma FPGA. A robustez do sistema é um grande diferencial.

Por fim, **perspectivas** demonstra se o grupo de pesquisa está ativo e são um grande apontador para as dificuldades encontradas e as necessidades da comunidade.

3.2 Trabalhos Estritamente Relacionados

O veleiro SB-Met (*Sailbuoy* 2019) listado na Tabela 3.2 merece atenção devido a ser o primeiro (e único até então) a completar a travessia do Atlântico Norte, em 26 de agosto de 2018. Saindo de Newfoundland e chegando na costa da Irlanda, o veleiro robótico ficou cerca de 80 dias navegando, totalmente autônomo, nas águas geladas do Atlântico Norte. O veleiro percorreu cerca de 5100 km, fazendo um zigue-zague (*tacking*) ao longo do caminho em linha reta para a costa da Irlanda, que daria cerca de 3000 km. Este veleiro é propulso 100% pelo vento, sendo capaz de permanecer até 6 meses na água sem a intervenção humana.

Este evento isolado abre muitas áreas de pesquisa, principalmente na otimização do caminho percorrido, que é bem maior se considerada a menor distância entre os pontos de partida e de chegada. O aspecto mais positivo é que o veleiro não utiliza qualquer tipo de energia que não seja energia limpa, sendo auto-suficiente. A respeito do seu controle, a única informação encontrada é que não há o controle direto de vela, levando a entender que apenas o leme é controlável, sendo isto feito remotamente, através de comandos enviados por telefone via satélite. O tipo de controle também não é reportado em nenhum documento, a única informação é que o mesmo é auto-propulso através de um mecanismo protegido por uma nova invenção patenteada que é baseada na ação do vento e que é operado e controlado remotamente por pessoal qualificado a partir de um centro de operações. Por fim, as características do *Sailbuoy Met* (SB-Met) são particularmente interessantes em missões de longo termo tal qual a travessia do oceano Atlântico, realizada em 2018, em outras missões de longo termo (Borge 2015) (Hole et al. 2016).

Uma vez o SB-Met ter conseguido essa façanha (*Sailbuoy* 2019), no todo, os dois trabalhos que mais se assemelham ao trabalho corrente, em termos de similaridades e dificuldades encontradas, são o do veleiro Fast (Alves & Cruz 2008) e o Roboat (Stelzer 2013).

Ambos são de vela não rígida, possuem tamanho similares, objetivos de desenvolver o veleiro em (*hardware e software*) e descrevem o projeto do veleiro em si como um todo.

A estratégia de distribuição do hardware ao longo do veículo, proposta deste trabalho, foi também utilizada no desenvolvimento do STARFISH (Sangekar et al. 2008), um veículo submarino autônomo (AUV). Este submarino robótico igualmente utilizou o advento de compartimentos isolados entre si como uma maneira de proporcionar mais segurança e confiabilidade a todo sistema, sendo isso uma técnica comum em robótica subaquática. Assim, pode-se dizer que este submarino autônomo inspirou fortemente o presente projeto em sua concepção de hardware distribuído adotada.

Capítulo 4

Projeto de Hardware e Software Distribuído

O projeto N-Boat insere-se em dois grupos de pesquisa integrantes dos Laboratórios Associados Natalnet, que são o Laboratório para Percepção em Robótica (LPR) da UFRN e o Laboratório de Pesquisa em Informática, Comunicação e Automação (Laica) do IFRN). Ambos demandam por uma plataforma aquática que, em uma das aplicações visionadas, possa ser utilizada como uma ferramenta para a realização de testes de medição da qualidade da água (Júnior et al. n.d.). Em uma outra aplicação, o N-Boat deve permitir a validação de ferramentas desenvolvidas em simulação, tal como o sistema de controle para veleiros autônomo desenvolvido recentemente (Santos, Silva Junior, Negreiros, Araujo, Souza e Silva, Aroca & Gonçalves 2016)(Santos et al. 2018). Assim, os grupos carecem atualmente de uma plataforma que seja confiável e reutilizável para que essas e outras pesquisas sejam realizadas.

Com este intuito, uma contribuição secundária desta dissertação é também suprir essas demandas através da disponibilização de um trabalho técnico-científico na área de Engenharia Mecatrônica que proponha o projeto e construa o veleiro, justificando cientificamente e tecnicamente as características das escolhas feitas. Do ponto de vista da Engenharia Naval, a documentação de todas as fases do projeto e construção do veleiro autônomo que foi nomeado pelo grupo de N-Boat II também é contribuição importante, no Brasil e no mundo. Com isto, o protótipo deverá se tornar uma alternativa confiável podendo ser reproduzido, com comparações e com um possível engajamento de mais pesquisadores da comunidade de pesquisa em veleiros autônomos.

4.1 Características de Projeto Esperadas

A busca por uma solução que entregasse tanto robustez, segurança e versatilidade levou ao desenvolvimento de uma embarcação estanque com escotilhas que permitem acesso ao interior do veleiro, e, uma vez fechadas, permitem estabelecer compartimentos completamente isolados uns dos outros e da água. Além disso, com segurança redundante, componentes que não podem entrar em contato com a água diretamente (eletrônicos no geral) são colocados dentro de caixas estanques, dentro de cada um desses compartimentos. Ou seja, para proporcionar ainda mais segurança e robustez, adotou-se compartimen-

tos que isolam seções internas do veículo e caixas estanques dentro de cada seção.

As principais características e requisitos atendidas pelo projeto e desenvolvimento do N-Boat II são:

Robustez: Ser um veleiro robusto que possa aguentar as intempéries do mar aberto, tal como os ventos fortes, corrente marinha e até mesmo erros inerentes a objetos de pesquisa e de *payload* mal formulados.

Versatilidade: O N-Boat II deve ser utilizado, desde em águas abrigadas, até em mar aberto. Desta forma, suportando ondas e ventos inerentes a esses ambientes.

Usabilidade: O N-Boat II deve possuir meios para que seja facilitada a instalação de novos recursos, possibilitando os mais diferentes testes.

Opensource: Ser uma plataforma de uso comum, isto é, que o seu projeto e aprendizados correntes sejam de domínio público, bem como que os projetos futuros no tocante a seu *payload* sejam realizados para o benefício da população mundial.

Autonomia: Ter autonomia suficiente para suportar o uso intenso de seus equipamentos embarcados por até 48h, sem o uso painéis solares. Com painéis solares é esperado total autonomia energética.

Payload: Possa levar até 30Kg em equipamentos de pesquisa, não relacionados ao controle do veleiro.

Comunicação: Possua mais de uma forma de comunicação com uma estação base. De preferência com uma sendo de curto alcance (100 metros) com grande volume de dados e outra de longo alcance (10 até 50 Km).

Controle: Possua total autonomia em traçar rotas, além de possuir um controle manual analógico para eventual necessidade.

Referência: O projeto do N-Boat II deve ser uma referência nacional e internacional na linha de veleiros robóticos autônomos e ASV.

4.2 Questões e Dificuldades da Solução

Um dos maiores empecilhos encontrados na elaboração da solução foi a escassez de projetos relacionados que atendessem as características almejadas. Ainda, como citado acima, a lacuna existente nesta linha de pesquisa no Brasil motivou ainda mais a realização deste trabalho. Como visto, restaram como fontes de consulta os *benchmarkings* (principalmente as competições) e alguns projetos de pesquisa internacionais nesta linha, que, entretanto, descrevem muito brevemente as metodologias utilizadas e a forma como as características dos respectivos projetos foram escolhidas e como replicá-las.

Poucos trabalhos dessa linha de pesquisa descrevem como replicar suas plataformas. Dos trabalhos escolhidos para comparação, na Capítulo 3, com exceção do veleiro Fast (Alves & Cruz 2008), nenhum trabalho dedica espaço suficiente para descrição das metodologias utilizadas na construção de seus projetos. O que acarreta em grandes problemas para a comunidade de pesquisadores que trabalha com veículos aquáticos autônomos e, principalmente, veleiros autônomos. Uma vez que a maioria dos projetos não são replicáveis e nem facilmente comparáveis, cada linha de pesquisa desenvolve metodologias e

técnicas diferentes. Muitas delas são incomparáveis e contribuindo pouco para que outros grupos de pesquisa, que não possuem conhecimentos na de área de veículos autônomos náuticos possam se interessar.

Outro problema foi a falta de servos atuadores na escala do N-boat que atendessem às especificações. Em projetos de pequenos e médio porte, é possível a utilização de servos existentes comercialmente, já no mercado, com fabricantes famosos, como: Futaba, Turnigy, Phoenix, etc. Mas, na escala e força necessárias para o controle do leme e da vela, por exemplo, não foram encontrados servos atuadores comerciais. Logo, a equipe do projeto tomou a decisão de desenvolver e construir tais dispositivos mecatrônicos (e seus eletromecanismos).

Outro problema inerente ao se trabalhar com veículos aquáticos é a própria água, principalmente água salgada. Água salgada quando em contato com equipamentos eletromecânicos, se não os destroem instantaneamente os metais dos circuitos e atuadores por eletrólise, acaba diminuindo significativamente a vida útil dos mesmos. O próprio grupo da Natalnet já enfrentou consequências desse problema com o N-boat I, no qual água salgada infiltrou no compartimento dos circuitos e baterias, ocasionando a perda quase total dos componentes.

4.3 Solução de Projeto Proposta

A fim de resolver os problemas relatados na Seção anterior, adotamos uma estratégia na qual, além de colocar os sistemas eletrônicos dentro de caixas estanques, projetamos compartimentos específicos para dividi-los em categorias diferentes. Como não encontramos na literatura soluções similares, acredita-se ser esta a contribuição principal deste trabalho. O Resultado da adoção dessa estratégia de hardware distribuído culminou em um projeto com quatro compartimentos distribuídos, respectivamente, da proa à popa:

- 1° **compartimento:** *Payload* e entrada de cabos provenientes de sensores vindos do mastro e do suporte frontal (buzina, câmera estéreo e luz de navegação).
- 2° **compartimento:** Baterias e atuador da vela.
- 3° **compartimento:** Caixas estanques. A caixa dos sistemas eletrônicos de controle e a caixa com controlador de carga dos painéis e dos fusíveis.
- 4° **compartimento:** Atuador do leme.

Considerando como maior problema da Seção 4.2 a escassez de projetos relacionados, principalmente no Brasil, a contribuição inovadora proposta na área de pesquisa e desenvolvimento em ciências mecatrônicas é: o desenvolvimento de um plataforma de pesquisa aquática, com grande autonomia, *opensource* e que atendesse as características da Seção 4.1. As configurações finais do projeto desenvolvido podem ser visualizadas no Apêndice C. O próximo Capítulo detalhará a implementação desta solução, de forma que se possa entender de forma simples o funcionamento do veleiro como um todo.

Capítulo 5

Solução Implementacional (Hardware e Software)

O N-Boat é um projeto que vem sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa Natalnet desde 2012, na forma do N-boat I (Júnior et al. 2013). Com as crescentes pesquisas e problemáticas já expostas, notou-se a necessidade da implementação de um projeto que englobasse o escopo definido no Capítulo 4, surgindo o N-boat II. Neste capítulo, serão expostas as atuais escolhas para cada item do escopo esperado. Vale salientar que, até o momento, por ser um projeto continuamente em desenvolvimento, alguns testes ainda estão sendo realizados e por isso as escolhas não representam um aparato científico-tecnológico definitivo.

5.1 O projeto da estrutura do veleiro

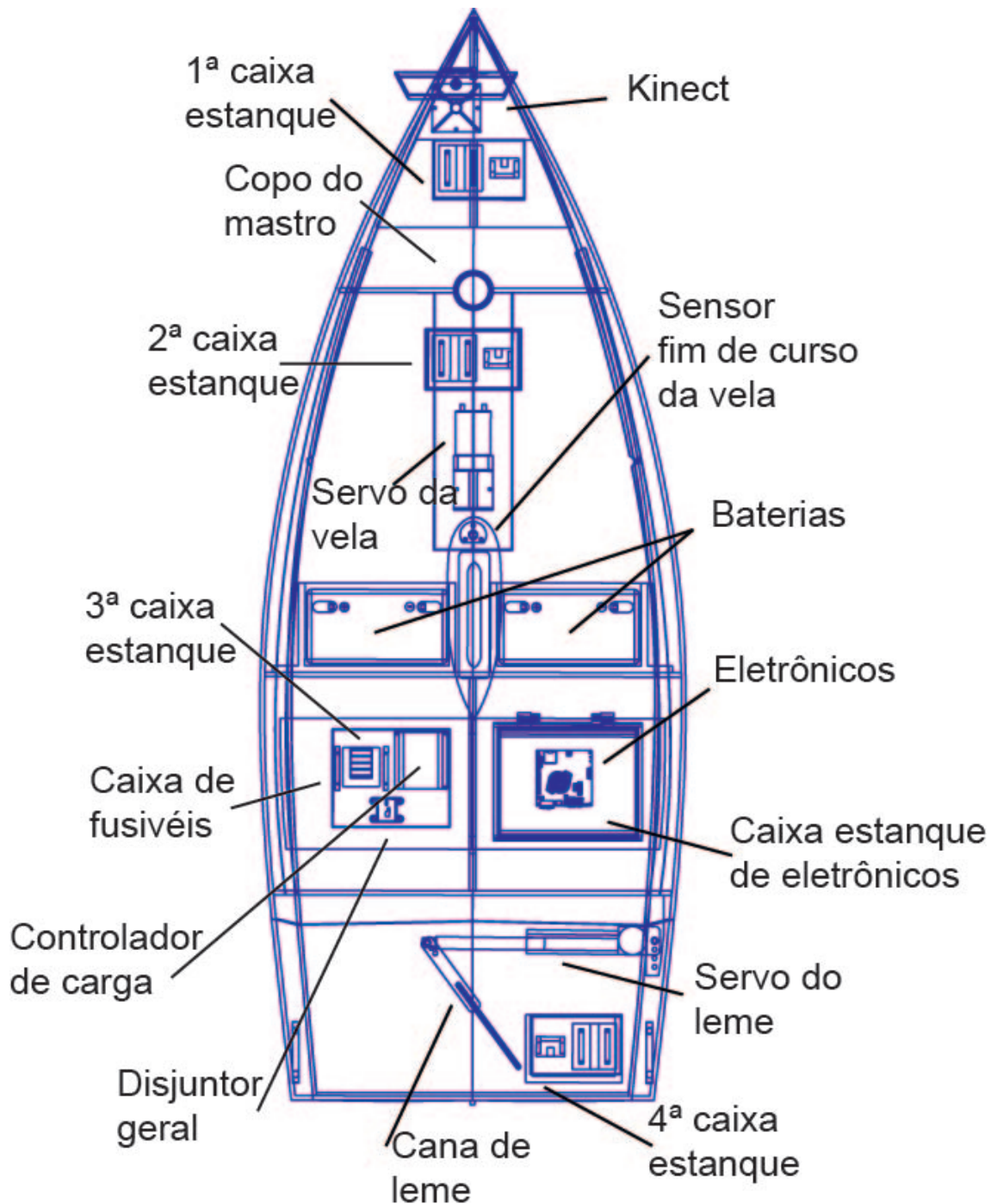
A estrutura do N-Boat II foi toda desenhada no SolidWorks, uma ferramenta de CAD 3D. A planta baixa com a descrição de suas funcionalidades pode ser visualizada na Figura 5.1. Outras imagens ilustrativas com a renderização do modelo em 3D podem ser visualizadas no Apêndice A.

O veleiro foi concebido com foco principal na estabilidade e segurança. Assim, diferentemente de veleiros tripulados de competição esportiva, a embarcação não possui uma área vélica grande em relação ao seu casco, que foi concebido para entregar o máximo de espaço interno. A estabilidade é proveniente de uma bolina retrátil com um peso de chumbo em sua extremidade.

Por simplicidade de execução e projeto, a vela escolhida foi a de pano tradicional, travada em um servo motor rotativo que faz uso de cabos para atuação da vela. No controle do leme, faz-se uso de um servo linear, já que no projeto em si já existia a cana do leme.

O casco atual está construído em fibra de vidro, com quatro compartimentos estanques numerados ordenadamente desde a proa até a popa. Todos eles possuem suas respectivas caixas estanques, onde os sistemas eletrônicos e terminais são protegidos de eventuais intempéries. O primeiro compartimento tem a funcionalidade de ser um espaço de uso exclusivo para o embarque de equipamentos de testes relativos à carga-paga. O segundo é onde se encontram as duas baterias e o servo da vela. No terceiro encontra-se duas

Figura 5.1: Planta baixa com as funcionalidades do N-Boat II.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

caixas estanques, hermeticamente fechadas e protegidas da água. A primeira comporta as placas de circuitos principais, e a segunda o disjuntor geral, fusíveis para determinadas funcionalidades e o controlador de carga do painel solar. Por fim, o quarto e último compartimento aloja o servo motor do leme e seu sistema sensorial proprioceptivo. A Figura A.2 ajuda a visualizar a divisão entre os compartimentos.

5.2 Hardware e sistemas eletrônicos

O *hardware* escolhido para ser o centro de processamento de alto nível do veleiro foi uma placa Jetson TK1 da Nvidia. Por ser uma opção que faz uso de um sistema operacional Linux, que além de ser mais cotidiano ao pesquisadores envolvidos, proporciona implementação de um sistema de tempo real emulado. As principais características da placa são:

- GPU NVIDIA Kepler com 192 núcleos CUDA e
- CPU NVIDIA 4-Plus-1™ Quad-Core ARM® Cortex™-A15.
- Memória de 2 GB x16 com largura de 64 bits.
- Memória de 16 GB 4.51 eMMC.
- Interfaces GPIOs, UART, HSIC, I2C, SATA, USB e Ethernet.

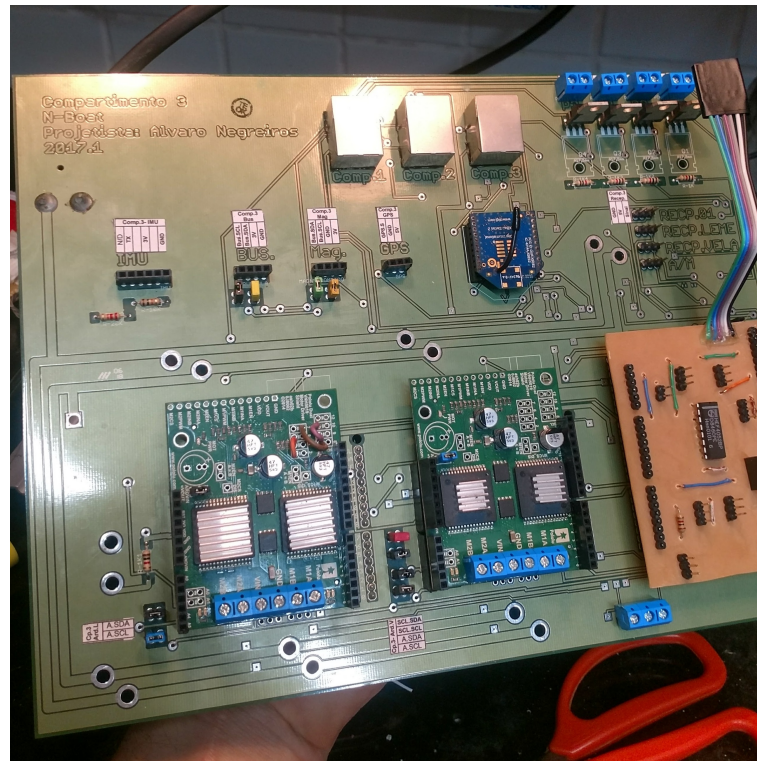
No controle de baixo nível utiliza-se dois microcontroladores Arduino UNO, um para comandar o servo do leme e o outro da vela, além de um terceiro Arduino MEGA, na função de mestre da comunicação I2C entre os demais Arduinos UNO escravos e com a camada de processamento de alto nível. Todos os Arduinos estão ligados nas portas de *reset* um dos outros, sendo uma alternativa em casos onde uma das placas venha a travar.

Ainda no baixo nível, foi projetada uma placa maior, mostrada na Figura 5.2, para conectar todos as demais placas comerciais e placas periféricas dos demais compartimentos estanques, sensores e terminais do veleiro. O projeto como um todo, em mais detalhes, pode ser visualizado no Apêndice B. Um componente muito importante dessa placa é o multiplexador, de código HEF4052. O mesmo multiplexa os sinais que atuam diretamente no servos do leme e da vela. O multiplexador pode chavear analogicamente entre os sinais de controle vindo das placas de circuito ou de um receptor de rádio controle modelo Turnigy 9x 2.4ghz de 8 canais.

As fontes de armazenamento de energia do veleiro são duas baterias de 105 A/h especificamente para uso naval. A produção de energia é proveniente de um painel fotovoltaico de 100 Wp, modelo BWSM100M36. Juntamente com um inversor modelo CIS-MPPT60-150, o sistema totaliza em torno de 2500 Wh de energia armazenada.

A Tabela 5.1 descreve todas as correntes e, por sua vez a potência de cada equipamento eletrônico e eletromecânico do veleiro. Visto que o total de corrente utilizada é de 90 A,

Figura 5.2: Placa principal de integração entre dispositivos.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

um disjuntor de corrente contínua de 100 A foi alocado dentro da caixa de distribuição de energia. Dentro dessa caixa estanque, além do disjuntor geral, encontra-se o controlador de carga e uma caixa de fusíveis. Essa última caixa, mostrada na Figura 5.3 possui um fusível de corrente similar ao especificado na respectiva tabela.

Tabela 5.1: Tabela com as correntes utilizadas por cada equipamento

Equipamento	Corrente (Para tensão entre 12~13 V)
Controlador de carga	20 A
Servo da vela	25 A
Servo do leme	5 A
Compartmento 1	10 A
Compartmento 2	10 A
Compartmento 3	10 A
Compartmento 4	10 A
Total	90 A

Outro ponto importante em relação aos sistemas eletrônicos do projeto é que todos eles

Figura 5.3: Caixa estanque com controlador de carga, disjuntor geral e fusíveis.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

foram colocados dentro de caixas estanques, conferindo uma segurança a mais quanto a possíveis vazamentos pelas escotilhas principais do veleiro.

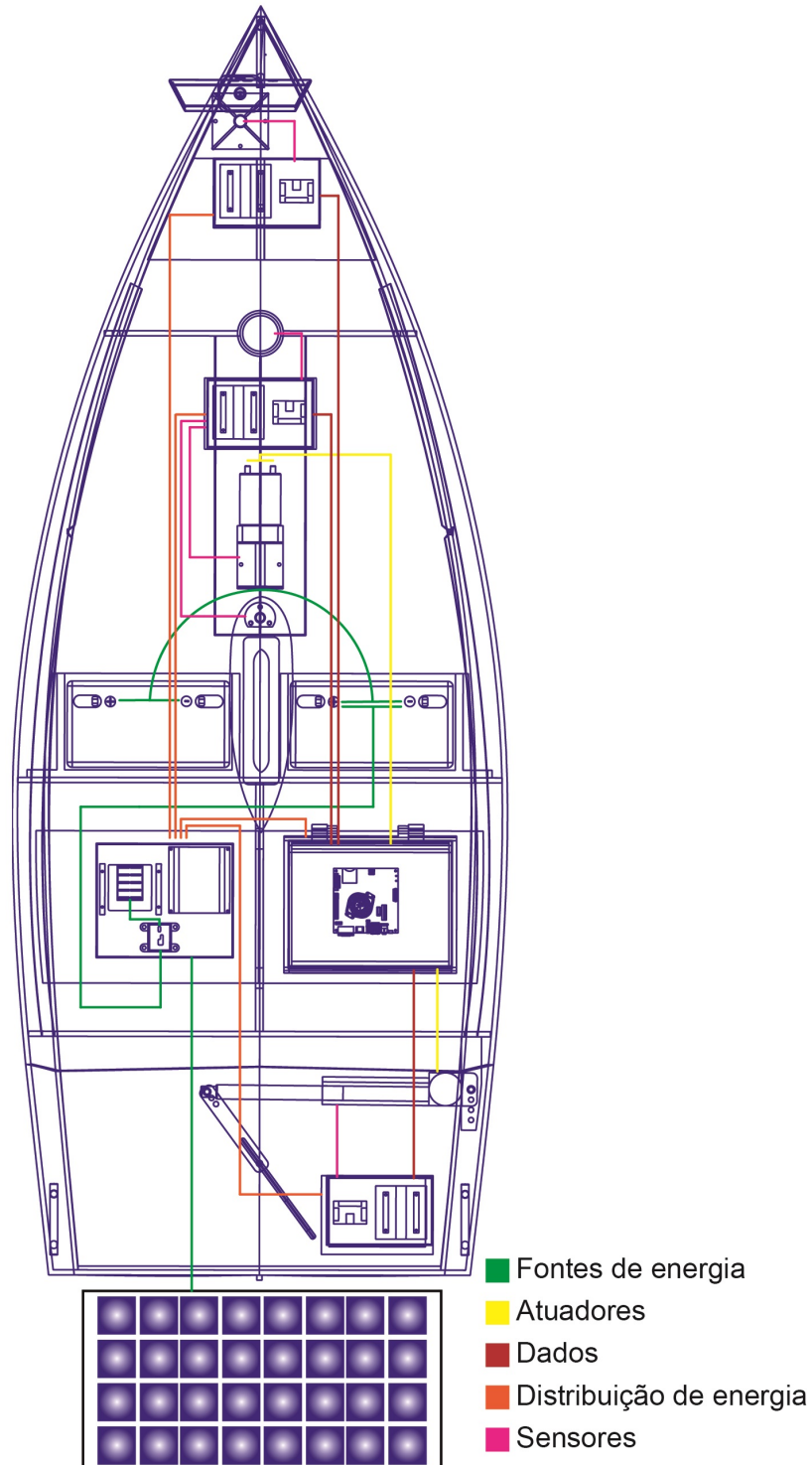
Em relação à fiação interna entre os compartimentos e seus respectivos dispositivos, foram escolhidos cabos de força que dessem suporte (verificado com o manual do fabricante) às respectivas correntes já expostas na Tabela 5.1. Para a comunicação interna foi escolhido um cabeamento de *ethernet* Cat 6. Este cabeamento tanto pode dar suporte ao baixo nível, em testes de controle do Arduino, quanto à implementação final de alto nível, com roteamento de dados entre os dispositivos em uma rede interna. A compilação desses projetos pode ser visualizada na Figura 5.4.

5.3 Sensores escolhidos

Os sensores de velejo e orientação utilizados não são diferentes dos enunciados no trabalho (Santos, Silva Junior, Negreiros, Araujo, Souza e Silva, Aroca & Gonçalves 2016), mas serão novamente expostos aqui por uma questão de reproducibilidade do trabalho.

Os principais sensores relativos à técnica de velejo automatizado são a biruta e o anemômetro, e ambos sensores foram retirados de um kit de estação meteorológica modelo WH2081. Como esses dois sensores são digitais e de uso específico, poucos arranjos

Figura 5.4: Planta baixa com o projeto elétrico do N-Boat II.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

técnicos precisaram ser feitos para implementação dos componentes no topo do mastro e para o controle do veleiro, respectivamente. A foto do conjunto final pode ser visualizada na Figura 5.5.

Figura 5.5: Biruta e anemômetro utilizados no projeto.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Para tornar possível a navegação e auto-orientação, foram utilizados no projeto:

- GPS modelo EM-406 SiRF III.
- Unidade de medida inercial(IMU), contendo:
 - Giroscópio de 3 eixos modelo ITG-3200.
 - Acelerômetro de 3 eixos modelo ADXL345.
 - Magnetômetro de 3 eixos modelo HMC5883L.
- Outro Magnetômetro de 3 eixos modelo HMC5883L para redundância.

5.4 Atuadores

Por simplicidade de projeto, para propiciar o controle da vela, foi escolhido um atuador rotativo sobre cabos. Tal decisão deu-se porque atuadores que trabalham diretamente sobre o eixo do mastro demandam mais complexidade de produção e possuem peso geralmente maior quando comparados aos demais. Essa escolha levou a um projeto que utilizasse um guincho de 750 lb do fabricante Pegamax. As características principais deste dispositivo elétrico são:

Motor: 0.3 kW de 0.4 hp a 12 V.

Capacidade de carga: 340 Kgf.

Peso do Equipamento: 5 Kg.

Velocidade sem carga: 10,5 metros em 3,2 minutos.

Freio automático: Sim.

Redução: 153:1.

Como o projeto do leme disponibilizou a cana do leme como estrutura de governo do mesmo, optou-se por usar um atuador linear do fabricante Santoro. Suas principais características são:

Motor: 55 W a 12 V.

Capacidade de carga: 60 Kgf.

Peso do Equipamento: 2,2 Kg.

Máximo curso: 200 mm.

Freio automático: Sim.

Ambos atuadores são acionados por suas respectivas *shields* para Arduino, com eletrônica de potência embarcada modelo VNH5019.

Capítulo 6

Experimentos e Resultados

A parte estrutural do veleiro foi construída, como pode ser observado na Figura 6.1, assim como a parte da eletrônica de controle do mesmo. Vários testes foram realizados visando verificar os atuadores e sensores do N-Boat, descritos a seguir.

Figura 6.1: Veleiro N-Boat II.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Figura 6.2: Teste dos atuadores em *hardware-in-the-loop* do N-Boat II.

(a) Teste do atuador da vela.

(b) Teste do atuador do leme.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

6.1 Teste de bancada dos atuadores

Foram realizados vários testes com os atuadores para verificar características elétricas, bem como determinar o consumo total de energia do N-Boat e outras características mecânicas. Esses testes estão mais detalhados em um artigo publicado em evento (LARS 2016) (Souza e Silva et al. 2016). Outros testes posteriores, que serão mais detalhados aqui, tiveram que ser realizados em relação à força e velocidade.

Para realizar esses testes, são usados dados de controle vindos de uma ambiente de simulação. A Figura 6.2 ilustra como foram realizados os mesmos. Os resultados quanto a velocidades e força em carga máxima podem ser visualizados a seguir, sendo semelhantes aos informados pelos fabricantes.

Atuador da vela :

- Velocidade: 1 metro de cabo em 25 segundos.
- Força: 370 kgf.

Atuador do leme :

- Velocidade: 200 mm guia em 6 segundos.
- Força: 80 kgf.

6.2 Teste de bancada dos equipamentos de comunicação

Dois testes de telemetria foram realizados, ambos no mesmo ambiente e usando configurações semelhantes, variando apenas o dispositivo de comunicação. Para simular o invólucro do barco e da caixa estanque dos sistemas eletrônicos, os dispositivos foram colocados dentro de duas caixas de plástico de alta densidade. No primeiro teste foi utilizado um módulo Xbee *serie 1* e no segundo o módulo 3DR de 915 MHz, que é utilizado comumente em telemetria de *drones*.

Figura 6.3: Teste de telemetria do N-Boat II.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Ambos os testes tiveram resultados similares e os dados puderam ser enviados sem perdas a uma distância de até 110 metros. Em distâncias maiores que esta, as interrupções e perdas de pacotes eram frequentes. Este teste prático afere resultados aceitáveis para prosseguir com os testes iniciais na água. Visto que um bote de apoio irá seguir o N-Boat a uma distância de até 20 metros.

6.3 Teste laboratorial do N-Boat

Como uma forma de testar a comunicação e interação de todos os componentes do veleiro, um teste laboratorial de *hardware-in-the-loop* foi elaborado. Todos os dispositivos do N-Boat II foram interligados em critério de prototipagem para o teste. Nessas ligações, foram utilizadas *protoboards* e *jumpers*. Uma vez que nesse ambiente o barco sofre várias oscilações, essas conexões provisórias não seriam uma solução viável para testes reais na água, podendo facilmente resultar em uma desconexão de algum componente, comprometendo criticamente o acionamento de algum atuador ou placa de controle e, por consequência, a navegação.

Para caracterizar esse experimento como se o mesmo ocorresse em situação real, um teste de *software-in-the-loop* foi preparado. Para que isso ocorresse, apenas coordenadas geográficas foram introduzidas no software, simulando objetivos de uma dada missão. Os sinais de controle foram calculados a partir de dados de capturados pelos sensores essenciais à navegação básica, são eles: GPS, IMU, magnetômetro, biruta e anemômetro. Com o algoritmo em *loop*, os atuadores controlaram a vela e o leme, ao mesmo tempo que um ventilador simulava o vento na biruta e anemômetro.

Durante 15 minutos o veleiro realizou os testes sem falhas. A Figura 6.4 ilustra o ocorrido. Os resultados desse experimento não são mensuráveis para uma comparação

futura, mas pode-se dizer que o veleiro passou nos testes sem apresentar nenhum defeito e conseguiria navegar autonomamente dentro da água.

Figura 6.4: Teste laboratorial do N-Boat II em *software-in-the-loop*.



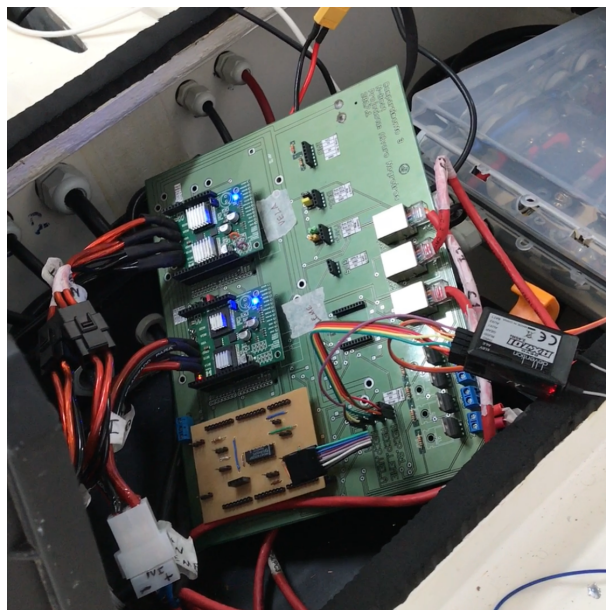
Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

6.4 Teste de interligação do N-Boat II

Nesse experimento, ao contrário do experimento Seção 6.3 em que foram utilizadas conexões provisórias, todos os componentes foram interligados utilizando-se as conexões finais projetadas para o projeto. Assim, foi utilizada toda rede que interliga as placas, componentes, servos e sensores entre os compartimentos. Em especial a placa principal e a caixa de distribuição de energia, respectivamente ilustradas na Figura 5.2 e Figura 5.3.

O intuito desse experimento foi atestar a funcionalidade da rede de interligação da placa principal e dos outros componentes distribuídos ao longo dos compartimentos do veleiro. O teste de funcionalidade foi receber um sinal de um rádio controle e transmiti-lo ao longo de outra rede interligada até o servo final, seja do leme ou da vela. O teste ocorreu com algumas falhas iniciais provenientes de oxidações de alguns componentes mal armazenados. Entretanto, com uma rápida limpeza não houver mais falhas e o experimento passou no teste. Na Figura 6.5 vemos uma ilustração da placa principal interligando todos os componentes.

Figura 6.5: Teste interligação do N-boat II.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Capítulo 7

Conclusão

O presente trabalho teve o intuito de propor e conceber o projeto estrutural de uma plataforma mecatrônica para um veleiro robótico autônomo, envolvendo desde a parte mecânica até a parte eletro-eletrônica, e também desenvolver e implementar o projeto, tendo finalizado com a construção do protótipo desse veleiro, denominado de N-Boat II. Ainda foi intuito disponibilizar toda a documentação do projeto da plataforma robótica aquática, de forma que a mesma seja replicável, *opensource*, e com autonomia para longas missões. Enfim, o trabalho foi realizado também visando atender às necessidades experimentais do grupo de pesquisa do Natalnet e demais grupos que necessitem de plataformas aquáticas com essas características.

As pesquisas na área de navegação aquática autônoma sugeriram no grupo de pesquisa Natalnet pelo projeto inicial do N-boat I. O mesmo utilizou-se de um barco modelo de 1 m de comprimento, o qual foi adaptado para navegações autônomas. Entretanto, pelo seu próprio tamanho e espaço interno reduzido, os experimentos foram limitados. Havendo entraves físicos que impossibilitaram embarcar placas de controle mais robustas e alguns sensores maiores. Da mesma forma que as condições ambientais, como velocidade vento, velocidade de correntezas e tamanho de ondas, limitavam a navegação desse veleiro de pequeno porte. Assim, as principais características do projeto do N-boat II foram trabalhadas sobre essas limitações do projeto anterior.

Ao longo do primeiro projeto e da continuação da linha de pesquisa com o segundo projeto, vários trabalhos foram publicados, como resultados de contribuições parciais reportadas na presente pesquisa. Os principais trabalhos anteriores foram sobre navegação (Santos, Negreiros, Jacobo, Gonçalves, Junior & Silva 2016), projetos robóticos e mecatrônicos (Santos, Silva Junior, Negreiros, Araujo, Souza e Silva, Aroca & Gonçalves 2016), sistema de monitoramento da qualidade da água embarcado (Souza e Silva et al. 2016). Da mesma maneira que, efetivamente, durante as pesquisas e desenvolvimento dos trabalhos no escopo do N-boat II, outros trabalhos foram publicados com contribuições parciais na área controle (Santos et al. 2018), simulação de veículos aquáticos (Paravisi et al. 2019) e análise da qualidade da água (Júnior et al. n.d.).

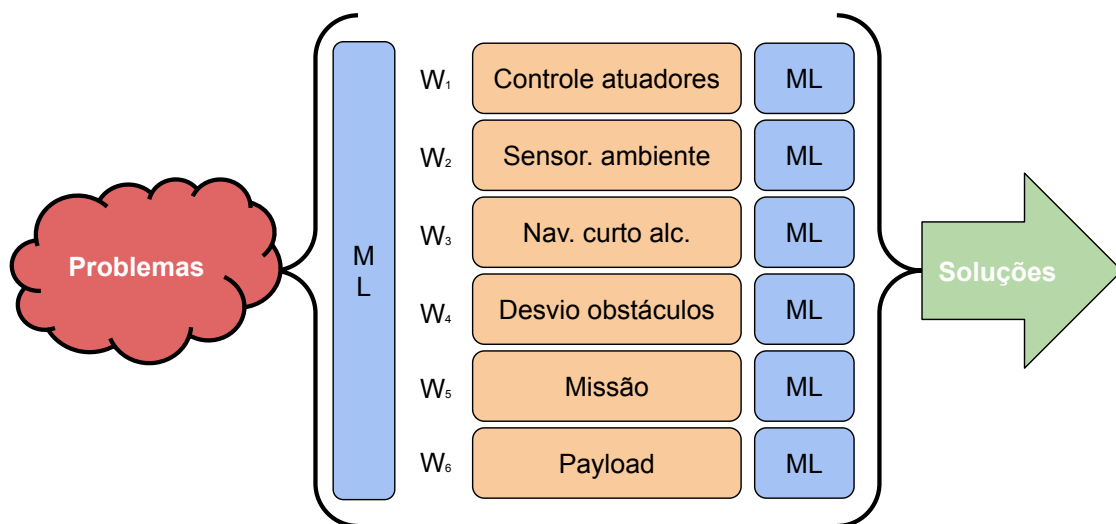
Com este trabalho espera-se que o próprio grupo de pesquisa da Natalnet possa prosseguir em suas pesquisas nas áreas que necessitam desta plataforma. Mas, além disso, o principal intuito é disponibilizar um projeto no qual outros pesquisadores possam replicar facilmente e realizar experimentos das diversas áreas de conhecimento, da mesma ma-

neira que se espera que pesquisadores utilizem esse trabalho como forma de inspiração em outros projetos e que esses sejam ainda mais eficientes.

O N-Boat II possui várias características as quais o diferenciam de outros trabalhos, como grande espaço interno para *payloads*, grande autonomia, robustez etc. Mas o principal são seus compartimentos estanques isolados, que separam por similaridade e características todos seus componentes embarcados. Conseqüentemente, característica de projeto proporciona uma arquitetura de eletrônica distribuída única, sendo esta contribuição principal deste trabalho.

Esse trabalho não é um fim de uma pesquisa, mas sim um meio. Com a finalização e estabelecimento dessa plataforma como um facilitador para outros trabalhos de pesquisa, abre-se caminho para outras linhas de pesquisa mais aprofundadas na área. Estabelecemos como objetivo futuro aprimorar técnicas de navegação aquáticas autônomas de uma embarcação robótica através da utilização da arquitetura *subsumption* (Brooks 1986), com utilização de técnicas de aprendizado de máquina profundo. Uma representação abstrata de como demonstrar a hipótese (e objetivo desta proposta de trabalho futuro) pode ser visualizada na Figura 7.1, na qual o grande problema de controle (complexo) é quebrado em vários problemas que são isolados em comportamentos a serem resolvidos de forma independente por aprendizado de máquina.

Figura 7.1: Solução proposta metodológica unindo arquitetura *subsumption* e aprendizado de máquina.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Pretende-se fazer o uso de novas abordagens metodológicas para aprendizado de máquina, como a recentemente proposta do *TEDA* (*typicality and eccentricity based data analytics*), (Angelov 2014) para detecção de anomalias e potenciais *outliers* no *stream* de dados, atuando sem o conhecimento prévio de distribuições estatísticas ou parâmetros relacionados aos dados. Será possível usar aprendizado com algoritmos evolutivos, como

por exemplo *TEDA-Cloud* (Bezerra et al. 2016), que poderá ser uma técnica viável para realizar a clusterização online e identificar padrões de comportamento ideais para realizar missões com maior eficiência.

Ainda, uma possibilidade que vamos estudar é combinar redes neurais profundas com aprendizado por reforço profundo ou DRL (*Deep Reinforcement Learning*) (François-Lavet et al. 2019), isto é, neste caso seria verificar o uso de DRL na camada de mais alto nível da arquitetura de controle combinado com aprendizado profundo nas camadas inferiores. Esta possibilidade surge da natureza do problema de navegação aquática, em que o veículo náutico deve ser o mais reativo possível frente às várias intempéries observadas neste tipo de ambiente. É um ambiente extremamente volátil, e DRL pode ser interessante, por exemplo, em situações quando a queda de pressão atmosférica indica a ocorrência de chuvas e tempestades (neste caso a vela deve ser abaixada evitando danos e todos os comportamentos devem ser desativados até que o vento brando retorne).

Também são algumas sugestões de pesquisas futuras:

- Implementação de um sistema operacional de tempo real voltado para sistemas embarcados.
- Implementação de uma arquitetura subsumption, proporcionando comportamentos de controle adequados a diferentes situações.
- Pesquisas na área de machine learning para otimização de rotas, complexas as quais necessitam superar obstáculos de ventos e correntezas em constante mudança.
- Desenvolvimento de uma vela rígida com aerofólio a qual possa ser instalada no N-boat II.

Referências Bibliográficas

- Alaieri, Fahad & André Vellino (2016), Ethical decision making in robots: Autonomy, trust and responsibility, *em* 'International Conference on Social Robotics', Springer, pp. 159–168.
- Alves, José C & Nuno A Cruz (2008), Fast-an autonomous sailing platform for oceanographic missions, *em* 'OCEANS 2008', IEEE, pp. 1–7.
- Anderson, Bryon D (2008), 'The physics of sailing', *Physics Today* **61**(2), 38.
- Angelov, Plamen (2014), Anomaly detection based on eccentricity analysis, *em* '2014 IEEE Symposium on Evolving and Autonomous Learning Systems (EALS)', IEEE, pp. 1–8.
- Badamasi, Yusuf Abdullahi (2014), The working principle of an arduino, *em* 'Electronics, computer and computation (icecco), 2014 11th international conference on', IEEE, pp. 1–4.
- Barros, Geraldo Luiz Miranda de (2014), *Navegar é fácil*, Lilian M. de Barros.
- Benchmarking mobile robots motion* (n.d.), <http://www.heronrobots.com/EuronGEMSig/downloads/Prague/MotionBench.pdf>. Accessed: 2017-11-17.
- Bezerra, Clauber Gomes, Bruno Sielly Jales Costa, Luiz Affonso Guedes & Plamen Parvanov Angelov (2016), A new evolving clustering algorithm for online data streams, *em* '2016 IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)', IEEE, pp. 162–168.
- Borge, Ragnhild Stegali (2015), Application of the unmanned offshore sensing sailbuoy for validation of ocean model simulations and remote sensing data in the north atlantic, Dissertação de mestrado, The University of Bergen.
- Brand, Joel (2013), *Rudderless Sailing by Joel Brand*, Lulu Books, Inc.
- Brooks, R. (1986), 'A robust layered control system for a mobile robot', *IEEE Journal on Robotics and Automation* **2**(1), 14–23.
- Dahl, Kjell, Anton Bengsén & Matias Waller (2015), Power management strategies for an autonomous robotic sailboat, *em* 'Robotic Sailing 2014', Springer, pp. 47–55.

- Dantas, André, Rafael Vidal Aroca & Luiz M. G. Gonçalves (2013), Modelagem e controle de um barco autônomo, *em* ‘Proceedings of Latin American Robotics Symposium, Workshop of Undergraduate Works in Robotics, 2013, Arequipa. Porto Alegre: SBC, 2013.’, pp. 1–8.
- Dupriez-Robin, Florian, Luc Loron, Fabien Claveau & Philippe Chevrel (2009), Design and optimization of an hybrid sailboat by a power modeling approach, *em* ‘Electric Ship Technologies Symposium, 2009. ESTS 2009. IEEE’, IEEE, pp. 270–277.
- Erckens, Hendrik, Gion-Andri Beusser, Cedric Pradalier & Roland Y Siegwart (2010), ‘Avalon’, *IEEE Robotics & Automation Magazine* **17**(1), 45–54.
- Erckens, Hendrik, Gion-Andri Büsser, Cedric Pradalier & Roland Y Siegwart (2010), ‘Navigation strategy and trajectory following controller for an autonomous sailing vessel’, *IEEE RAM* **17**, 47–54.
- François-Lavet, Vincent, Peter Henderson, Riashat Islam, Marc G. Bellemare & Joelle Pineau (2019), ‘An introduction to deep reinforcement learning’, *Foundations and Trends in Machine Learning* **11**(3-4), 1–140.
- Furrer, Fadri & Pascal J Gohl (2010), ‘Control of an autonomous sailing catamaran on the concept of hydrofoils’, *Semester thesis, ETH Zürich*.
- Gomes, Luís, Miguel Santos, Thiago Pereira & Anikó Costa (2015), Model-based development of an autonomous sailing yacht controller, *em* ‘Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2015 IEEE International Conference on’, IEEE, pp. 103–108.
- Hole, Lars R, Ilker Fer & David Peddie (2016), ‘Directional wave measurements using an autonomous vessel’, *Ocean Dynamics* **66**(9), 1087–1098.
- Júnior, Andouglas, Davi Santos, Petrúcio Medeiros, Alvaro Negreiros, Justo Jacobo, Joao M Silva, L Gonçalves & Rafael V Aroca (n.d.), ‘Sistema de monitoramento em tempo real da qualidade da água para reservatórios de usinas hidrelétricas’.
- Júnior, Andouglas GS, André PD Araújo, Marcus VA Silva, Rafael V Aroca & Luiz MG Gonçalves (2013), N-boat: an autonomous robotic sailboat, *em* ‘Robotics Symposium and Competition (LARS/LARC), 2013 Latin American’, IEEE, pp. 24–29.
- Kuindersma, Scott, Robin Deits, Maurice Fallon, Andrés Valenzuela, Hongkai Dai, Frank Permenter, Twan Koolen, Pat Marion & Russ Tedrake (2016), ‘Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot’, *Autonomous Robots* **40**(3), 429–455.
- Markoff, John (2012), ‘Skilled work, without the worker’, *The New York Times* **18**.

- Meinig, Christian, Noah Lawrence-Slavas, Richard Jenkins & Heather M Tabisola (2015), The use of saildrones to examine spring conditions in the bering sea: Vehicle specification and mission performance, *em* 'OCEANS'15 MTS/IEEE Washington', IEEE, pp. 1–6.
- Mirabaud LX modifications declared a success* (2013).
URL: <https://www.yachtsandyachting.com/news/170420/Modifications-declared-a-success>
- Ortiz, Luis Enrique, Elizabeth V. Cabrera & Luiz M. Goncalves (2018), 'Depth data error modeling of the zed 3d vision sensor from stereolabs', *ELCVIA : Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis* **17**(1), 1–15.
- Paravisi, Marcelo, Davi H Santos, Vitor Jorge, Guilherme Heck, Luiz Marcos Gonçalves & Alexandre Amory (2019), 'Unmanned surface vehicle simulator with realistic environmental disturbances', *Sensors* **19**(5), 1068.
- Radioamador* (2015). Acessado em 14 Abril de 2019.
URL: <http://www.anatel.gov.br/setorregulado/radioamadorismo>
- Raghunathan, Vijay, Aman Kansal, Jason Hsu, Jonathan Friedman & Mani Srivastava (2005), Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems, *em* 'Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks', IEEE Press, p. 64.
- Ran, Li, Wu Junfeng, Wang Haiying & Li Gechen (2010), Design method of can bus network communication structure for electric vehicle, *em* 'Strategic Technology (IFOST), 2010 International Forum on', IEEE, pp. 326–329.
- Rynne, PF & KD Von Ellenrieder (2008), A wind and solar-powered autonomous surface vehicle for sea surface measurements, *em* 'OCEANS 2008', IEEE, pp. 1–6.
- Sailbuoy* (2019). Acessado em: 11 de Junho de 2019.
URL: <http://sailbuoy.no/>
- Sangekar, Mehul, Mandar Chitre & Teong Beng Koay (2008), Hardware architecture for a modular autonomous underwater vehicle starfish, *em* 'OCEANS 2008', IEEE, pp. 1–8.
- Santos, Davi, Alvaro Negreiros, Justo Jacobo, Luiz Goncalves, Andouglas Silva Junior & Joao Moreno Silva (2018), Gain-scheduling pid low-level control for robotic sailboats, *em* '2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)', IEEE, pp. 147–152.
- Santos, Davi H. (2016), Controle de orientação e planejamento de caminho de curta distância para o veleiro robótico NBoat II, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

- Santos, Davi H., Andouglas G. Silva Junior, Alvaro P. F. Negreiros, Andre P. Araujo, Justo E. A. Souza e Silva, João M. V. B. and Jacobo, Rafael V. Aroca & Luiz M. G. Gonçalves (2016), ‘Design and implementation of a control system for a sailboat robot’, *Robotics (MDPI)* **5**(1), 5.
- Santos, DH, APF Negreiros, JEA Jacobo, LMG Gonçalves, AG Silva Junior & JMVBS Silva (2016), Short-term path planning for high-level navigation control of n-boat-the sailboat robot, *em* ‘2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR)’, IEEE, pp. 211–216.
- Santos, Einstein G., Rafael Vidal Aroca & Luiz M. G. Gonçalves (2013), Arquitetura de controle de alto nível para barcos robóticos, *em* ‘Proceedings of Latin American Robotics Symposium, Workshop of Graduate Works in Robotics, 2013, Arequipa. Porto Alegre: SBC, 2013.’, pp. 1–8.
- Silva Junior, Andouglas Goncalves da, Sarah Thomaz de Lima Sa, Davi Henrique dos Santos, Álvaro Pinto Fernandes de Negreiros, João Moreno Vilas Boas de Souza Silva, Justo Emílio Álvarez Jacobo & Luiz Marcos Garcia Gonçalves (2016), ‘Towards a real-time embedded system for water monitoring installed in a robotic sailboat’, *Sensors* **16**(8), 1226.
- Souza e Silva, João M. V. B., Andouglas G. Silva Junior, Davi H. dos Santos, Alvaro P. F. Negreiros, Justo E. A. Jacobo & Luiz M. G. Gonçalves (2016), Towards the electromechanical design of an autonomous robotic sailboat, *em* ‘Proceedings of Latin American Robotics Symposium’, pp. 43–48.
- Stelzer, Roland (2013), *Autonomous Sailboat Navigation: Novel Algorithms and Experimental Demonstration*, LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Tretow, Claes (2017), ‘Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat’.
- Viola, IM, Patrick Bot & M Riotte (2013), ‘Upwind sail aerodynamics: A rans numerical investigation validated with wind tunnel pressure measurements’, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **39**, 90–101.
- Williamsz, Ben, Julia Kane, Richard J Hartnett & Peter F Swaszek (2014), ‘Senior project design of a two meter autonomous sailboat’.

Apêndice A

Arquivos do projeto estrutural do veleiro

Figura A.1: Renderização em 3D do N-boat II com vista lateral



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Figura A.2: Renderização em 3D do N-boat II aberto com vista superior



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Figura A.3: Renderização em 3D do N-boat II aberto com vista lateral

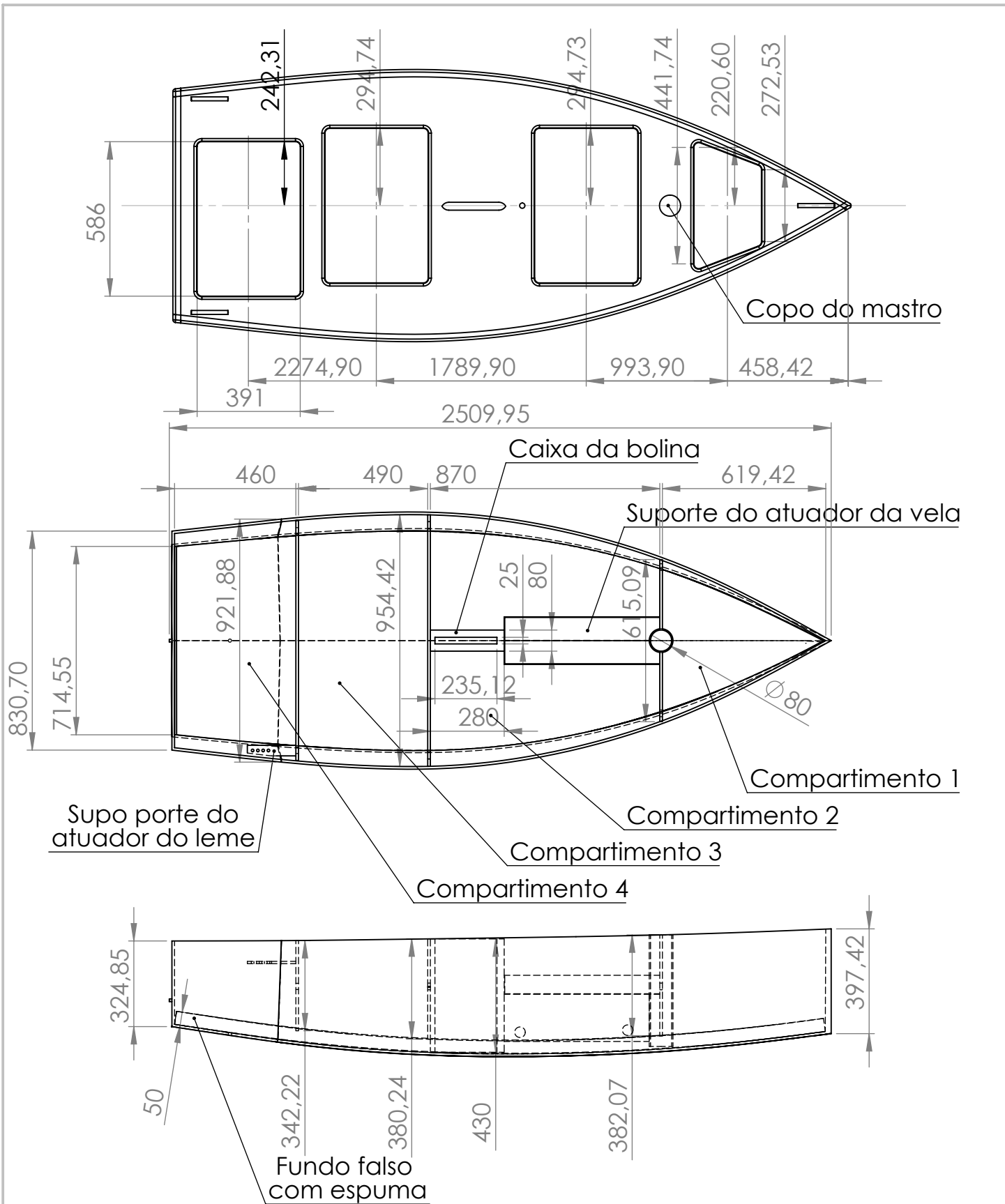


Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Figura A.4: Renderização em 3D do N-boat II com vista livre



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.



Categoria: **Veleiro Autônomo** Local: **Laboratório Natalnet UFRN Natal/RN - 2018.2** Autor: **Álvaro Pinto Fernandes de Negreiros**

DES.	NOME	ASSINATURA	DATA
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

título: **Vistas do casco do N-Boat II**

DES. Nº **Planta do N-Boat II** A4

PESO: ESCALA: 1:50 FOLHA 2 DE 2

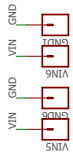
Apêndice B

Arquivos do projeto eletrônico do veleiro

Figura B.1: Caixa de elétricos do N-boat II



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.



-Pino 7 arduino mega está ligado nos reset dos demais arduinos

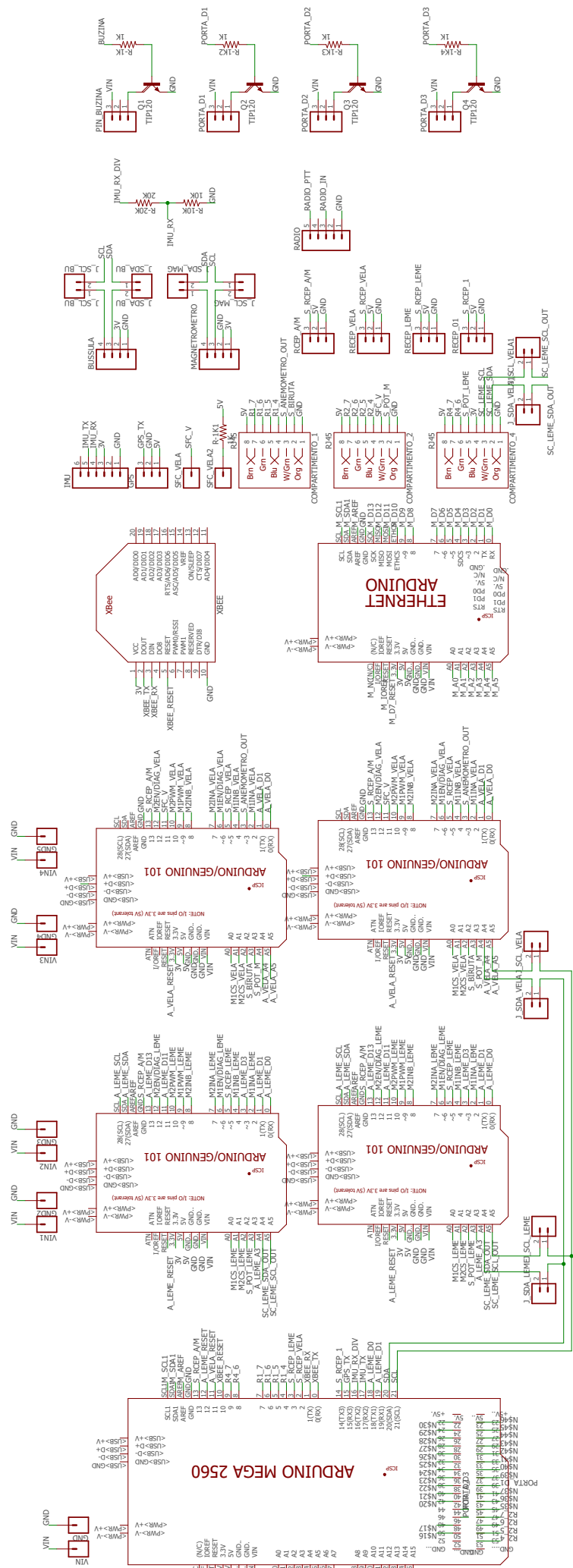


Figura B.2: Placa central de circuitos o N-boat II



Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Apêndice C

Características gerais do veleiro

Tabela C.1: Características gerais do N-Boat II

Item	Descrição
Origem	Natal/RN - Brasil
Grupo de pesquisa	Natalnet / UFRN
Categoria	Veleiro Autônomo
Tipo de casco	Monocasco
Comprimento	2500 mm
Largura	830 mm
Calado	1322 mm
Peso do casco	65 kg
Peso da bolina	37 Kg
Peso das baterias	25.50 Kg + 25.50 Kg
Número de baterias	2
Número de compartimentos	4
Número de caixas estanques	7
Comprimento do mastro	3130 mm
Área vélica	3188320.84 mm ²
Tipo de vela	Maleável - Dacron
Hardware principal	Jetson Tk1
Número de atuadores	2
Tipos de comunicação	Wifi / Xbee / Rádio 915 MHz
Potência armazenada	105 A + 105 A (12V)
Potência do painel solar	100 Wp
Espaço para payload	Sim