

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ANDRÉ PAULO DANTAS DE ARAÚJO

**Uma arquitetura para controle e automação em
veleiros autônomos monocasco**

NITERÓI

2022

ANDRÉ PAULO DANTAS DE ARAÚJO

Uma arquitetura para controle e automação em veleiros autônomos monocasco

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Ciência da Computação

Orientador:
Esteban Walter Gonzalez Clua

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

A658a Araújo, André Paulo Dantas de
Uma Arquitetura para Controle e Automação em Veleiros
Autônomos Monocasco / André Paulo Dantas de Araújo ;
Esteban Walter Gonzalez Clua, orientador. Niterói, 2022.
121 p. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PGC.2022.m.01382650469>

1. Inteligência Artificial. 2. Sistemas de Controle. 3.
Barco Autônomo. 4. Robótica. 5. Produção intelectual. I.
Clua, Esteban Walter Gonzalez, orientador. II. Universidade
Federal Fluminense. Instituto de Computação. III. Título.

CDD -

ANDRÉ PAULO DANTAS DE ARAÚJO

Uma arquitetura para controle e automação em veleiros autônomos monocasco

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Ciência da Computação

Aprovada em MARÇO de 2022.

BANCA EXAMINADORA



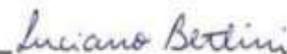
Prof. Dr. Esteban-Walter Gonzalez Clua - Orientador, UFF



Prof. Dr. José Viterbo Filho, UFF



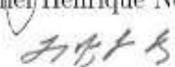
Prof. Dr. Raphael Pereira de Oliveira Guerra, UFF



Prof. Dr. Luciano Bertini, UFF



Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias, UFF



Prof. Dr. Luiz Marcos Garcia Gonçalves, UFRN

*Dedico este projeto as mulheres da minha vida, Izolda Dantas de Araújo minha mãe,
Francisca Alves de Araújo minha avó, Juliana Patricia Graciano Pessoa de Araújo
minha linda esposa, pois sem elas nada disso teria acontecido.*

*Dedico a Deus por ter me dado o dom da Vida e está sempre presente comigo me
orientando e guiando para o caminho certo. A UFF por abrir as portas para que eu
pudesse concluir esse curso tão difícil e lindo que é.*

Agradecimentos

À minha mãe Izolda Dantas de Araújo; ela foi uma das principais incentivadoras para que eu terminasse esse curso, foi nela em que me apoiei nas horas mais difíceis da minha vida. À minha avó Francisca Alves de Araújo minha segunda mãe, a partir dela tive força e dedicação em terminar o curso. À minha esposa Juliana Patrícia Graciano Pessoa de Araújo, onde soube me apoiar, me ajudar, me compreender e me aceitar, sou muito feliz em poder ter uma esposa tão dedicada e atenciosa como ela. Aos meus familiares que me incentivaram direta e indiretamente nesta conquista.

Ao Laboratório MediaLab que me aceitou e apoiou, dando suporte para que eu pudesse terminar essa dissertação e o curso. Aos Professores: Esteban Walter Gonzalez Clua meu orientador que me aceitou para ser seu orientando e me ajudou bastante dando orientações no meu projeto. Ao meu coorientador Luiz Marcos Garcia Gonçalves que me orientou na minha graduação na UFRN me dando total apoio a continuar estudando e pesquisando. Aos Professores da Pós-Graduação em Computação da UFF pela dedicação e ensinamentos aos quais levarei para a vida profissional.

À UFF que me proporcionou uma vida acadêmica de excelência.

Aos amigos adquiridos na UFF e UFRN.

À Marinha do Brasil pelos 7 anos me apoiando.

Resumo

Veículos marítimos autônomos vêm ganhando importância em diferentes aplicações, tais como atividades de risco, monitoramento ambiental, repetição ou ambientes adversos de operação, inspeção de estruturas de plataformas, transportes e logística de bens, localização de objetos no fundo do mar e levantamentos batimétricos.

Nesta dissertação propomos e apresentamos uma arquitetura para controlar e desenvolver veleiros monocascos totalmente autônomos, considerando como meio de propulsão primária a vela e tendo sua direção ditada por um leme. Nossa arquitetura também prevê a presença de um motor de popa elétrico para realizar manobras de risco. Também inclui a utilização de painéis solares para controle de energia. Nossa proposta permite integrar todos estes elementos juntamente com uma série de sensores auxiliares para a navegação.

Em função da complexidade e imprevisibilidade das condições de navegabilidade, a arquitetura proposta inclui um controlador que envolve variáveis matemáticas não lineares.

Para validar a proposta deste trabalho, esta arquitetura foi implementada e embarcada em um veleiro real, denominado F-Boat. Foram realizados testes reais, com resultados baseados numa telemetria detalhada. Estes experimentos verificaram o funcionamento da presente proposta, bem como demonstraram a capacidade de criar e programar comportamentos autônomos mais complexos no futuro.

Palavras-chave: Barco Autônomo, Sistemas de Controle, Inteligência Artificial.

Abstract

Autonomous marine vehicles are gaining importance in different applications, such as risk activities, environmental monitoring, repeat or adverse operating environments, inspection of platform structures, transport and logistics of goods, location of objects on the seabed and bathymetric surveys.

In this dissertation we propose and present an architecture to control and develop fully autonomous monohull sailboats, considering the sail as a means of primary propulsion and having its direction dictated by a rudder. Our architecture also provides for the presence of an electric outboard motor to perform risky maneuvers. It also includes the use of solar panels for energy control. Our proposal makes it possible to integrate all these elements together with a series of auxiliary sensors for navigation.

Due to the complexity and unpredictability of navigability conditions, the proposed architecture includes a controller that involves non-linear mathematical variables.

To validate the proposal of this work, this architecture was implemented and boarded in a real sailboat, called F-Boat. Real tests were carried out, with results based on detailed telemetry. These experiments verified the functioning of the present proposal, as well as demonstrated the ability to create and program more complex autonomous behaviors in the future.

Keywords: Autonomous Boat, Control Systems, Artificial Intelligence.

Lista de Figuras

1	F-Boat	14
2	Representação da manobra do barco utilizando o leme, de acordo com o vento aparente.	20
3	Representação da manobra do barco utilizando o leme	21
4	Representação da manobrabilidade do barco utilizando o leme. A cana do leme (seta branca na popa do barco) gira para o lado contrário à direção em que se deseja rotacionar o veleiro.	22
5	Denominação das diversas mareações (angulações da vela) em função da direção do vento.	23
6	Principais sistemas de coordenadas adotados no trabalho para formalizar matematicamente a navegação.	26
7	Diagrama Geral da Plataforma do Barco Autônomo	41
8	Diagrama de componentes	42
9	Diagrama de conexões da Pixhawk	45
10	Diagrama da Plataforma do Barco Autônomo - COMPLETA	50
11	Jetson Xavier	51
12	Modem	52
13	Diagrama da Plataforma do Barco Autônomo do computador de visão computacional e comunicações de dados	53
14	Baterias	54
15	Disjuntor e Relé	54
16	Guincho	55
17	Sensores de vento	56

18	Diagrama da Plataforma do Barco Autônomo das baterias e do atuador da vela	56
19	Caixa de fusíveis	57
20	Pixhawk	58
21	Arduino Mega e Ponte H vnh5019	59
22	Diagrama de conexão dos módulos.	60
23	Atuador Linear	61
24	Ponte H do Atuador Linear para o controle da velocidade do motor	62
25	Diagrama da Plataforma do Barco Autônomo do controle do atuador do leme e do motor de popa	63
26	Corrente \times Curva de tensão para um painel fotovoltaico	65
27	Planta baixa das conexões elétricas	67
28	Diagrama da estrutura de orientação e controle do veleiro	70
29	Estrutura de controle com a lógica Fuzzy	71
30	Representação gráfica do ângulo do leme	72
31	Representação gráfica do ângulo da vela	72
32	Representação gráfica do ângulo de rotação - roll	73
33	Representação gráfica do ângulo de guinada - yaw	73
34	Diagrama polar de um veleiro para diferentes velocidades de vento. Mostra a velocidade esperada do veleiro para cada ângulo de ataque.	75
35	Representação gráfica do VMG.	75
36	Ângulos máximos	76
37	Estrutura de controle com jibe	77
38	Representação gráfica do ângulo do leme ao longo do tempo	78
39	Representação gráfica do ângulo da vela ao longo do tempo	78
40	Representação gráfica do ângulo de rolagem - roll ao longo do tempo . . .	79
41	Representação gráfica do ângulo de guinada - yaw ao longo do tempo . . .	79

42	Representação gráfica do consumo de Energia do Leme na cor verde e da Vela na cor vermelho	82
43	Representação gráfica do consumo de Energia em relação à tensão na cor vermelha e corrente na cor verde	83
44	Representação gráfica da velocidade do vento real na cor vermelha e aparente na cor verde	84
45	Representação gráfica da direção atual na cor verde e desejada na cor vermelha	85
46	Representação gráfica da direção do Roll na cor vermelha e da direção do Yaw na cor verde	86
47	Representação gráfica do Controle PI da embarcação para o Leme na cor vermelho e para a Vela nas cores azul e verde	87
48	Construção do F-Boat, foto mostrando a carcaça	96
49	Construção F-Boat com os compartimentos delineados	97
50	Partes do F-Boat	98
51	Planta baixa	99
52	Guincho	100
53	Atuador Linear	100
54	Motor de popa	101
55	Jetson Xavier	101
56	Pixhawk e acessórios	102
57	Arduino Mega	103
58	Arduino Uno	103
59	Ponte H vnh5019	104
60	Motor Controller, DROK PWM DC Motor Speed Controller 10-50V 60A High Power HHO RC Driver PWM Controller Module 12V 24V 48V 3000W Extension Cord with Switch	104
61	Baterias Náutica 11Ah Moura (antiga 105Ah)	105

62	Disjuntor Bipolar Dc Cc Sistema Fotovoltaico Solar 40a 1000v	105
63	Disjuntor Som Automotivo 70a 80a 100a 120a 140a 150a 200a	106
64	GIGAVAC GX16CE DC Contatora - Continuous Current (Amps) 600A Coil Voltage 24Vdc Dielectric At Sea Level (Leakage < 1mA) 2200 Vrms Contact Voltage, Operating Max 800 Vdc	106
65	Botão Emergência Vermelho Stop / Gira Jng + 1nf	107
66	Potenciômetro de 10k	107
67	Anemômetro e Biruta	108
68	Modem 4g wi-fi md-4000	108
69	Conversor Dc Dc Entrada 10-32v Step Up Saida 12-35v 150w	109
70	Controlador de Carga MPPT	109
71	Painel solar 150W Resun Solar - RS6E 150P	110
72	Caixa Porta Fusível 8 Vias Led Universal Fueltech Pandoo	110
73	Caixa Estanque Seasub Grande	111
74	Prensa cabo	111
75	Barramento Neutro/terra 10 Furos	112
76	FrSky Taranis X9D Plus 2019 ACCESS w/ X8R 16CH Receiver - Silver . .	112
77	ZED 2 Stereo Câmera	113
78	SP360 4K - DUAL PRO PACK - INCLUDES (2) SP360 4K VR CÂMERAS	113
79	8 P Rj45 Conector Pcb E Kit De Placa De Fuga Para Verificação Ethernet Não Solda X30	114

Lista de Tabelas

1	Notação náutica SNAME.	27
2	Notação matemática	29
3	Projetos de veleiros autônomos	38
4	Modelagem, simulação e controle de veleiros	39
6	Jetson	51
8	Modem	52
9	Baterias	53
10	Disjuntor e Relé	54
11	Guincho	55
13	Sensores de vento	56
15	Caixa de energia	57
17	Caixa de energia	58
19	Arduino e Ponte H	59
20	Atuador linear	61
22	Arduino e Ponte H	62
23	Especificações do veleiro	97

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASV	: Veículos de superfície autônomos;
IMU	: Unidade de Medida Inercial;
CNN	: Métodos baseados em redes profundas;
DOF	: Degrees of Freedom;
GPS	: Global Positioning System;
MPP	: Ponto de potência máxima;
MPPT	: Rastreamento do ponto de máxima potência;
P	: Controlador Proporcional;
PI	: Controlador Proporcional + Integral;
PD	: Controlador Proporcional + Derivativo;
PDI	: Proporcional + Integral + Derivativo;
RL	: Reinforcement learning;
SNAME	: Society of Naval Architects and Marine Engineers;
VMG	: Velocity Made Good;
VSNT	: Veículos de superfície não tripulados;
VPP	: Velocity Prediction Program;
UFRN	: Universidade Federal do Rio Grande do Norte;
UFF	: Universidade Federal Fluminense;
DCA	: Departamento de Engenharia de Computação e Automação;

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Objetivo	12
1.1.1	F-Boat	13
1.2	Motivação	14
1.3	Contribuições	16
1.4	Justificativa e Aplicações	17
1.5	Organizações do Texto	18
2	Conceitos teóricos	19
2.1	Elementos de um Sistema de Navegação a Vela	19
2.1.1	Vento Real e Vento Aparente	20
2.1.2	Força Motriz Resultante	20
2.1.3	Controle do Leme	21
2.1.4	Manobras de vela	22
2.2	Modelagem do Barco Autônomo	25
2.2.1	Referenciais (Sistemas de Coordenadas)	25
2.2.2	Cinemática	27
2.2.3	Dinâmica	28
2.3	Teoria de Controle de Veleiros Autônomos	31
2.3.1	Controle proporcional + integral + derivativo (PID)	33
2.3.2	Controlador Proporcional (P)	33
2.3.3	Controlador Proporcional + Integral (PI)	33

2.3.4	Controlador Proporcional + Derivado (PD)	34
2.3.5	Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	35
2.3.6	Controle Inteligente do tipo lógica <i>fuzzy</i>	35
3	Trabalhos relacionados	37
4	Arquitetura de hardware	41
4.1	Eletrônica embarcada	43
4.1.1	Driver dos atuadores	43
4.1.2	Arduinos	43
4.1.3	Sensores de posição dos atuadores	44
4.1.4	Sensores de vento	44
4.1.5	Pixhawk	44
4.1.6	Conexões do Autopilot na Pixhawk	44
4.2	Arquitetura de hardware para veleiro monocasco	49
4.2.1	Módulo do computador de visão computacional e comunicações de dados	51
4.2.2	Módulo das baterias e do atuador da vela	53
4.2.3	Módulo do gerenciamento da energia solar e dos hardwares para controle dos atuadores	57
4.2.4	Módulo do controle do atuador do leme e do motor de popa	60
4.3	Abordagens de geração de energia	63
4.4	Sensores e Processamento Visual	68
5	Arquitetura de software	69
6	Resultados alcançados	81
6.1	Experimentos práticos	81
7	Conclusão	89

7.1	Perspectivas de novos desenvolvimentos	90
	REFERÊNCIAS	91
	Apêndice A - ANEXO A – EQUIPAMENTOS USADOS	96
A.1	Características do F-Boat	96
A.1.1	Equipamentos usados no F-Boat:	100
	Apêndice B - ANEXO B – Códigos-fontes	115

1 Introdução

O desenvolvimento de técnicas de navegação para embarcações autônomas e a implementação prática de sistemas para torná-las completamente autônomas são temas de pesquisa que ainda têm sido pouco explorados na literatura. Observa-se, no entanto, que, ultimamente, vêm sendo realizadas intensas investigações sobre veículos de superfície não tripulados (VSNT ou ASV, da sigla em inglês - *Autonomous Surface Vehicle*). Um tipo específico de ASV são os veleiros robóticos, sendo este o elemento prático-implimentacional principal do tópico de pesquisa desta dissertação. Especificamente, estudamos maneiras de automatizar completamente o veleiro robótico para que ele consiga atuar em um ambiente de superfície aquática sem intervenção humana, neste caso podendo agir sem a necessidade de ter um velejador embarcado.

1.1 Objetivo

Essa dissertação tem como objetivos focar no desenvolvimento dos sistemas computacional, elétrico e eletrônico, que tornam o veleiro totalmente autônomo, sendo ele movido à propulsão a vela e eventualmente com um motor de popa para ajudar na navegabilidade. Observamos que os dados fornecidos possuem certo grau de incerteza e envolvem variáveis matemáticas não lineares, visando controlar qual a posição da vela quando ocorrer um vento de uma determinada posição ou até mesmo controlar o leme indicando qual lado que o barco irá virar, o que gera um certo grau de complexidade. Essas complexidades foram estudadas e compreendidas de tal forma que chegamos ao problema principal a ser resolvido, que é determinar quais os ângulos da vela e o do leme que o sistema de controle barco terá que atuar sobre para fazer a embarcação chegar a uma determinada posição geográfica.

Assim, a solução para o problema em foco resume-se em desenvolver a arquitetura e os controladores de baixo nível, para se obter autonomia para o veleiro, partindo de um ponto inicial em direção a um alvo em tempo aceitável e que possam ser reproduzidos em

outro tipo de embarcação.

Portanto, o sistema a ser controlado deve ser melhor compreendido, bem como as suas variáveis e parâmetros identificados, que queremos controlar. Com o estudo preliminar sobre a arte da navegação e de um controlador inicial implementado no MATLAB (JÚNIOR et al., 2013), podemos perceber que, por simplicidade, as únicas variáveis a serem controladas são a velocidade e o deslocamento angular da direção do barco em relação à direção do alvo. Isso significa modificar o ângulo de incidência do vento na vela e a orientação do leme mapeada nos ângulos finais do leme e do atuador da vela.

De fato, no decorrer deste trabalho, participamos no *design* e construção do protótipo atual do veleiro robótico F-Boat, mostrado na Figura 1, sobre o qual desenvolvemos nosso tema de dissertação de mestrado.

O F-Boat é uma embarcação com navegação a vela, autônoma, capaz de receber informações de sensores como GPS, anemômetro, biruta e IMU - (Unidade de Medida Inercial) e com capacidade de traçar uma rota entre dois ou mais pontos. No caso de um veleiro robótico, navegar de forma autônoma é basicamente controlar a vela e o leme por meio de servomotores e visão computacional (SANTOS; JUNIOR et al., 2016). O F-Boat consegue também comunicar-se com alguma estação base em terra para realizar uma tarefa de movimentação no mar, ou mesmo em rios, lagoas e lagos. Para proporcionar a direção de curso, o sistema de navegação utiliza energia armazenada e fornecida por duas bateria de 12V. Abastecer as células de energia tem que ser uma tarefa também autônoma (energia solar é utilizada), estando no escopo de outro trabalho do grupo (CORREA et al., 2021). Ainda, um dos principais objetivos das pesquisas com o F-Boat é obter um projeto abrangente, que vise a construção de um veleiro-robô autônomo projetado para realizar diversas missões, com diferentes finalidades.

1.1.1 F-Boat

O F-Boat é um projeto da Universidade Federal Fluminense em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, onde foi desenvolvido um veleiro com finalidade de monitorar, em um projeto piloto, as águas na Baía de Guanabara. Com o intuito de colaborar na atenção da demanda ambiental, um grupo de pesquisadores da UFF juntamente com a equipe do projeto N-Boat da UFRN iniciaram esse projeto. Alunos e docentes dos Departamentos de Engenharia Elétrica (TEE-UFF), Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (TGH-UFF), e do Instituto de Computação (IC-UFF), desenvolveram em conjunto com a equipe da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

uma embarcação autônoma para monitoramento da água das baías e lagoas de Niterói. A iniciativa também tem apoio financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Prefeitura de Niterói, Marinha do Brasil e da empresa nVidia, líder mundial em soluções de Inteligência Artificial e sistemas computacionais de alto desempenho embarcado. Abaixo pode-se ver as fotos de sua montagem e configurações. A construção do F-Boat foi realizada por uma empresa naval na cidade Natal/RN, finalizada no início de 2021.



Figura 1: F-Boat

1.2 Motivação

De forma geral, os ASV ainda estão restritos no que se refere ao seu alcance, devido a capacidade das baterias a bordo ou a quantidade de combustível necessária para missões de longo tempo. Vale salientar que devido a essas dificuldades, ultimamente, vem ocorrendo o desenvolvimento de sistemas semiautônomos, em que somente um grupo de funcionalidades é automatizado, como por exemplo, as engrenagens responsáveis pelo di-

recionamento para controle do leme e poucos ajustes automáticos da vela, caso seja esse tipo de embarcação, a fim de que o barco consiga alcançar a maior velocidade possível e direção desejada.

Todas essas funcionalidades necessitam de ajustes finos para que a embarcação consiga fazer seus deslocamentos com bastante precisão. Contudo, todo esforço realizado pela embarcação influencia diretamente no seu desempenho, de acordo com a finalidade da aplicação. Por exemplo, alguma dificuldade pode ser encontrada caso uma embarcação não consiga fazer os movimentos básicos de navegação, como atracar, desatracar, chegar ao um ponto ou desviar de obstáculos, com a precisão igual a que um ser humano faria. Nessas situações, o uso de técnicas de inteligência artificial pode ajudar na economia de tempo, na redução de acidentes, na economia de combustível e na busca de soluções para problemas, desde que possam ser tratados com os modelos dirigidos a dados.

Esses modelos têm sua utilização ideal em aplicações de longa duração, sendo o caso do monitoramento marítimo (costeiro ou oceânico) de longo prazo por uma embarcação, em que dados de qualidade da água devem ser adquiridos por sensores e enviados usando telemetria a um sistema que faria o processamento e disponibilização desses dados a órgãos gestores. Outra aplicação interessante é a tarefa de travessia do Oceano Atlântico, tal como proposta no Microtransat Challenge ([MICROTRANSAT](#), s.d.). Ainda, o monitoramento da nossa zona territorial marinha é exemplo de atividade que pode ser classificada como sendo de longa duração.

Em aplicações de longa duração como as visionadas no parágrafo anterior, as principais características de uma embarcação autônoma, idealmente, devem ser: 1) ser energeticamente autossuficiente; 2) ter todo o controle de seus atuadores sendo realizado a bordo e gerenciado por uma estação de terra; e 3) ser capaz de desviar de obstáculos e executar suas trajetórias pré-definas. ([SANTOS, 2020](#))

Um robô que navega totalmente autônomo deve realizar o planejamento de trajetórias sem qualquer tipo de auxílio humano. Uma rota ótima deve ser calculada com base em um mapa cartográfico e em dados meteorológicos (força e direção do vento, maré, correntezas, dentre outros), a fim de navegar com segurança (evitando colisões) nos mais diversos tipos de situações. Assim sendo, a embarcação deve possuir algumas características como sendo auto-suficiente energeticamente, no caso de veleiros usar a força do vento como fonte de propulsão, ter a bordo todo o seu controle, mas sendo gerenciado por comandos em terra e ter capacidade de verificar e desviar de obstáculos. Embora alguns desenvolvimentos e melhorias nas técnicas de navegação de veleiros já tenham ocorrido até o momento,

esforços para torná-los totalmente autônomos ainda são considerados insuficientes pela comunidade científica.

1.3 Contribuições

Nesse sentido, neste trabalho, foram utilizadas tecnologia de ponta para a implantação de equipamentos mecânicos, elétricos e eletrônicos, e também seus controladores, propondo um novo modelo de projeto arquitetônico de um veleiro autônomo. (SANTOS; JUNIOR et al., 2016) Como dito acima, até o momento, o robô veleiro da Figura 1 foi projetado e construído, com todos os componentes elétricos e eletrônicos já embarcados como mostrado na Figura 8. A arquitetura concebida para ele, pretende apoiar o desenvolvimento de estratégias baseadas na utilização de aprendizado por reforço (RL - sigla das palavras em inglês) para a aquisição de competências básicas de navegação. Uma abordagem de navegação baseada em RL de alto nível foi testada em simulação (SILVA JUNIOR et al., 2020) e a ideia é estendê-la usando a arquitetura proposta aqui de forma a transmitir novas técnicas a serem desenvolvidas para navegação robusta em aplicações de longa duração.

Assim, a contribuição principal desta dissertação consiste em propor uma nova arquitetura com o *design* elétrico, mecânico e eletrônico melhorado para veleiros autônomos conforme verificado nos outros projetos mostrados nessa dissertação e mencionados no Capítulo 3. Nossa arquitetura possui equipamentos mais robustos e atualizados, e itens adicionais como placa solar e motor elétrico. Além disto, foram desenvolvidos os controladores de baixo nível que serão usados para conduzir a embarcação usando técnicas de controle. Com base na literatura, explanaremos os motivos para conceber controladores bem simples e já utilizados, com algumas adaptações, para controlar o trajeto da embarcação. Para o leme, planejamos inicialmente um controlador proporcional, integral e derivativo PID e para a vela propomos um controlador *fuzzy* adaptado, que corrigirá o posicionamento angular da vela em função da direção do vento, porém após testes em simulação percebeu-se que o parâmetro D do PID pode ser desconsiderado, desta forma criamos um controlador PI simplificado para o leme, e para a vela trocamos o controlador *fuzzy* por um controlador por coordenadas polares por ser mais eficientes em manobras de jibe ¹. Para os testes práticos iniciais, foram utilizados controladores PI para o leme e

¹Jibe, também conhecido como Cambada à direita ou à esquerda ou Virada à direita ou à esquerda, é uma manobra feita para mudar a direção do barco, mas, diferentemente da Cambada, é realizada com a proa a favor do vento. Trata-se de uma manobra mais arriscada, já que, com uma maior velocidade do vento e navegando-se a favor dele, o barco ganha impulso com mais facilidade e há risco da retransa,

para a vela, mostrando-se, este tipo de controle, efetivo nos testes realizados.

Também adotamos aqui outro modelo de controlador para a vela, usando um modelo baseado em coordenadas polares. No topo dessa arquitetura criamos uma estratégia simples para executar um comando de jibe, o que demonstra que nossa abordagem pode ser usada para criar estratégias para movimentos muito simples. Ambos podem fazer parte de um planejamento de caminho de nível hierárquico superior e seguir uma estratégia baseada em aprendizado de máquina, que é o nosso objetivo futuro. Além disso, fornecemos documentação para o projeto elétrico, mecânico e eletrônico, que inclui sensores como biruta, anemômetro, bússola, câmeras (360 graus e 3D), um sistema de alimentação de painéis solares e um motor sobressalente que pode ser usado para resgatar e salvar o veleiro em caso de emergência.

Esta dissertação tem ainda como contribuição documentar a experiência do projeto desenvolvido que consiste na criação e montagem de um barco autônomo, onde se fez necessária a junção de equipamentos de hardware com o desenvolvimento de software, na sua arquitetura. O hardware é composto basicamente por equipamentos do tipo sensores, atuadores, microcontroladores e microcomputadores. Já o software desenvolvido é a parte lógica do sistema, responsável pela inteligência embarcada. Desenvolvemos um sistema de controle para comandar os sistemas mecânicos do veleiro, que irá atuar juntamente com os sensores e atuadores para poder fazer a correção do ângulo da vela e do ângulo do leme, relacionando-os com a velocidade do vento para que o veleiro possa chegar a pontos pré-determinados no planejamento de trajetória.

1.4 Justificativa e Aplicações

Enquanto que ultimamente vêm sendo realizadas intensas pesquisas sobre veículos de superfície autônomos (ASV) que empregam motores elétricos ou de combustão, uma vez que, o seu controle é de mais fácil acesso e não dependem inteiramente de fatores ambientais para se locomoverem, veículos movidos a energia por placas solares ainda apresentam muitos desafios. Veículos motorizados estão restritos no que se refere ao seu alcance, devido à capacidade das baterias a bordo ou a quantidade de combustível, o que acarreta uma significativa desvantagem em relação aos veleiros, já que estes requerem de uma quantidade muito menor de energia, necessário para alimentar os sensores, atuadores, computador de bordo e ajuste da posição da vela e do leme.

tubo horizontal que sustenta a vela, golpear a tripulação. A vela muda rapidamente de lado, movimento que deve ser acompanhado pelo(s) velejador(es) (OLIMPICO, s.d.).

A título de aplicações, tal sistema tem a vantagem de poder ser utilizado em missões de longa duração. Seu emprego em monitoramento é imediato, com a ideia de se realizar análise da qualidade de água da Baía da Guanabara.

1.5 Organizações do Texto

Nessa perspectiva, o conteúdo desta dissertação foi organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 explana a apresentação de conceitos técnicos referente à navegação, como também é apresentado à modelagem de veleiros autônomos e a teoria de controle; o Capítulo 3 aborda de maneira ampliada os veleiros autônomos e trabalhos relacionados; o Capítulo 4 versa sobre a arquitetura de hardware ; Capítulo 5 mostra a arquitetura de software e implementação do controlador; o Capítulo 6 disserta sobre resultados alcançados e os experimentos práticos; Capítulo 7 compreende as considerações finais e os aspectos futuros para este trabalho; já o Capítulo 8 são às referências; Por fim, os apêndices A e B trazem os equipamentos usados e os links para os códigos fontes e vídeos dos testes práticos.

2 Conceitos teóricos

Um veleiro que pretende operar de forma autônoma no mar deve sobrepassar por todos os desafios trazidos por fenômenos ambientais, tais como ondas, vento, salinidade da água e temperatura, entre outros. A maioria desses fenômenos podem ser representados por variáveis dinâmicas, o que é uma alternativa natural para a design e construção do hardware e para a análise e comparação dos sistemas e técnicas de navegação autônoma. Assim, para melhor compreender e para poder projetar e implementar um veleiro totalmente autônomo, é necessário reunir alguns conteúdos multidisciplinares. Neste capítulo, abordamos os principais conceitos, com questões importantes relacionadas ao sistema de navegação a vela, a modelagem do veleiro autônomo envolvendo cinemática e dinâmica e fechamos o capítulo com um pouco de teoria de controle (controladores PI, PID e *Fuzzy*). O gerenciamento de energia também é crucial no projeto arquitetônico do veleiro, porém, não faz parte do escopo desta dissertação. Aqui focamos nas premissas para se modelar uma embarcação autônoma monocasco com a utilização de conceitos da Física cinemática e dinâmica e as suas aplicações, além de explicar sobre o formalismo de sistemas de controle para veleiros, com uma implementação prática dos mesmos. Com o perfeito entendimento do controle do leme e das manobras de vela, será possível planejar e elaborar uma estratégia de navegação a vela eficaz usando controladores PI, PID e/ou *Fuzzy*.

2.1 Elementos de um Sistema de Navegação a Vela

Em geral, no caso de sistemas de navegação em ambientes aquáticos, as formas de energia disponíveis mais importantes são a eólica, solar e maremotriz. No que diz respeito à propulsão, as embarcações que utilizam a força propulsora do vento como fonte primária são denominadas veleiros. As velas são responsáveis por transferir a força do vento para a propulsão do barco não dependendo de motor para esta finalidade. Segundo Belcher ([BELCHER, 1982](#)), o uso de barcos movidos pelo vento é a melhor alternativa para tarefas de longo prazo. No escopo do presente trabalho, entre os elementos físicos principais

do sistema, podemos destacar o controle do leme e as manobras envolvendo vela. As definições de vento aparente e resultante são vistas a seguir.

2.1.1 Vento Real e Vento Aparente

Um elemento que deve ser levado em consideração e que aparece apenas quando o barco está em movimento, sendo essencial na navegação à vela, é o denominado de vento aparente, cujo conceito está ilustrado na Figura 2. Este vento pode ser entendido como o vento resultante considerando-se vetorialmente o movimento e direção de uma embarcação e a intensidade e direção do vento real que incide nas suas velas. Assim, de forma prática, no cômputo do vento aparente, deve-se notar as variações de direção e intensidade que podem ocorrer no vento real, bem como a variação da velocidade e direção do barco. Ressalta-se que o F-Boat possui um sensor anemômetro que capta a velocidade e direção do vento. Neste caso, pode ocorrer ainda uma variabilidade nos dados desse sensor devido à velocidade e direção atual do veleiro. Isso será tratado adequadamente no desenvolvimento e implementação dos controladores.

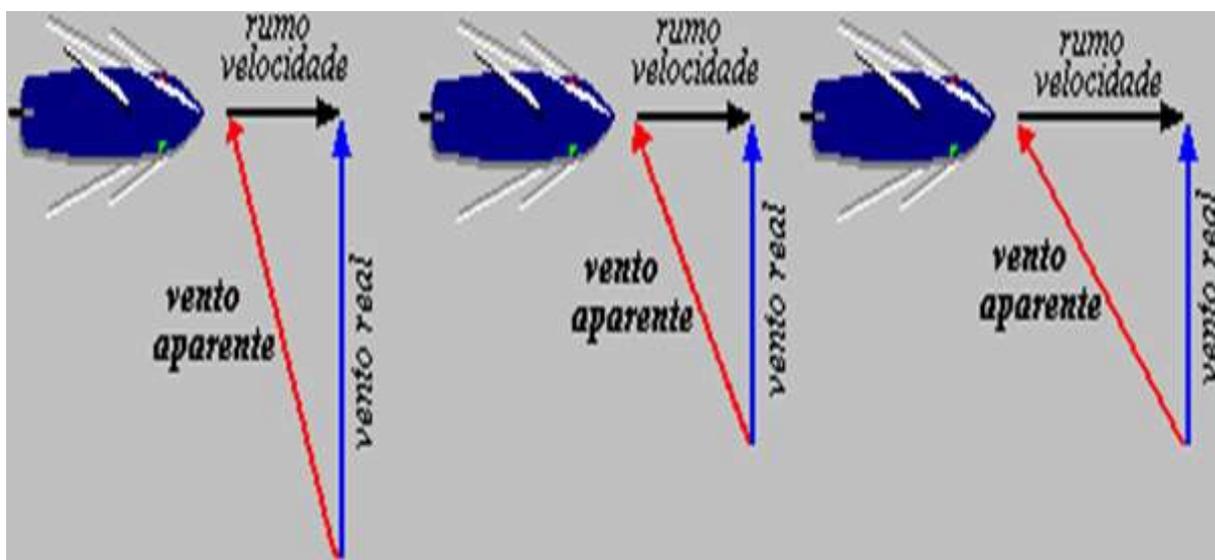


Figura 2: Representação da manobra do barco utilizando o leme, de acordo com o vento aparente.

([COELHO, s.d.](#))

2.1.2 Força Motriz Resultante

Além de questões relacionadas ao vento aparente, o ambiente onde uma embarcação se desloca também influencia no seu desempenho. Existem as chamadas forças externas,

como por exemplo, as correntes e o vento real que geram um abatimento ou deriva no rumo da embarcação a corrente e o vento real agem transversalmente sobre o veleiro, retirando-o da rota a médio prazo. Ou seja, não se pode aproar a embarcação diretamente ao alvo, sendo necessário calcular e indicar uma direção resultante que compense essa deriva. Esta direção será calculada em função da força correnteza da água, da possível força exercida lateralmente pelo vento real que pode ser negligenciada, a curta distância, da velocidade do barco e da distância e direção do alvo a ser atingido.

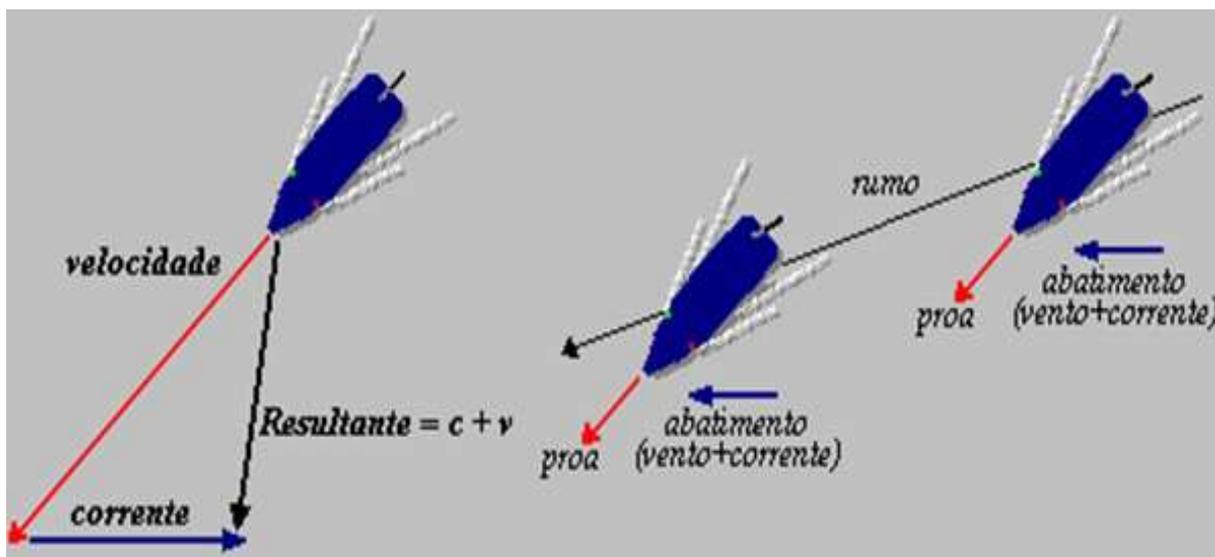


Figura 3: Representação da manobra do barco utilizando o leme
(COELHO, s.d.)

Desta forma, em curtas distâncias, a direção resultante pode ser indicada simplesmente pela soma vetorial da correnteza da água com a velocidade do barco. No caso geral, considera-se o abatimento como sendo composto pela corrente mais o vento, conforme indicado na Figura 3.

2.1.3 Controle do Leme

O leme é utilizado para dar a direção de um barco à vela, assemelhando-se ao volante de um carro que dita o direcionamento de suas rodas girantes normalmente as rodas da frente. Em um veleiro, o leme é uma peça submersa geralmente acoplada ao casco no painel de popa ou próximo deste que, na sua posição natural, está sempre alinhado à extensão da embarcação. O leme é manobrado por uma roda ou por uma cana de leme que o faz girar em torno de um eixo, alterando assim a sua angulação. Quando se usa uma roda de leme, o resultado assemelha-se ao de um volante em um veículo automotivo,

enquanto que com o uso da cana do leme o resultado é o oposto, isto é, a atuação é sempre feita no sentido contrário ao lado para onde se quer manobrar. É modificando a direção do leme que se altera a direção desejada para o veleiro, conforme ilustrado na Figura 4. Se a parte posterior do leme em relação à frente ou proa da embarcação for direcionada para a esquerda o rumo será para bombordo (esquerda), e se leme for deslocado para a direita, a embarcação tomará o rumo a estibordo (direita). Note que no caso de se usar uma cana de leme, deve-se girar a cana que se encontra normalmente conectada à parte frontal do leme no sentido oposto ao que se deseja direcionar o barco. Ressalta-se ainda que o leme só produz algum efeito uma vez que o barco esteja navegando com movimento em relação à água.

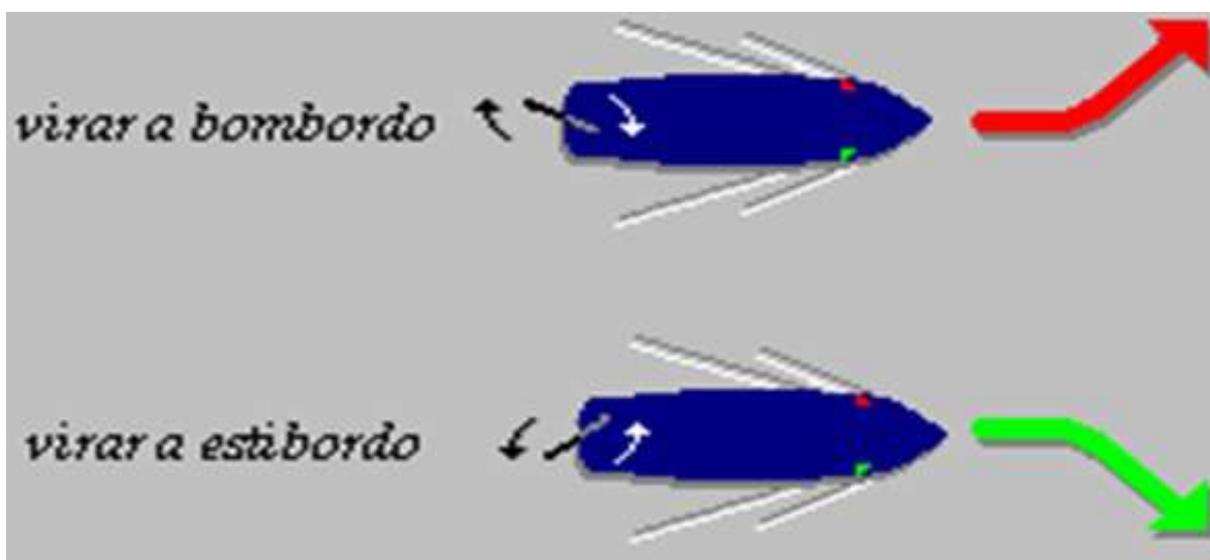


Figura 4: Representação da manobrabilidade do barco utilizando o leme. A cana do leme (seta branca na popa do barco) gira para o lado contrário à direção em que se deseja rotacionar o veleiro.

(COELHO, s.d.)

2.1.4 Manobras de vela

Como visto acima, o vento é o principal meio de propulsão nas embarcações a vela, embora, neste projeto, o motor possa servir também como um meio de propulsão auxiliar, a ser utilizado principalmente nas manobras de acostagem, quando se fundeia, ou ainda quando não há vento. Entretanto, de maneira sintética, podemos assumir que o vento é o combustível de um veleiro e a(s) vela(s) o seu motor. Assim, a ação de velejar é a forma de manobrar as velas em função do vento, direção e intensidade, de acordo com o rumo que se quer seguir, paralelamente às manobras de leme, descritas acima. A Figura

5 mostra os principais movimentos e direcionamentos que se deve dar à vela em função da direção do vento (mareações) e de acordo com a direção que o barco deve seguir.



Figura 5: Denominação das diversas mareações (angulações da vela) em função da direção do vento.

(COELHO, s.d.)

Inicialmente, pode-se ver no diagrama mostrado que nem todas as direções de destino podem ser seguidas pelo veleiro. De fato, dada a direção do vento, é impossível ir em qualquer direção que esteja em uma região angular de direções em relação a esta, isto é, é impossível o veleiro ganhar velocidade em um cone de direções contra o vento. Isso deve ser considerado no desenvolvimento do controlador autônomo para o veleiro robótico. Com isso em mente, sabe-se que o projeto e implementação de controladores usando a teoria de controle clássica envolve a determinação de equações que modelam o sistema, que não é uma tarefa trivial para veleiros devido às variáveis altamente não lineares, como a corrente da água e a direção do vento.

Além disso, a deriva causada por mudanças na direção e velocidade do vento é também uma variável instável. O movimento de um veleiro, em geral, não é tão rápido, permitindo que certas restrições e suposições possam ser estabelecidas. Por exemplo, usando uma lei de controle que funciona com base na minimização de erros para o alvo e assumindo que

a velocidade da corrente da água é menor do que a velocidade do vento, em uma situação geral de movimento, o efeito da corrente de água pode ser desprezado nas variáveis do sistema.

Vale salientar que o projeto F-Boat possui somente uma vela, não necessitando da segunda vela para adquirir mais velocidade, pois esse não é um dos seus objetivos.

De fato, ela pode ser incorporada de forma transparente no modelo de erro adotado. Como nosso objetivo é desenvolver um controlador simples, porém eficaz e que possa ser aplicado a diferentes tipos de veleiros, uma alternativa pragmática é adotada. Como será visto, basicamente, a estratégia adotada é começar com a modelagem do barco. Então, utilizamos alguns modelos de controladores já existentes na literatura que foram testados no software MATLAB (PI, PID, e *Fuzzy*). A seguir, definimos um controlador final que é testado em simulador e, por fim, implementado no protótipo do veleiro. Para o controle em si, não há muitas restrições a serem aplicadas ao leme; no entanto, existem alguns para a vela principalmente devido para a região morta acima citada, com vários casos que podem ser empiricamente estabelecidos e testados. Basicamente, surgem as seguintes três situações de movimento, considerando-se o movimento de rotação da vela:

- **Veleiro na mesma direção que o vento:** Solta-se todos os cabos disponíveis para conseguir o máximo de vento possível na vela principal para obter velocidade.
- **Veleiro contra a direção do vento:** Conforme mostrado na Figura 5, é impossível obter velocidade nesta situação; assim, fazendo o barco seguir alternadamente, em linhas em cada lado da direção do vento, o veleiro pode ir para o alvo em um movimento em ziguezague.
- **Veleiro com o vento a bombordo ou estibordo:** O vento é lateral ao barco, então para obter velocidade, só necessita-se liberar cerca de metade do tamanho do cabo de forma que a vela fique em cerca de um quarto da circunferência (45 graus) direção em relação à direção do vento (nesta situação o veleiro consegue, inclusive, ser mais rápido que o vento).

As ações acima não são as mais eficazes, no entanto, eles resolvem o problema de navegação em qualquer situação de uma maneira simples, sendo suficientes para as situações enfrentadas no contexto do presente trabalho.

2.2 Modelagem do Barco Autônomo

Nesta Seção, explanamos como foi realizada a modelagem do barco com a finalidade de obtermos suas respectivas variáveis e transformá-las em uma equação final para poder ser aplicada à teoria de controle. Vale ressaltar que foram feitos estudos sobre conceitos de posicionamento robótico, dinâmica do barco e das diversas forças e momentos que nele atuam.

2.2.1 Referenciais (Sistemas de Coordenadas)

No que se refere ao estudo da cinemática de um veleiro, é empregado um sistema com seis coordenadas independentes, com a finalidade de se ter a pose do veleiro incluindo posição e orientação. Quando se controla um ASV, é imprescindível obter os dados relativos à sua pose e velocidade em relação a um referencial fixo na Terra, entretanto como toda a dinâmica de um veículo é modelada no referencial móvel, existe a necessidade de se obter transformações (que dependem de coordenadas isoladas) de um referencial para outro, conforme sugerido pela Sociedade de Arquitetos Navais e Engenheiros Marítimos ([SNAME, s.d.](#)).

Neste trabalho, adotamos o mesmo modelo usado por Santos ([SANTOS, 2020](#)), que define os sistemas de coordenadas $\{n\}$, $\{b\}$, $\{s\}$ e $\{r\}$ usando a regra de mão esquerda, conforme mostrado na Figura 6. O sistema principal do veleiro $\{b\}$ tem o dedo indicador (eixo Z) apontando para estibordo e o médio (eixo X) apontando para a proa do veleiro. O eixo Y (polegar) aponta para baixo, neste caso, por ser um sistema de mão esquerda. Este sistema é compatível com o sistema de navegação NED $\{n\}$ adotado também como de mão esquerda (vide Figura 6), assim como os outros sistemas do leme $\{r\}$ e vela $\{s\}$ que possuem apenas duas coordenadas.

Já o sistema de coordenadas $\{e\}$ é definido pela regra da mão direita, referenciando-se ao centro da Terra (vide esquema na parte inferior da mesma Figura 6). Esses sistemas devem ser compatibilizado através dos respectivos mapeamentos para mudanças de base transformações lineares visando evitar problemas com o uso indevido dos referenciais definidos.

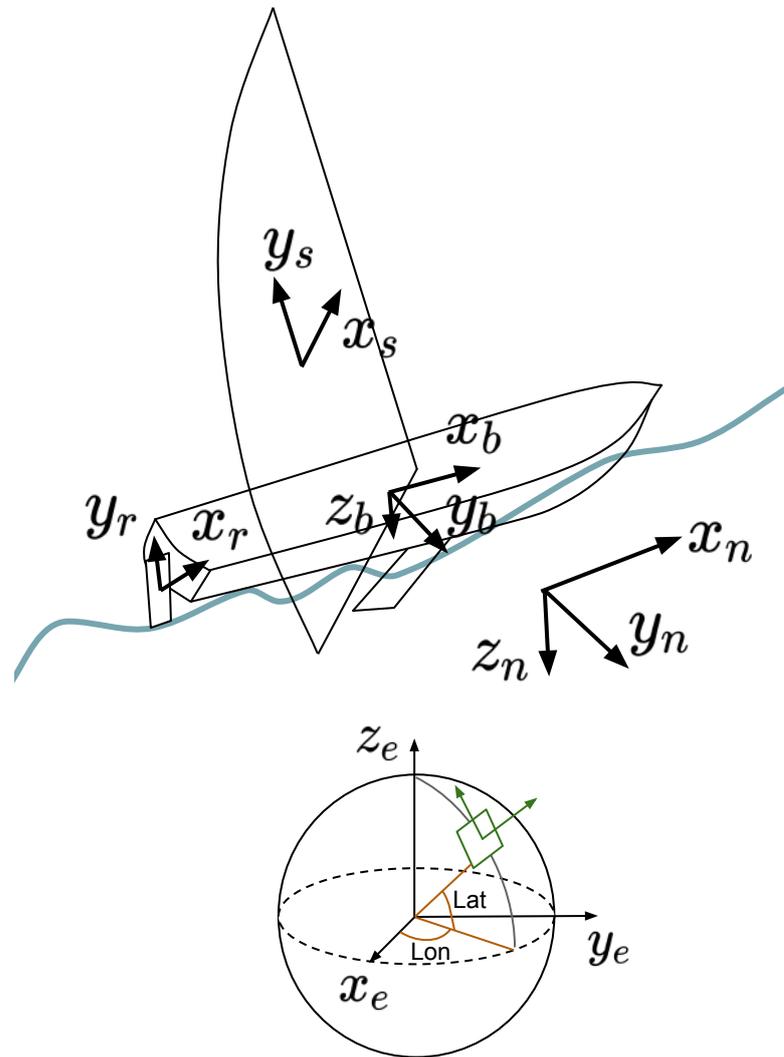


Figura 6: Principais sistemas de coordenadas adotados no trabalho para formalizar matematicamente a navegação.

De modo a um melhor entendimento, segue uma melhor explicação e/ou a definição mais formal dos sistemas adotados (SANTOS, 2020):

ECEF $\{e\}$ Referencial com origem no centro da Terra. As coordenadas de latitude e longitude são dadas nesse referencial.

NED $\{n\}$ – Norte-Leste-Baixo Referencial com origem na superfície da terra. Usado para descrever marcos locais nas proximidades do robô. Também chamado de referencial de terra plana ou referencial de mundo. Quando não há um marco natural ou posição preferível para este referencial, sua origem é definida como o ponto inicial do robô no ambiente.

CORPO $\{b\}$ Referencial com origem fixa no robô, chamado de referencial de corpo rígido. A posição e orientação é dada em relação à um referencial fixo ($\{e\}$ ou $\{n\}$). As velocidades linear e angular são dadas em relação à $\{b\}$.

VELEJAR $\{s\}$ Referencial com origem fixa na vela.

LEME $\{r\}$ Referencial com origem fixa no leme.

QUILHA $\{k\}$ Referencial com origem fixa na quilha.

Projetando o sistema para ser usado com dois referenciais cartesianos, assumimos que:

- Referencial inercial à Terra $\{X,Y,Z\}$, onde a origem do referencial está localizada no plano tangente à área de interesse;
- Referencial do corpo $\{Xb,Yb,Zb\}$, em que este sofre translação e rotação consoante com o movimento do corpo e a origem geralmente coincide com o centro de massa do veículo.

Tabela 1: Notação náutica SNAME.

	Forças e momentos	Velocidades linear e angular	Posição e ângulos de Euler
Movimento na direção x	X	u	x
Movimento na direção y	Y	v	y
Movimento na direção z	Z	w	z
Rotação na direção x	K	p	ϕ
Rotação na direção y	M	q	θ
Rotação na direção z	N	r	ψ

2.2.2 Cinemática

Para o estudo da cinemática de um veleiro, é empregado um sistema com seis coordenadas independentes como a necessidade de posicionar e orientar. Nos sistemas robóticos a localização de um objeto é calculada recorrendo a pontos referenciais (Erckens et al., 2004).

Dada à orientação do objeto em questão em relação ao referencial da Terra, é possível obter-se qualquer uma das orientações através de três rotações elementares.

$$\mathbf{R}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde $c(\alpha) = \cos(\alpha)$ e $s(\alpha) = \sin(\alpha)$.

Matriz de transformação segundo a nomenclatura em (Fossen, 1994):

$$R_b^n(\Theta_{nb}) := R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \quad (2.2)$$

$$R_b^n(\Theta_{nb}) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi c\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A ordem destas três rotações não é arbitrária em aplicações de orientação e controle, sendo esta da forma como se utiliza a convenção $-zyx-$ para descrever o movimento do corpo. A matriz de rotação é dada por R_z, R_y, R_x quando se pretende obter o referencial x, y, z . Caso se pretenda o contrário, é imprescindível inverter a ordem da matriz de transformação, sendo esta dada por R_x, R_y, R_z .

2.2.3 Dinâmica

O desenvolvimento de um modelo matemático de uma embarcação é feito por meio de equações complexas e não lineares de movimento. Estas equações devem ser descritas com seis graus de liberdade: surge(onda), sway(balançar) e heave(arremesso) para os movimentos de translação, e roll(rolar), pitch(oscilar) e yaw(guinada) para movimentos rotacionais. Porém, de acordo com o objetivo que almejamos para o controle, o modelo pode se tornar menos complexo, com pequeno grau de liberdade até alcançar à cinemática linear, uma vez que se pressupõem alterações de velocidade e posição lenta.

Em uma primeira análise pode-se excluir a altura e a rotação em pitch, devido serem residuais frente aos componentes restantes e fará com que o modelo dinâmico tenha apenas 4 graus de liberdade e, conseqüentemente, se torne mais simples. O vetor $v = [u, v, p, r]t$ representa o vetor velocidade no referencial fixo ao corpo e $\eta = [x, y, \theta, \psi]t$ é o vetor que representa, respectivamente, a posição do veleiro no referencial fixo ao corpo rígido e os

ângulos roll e yaw.

É valido advertir que todos os cálculos levaram em consideração o fato do barco estar em águas tranquilas, assim, os possíveis efeitos provocados pela corrente e ondulação frente à força do vento serão descartados.

Segundo Santos (SANTOS, 2020) o estudo da dinâmica pode ser dividido em duas partes: a cinemática, que trata dos aspectos geométricos do movimento; e a cinética, que descreve as forças que agem no veículo. A modelagem matemática aqui apresentada resulta em um modelo de simulação que possui seis graus de liberdade (6-DOF). Este modelo foi inicialmente desenvolvido por Fossen (FOSSEN, 2005, 2011) e se baseia fortemente nas definições apresentadas por Xiao (XIAO; JOUFFROY, 2014). A notação matemática é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Notação matemática

Notação	Descrição
M, M_{RB}, M_A	Matriz de inércia do sistema/corpo-rígido/massa adicional
C, C_{RB}, C_A	Matriz Coriolis-centripetal do sistema/corpo-rígido/massa adicional
I	Matriz de inércia
J	Matriz de transformação do sistema de coordenadas
τ	Vetor das forças propulsoras
ϕ, θ, ψ	Componentes roll, pitch e yaw do vetor de atitude
u, v, w	Componentes do vetor de de velocidade linear em (x, y, z)
p, q, r	Componentes do vetor de velocidade angular
\mathbf{V}_{tw}	Vetor velocidade do vento real (vento no referencial de mundo {n})
U_{tw}, γ_{tw}	Valor absoluto da velocidade e ângulo do vento real
\mathbf{V}_{aw}	Vetor velocidade do vento aparente (vento no referencial de corpo rígido {b})
U_{aw}, γ_{aw}	Valor absoluto da velocidade e ângulo do vento aparente
\mathbf{V}_v	Vento induzido pela velocidade do veleiro no referencial de corpo rígido {b}
δ_s, δ_r	Ângulo da vela e do leme no referencial de corpo rígido {b}
α_s, α_r	Ângulo de ataque da vela e do leme
ψ_t, d_t	Ângulo e distância de bordejar

De acordo com a segunda Lei de Newton temos a possibilidade de derivar as equações dinâmicas do corpo rígido da seguinte maneira:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (2.4)$$

Assim sendo, a soma das forças e dos momentos que atuam nele, em cada eixo, seguindo a nomenclatura são dados por (Fossen, 1994):

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{xx} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & -I_{xz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & -mr & 0 & 0 \\ mr & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$J_{(n)} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi c\phi & 0 & 0 \\ s\psi & c\psi c\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c\phi \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

No momento em que um corpo é introduzido em um fluido e este se desloca, gerando o movimento das partículas que o cercam, instituindo este fenômeno como a força e momento de massa acrescentada. Isto ocorre devido ao fato de que quando o barco se movimenta uma porção do fluido que se localiza logo após a proa, tenha que se movimentar para a popa, induzindo forças e momentos contrários ao movimento do corpo (Hoerner, 1985).

É relevante o fato do modelo dinâmico ser obrigado a levar em consideração a energia cinética provocada com o movimento do fluido, podendo ser entendido como um aumento da pressão no entorno do veleiro e, portanto, um aumento relativamente aparente da massa do mesmo.

Conceitualmente, afirma-se que o amortecimento viscoso é um fenômeno que ocorre por causa da pressão gerada pelo movimento do corpo. Esta se deve basicamente pela contribuição linear e quadrática da fricção na camada exterior do corpo e ao arrastamento devido aos movimentos espirais ao redor de um centro de rotação.

Para o veleiro poder se locomover na água é necessário fazer com que este se desloque da proa em sentido a popa do barco e a este movimento de partículas denomina-se de drag, que significa força de arrasto ou amortecimento viscoso. No que se refere à mecânica dos fluidos, tem-se a medida da razão de forças cinemáticas ou inerciais para as forças viscosas no fluido, assim, a proporção de força necessária para mover o fluido, é obtida pelo número adimensional de Reynold (REHM et al., 2008).

No momento em que um corpo se desloca ele cria nas suas extremidades diferentes velocidades aparentes em relação ao meio onde se localiza. A este fenômeno denomina-se de lift, sendo um conceito mais compreensível na aeronáutica, pois é a força que faz sustentar o avião a uma determinada altitude.

A força provocada pelo vento para impulsionar o barco está atrelado geralmente ao ângulo que este faz com a vela. Portanto, segundo Alves (ALVES, 2010), as forças e momentos que atuam no corpo rígido são dados por:

$$\begin{aligned}
& (M_{RB} + M_{A(\text{Hidrodinâmica})})V + (C_{RB(\text{Dinâmica}(\text{centro de massa}))})V + (C_{A(\text{Hidrodinâmica}(\text{coriolis e centrípeto}))})V + \\
& (D_{K(\text{Lift}(\text{forças e os momentos gerados pela quilha}))})V + (D_{H(\text{Lift}(\text{força resultante do casco}))})V + g(n) \\
& = \tau_s + \tau_r \Leftrightarrow (M_{RB} + M_{A(\text{Hidrodinâmica})})V = \tau_s + \tau_r - (C_{RB(\text{Dinâmica}(\text{centro de massa}))})V \\
& + (C_{A(\text{Hidrodinâmica}(\text{coriolis e centrípeto}))})V - (D_{K(\text{Lift}(\text{forças e os momentos gerados pela quilha}))})V \\
& \quad - (D_{H(\text{Lift}(\text{força resultante do casco}))})V - g(n)
\end{aligned}$$

2.3 Teoria de Controle de Veleiros Autônomos

São vários os requisitos envolvidos em uma embarcação à vela autônoma, desde a concepção do projeto mecânico, elétrico e eletrônico até o seu controle. Nesta seção, fornecemos um histórico mais detalhado sobre os modelos de orientação e controle de vela que podem ser aplicados em nossa proposta de arquitetura de veleiro, a fim de compreender melhor as estratégias de movimento adotadas. A grosso modo, um veleiro robótico pode ser caracterizado como um ASV que se move para um objetivo desejado por meio da propulsão do vento em um conjunto de velas e tendo sua direção ditada por um leme (SANTOS; JUNIOR et al., 2016). Nesse tipo de embarcação, o retorno dos dados dos sensores tem certo grau de dificuldade e a modelagem desses dados geralmente envolve variáveis matemáticas não lineares. Por exemplo, controlar a posição da vela quando há vento de uma determinada posição ou mesmo controlar o leme indicando para que lado o barco vai virar gera um grau de complexidade muito alto.

Basicamente, o problema de controle de orientação de um veleiro é geralmente resolvido por meio da determinação de uma equação que otimiza os ângulos da vela e do leme, ao mesmo tempo, considerando as posições do barco e da corrente alvo, e variáveis como direção do vento, água corrente, velocidade do barco e outros. Observe que a meta

pode não ser alcançável em todas as direções possíveis do vento. Na verdade, para algumas direções (por exemplo, contra o vento), o veleiro não pode se mover para frente. Nessas situações, deve-se fazer uma virada, ou ziguezague, para atingir a meta. Assim, o problema de controle pode ser dividido em duas situações distintas: (1) o veleiro pode ir direto para uma determinada posição dado um certo par de ângulos para o leme e a vela; e (2) o veleiro não pode se mover para frente, direto para a meta, devido às condições do vento, exigindo uma manobra estratégica. (SANTOS; GONÇALVES, 2019; SANTOS; GONÇALVES, 2020)

Isso sugere o uso de uma espécie de controlador hierárquico que pode ser dividido em, pelo menos, dois níveis. O nível inferior cuida da alteração (se necessário) das posições angulares da vela e do leme, apenas, e pode ser implementado diretamente em alguma placa de controle, tais como Pixhawk ou Navio2. Este nível usa variáveis como posições lineares e angulares reais do leme e da vela fornecidas por sensores proprioceptivos construídos para este fim e as posições alvo e atual (do GPS). Além disso, pode usar algum sensor IMU (Unidade de Medida Inercial) para melhorar a navegação. Sua saída são os movimentos desejados tanto da vela quanto do leme para que o veleiro alcance o alvo em linha reta. Um nível superior de controle verifica e/ou retifica a trajetória dada por algum planejador de missão, de um *waypoint* a outro, replanejando a trajetória se necessário de acordo com uma determinada situação. Utilizam-se variáveis como posição alvo e real do veleiro (dada pelo GPS), direção e velocidade do vento, presença de obstáculos dinâmicos ou estáticos (dada pela visão) e correnteza da água, entre outras. Sua saída são *waypoints* que estão livres de obstáculos e permitem que o veleiro avance, os quais são enviados diretamente ao sistema de controle de baixo nível. Usar aprendizagem por reforço neste nível parece ser uma boa estratégia, conforme apontado por (SILVA JUNIOR et al., 2020).

O sistema de orientação do veleiro que adotamos neste trabalho é feito basicamente no topo de dois controladores de baixo nível. Usamos uma derivada integral proporcional simples (PID) para o leme e um controlador Takagi-Sugeno Fuzzy (HUANG; NGUANG, 2009) para a vela devido à sua característica de ser um controlador não linear com ganho variável (YING, 1998). O módulo de controle possui um formato de malha fechada, conforme será descrito posteriormente. A abordagem da lógica *fuzzy* utilizada para a vela permite o tratamento de expressões que envolvem grandezas não exatamente descritas, compostas por variáveis linguísticas. A lógica *fuzzy* é baseada no conceito de conjuntos *fuzzy* (KLIR; YUAN, 1995). Esta abordagem é útil quando existem não linearidades e/ou incertezas e perturbações paramétricas, que geralmente estão presentes no controle da vela. Este sistema de controle básico com dois níveis foi testado e usado em simulações

(com Matlab) e demonstra funcionar bem em um veleiro anterior. (JÚNIOR et al., 2013; SANTOS; JUNIOR et al., 2016)

2.3.1 Controle proporcional + integral + derivativo (PID)

A modelagem matemática de veleiros autônomos consiste em desenvolver os cálculos físicos da embarcação com intuito de descobrir as variáveis necessárias para aplicações de controle do mesmo. Uma forma de esboçar esses cálculos é o desenvolvimento de um diagrama de blocos em algum software com a estrutura do que se deseja controlar. Para este projeto foi utilizado o MATLAB como a ferramenta para realizar os testes dos controles definidos. Essa arquitetura possui um diagrama de malha aberta e um diagrama de malha fechada:

Esta modelagem foi realizada por um controle Proporcional + Integral + Derivativo (PID) e um controlador inteligente *Fuzzy* tipo Takagi-Sugeno, inicialmente.

2.3.2 Controlador Proporcional (P)

Segundo (ARAÚJO, s.d.) pode-se dizer que a relação entre a saída e a entrada do compensador, também chamado de ganho proporcional 'K', portanto, existe um conceito inversamente proporcional em relação ao maior se o compensador o ganho, quanto menor for o erro de estado estacionário 'essencial', no entanto, o tempo de acomodação aumenta, tendendo, em certos casos, a desestabilizar o sistema. O oposto ocorre quando o ganho é reduzido (atenuado). Um compensador deste tipo, por não adicionar polos ou zeros ao sistema principal, representa apenas um ajuste ao seu ganho original. Assim, segundo (ARAÚJO, s.d.) pode-se afirmar que:

1. É um amplificador com ganho ajustável (K);
2. Aumentar K diminui o erro de regime;
3. Em geral, o aumento de K torna o sistema mais oscilatório e pode desestabilizá-lo;
4. Melhora o regime e agrava o transitório, sendo bastante limitado.

2.3.3 Controlador Proporcional + Integral (PI)

Conceitualizando de acordo com (ARAÚJO, s.d.), ele afirma que a ação integral é consistente em ter uma taxa de variação do sinal de saída em relação à entrada ($u = K_i e$

$$\rightarrow u = k_i \int^t e dt).$$

Assim, pode-se afirmar que com uma ação integral, atua-se positivamente na resposta em regime estacionário, tendendo a encerrar o erro estacionário, tendo porém o regime transitório prejudicado, devido à adição de polos ao sistema, tendendo a desestabilizar e assim aumentar o tempo de acomodação. Ainda, pode-se afirmar que a ação de um controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional e uma ação integral. Desse modo, a resposta transitória pode ser melhorada com a contribuição da ação proporcional, enquanto que a ação integral corrige o erro de estado estacionário (ARAÚJO, s.d.).

$$U(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{\tau} \int_0^t e(\tau) d\tau); U(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} E(s) \quad (2.8)$$

onde: $K_i = \frac{K_p}{\tau}$, sendo τ o tempo integrativo ou reset time.

Resumidamente:

1. Tende a zerar o erro de regime, pois aumenta o tipo de sistema;
2. Adiciona um pólo em $p = 0$ e um zero em $z = -K_i/K_p$;
3. É usado quando a resposta transitória é aceitável e a resposta é insatisfatória;
4. Conforme a ordem do sistema aumenta, ele adiciona possibilidades de instabilidade diferentes daquelas apresentadas pelo sistema original.

2.3.4 Controlador Proporcional + Derivado (PD)

Segundo Araújo (ARAÚJO, s.d.), embora na prática um controlador meramente derivado não se aplique, a ação derivada, integrada à ação proporcional, corresponde ao acréscimo de zero ao sistema, agindo favoravelmente no regime transitório, vale ressaltar que se opõe a essas vantagens, dessa forma, aumenta o tempo de subida e, por não funcionar em regime permanente, não corrige o erro em regime permanente. Araújo também faz uma ressalva em relação ao compensador, onde este, ao inserir um adiantamento de fase, é considerado na bibliografia atual como um caso peculiar de um compensador antecipado.

$$U(t) = K_p(e(t) + \tau d \frac{d}{d\tau} e(t)); U(s) = (K_p + K_d s) E(s) \quad (2.9)$$

onde: $K_d = K_p \tau$ d, sendo τ d a constante derivativa.

Resumidamente:

1. Leva em consideração a taxa de variação de erro;
2. Adiciona um zero a $z = -K_p/K_d$;
3. É usado quando a resposta no regime é aceitável e a resposta transitória é insatisfatória;
4. Introduce um efeito de antecipação no sistema, fazendo-o reagir não só à magnitude do sinal de erro, mas também à sua tendência para o instante futuro, iniciando assim uma ação corretiva antecipada;
5. A ação derivada tem a desvantagem de amplificar os sinais de ruído, o que pode causar um efeito de saturação nos atuadores do sistema.

2.3.5 Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

Segundo Araújo (ARAÚJO, s.d.), o controlador PID reúne as ações proporcionais, integrais e derivativas em um único controlador, atuando tanto no regime transitório quanto no permanente.

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \Rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (2.10)$$

Resumidamente:

1. É usado quando temos uma resposta transitória e um regime insatisfatório;
2. Adiciona um pólo em $p = 0$ e 2 zeros, que dependem dos parâmetros do controlador;
3. Geralmente, os dois zeros são reais e iguais

2.3.6 Controle Inteligente do tipo lógica *fuzzy*

A lógica *fuzzy* permite o tratamento de expressões que envolvem grandezas com uma descrição não exata e que envolvem variáveis linguísticas. A lógica *fuzzy* é baseada no conceito de conjuntos *fuzzy*. (KLIR; YUAN, 1995)

um referencial fixo Esta abordagem é útil quando existem não linearidades nos dados na terra e/ou incertezas e perturbações paramétricas, que geralmente estão presentes

no controle da vela. Não linearidades, incertezas paramétricas e perturbações são desafios presentes, em maior ou menor grau, na grande maioria dos processos a serem controlados. Quando tais questões se tornam relevantes, os sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno são muito úteis devido à sua capacidade de modelar, de forma aproximada ou precisa, dinâmicas não lineares sobre domínios compactos, combinando modelos lineares válidos localmente.

Depois de simulado na ferramenta Matlab, é necessário testar o controle em um barco real para saber se a simulação era coerente com a realidade. Portanto, é considerável importarmos e modificarmos a estrutura do simulador desenvolvido em matlab para um sistema de hardware do tipo microcontrolador Arduino Mega 2560 e Pixhawk para validação dos resultados.

3 Trabalhos relacionados

A vela foi uma das primeiras abordagens desenvolvidas pela humanidade para atravessar os mares e realizar o transporte de carga para longas distâncias. Um veleiro clássico usa o vento para a propulsão e seu movimento é possível graças a dois componentes do sistema: a vela que serve para capturar o vento, dando velocidade ao barco; e o leme que controla a direção do movimento.

Em uma analogia com um carro, a vela seria o motor e o leme, o volante, como colocado anteriormente. Dessa forma, a fim de desenvolver um controlador para um veleiro, tanto a vela quanto o leme devem ser considerado para o desenvolvimento do seu sistema de propulsão. A arte de navegar consiste em controlar a posição / orientação da vela e do leme para fazer o veleiro seguir uma determinada direção ou alvo. Muitos trabalhos foram realizados nesta linha, vários deles preocupando-se em introduzir conceitos de automatização para a navegação, mais voltados à navegação de grande porte como navios cargueiros e outros similares. No tocante à automatização de veleiros para se tornarem veículos autônomos, ainda temos uma carência de trabalhos na literatura, sendo os desenvolvimentos ainda incipientes.

Claro, entre esses, é possível encontrar trabalhos na literatura que tratam de abordagens similares ou relacionadas com a utilizada no presente trabalho ([SILVA JUNIOR et al., 2020](#); [LE BARS; JAULIN, 2015](#); [LIU et al., 2018](#); [JÚNIOR et al., 2013](#); [ESTEVES; GOMES; COSTA, 2017](#); [ABROUGUI; NEJIM; DALLAGI, 2019](#); [SANTOS; GONÇALVES, 2020](#); [ASTROV; UDAL, 2020](#); [VIEL et al., 2019](#)). Existem também algumas iniciativas de avaliação do sistema de navegação no contexto mais amplo da robótica móvel, com propostas de definição de métricas e cenários de teste ([SANTOS; GONÇALVES, 2020](#); [SILVA JUNIOR et al., 2020](#); [SANTOS, 2020](#)). Para o objetivo deste trabalho, selecionamos e classificamos os trabalhos relativos ao projeto arquitetônico de veleiros e os de sistemas de orientação autônoma de veleiro (envolvendo controle e estratégia de navegação).

Podemos encontrar várias abordagens relacionadas a propostas de design arquitetônico que inspiraram nosso projeto atual (CHACON-MOSQUERA, 2021; YANG et al., 2021; PLUMET et al., 2015; SANTOS; JUNIOR et al., 2016). Esses veleiros utilizam basicamente a vela para transformar a força do vento em sua força de propulsão, necessitando de energia apenas para alimentar os sistemas internos necessários à autonomia, como sensores, atuadores e computadores de bordo muito simples. Alguns desses veleiros autônomos são privilegiados em tarefas que exigem um maior nível de persistência onde se deseja autossuficiência energética, como vigilância costeira e coleta de dados oceânicos.

No tocante à parte do projeto arquitetônico do veleiro, as obras que se destacam por estarem próximas ao que estamos trabalhando na parte arquitetônica podem ser descritas conforme Tabela 22, que são as obras de Mosquera et Al. (CHACON-MOSQUERA, 2021), Shaolong et Al. (YANG et al., 2021), Plumet et Al. (PLUMET et al., 2015), e Santos et Al. (SANTOS; JUNIOR et al., 2016). Este trabalho atual foi baseado no veleiro denominado N-Boat (SANTOS; JUNIOR et al., 2016), embora apresentemos uma abordagem completamente revisada.

AUTOR	ANO	ARTIGO
E.F.C. Mosquera et Al.	2021	(CHACON-MOSQUERA, 2021)
Shaolong Yang et Al.	2021	(YANG et al., 2021)
D.H. Santos et Al.	2016	(SANTOS; JUNIOR et al., 2016)
F. Plumet et Al.	2015	(PLUMET et al., 2015)

Tabela 3: Projetos de veleiros autônomos

A Tabela 4 resume os trabalhos mais relacionados ao nosso abordando o aspecto de controle. Em relação ao sistema de controle responsável por gerar comandos de leme para atingir o objetivo de controle (RDC), as técnicas mais utilizadas são (1) PID (STELZER, 2012) (MARTINS, 2013) (DENG et al., 2020), (2) não-linear, (3) conjuntos fuzzy (KANG et al., 2017) (LEMAIRE et al., 2019) (SHEN et al., 2019), e (4) usando abordagens de aprendizado de máquina.

TRABALHO	RDC	SLC	TGW	TCK	DSI	CMP
(STELZER, 2012)	3*	5*	1	1*	não	sim
(MARTINS, 2013)	3*	5*	1	2*	não	não
(KANG et al., 2017)	1	1*	1	1*	não	não
(LEMAIRE et al., 2019)	1	1	1	1*	sim	não
(SHEN et al., 2019)	1	4*	1	-	no	sim
(DENG et al., 2020)	3*	5*	2	1	no	sim

Tabela 4: Modelagem, simulação e controle de veleiros

Em relação ao controle de vela (SLC), que é o sistema que gera referências desejáveis para controlar o ângulo da vela, as técnicas descritas na tabela são (1) diagrama polar (KANG et al., 2017) (LEMAIRE et al., 2019), (2) linear, (3) objetivo fixo, (4) pesquisa extrema (SHEN et al., 2019), (5) conjuntos difusos (STELZER, 2012) (MARTINS, 2013) (DENG et al., 2020), (6) Diagrama de Voronoy e (7) mecânico.

Em relação ao sistema de geração de trajetória (TGW), as técnicas listadas na tabela são (1) usando linha de visada para o destino (orientação sucessiva) (STELZER, 2012) (MARTINS, 2013) (KANG et al., 2017) (LEMAIRE et al., 2019) (SHEN et al., 2019), (2) seguindo um segmento reto (DENG et al., 2020), (3) usando campos potenciais, e (4) usando rastreamento de curva.

As estratégias mais usadas para avançar quando o waypoint está na zona morta fazendo a aderência (TCK como mostrado na Tabela 4), podem ser classificadas como (1) reativas (STELZER, 2012) (KANG et al., 2017) (LEMAIRE et al., 2019) (DENG et al., 2020) e (2) deliberativo (MARTINS, 2013).

As células marcadas com um asterisco na Tabela 4 indicam o foco de nossa pesquisa, seguindo alguns critérios: O critério de disseminação de implementação (DSI) indica se os autores fornecem implementações que permitem reprodutibilidade; O critério de comparação (CMP) indica se o trabalho é comparado a outros para validar a contribuição. Observe que a estratégia usada para seguir trajetória com base em *waypoints* é denotada pelo critério TGW.

Da coluna RDC, pode-se verificar que as técnicas mais utilizadas para controle de velas são a abordagem de conjuntos *fuzzy*, com 3 trabalhos, e a técnica PID, também com 3 trabalhos. A principal diferença entre os trabalhos que utilizam a técnica PID está em como os parâmetros do controlador são calibrados e também se os parâmetros do controlador são fixos ou variáveis durante a missão. Por outro lado, existe uma maior

variedade entre as obras que utilizam técnicas de controle do leme não linear, sendo que cada proposta possui uma abordagem de controle diferente.

Os trabalhos *não lineares* representam uma variedade de técnicas de controle, com diferentes níveis de complexidade e número de parâmetros para calibração. Assim sendo, é difícil uma comparação justa com elas, já que cada uma é diferente da outra. A maioria das comparações são feitas por trabalhos que utilizam técnicas não lineares propondo seu desempenho a técnicas lineares, como o PID, por ser mais fácil de implementar e ajustar.

Na coluna SLC, observa-se que há uma grande variedade de estratégias para controlar a vela. Os mais comuns são aqueles que envolvem a utilização do diagrama polar do veleiro, o qual visa maximizar a velocidade do veleiro. Um diagrama polar é geralmente estimado usando experimentos em túnel de vento ou usando um programa de previsão de velocidade (VPP). Dada a dificuldade, recentemente tem havido um maior esforço para tentar controlar a vela usando técnicas de busca local, como a busca extrema. A outra estratégia de controle comum é a interpolação linear de acordo com o vento aparente, graças à sua simplicidade e facilidade de implementação.

A coluna TGW esclarece que a abordagem mais usada para seguir os *waypoints* é a estratégia de linha de visão, onde o veleiro sempre tenta apontar sua proa em direção ao destino. A segunda estratégia mais comum é ir gerando novos *waypoints*, ou seja, navegando em zigzag até chegar ao seu ponto. A coluna TCK mostra que a técnica mais comum é a adesão reativa, sendo as mais comuns aquelas que seguem uma direção. Outra estratégia comum é seguir a direção navegável o mais próximo possível do vento e mudar de direção ao atingir os limites de algum corredor lateral determinado em torno da linha reta que conecta os dois *waypoints*.

A coluna DSI mostra três trabalhos que deixam clara a divulgação da implementação das técnicas. Destes, apenas dois ainda possuem links ativos para acessar as implementações. Essa tendência de não reprodutibilidade implica que pesquisadores interessados devam implementar as técnicas já apresentadas na literatura, além de implementar suas próprias soluções. Isso custa caro e acaba tornando a comparação uma tarefa difícil e desmotivada.

4 Arquitetura de hardware

Como visto no Capítulo 1, o objetivo do nosso trabalho é realizar o desenvolvimento de um sistema que torne o veleiro totalmente autônomo. A embarcação deve ser movida por propulsão a vela na maior parte do tempo, mas ela também possui um motor elétrico para manobras de risco e outras pontuais. Porém, em ambos os casos, o veleiro tem sua direção ditada por um leme. Portanto, deve ser proposta uma arquitetura robusta, que seja capaz de controlar o veleiro levando em consideração esse conjunto de situações, e usando os dados providos por sensores embarcados. Consideramos apenas o uso de vela e leme, no trabalho, deixando a discussão da utilização do motor elétrico para abordagens futuras.

Deste modo, neste capítulo, será fornecida uma visão geral da arquitetura de hardware sugerida para qualquer veleiro monocasco. A Figura 7 e a Figura 8 mostram esta arquitetura de hardware com detalhes.

A Figura 7 mostra o diagrama dos componentes do veleiro, proposta nesta dissertação para que seja utilizado em qualquer embarcação do tipo veleiro monocasco.

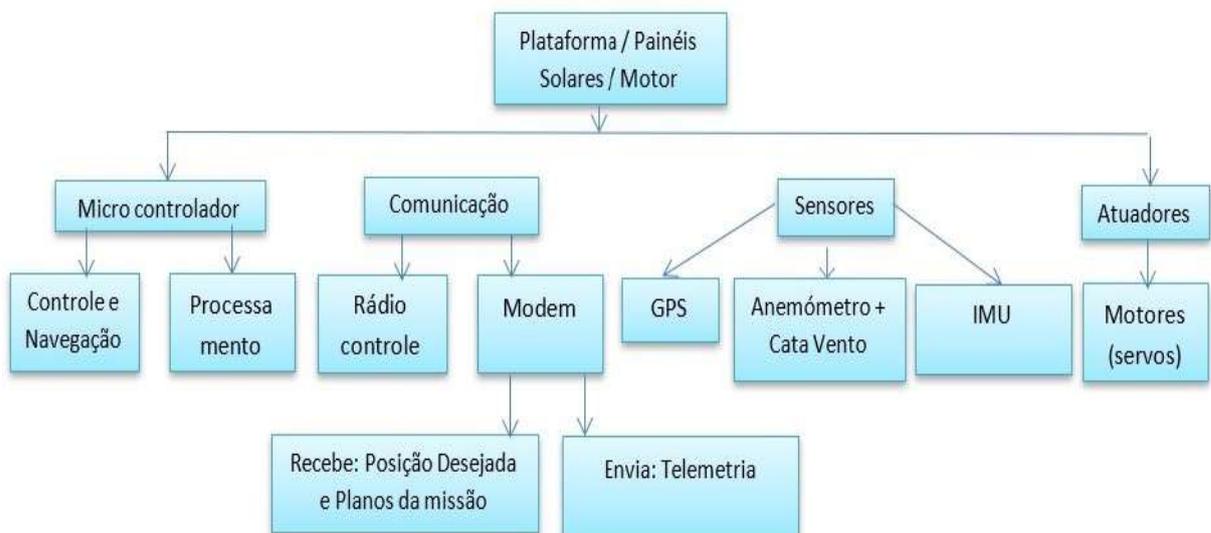


Figura 7: Diagrama Geral da Plataforma do Barco Autônomo

A Figura 8 mostra uma visão geral de nossa arquitetura de hardware proposta, aplicada a um veleiro, incluindo um diagrama de componentes com comunicação, computadores, sensores, leme, vela, motores, potência, câmeras e troca de energia entre outros componentes. Aqui apresentamos os sensores e o processamento da visão, além da eletrônica.

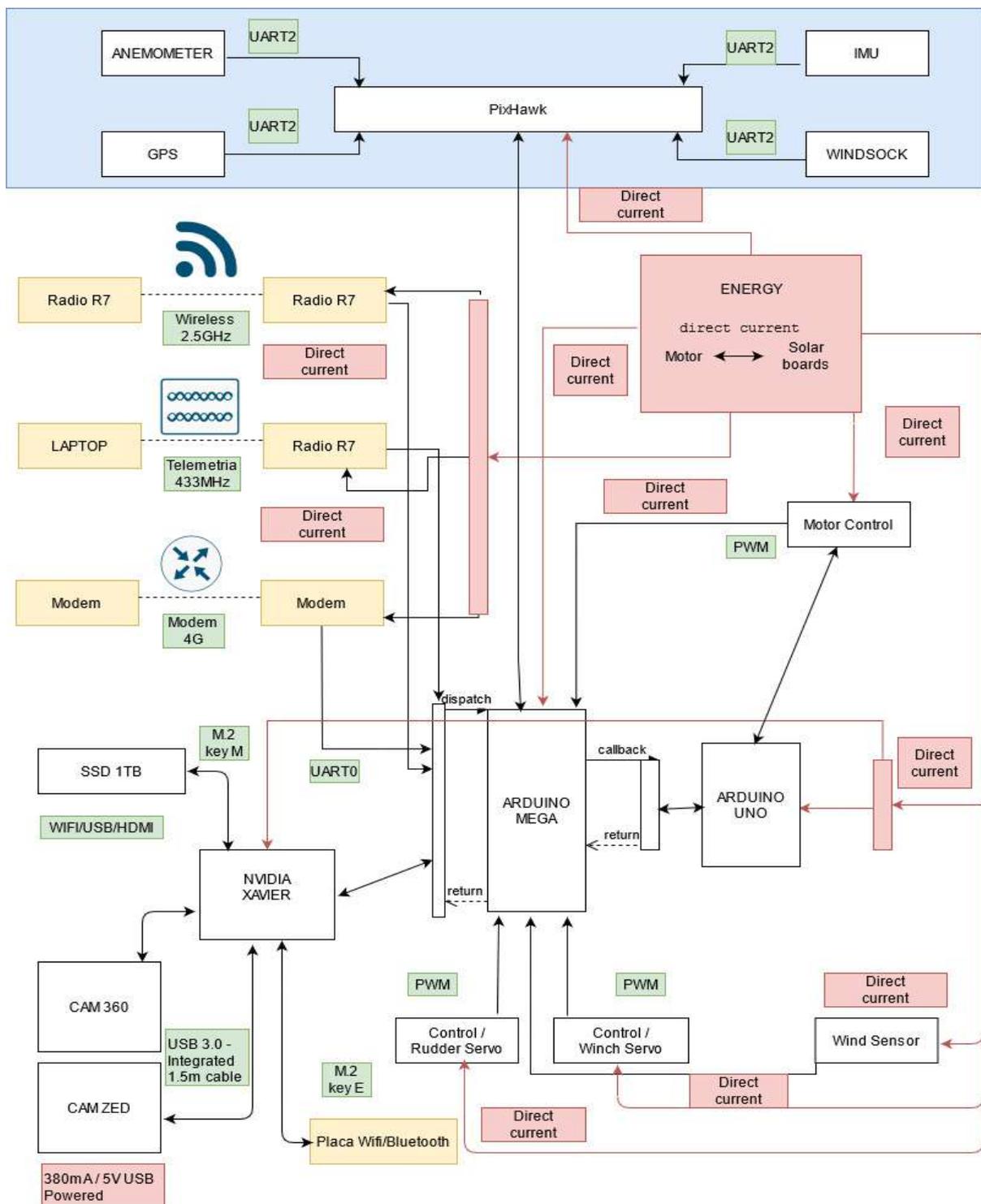


Figura 8: Diagrama de componentes

4.1 Eletrônica embarcada

Os componentes eletrônicos básicos usados podem ser vistos na Figura 8. Os componentes usados nesses componentes são: Pixhawk 2.4.6; Arduino Mega e Uno; Driver VNH5019 para atuadores; atuador linear do leme; mini guincho para ativar a vela; bateria náutica; sensores de vento; GPS-IMU; Telemetria de 433 MHz; e um rádio R7 (transmissor e receptor). Os principais subsistemas são o link de rádio (receptor e transmissor) para eventual controle remoto; o sistema de telemetria para envio de dados das aplicações de carga útil e da própria embarcação e o sistema de controle de hardware. (SILVA JUNIOR et al., 2020).

4.1.1 Driver dos atuadores

O driver Dual-VNH5019-Motor-Shield efetua o controle dos atuadores por meio de sinais de comando do tipo PWM oriundos do Arduino, que servem como comandos para o chaveamento da Ponte H desse circuito ao qual os atuadores estão conectados. O driver possui dois canais de saída: um usado para o guincho da vela; o outro, para o atuador linear do leme, sendo o limite de corrente de cada canal 12A, suportando picos de até 30A (SILVA JUNIOR et al., 2020).

4.1.2 Arduinos

O Arduino Mega primeiramente recebe o sinal de comando dos atuadores na faixa [1000 2000] enviado pela Pixhawk e então o traduz para valores de ângulos de atuador $[-90^\circ 90^\circ]$. O Arduino Mega está conectado ao shield VNH5019, que, por fim, efetua o controle de posição dos atuadores. Em seu software está implementado um controle PI (Proporcional-Integrativo), que obtém uma medida analógica de 10 bits [0 1023], a partir de uma conversão digital-analógica do valor de saída do divisor de tensão que esse potenciômetro estabelece. Após isso o arduino traduz para valor de ângulo de atuador e compara com o ângulo de referência enviado pela Pixhawk, gerando um erro. Neste erro são aplicados os ganhos P e I e então este valor é passado como velocidade para os canais dos atuadores no driver VNH5019 (SILVA JUNIOR et al., 2020).

4.1.3 Sensores de posição dos atuadores

Os potenciômetros da vela e do leme servem para dar ao controlador de posição dos atuadores um retorno sobre a posição atual do atuador. Um suporte para o potenciômetro que encaixa no eixo do mini-guincho foi projetado e impresso. A medida que o mini-guincho gira, também gira o potenciômetro que está acoplado na base. O potenciômetro do leme é montado na parte superior do leme, e gira junto com o leme, mapeando sua posição (SILVA JUNIOR et al., 2020).

4.1.4 Sensores de vento

Os sensores de vento estão localizados no mastro da embarcação. A embarcação possui um anemômetro, que mede a magnitude da velocidade do vento, e uma biruta, que mede sua direção. Essas informações do vento são enviadas à Pixhawk e então processadas para estimar a situação do vento que será usada para navegação (SILVA JUNIOR et al., 2020).

4.1.5 Pixhawk

A Pixhawk é o processador central de baixo nível. Ela é responsável pelo controle de movimento e o planejamento da missão, além da coleta e tratamento dos dados dos sensores. A Pixhawk executa o Ardupilot Arduover com configuração específica para veleiro. A próxima seção apresenta os detalhes da programação da Pixhawk (SILVA JUNIOR et al., 2020).

Para montagem da Pixhawk com a instalação do Autopilot foram seguidas as seguintes orientações mostradas na subseção a seguir:

4.1.6 Conexões do Autopilot na Pixhawk

Nessa subseção será abordado detalhadamente todas entradas e saídas da Pixhawk com o autopilot. Portanto, é fundamental que as entradas de controle sejam obrigatórias para operação do veículo autônomo, são essas: Receptores de controle de rádio, ou seja, estações de controle de solo ou computadores complementares que devem existir.

Para as entradas de Sensores: são necessários ter: GPS, Bússola, Velocidade do ar, Telêmetros, Barômetros redundantes, IMUs, etc. Além de entradas da unidade de gerenciamento de energia.

Nas entradas analógicas: é necessário receberem as entradas de intensidade do sinal e dos sensores analógicos de velocidade do ar. Já nas saídas de controle são enviados sinais para que os motores de controle/mecânico, informem nas suas saídas de telemetria etc.

Sobre os atuadores e E/S de uso geral: Relés, LEDs, Interruptor de segurança, Campanhas. Tudo isso é necessário para o controle de um veículo autônomo, conforme imagem abaixo.

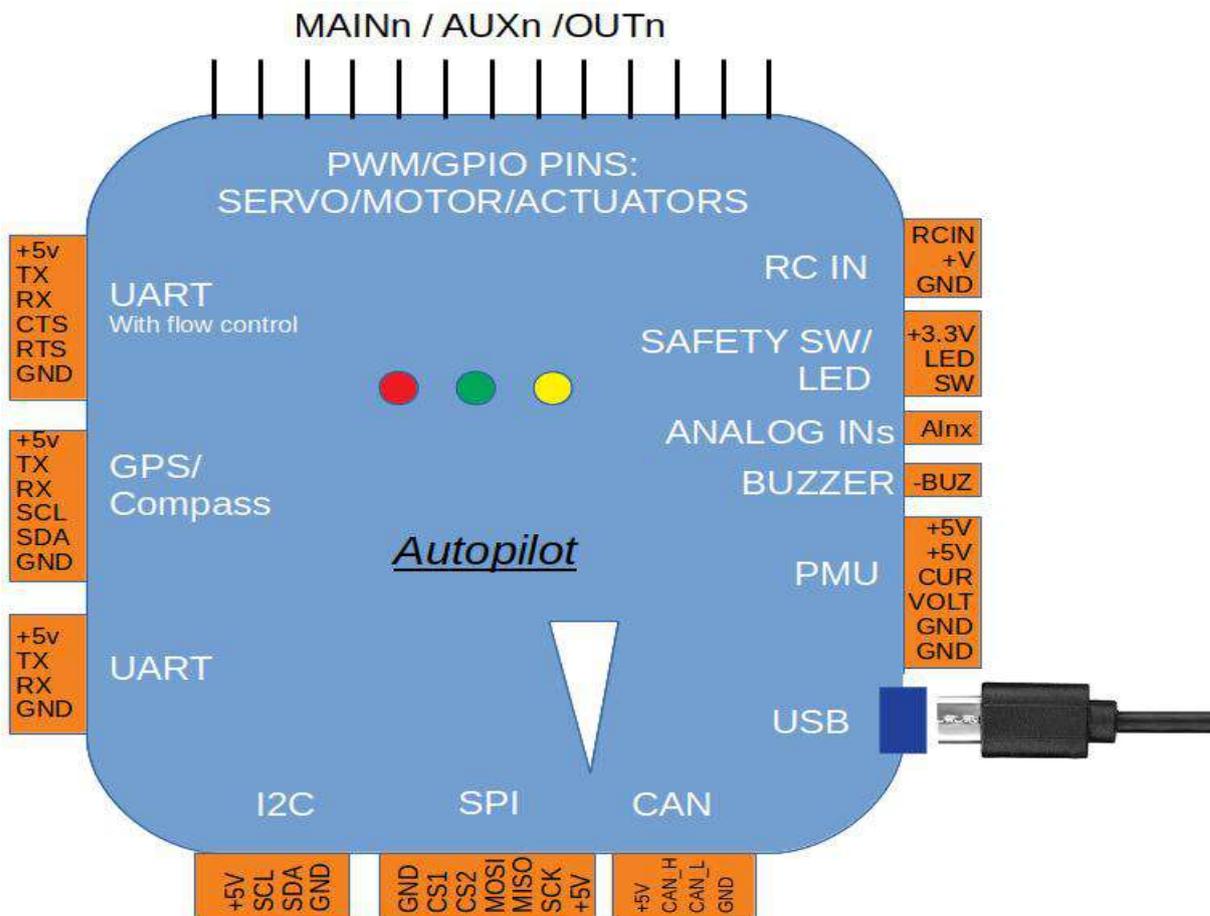


Figura 9: Diagrama de conexões da Pixhawk

Abaixo será detalhada as entradas e saídas de um Autopilot dentro de uma Pixhawk para gerenciamento de veículo robótico.

- **USB:** É fornecido como a porta principal para configuração do piloto automático. Sempre aparece como a primeira porta serial (0) para o piloto automático.
- **UART:** Normalmente, várias portas UART são fornecidas. Eles fornecem conexões para rádios de telemetria, GPS, telêmetros e até servos SBUS. Além disso, a partir

das versões de firmware 4.0, as entradas seriais do receptor RC podem ser conectadas a qualquer UART.

TX: Data Output, conecta-se ao sinal RX dos periféricos

RX: Data Input, conectar ao sinal TX periférico

Geralmente +5V e GND são fornecidos no conector, ou próximos se um piloto automático estilo placa. Às vezes, os sinais de controle de fluxo são fornecidos opcionalmente no conector. Alguns rádios de telemetria utilizam estes sinais:

CTS: Clear para enviar saída para a entrada CTS rotulada do periférico.

RTS: Solicitação de envio de entrada da saída RTS rotulada do periférico.

- **I2C:** É usado para conectar determinados sensores ou periféricos. Mais notavelmente bússolas (que são obrigatórias em muitos veículos) e sensores digitais de velocidade do ar.

Sinais:

SCL: Saída de Relógio, conecta-se ao pino SCL de periféricos

SDA: Dados bidirecionais, conecta-se ao pino SDA de periféricos

Enquanto o I2C usa sinalização de 3,3 V, geralmente +5 V é fornecido no conector junto com os sinais, já que muitos dispositivos I2C realmente usam isso como alimentação principal. Se não forem fornecidas portas suficientes, as placas de expansão I2C podem permitir que mais de um dispositivo seja conectado.

- **GPS:** Geralmente é conectado a uma das portas UART, mas alguns pilotos automáticos fornecem um conector dedicado ao GPS e/ou GPS/Bússola que inclui os sinais I2C.

Sinais:

TX: Saída de dados, conectada à entrada GPS RX

RX: Entrada de dados, conectado à saída GPS TX

Geralmente +5V e GND são fornecidos no conector. Se for uma porta GPS/Bússola, os sinais I2C também serão fornecidos e anexados aos mesmos sinais nomeados no submódulo bússola de um módulo GPS/Bússola.

- **PMU:** A maioria dos pilotos automáticos fornece os meios para se conectar a uma unidade de gerenciamento de energia (PMU) de algum tipo. Essas unidades fornecem um ou todos os itens a seguir:

Uma alimentação regulada de +5V para o piloto, automático da bateria de voo, Monitoramento de corrente da bateria de voo, Monitoramento da tensão da bateria de voo.

Sinais:

+5V: Alimentação regulada para piloto automático

- **CUR**: Saída do monitor atual. Normalmente, uma tensão analógica de 0-3,3v representa o nível de consumo de corrente
- **VLT**: Saída do Monitor de Tensão. Geralmente uma tensão analógica de 0-3,3 V representando a tensão da bateria GND: Terra

Alguns monitores de bateria/energia “inteligentes” substituem os pinos CUR e VLT por sinais I2C para fornecer informações digitais sobre o status da bateria.

Muitos pilotos automáticos de placa integram totalmente a PMU como parte da placa com conexões internas ao processador.

Além disso, muitos pilotos automáticos oferecem várias conexões de PMU desde o firmware ArduPilot versões 4.0 e posteriores suportam até 10 PMUs/monitores de bateria.

- **RCIN**: A entrada do receptor de controle de rádio é inserida neste pino. A maioria dos protocolos RC seriais (PPM, SBUS, DSM, etc.) são suportados pelo ArduPilot e detectados automaticamente. Além disso, alguns pilotos automáticos fornecem conectores dedicados para receptores de satélite de protocolo DSM que fornecem energia ao receptor além do sinal de entrada.

A partir das versões de firmware 4.0 e posteriores, o ArduPilot também permite que um receptor RC seja conectado a qualquer porta UART

- **MAIN/AUX/OUT**: As saídas primárias para controle de motores (via ESCs) e servos são fornecidas por esses pinos/conectores. Eles são rotulados como saídas MAIN/AUX ou apenas como OUTPUTs. Essas saídas fornecem os sinais PWM ou Dshot para o ESC do motor ou controle servo das superfícies de voo. Eles também podem ser usados às vezes como pinos de E/S de uso geral para controlar relés, pára-quedas, garras, etc.

Esses controladores com etiquetas de saída MAIN/AUX geralmente indicam que um coprocessador IOMCU está sendo empregado. Eles fornecem saídas destinadas ao

uso como saídas de motor/servo e fornecem meios redundantes de controle via RC se o piloto automático principal falhar. As saídas MAIN vêm deste coprocessador, enquanto as saídas designadas AUX são controladas diretamente pelo piloto automático. A maioria dos pilotos automáticos de nível de placa não usa um IOMCU e tem saídas marcadas apenas como OUTPUTx ou Mx.

Essa distinção é importante, pois as saídas AUX (e SAÍDAS de pilotos automáticos sem IOMCU) podem ser usadas como GPIOs, bem como PWM ou Dshot. Enquanto as saídas MAIN só podem ser usadas para PWM.

Muitas vezes, essas saídas são fornecidas em tiras de conector de 3 pinos que fornecem ou distribuem a alimentação do servo e o terra, além dos sinais de saída individuais. Essa energia geralmente é fornecida externamente, como pelo ESC ou BEC, embora alguns pilotos automáticos forneçam essa energia a partir de reguladores internos.

- **CAN:** O barramento CAN é fornecido em muitos pilotos automáticos para uso com periféricos DroneCAN. ESCs, GPS/Bússola, Telêmetros e muitos outros periféricos e sensores estão sendo adicionados à lista de dispositivos DroneCAN disponíveis todos os dias. O CAN fornece um método robusto de comunicação com periféricos com integridade de dados, mesmo com cabos longos.
- **GPS/Compass:** O GPS é geralmente obrigatório em todos os veículos, exceto quando algum outro sensor ou sistema de determinação de posição é usado. A bússola também é geralmente necessária para os tipos de avião Copter e Rover e QuadPlane (consulte Operação sem bússola para alternativas de bússola), mas não para aviões convencionais, no entanto, é recomendado.

Sinais:

CANH: sinal do lado alto CAN, conecta-se ao pino CANH dos periféricos

CANL: sinal do lado baixo CAN, conecta-se ao pino CANL dos periféricos

A alimentação e o aterramento geralmente também são fornecidos em um conector JST-GH padrão de 4 pinos.

- **SPI:** A maioria dos pilotos automáticos tem processadores com várias portas SPI. Embora algumas portas sejam usadas para periféricos integrados, muitas vezes uma ou mais são fornecidas externamente para a adição de chips de sensores, como barômetros ou IMUs, para redundância.

Sinais:

CSx: Um ou mais chip seleciona para habilitar o periférico SPI

MOSI: Master Out/Slave In Data, conecta-se ao mesmo sinal no periférico SPI

MISO: Master In/Slave Out Data, conecta-se ao mesmo sinal no periférico SPI

SCK: Sinal do Relógio

- **SAFETY SW/LED:** Muitos pilotos automáticos fornecem GPIOs dedicados em um conector para adicionar o interruptor de segurança opcional e os leds de notificação que o ArduPilot suporta. Normalmente, eles são oferecidos em pilotos automáticos que utilizam um coprocessador IOMCU.

Sinais:

+3,3V : Alimentação para o LED e Interruptor LED: Aciona o lado terra do LED de notificação

SW: Detecta se +3,3V está presente para indicar o fechamento do interruptor

- **BUZZER:** Uma saída BUZZ às vezes é fornecida para uma campainha passiva ou ativa para sons de notificação do sistema e fornece uma conexão de aterramento comutada para a campainha.
- **ENTRADAS ANALÓGICAS:** Frequentemente, são fornecidos pinos de medição de tensão analógicos. Eles são usados para detecção de corrente e/ou tensão de um monitor de energia (se um conector dedicado não tiver sido fornecido), outros pontos de monitoramento de tensão do sistema ou para entrada analógica RSSI.

4.2 Arquitetura de hardware para veleiro monocasco

Nesta Seção, serão abordados os vários módulos que compõem a arquitetura de hardware, sendo eles: o módulo do computador de visão computacional e comunicações de dado; o módulo das baterias e do atuador da vela; o módulo do gerenciamento da energia solar e dos hardwares para controle dos atuadores; e o módulo do controle do atuador do leme e do motor de popa. Portanto todos esses módulos estão detalhadas nos módulos de I à IV respectivamente conforme a figura 10.

4.2.1 Módulo do computador de visão computacional e comunicações de dados

Neste módulo Figura 13, estão a Jetson Xavier, modem de internet 12, conversores de eletrônicos e o botão de emergência. A Jetson Xavier Figura 11 é um computador robusto onde será processado os dados de visão computacional. Ele recebe informações de imagens das câmeras, fazendo desta forma os pré processamentos dos dados ajudando no monitoramento e navegação do veleiro.

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
Jetson AGX Xavier 32 GB eMMC 5.1 Storage	01	DADOS da PixHawk a serem enviados ao Arduino Mega

Tabela 6: Jetson

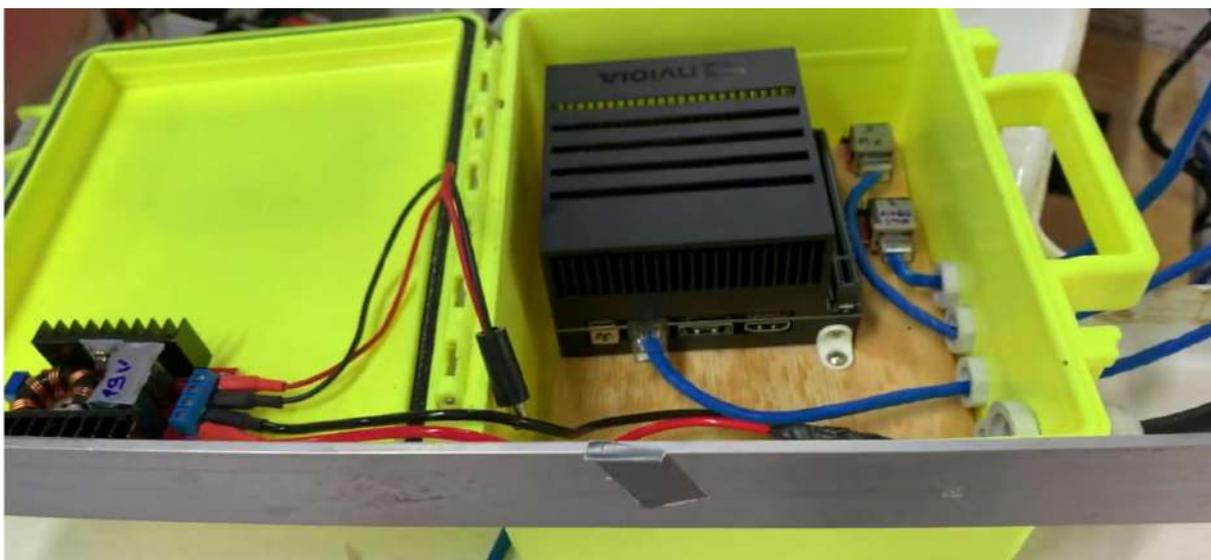


Figura 11: Jetson Xavier

O modem de internet Figura 12 será utilizado para receber e enviar dados da embarcação para estação base. Nele será inserido um chip de telefone que transmitirá os dados via a tecnologia General Packet Radio Service (GPRS).

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
Modem 4g Wi-fi Md-4000	02	ETHERNET que vai para a Jetson

Tabela 8: Modem

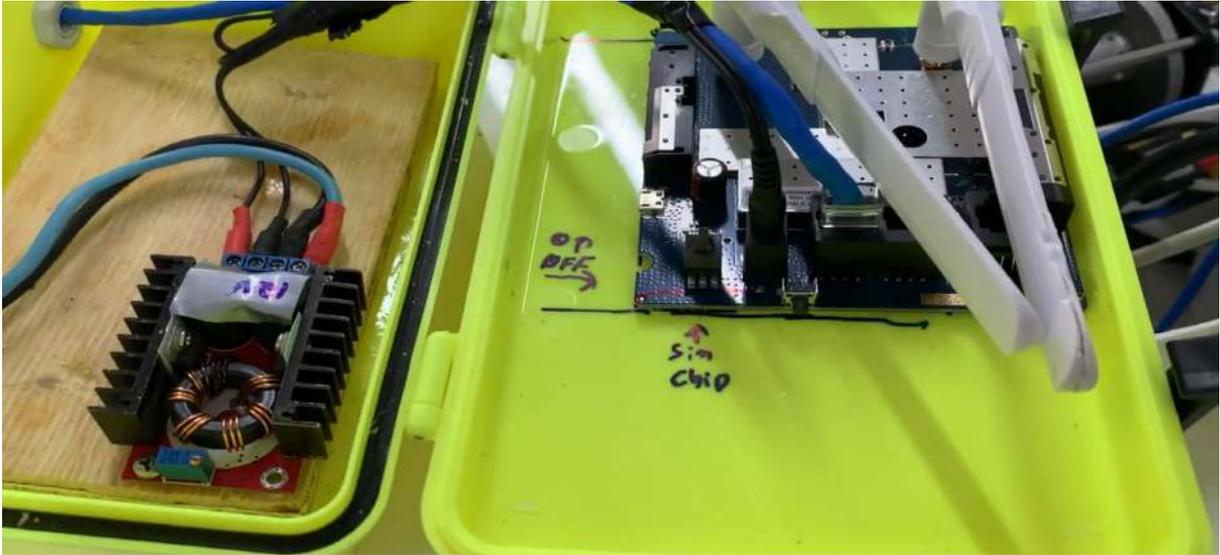


Figura 12: Modem

O veleiro também está equipado com um botão de emergência que fica interligado com o disjuntor geral e as baterias de alimentação, com intuito de desligar a embarcação caso ocorra algum problema. Os conversores eletrônicos estão sendo utilizados para alimentar e estabilizar a tensão de alimentação da Jetson 19v e do modem 12v.

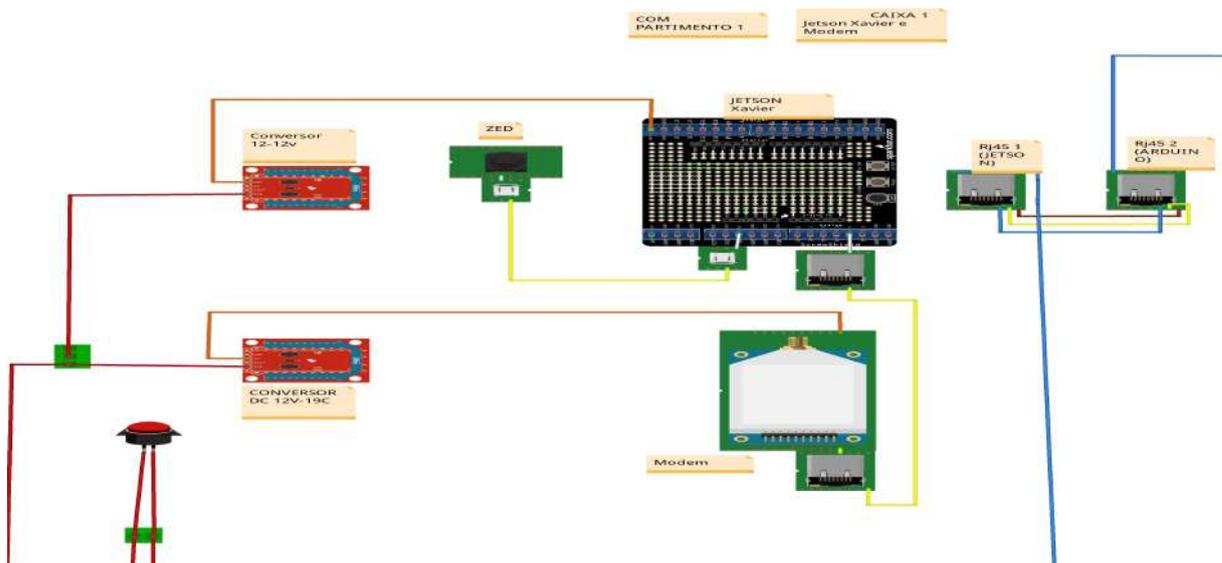


Figura 13: Diagrama da Plataforma do Barco Autônomo do computador de visão computacional e comunicações de dados

4.2.2 Módulo das baterias e do atuador da vela

Serão alocados neste módulo as baterias náuticas, disjuntor geral, um motor automotivo que serve para controlar a vela juntamente com o potenciômetro, a placa com resistores para controle dos sensores de biruta e anemômetro conforme imagem 18.

As duas baterias associadas em paralelo náuticas são utilizadas para energizar a embarcação, elas foram colocadas em paralelo para melhor distribuição de carga, conforme Figura 14.

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
Baterias 111Ah Náutica Moura	02	ELÉTRICA

Tabela 9: Baterias



Figura 14: Baterias

Neste projeto a necessidade de adicionar um disjuntor geral Figura 15 para ligar e desligar a embarcação, que foi colocado em série com o disjuntor geral, pois como ele tem a característica de estar normalmente fechado, quando acionado, irá energizar sua bobina para abrir o circuito. Ao fazer isto impede-se que haja alimentação de energia para os componentes elétricos e eletrônicos. O relé/contatora está ligado diretamente a bateria.



Figura 15: Disjuntor e Relé

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
Disjuntor e Relé/Contatora	02	ELÉTRICA

Tabela 10: Disjuntor e Relé

A movimentação de virar a vela para direita ou esquerda é realizada por um atuador rotativo sobre cabos, que é um guincho automotivo Figura 16. Ele fica preso à escolta da vela fazendo com que o cabo da vela seja solto ou recolhido. As características principais deste dispositivo elétrico são:

NOMES	ESPECIFICAÇÕES
Motor	1,1 KW / 1,4 HP
Tração	3000 LB (1361 kg)
Peso	8 Kg
Desenrolamento	(metros/Min) 3.3
Enrolamento	(Metros/Min) 0.6
Freio automático	Sim.
Redução	150:1.

Tabela 11: Guincho

Para segurança do veleiro é adicionado um relé e com o topador da vela, evitando que o cabo do motor seja puxado ao ponto de implodir a embarcação.



Figura 16: Guincho

Neste módulo também situa-se a caixa onde se realiza a ligação de energia e dados dos sensores da biruta e anemômetro Figura 17. A biruta é responsável por medir a direção do vento e o anemômetro mede a magnitude da velocidade. Essas informações do vento são transmitidas para a Pixhawk a fim de serem processadas, ajudando desta forma na navegação da embarcação. Eles estão conectados na caixa 01 dos Sensores de vento, tendo

suas ligações no conector de RJ45, sendo os dois cabos azuis do anemômetro e os das cores laranja e verde da biruta. Eles estão indo para a caixa da Pixhawk.



Figura 17: Sensores de vento

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
Sensores de vento	02	ETHERNET que conecta a Pixhawk

Tabela 13: Sensores de vento

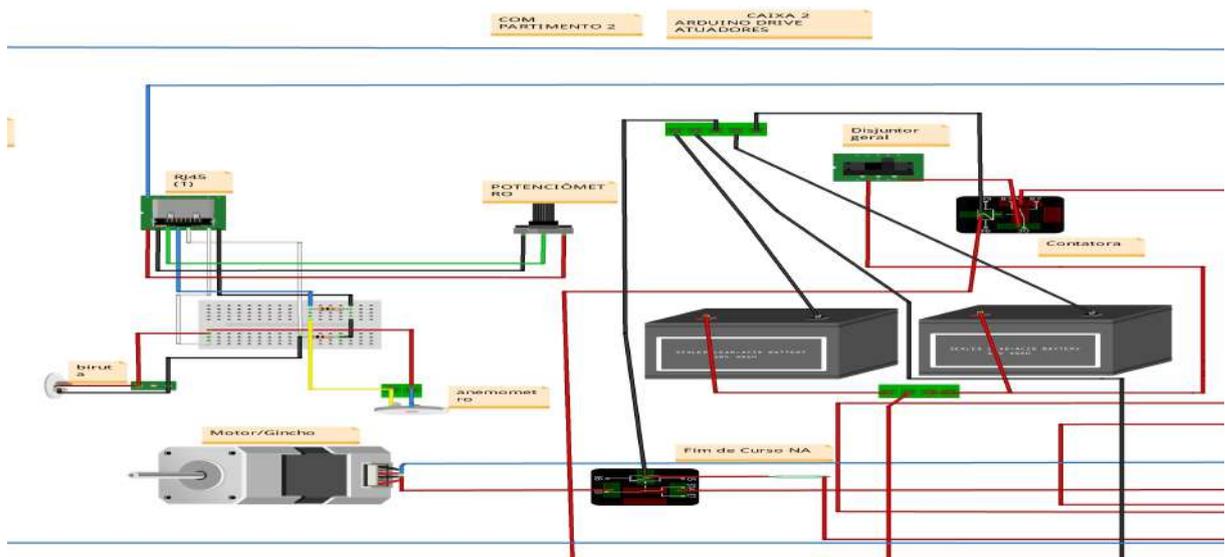


Figura 18: Diagrama da Plataforma do Barco Autônomo das baterias e do atuador da vela

4.2.3 Módulo do gerenciamento da energia solar e dos hardwares para controle dos atuadores

No terceiro módulo encontram-se as partes mais importantes do barco. A caixa de distribuição de energia para os módulos e o arduino central que se comunica com as outras seções. Também nele está a Pixhawk [20](#) que é dispositivo principal para comunicação e controle dos atuadores e sensores.

A caixa de fusíveis [Figura 19](#), bem como o segundo disjuntor e controlador de carga para o painel solar localizam-se neste compartimento. Cada fusível no total de quatro são para evitar picos de tensão nos módulo, cada um sendo 30f.

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
MPPT, Disjuntor e Caixa de fusíveis	01	ETHERNET que se conecta com a Pixhawk

Tabela 15: Caixa de energia



Figura 19: Caixa de fusíveis

A segunda caixa contém a Pixhawk, que possui um módulo de potência que nada mais é que um regulador de tensão interligado a ela. Esta recebe 12v das baterias, manda energia para a Pixhawk e se comunica com o motor de popa da embarcação.

Também possui o receptor do rádio FrSKY X8R. Existe também o dispositivo de telemetria da Holybro e o módulo de GPS da Holybro, onde encontram-se uma unidade de

medidas inerciais (IMU) que é um conjunto de sensores que combinam vários acelerômetros e giroscópios para uma medição tridimensional da aceleração exercida, e a velocidade angular, sendo esse coletado pelo GPS, que precisa sempre estar apontado para proa do barco com intuito de obter a posição correta do veleiro.

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
Readytosky Pixhawk PX4 Flight Controller Pix 2.4.8 32 Bit Flight Control Board+Safety Switch+Buzzer+I2C Splitter Expand Mo- dule+4GB SD Card	02	ETHERNET que conecta ao Arduino

Tabela 17: Caixa de energia

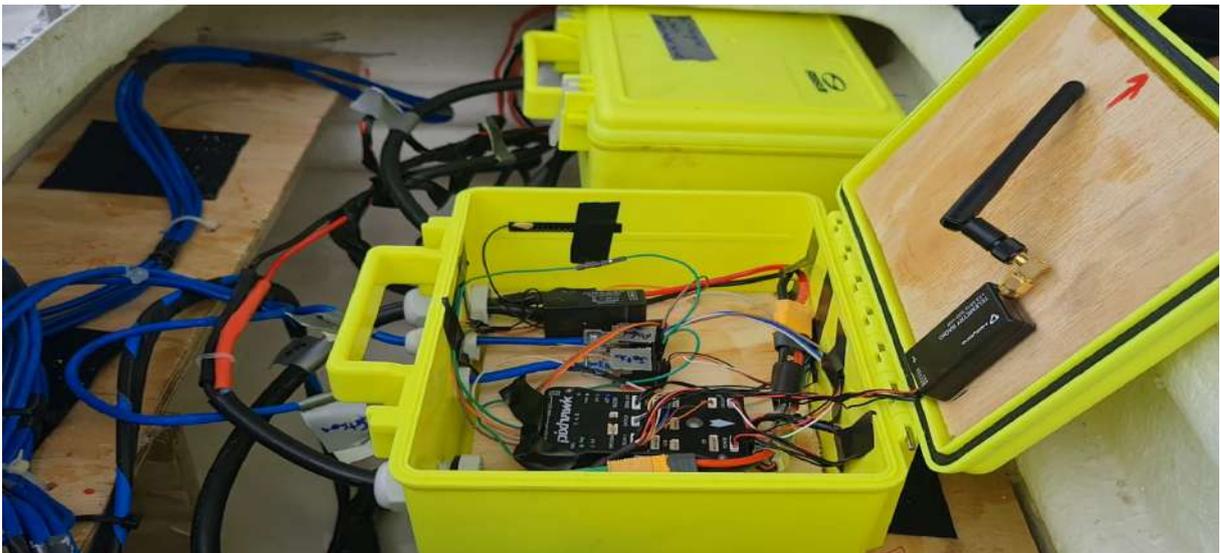


Figura 20: Pixhawk

Na Pixhawk, encontram-se as ligações do GPS com a porta GPS e switch, sendo que a ligação I2C é para se comunicar com o IMU. A porta serial 4/5 manda dados para os arduinos, que por sua vez recebe as informações de correntes dos outros atuadores e dos ângulos do atuadores. Além disso, a Pixhawk envia os sinais de Modulação por Largura de Pulso (PWM) para o controle do leme e do guincho. Ela recebe as informações da posição do vento que vem da seção dois até o RJ45 dessa caixa da Pixhawk. Para fazer a comunicação entre o receptor e o rádio, é necessário ligar o receptor na porta SBUS dele até a porta RCIN da Pixhawk. No tocante à comunicação da telemetria, é usada a porta TELEM2 (telemetria) da Pixhawk que envia essas informações para a estação base.

O sensor da biruta é conectado na porta ADC6.6V que recebe 5v, dados e terra. Essas informações vêm do compartimento 2 do veleiro. O modulo de potência está conectado na porta POWER da Pixhawk que recebe as informações de tensão e corrente, sendo que essa tensão vem da bateria e a corrente que passa por ele.

Por fim, nas portas auxiliares da Pixhawk onde estão ligados o terra e o VCC. Já a porta AUX 5 corresponde a conexão que vem do anemômetro que é a informação de velocidade do vento, o MAIN OUT 1 gera o sinal de PWM para o arduino, onde é calculado a velocidade que é enviado para o atuador do leme, o MAIN OUT 3 enviado esses mesmos passos do leme só que para o atuador linear do guincho para controle da vela, e o MAIN OUT 4 é o que manda para o drive do motor.

A terceira caixa 21 é onde está o arduino que faz o controle de hardware. Este trabalha com uma ponte H vnh5019 que é o driver de comunicação entre os atuadores.

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
VNH5019 Unidade de Motor DC Única 30A Proteção de Auto-tensão de Alta Corrente	03	ETHERNET que conecta a Pixhawk ao Arduino

Tabela 19: Arduino e Ponte H

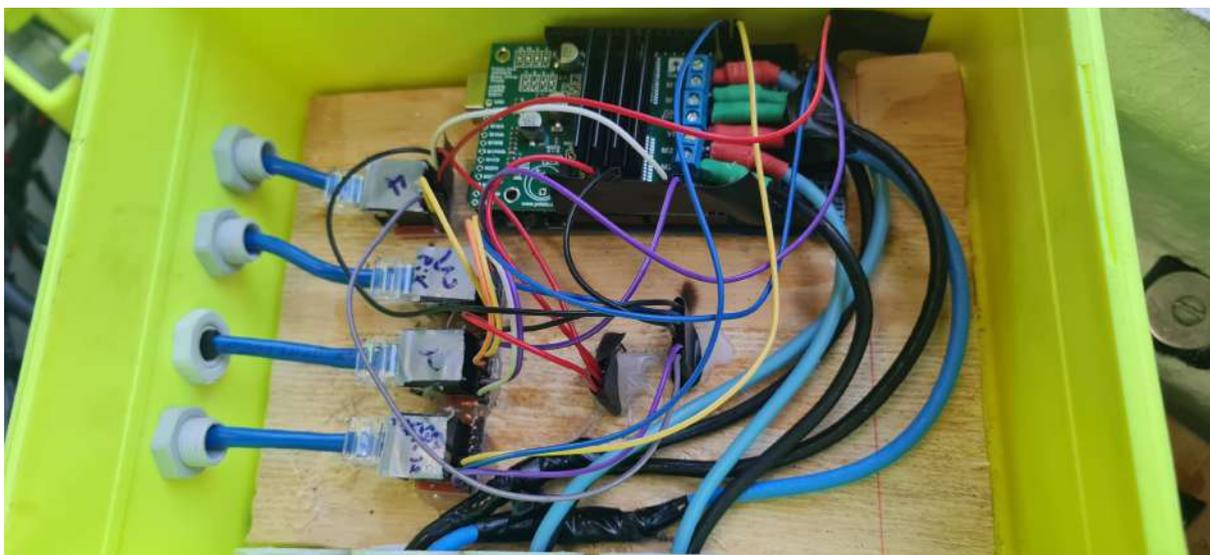


Figura 21: Arduino Mega e Ponte H vnh5019

O arduino recebe os sinais do potenciômetro nas suas portas analógicas A2 do leme e A3 da vela para depois identificar a posição dos atuadores, além de receber as informações de corrente dos equipamentos que depois são enviados para a Pixhawk. As portas TX,

RX e terra se comunicam via serial com a Pixhawk. Já as portas 26 e 28 recebem os PWM que vem da Pixhawk e transformam essa informação em ângulo para enviar para os atuadores. Vale salientar que todas essas conexões são mostradas no diagrama de conexão de cada módulo, conforme Figura 22.

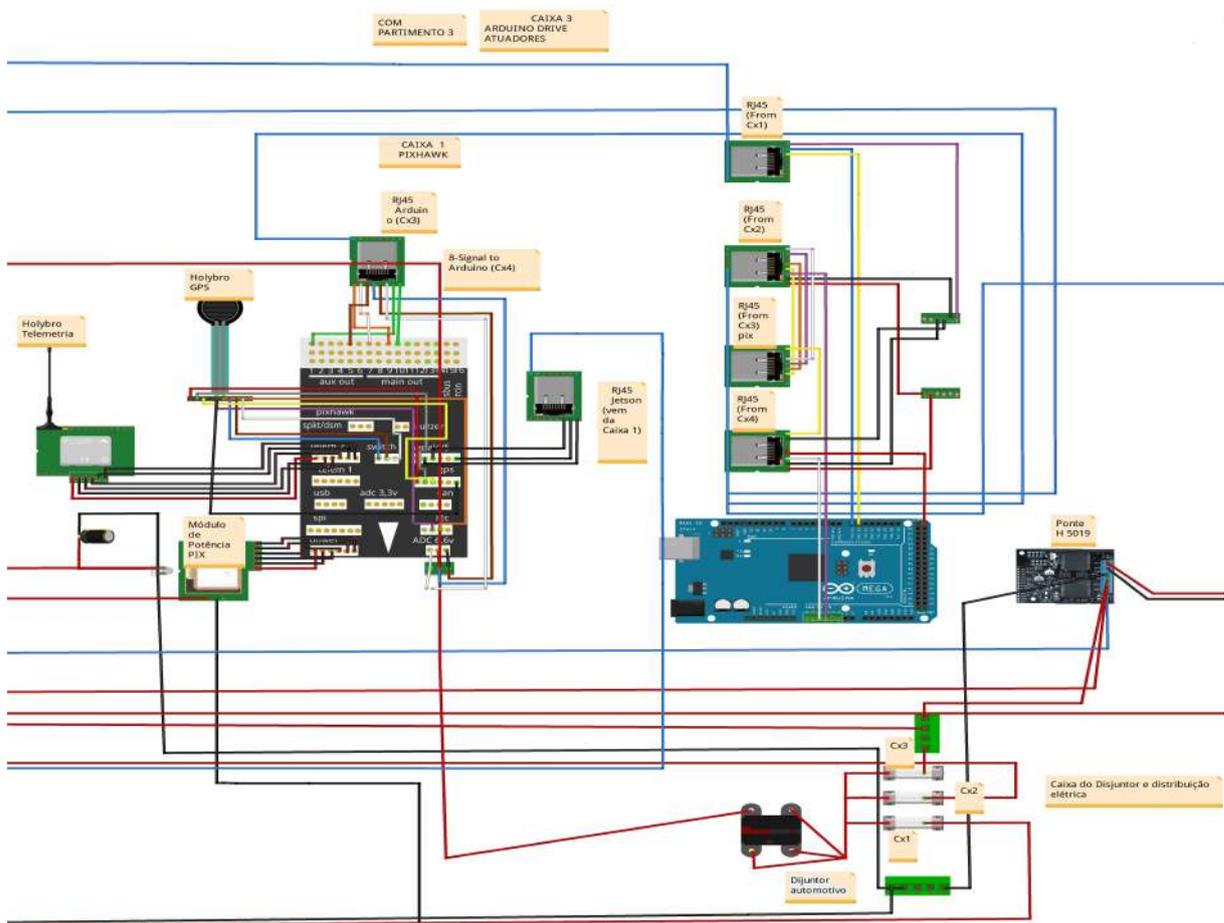


Figura 22: Diagrama de conexão dos módulos.

4.2.4 Módulo do controle do atuador do leme e do motor de popa

O último módulo Figura 23 é composto pelo atuador linear para o controle de posição do leme e pelo motor de popa. Sua arquitetura modular é apresentada na Figura 25. A caixa estanque tem uma controladora de motor para o motor de popa, que é responsável por controlar o motor de popa, por meio de comandos PWM do Arduino Uno, que, por sua vez, recebe comandos oriundos da Pixhawk presente no Compartimento 3. O motor requer uma tensão estabilizada, portanto, foi adicionado um capacitor na porta de saída do Arduino com o intuito de formar um filtro capacitivo.

As conexões do arduino uno são as seguintes: um cabo na porta 07 recebe o sinal

PWM da Pixhawk o cabo na porta 08 passa pelo circuito capacitivo e manda o sinal PWM para a controladora de motor.

O atuador linear para controle do leme Figura 24 possui um potenciômetro que se comunica com a caixa do Arduino Mega do compartimento III. Esse potenciômetro juntamente com o outro do guincho que está no compartimento II coletam a posição dos atuadores de forma de enviar o feedback para a Pixhawk poder saber sua posição atual.

NOMES	ESPECIFICAÇÕES
Tensão de entrada	12V
Corrente	3A (Sem carga); 9,5 A (Carga máxima)
Ciclo de trabalho	25% (5 minutos ligado para 15 minutos desligado)
Vida útil	50.000 ciclos
Temperatura de operacional	- 25 - 70°C
Tipo de motor	DC escovado

Tabela 20: Atuador linear



Figura 23: Atuador Linear

CONFIGURAÇÃO	CAIXA	COMUNICAÇÃO
Arduino UNO e VNH5019 Unidade de Motor DC Única 30A Proteção de Auto-tensão de Alta Cor- rente	01	ETHERNET que vai para a Pixhawk, e envia dados para controle do atuador linear e dados para controle do motor de popa

Tabela 22: Arduino e Ponte H

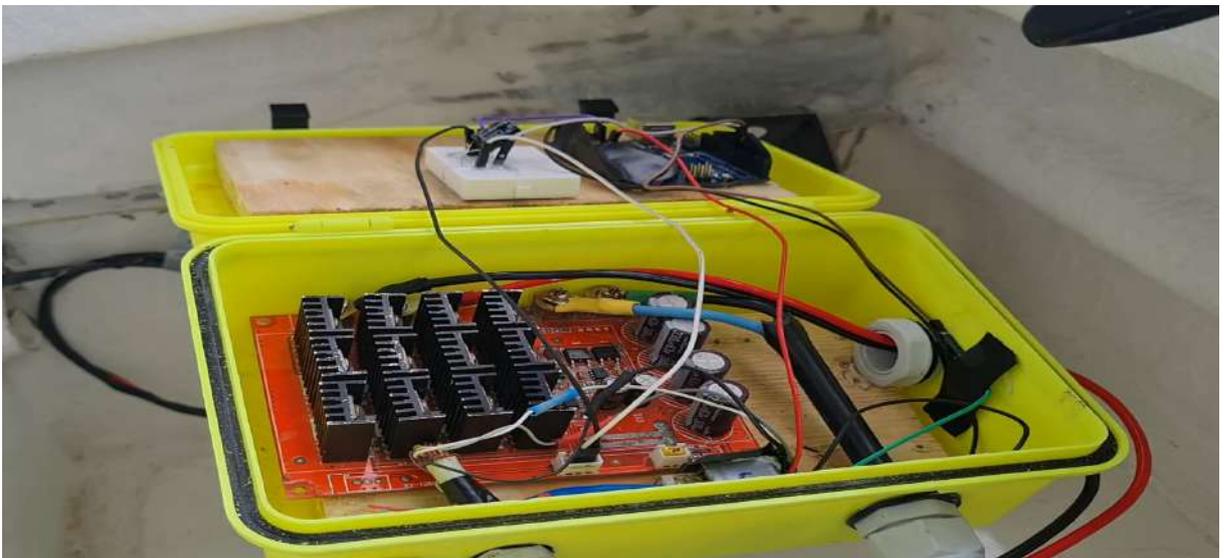


Figura 24: Ponte H do Atuador Linear para o controle da velocidade do motor

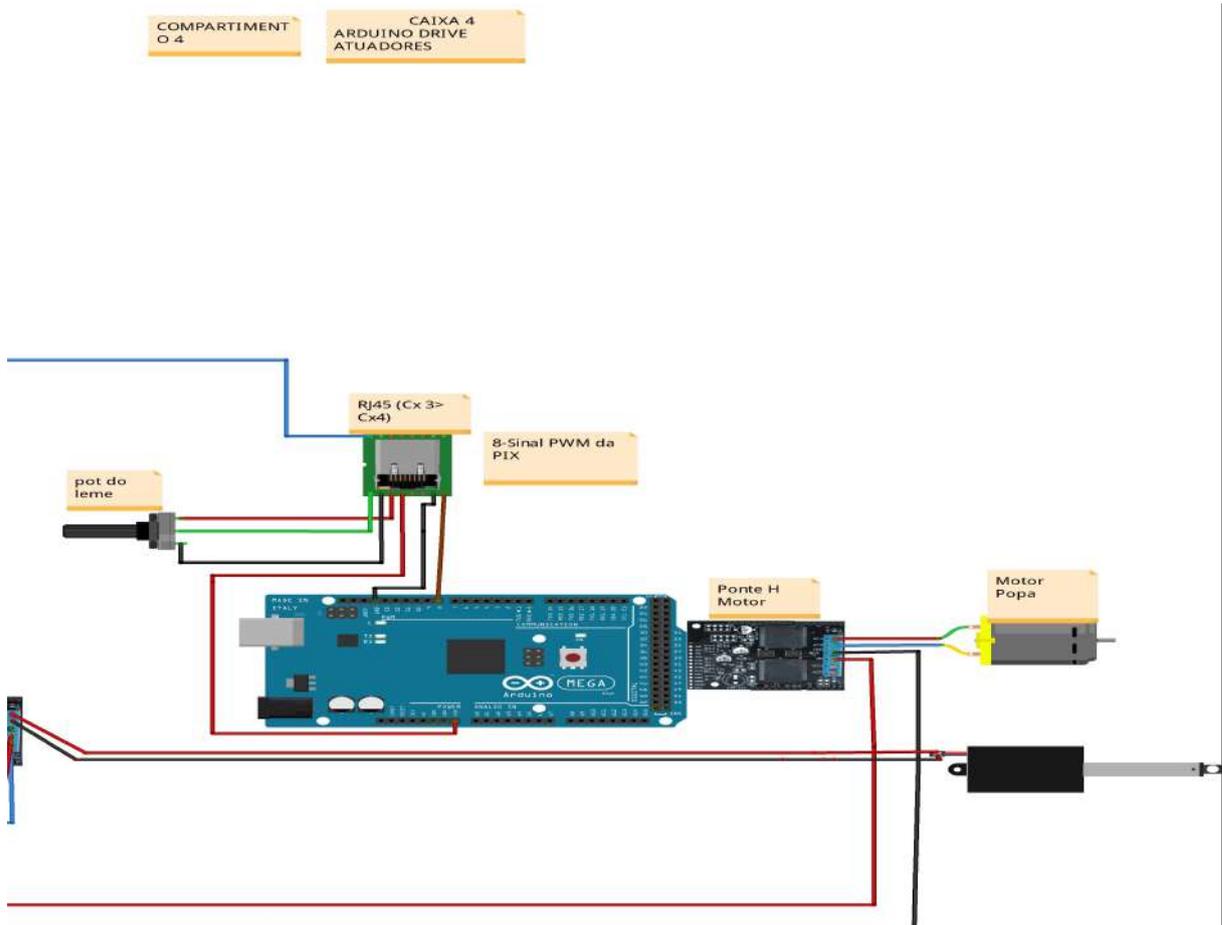


Figura 25: Diagrama da Plataforma do Barco Autônomo do controle do atuador do leme e do motor de popa

4.3 Abordagens de geração de energia

O sistema de geração e armazenamento de energia do veleiro utiliza painéis solares com controlador de carga e baterias, para fornecer carga de energia constante durante suas missões. Segundo a literatura (BOAS et al., 2016), a energia gerada é suficiente para o controle da vela e do leme (com propulsão eólica da embarcação) no caso de casco único, incluindo também a potência para os dispositivos eletrônicos embarcados e alguma eventual aplicação de carga paga. Assim, a embarcação passa a utilizar esta usina mais simples, porém com uma arquitetura que permite implementar uma abordagem alternativa que vem sendo pensada, que é o desenvolvimento de uma forma de recarregar baterias fora da rede, com o objetivo de contribuir diretamente para o acionamento de sua hélice elétrica a qualquer momento. Neste caso, embora secundário, o motor elétrico assume o sistema de hélice principal da embarcação por um pequeno período de tempo,

desde que seja possível a geração contínua de energia e seja necessário um manobrador específico. A vela também é usada em conjunto e o resultado é um sistema que funciona integrado, aumentando a autonomia energética com um modelo de propulsão híbrido, aumentando a manobrabilidade do veleiro e diminuindo sua dependência da situação do vento.

Existem algumas vantagens principais de usar um painel solar para geração de energia elétrica: Não consome combustível, portanto não produz poluição ou contaminação ambiental; Está em silêncio; Possui vida útil de mais de 20 anos sendo resistente às condições climáticas extremas (granizo, vento, temperatura e umidade); Não possui partes móveis e por isso requer pouca manutenção (apenas limpeza do painel) e permite aumentar a potência instalada através da incorporação de módulos adicionais. Existem também algumas limitações como o seu peso, o espaço de ocupação e a necessidade de um posicionamento de forma que receba impacto direto dos raios solares.

Para o F-Boat escolhemos o painel do fabricante SUNLOAD com 21 W_p com 995x330x2 mm, com peso de 750 gramas, que atende perfeitamente aos requisitos descritos acima. Com as dimensões desta solução, o painel pode ser colocado no casco sem deformar a aerodinâmica do veleiro, pois o painel é flexível e se adapta à aparência do convés. Porém, como cada célula produz uma energia elétrica reduzida, as células são interconectadas para formar um mosaico fotovoltaico. A Figura 26 mostra o gráfico da curva de corrente-tensão (curva I-V) do painel fotovoltaico.

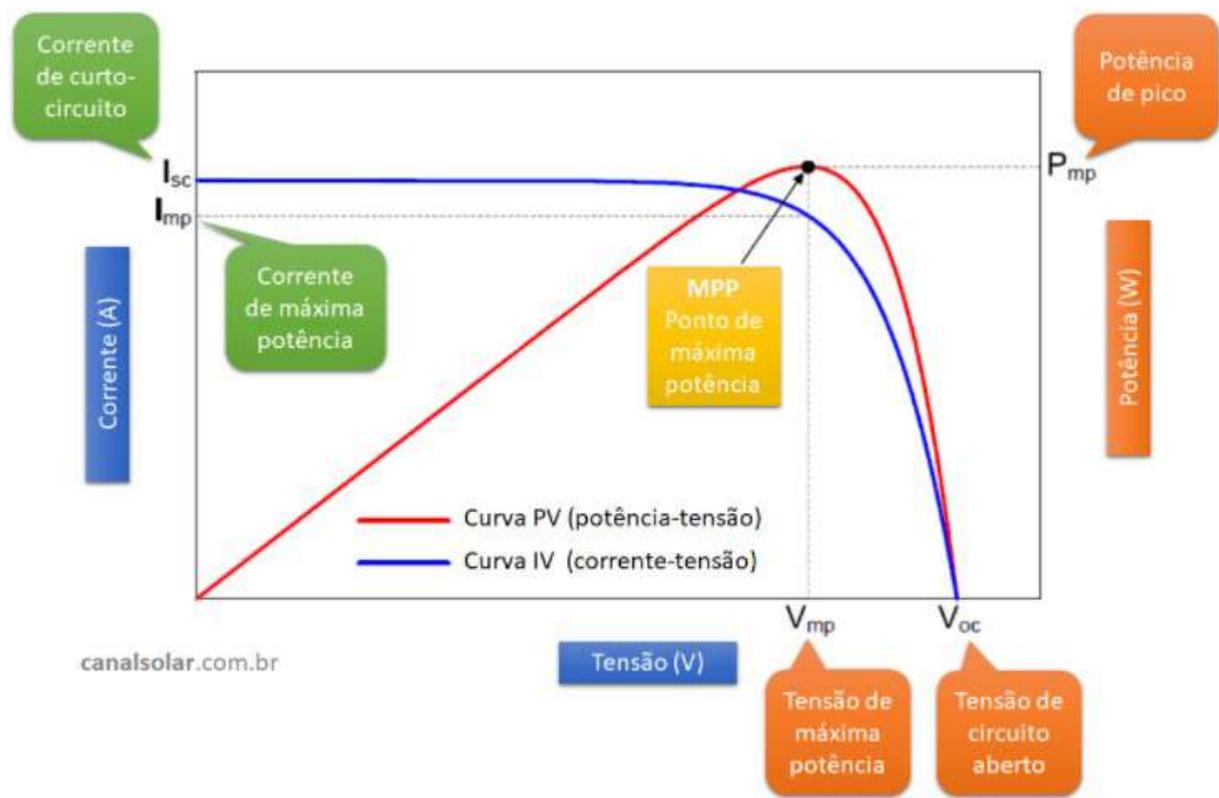


Figura 26: Corrente \times Curva de tensão para um painel fotovoltaico

Através da curva característica do painel podemos observar que a potência máxima alcançada não corresponde aos máximos individuais de tensão e corrente, mas sim ao ponto onde o produto da corrente e da tensão é máximo. Este ponto de potência máxima (MPP) varia com as condições ambientais, especificamente de acordo com a temperatura e a incidência de radiação solar. Assim, existem vários modos de funcionamento dos painéis solares, sendo necessário descobrir qual a configuração adotada para os painéis fotovoltaicos e baterias.

Observe que o primeiro modelo tem a vantagem de maior simplicidade de implementação. Porém, é necessário mais de material eletrônico para fazer as conexões entre os painéis e as baterias. O segundo modelo tem a vantagem de possuir uma interface de controle que permite aos painéis fotovoltaicos carregar as baterias ou acionar diretamente os motores. Este último método de controle é interessante para ser utilizado, por exemplo, em situações de emergência. No entanto, esta maior robustez dos painéis se traduz em sua maior complexidade de controle. Ou seja, os painéis fotovoltaicos devem ser otimizados para extrair sempre a máxima potência possível. Como visto, o ponto de potência máxima de um painel depende de vários fatores, incluindo radiação e temperatura. Para resolver

este problema, usamos o método conhecido como *Rastreamento do Ponto de Potência Máxima* (MPPT) para obter seu ponto de potência máxima a cada instante que o painel opera. O controle MPPT visa orientar o funcionamento do conversor de forma a extrair, a cada momento, a maior potência possível.

A embarcação possui duas baterias que fornecem energia aos motores elétricos e aos diversos subsistemas. Usamos painéis fotovoltaicos para recarregar as baterias. Além disso, este projeto pretende utilizar outras fontes renováveis como a corrente hídrica e o vento. Os painéis podem ser conectados diretamente às baterias servindo apenas para carregá-los ou os motores e baterias podem ser conectados através de um interruptor, neste caso para acionamento da hélice elétrica da embarcação para uma situação de emergência. Os painéis fotovoltaicos devem ser otimizados para retirar sempre a potência máxima possível, o que depende de vários fatores incluindo a radiação e a temperatura. Portanto, o método de rastreamento do ponto de potência máxima (MPPT) é usado aqui para garantir que o painel opere em seu ponto máximo de potência a cada instante.

Como dito, o veleiro possui uma hélice elétrica (motor) para barcos convencionais (PHA-DIGSW54 54Lbs), para água salgada com eixo fixo. Esta hélice será utilizada em situações de emergência ou manobras complexas e pode ser ativada ou desativada de duas maneiras. A primeira é por um piloto humano utilizando uma estação terrestre, por meio de um sinal PWM gerado por uma placa Arduino, que é enviado ao seu driver do motor. E o segundo modo de operação é autônomo, por comandos adequados nas técnicas de controle em execução a bordo da embarcação.

Um aspecto que motivou a propulsão elétrica foi o reconhecimento da importância de projetar visando custo de vida útil. É também uma vantagem, da propulsão elétrica, o uso do sistema de potência, que auxilia no aumento do tempo de vida útil da embarcação, redução do consumo de combustível, redução do nível de vibração, por não necessitar de conexão mecânica, a não necessidade de motor auxiliar, maior flexibilidade, devido a economia de espaço, menor nível de ruídos, por não haver necessidade do uso de engrenagens reductoras e redução de poluição por queima de gases poluentes.

Como desvantagem está o alto custo de desenvolvimento e de diluição de riscos para novos modelos. Para superar tais riscos, nas embarcações, se faz necessário o financiamento de um projeto que visa a diluição desses riscos onde se deve realizar uma bateria de testes, que ajudará a configurar o sistema, fazendo com que o mesmo possa ser usado como referência para outras embarcações. É, também, uma desvantagem o aumento de riscos por problemas elétricos, como incêndios, o que pode vir a comprometer a flutua-

bilidade da embarcação, a necessidade de maior habilidade de utilização, a necessidade de sobressalentes e o maior custo de manutenção, quando operando em regiões de baixas temperaturas. Enfim, a Figura 27 mostra a planta baixa do sistema com todas as suas conexões elétricas.

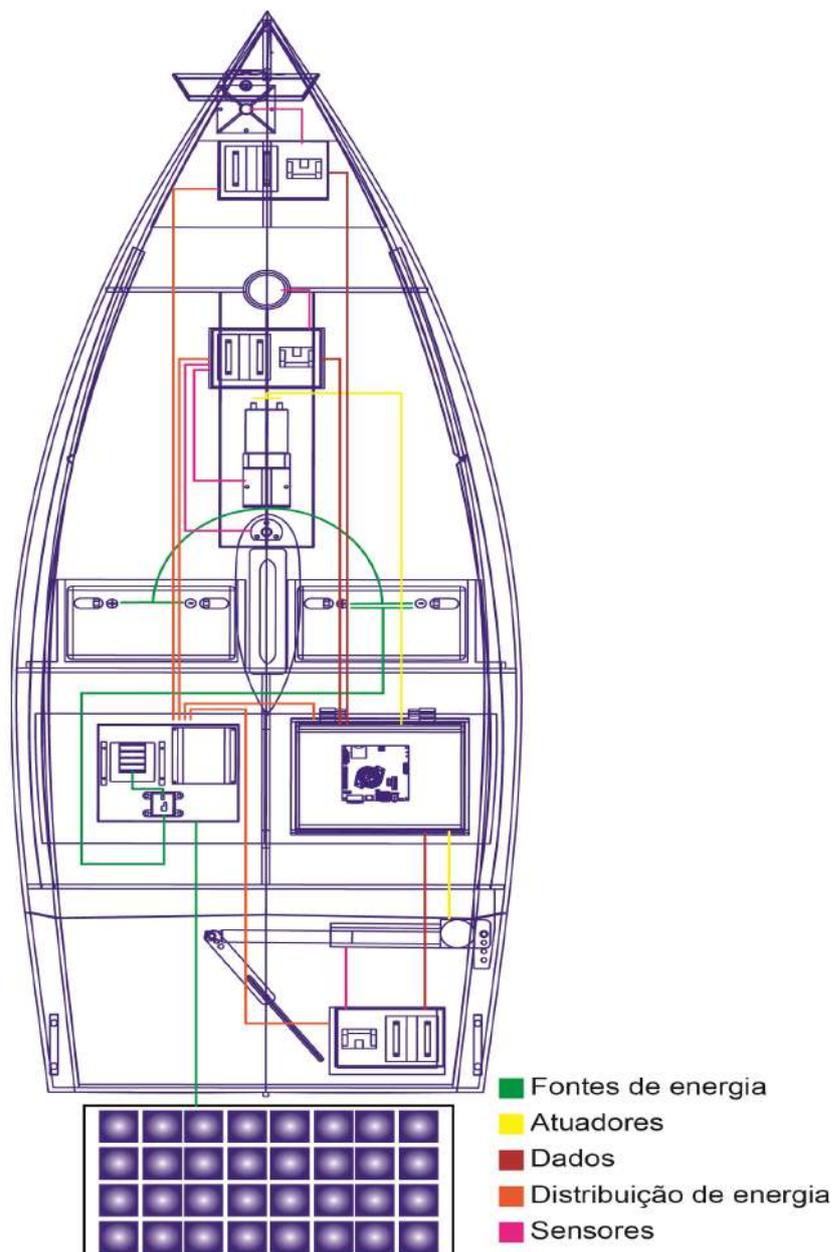


Figura 27: Planta baixa das conexões elétricas

4.4 Sensores e Processamento Visual

A solução para o processamento de visão computacional é que o veleiro com um computador embutido (nVidia Xavier) consiga fornecer poder de processamento suficiente para permitir tarefas de visão. Isso irá potencializar as etapas de percepção (detecção do objeto, classificação, rastreamento, entre outros), localização (fornecer um caminho de referência para o robô), planejamento (para definir a nova rota) e controle (para enviar ordens aos atuadores). Os dados sensoriais básicos necessários para a navegação de curto prazo incluem a direção do vento, a posição do GPS, a bússola e os ângulos do leme e da vela. Além disso, outros sensores como uma câmera panorâmica de 360 graus e uma câmera estéreo Zed 3D também estão instalados.

Eles podem ser usados em missões de longo prazo. A literatura possui vasto material sobre detecção de objetos e prevenção de colisões. Métodos baseados em redes profundas (CNN) combinados com segmentação de imagens têm sido aplicados com sucesso no reconhecimento de imagens e vídeos (GERON, 2017). Uma CNN tem como objetivo classificar e detectar objetos onde uma caixa delimitadora que identifica uma classe específica de objeto é encontrada. A segmentação semântica usa um conceito para identificar cada pixel da imagem e uma máscara é aplicada a cada um deles (SULTANA; SUFIAN; DUTTA, 2020). Este sensor não será detalhado aqui, sendo escopo de outro trabalho.

5 Arquitetura de software

Neste capítulo, apresentamos o modelo de arquitetura de software, representado esquematicamente pelo diagrama da Figura 29, bem como os controladores implementados.

$$\begin{aligned} & (M_{RB} + M_{A(\text{Hidrodinâmica})})V + (C_{RB(\text{Dinâmica}(\text{centro de massa}))})V + (C_{A(\text{Hidrodinâmica}(\text{coriolis e centrípeto}))})V + \\ & (D_{K(\text{Lift}(\text{forças e os momentos gerados pela quilha}))})V + (D_{H(\text{Lift}(\text{força resultante do casco}))})V + g(n) \\ & = \tau_s + \tau_r \Leftrightarrow (M_{RB} + M_{A(\text{Hidrodinâmica})})V = \tau_s + \tau_r - (C_{RB(\text{Dinâmica}(\text{centro de massa}))})V \\ & + (C_{A(\text{Hidrodinâmica}(\text{coriolis e centrípeto}))})V - (D_{K(\text{Lift}(\text{forças e os momentos gerados pela quilha}))})V \\ & \quad - (D_{H(\text{Lift}(\text{força resultante do casco}))})V - g(n) \end{aligned}$$

Inicialmente apresentamos o modelo matemático completo que representa o comportamento dinâmico do barco, proposto por Alves (ALVES, 2010) e o desenvolvimento de um algoritmo para aplicações de teoria de controle. A Figura 28 mostra a arquitetura de controle e orientação, aplicada a um veleiro, incluindo um diagrama de componentes mostrando onde os controles foram utilizados.

No que diz respeito ao movimento do leme, planejamos um controlador PID onde a entrada é o erro de orientação que é definido como a diferença entre a orientação desejada e a real. Os três componentes (PID) também são usados para calcular o ângulo do leme. Em relação aos valores de cada ganhos, estes foram obtidos por meio de uma análise empírica do comportamento do veleiro com o auxílio do software Matlab Tune, capturando um instantâneo a cada 10 segundos. Como o modelo é não linear, é necessário indicar o tempo de linearização ao Matlab para a obtenção dos valores Figura 29, os parâmetros de fuzzy e ganhos do PID estão detalhados conforme os artigos (JÚNIOR et al., 2013) e (<http://www.natalnet.br/lars2013/WGWR-WUWR/121534.pdf>)

A partir da execução da simulação, alcançamos os valores de ganho: $K_p = 0,68$ $K_i = 0,125$ $K_d = -0,130$, para $N = 25$. Para o controle da vela realizamos um estudo do

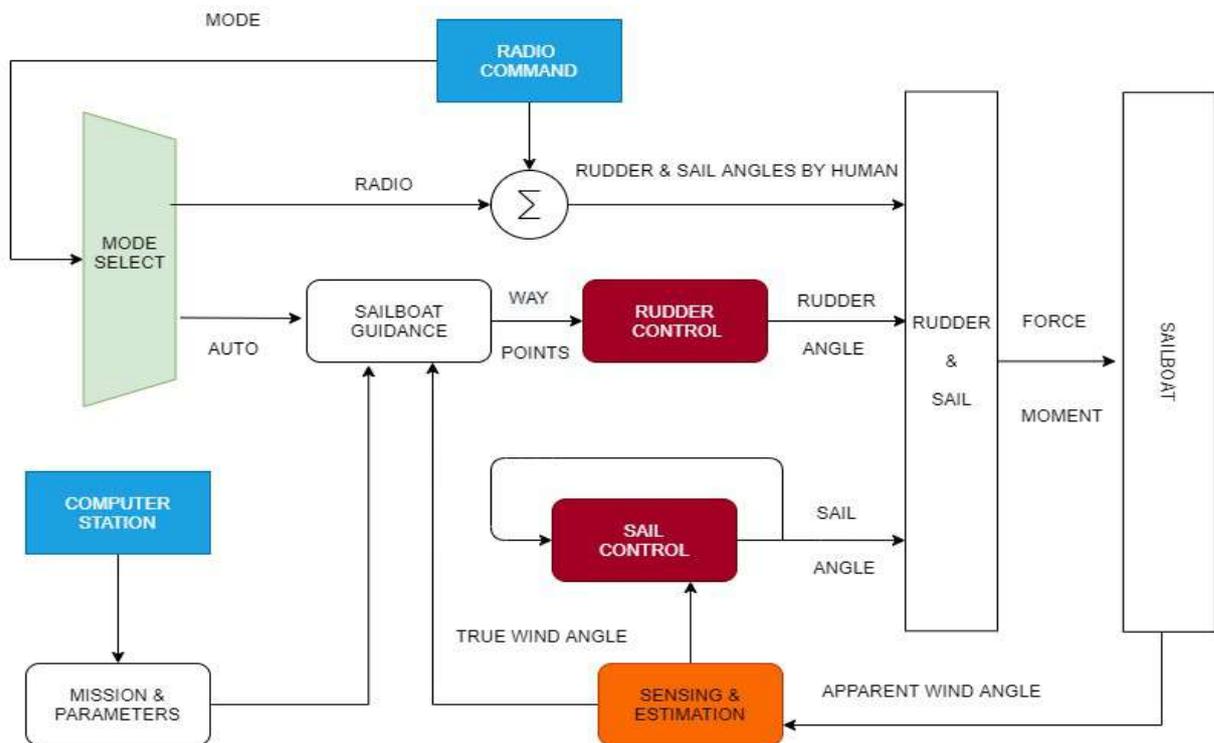


Figura 28: Diagrama da estrutura de orientação e controle do veleiro

comportamento dos movimentos do veleiro para um dada orientação, para posteriormente construir um controlador baseado em Lógica *Fuzzy* capaz de representar e controlar esses movimentos.

A escolha do método de inferência focado no Takagi-Sugeno se deve ao fato das saídas serem baseadas em funções, que estão retornando pesos diferentes para as variáveis de entrada do sistema. No entanto, eles são muito mais complexos do que o método de Mandani (ABRIL; SALOM; CALVO, 1997) (STELZER; PRÖLL; JOHN, 2007). Afirma-se que este controlador possui duas entradas: o erro de orientação e sua derivada. A saída é o ângulo da vela, que indica quão esticada ela ou a espia da vela deve ser. O tipo de função de associação usada para a entrada é o tipo Bell, que é fornecido por:

$$bell(x; a, b, c) = \frac{1}{a + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.1)$$

O leme e o controle da vela foram configurados para uma orientação desejada de $\pi + \pi/4$ rad.

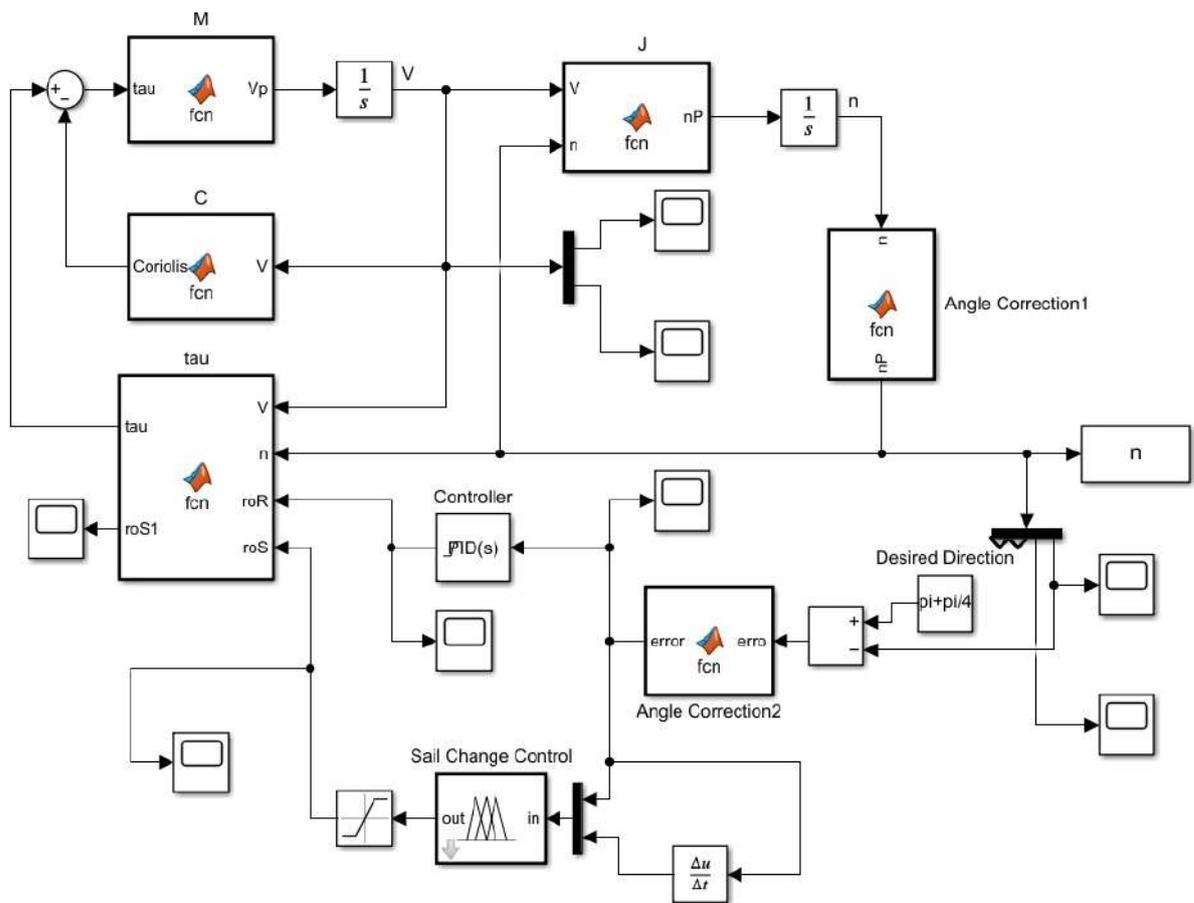


Figura 29: Estrutura de controle com a lógica Fuzzy

Nas figuras 30 e 32 são mostrados os resultados dos comportamentos utilizando o controlador *Fuzzy* para vela e PID para o leme respectivamente.

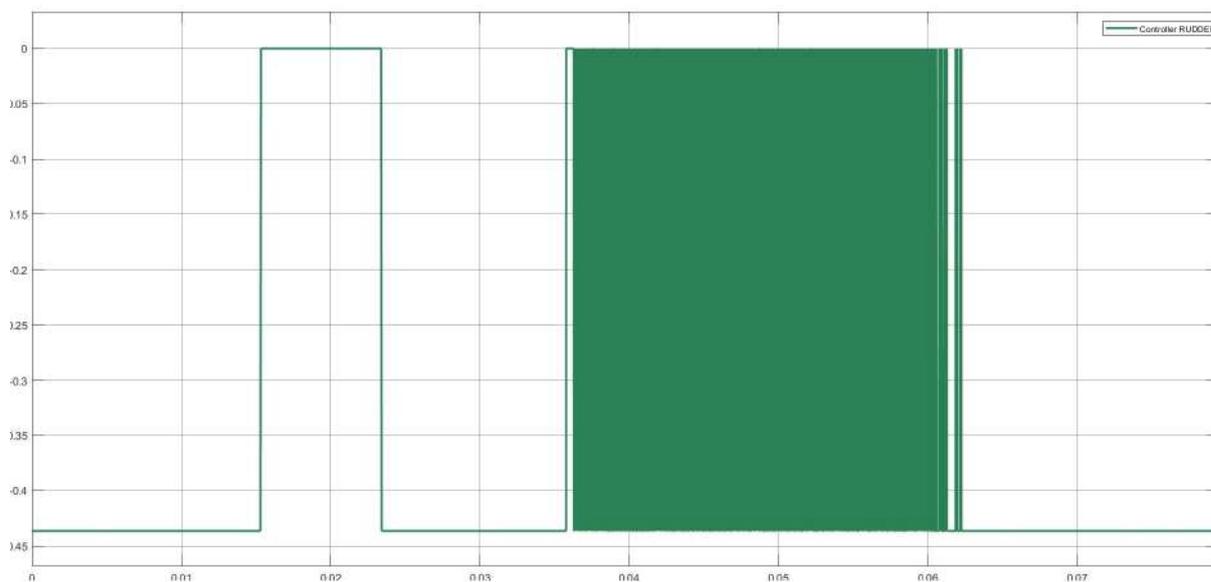


Figura 30: Representação gráfica do ângulo do leme

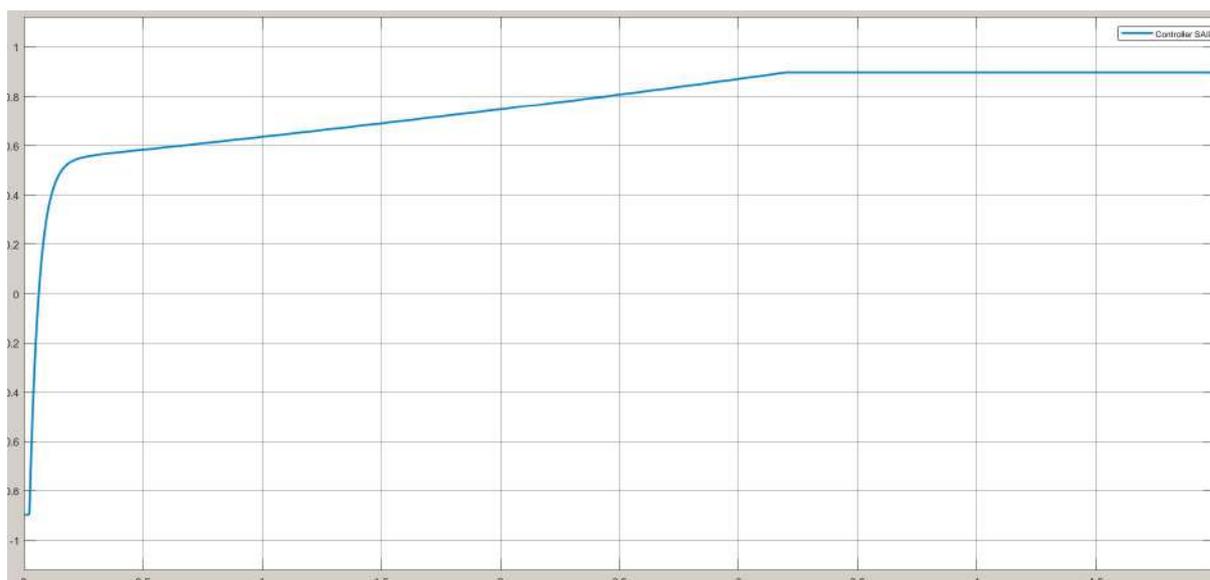


Figura 31: Representação gráfica do ângulo da vela

Nas figuras 32 e 33 são mostrados os resultados dos comportamentos ângulo de rotação - roll e ângulo de guinada - yaw respectivamente.

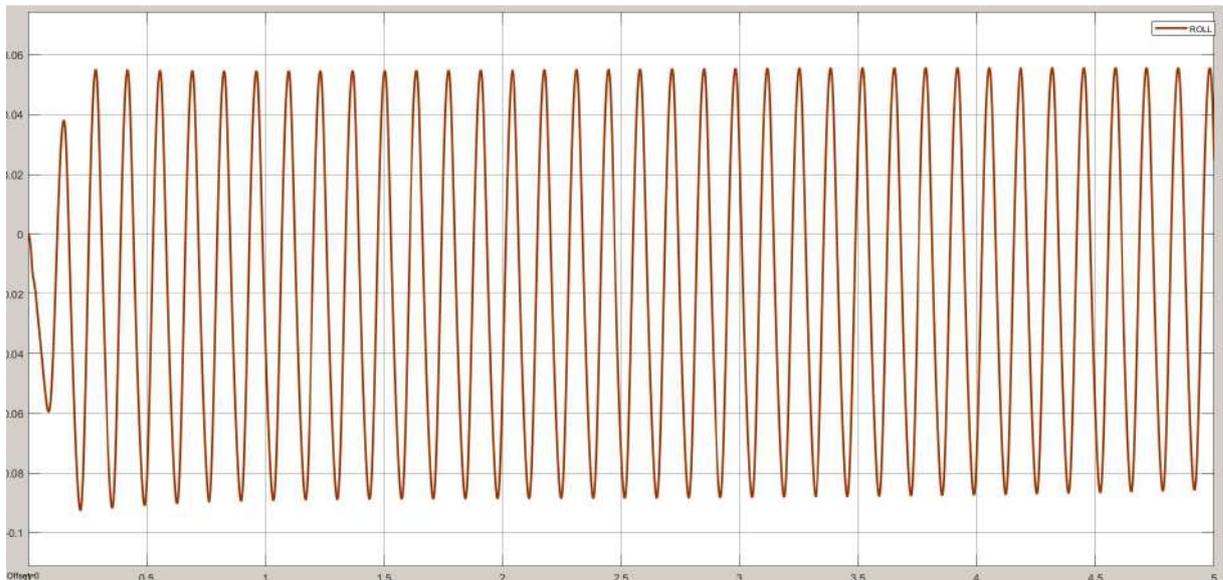


Figura 32: Representação gráfica do ângulo de rotação - roll



Figura 33: Representação gráfica do ângulo de guinada - yaw

Após essas observações, notamos que o parâmetro D pode ser desconsiderado no controle do protótipo, principalmente por causa da instabilidade, que é gerada devido à intensificação de ruído de alta frequência causado pela derivada. Assim sendo, criamos um controlador PI simplificado.

Segundo a instituição SNAME (Sociedade de Arquitetos Navais e Engenheiros Marítimos) (SNAME, s.d.) a influência da variável da corrente de água pode ser desprezada considerando que a corrente da velocidade é menor que a velocidade do vento e que o

deslocamento e o ângulo para o alvo são escolhidos como parâmetros a serem modificados no controle. Seu efeito de colocar o barco fora da direção do alvo obtém corrigido no controle. O algoritmo de controle mostra a posição do barco sendo controlado independentemente da corrente de água. Isso significa que a influência da corrente de água não importa, pois o sistema de controle, a cada interação, corrige o rumo do veleiro.

Testamos diferentes panoramas para possíveis trajetórias do veleiro, que são aqui analisadas, tanto com o controlador usando PID para leme quanto *Fuzzy* para velejar. Um exemplo de aplicação que mostra o controle da vela por uma equação matemática com a finalidade de navegar em zigue-zague e/ou jibe também é apresentado a seguir.

Durante competições de regata é comum os velejadores usarem uma tabela, chamada de diagrama polar, que relaciona a velocidade esperada do veleiro para diversas direções e velocidades do vento aparente (SANTOS, 2020). O diagrama polar mostra, para cada velocidade e direção de vento, uma curva que é uma estimativa da melhor velocidade obtida em condições ideais. Este diagrama auxilia o velejador a verificar o desempenho da vela. Caso o velejador verifique que a velocidade do veleiro está muito distante da velocidade indicada pelo diagrama polar, significa que é possível ajustar a vela para aumentar a velocidade da embarcação. Além disto, a informação do diagrama polar também ajuda a encontrar o ângulo de navegação que mais reduz o tempo ao destino. Usando o diagrama polar, pode-se encontrar o ângulo com o vento que maximiza o avanço em uma direção usando a relação trigonométrica apresentada na Equação 5.2.

$$V_{max} = U \cos(\psi - \gamma_{tw}) \quad (5.2)$$

A Figura 34 mostra um exemplo de diagrama polar. Cada veleiro possui um diagrama polar específico, porém algumas características em comum podem ser observadas. (SANTOS, 2020) Por exemplo, percebe-se que a maior velocidade que o veleiro pode alcançar quando navegando a favor do vento é dada na região do ponto de velejo alheta, enquanto que por senso comum se diria que esta ocorre na posição popa rasa. Este fenômeno ocorre pois enquanto na posição popa rasa a velocidade máxima do veleiro é a velocidade do vento, na posição alheta os efeitos aerodinâmicos na vela geram uma força de sustentação adicional, o que resulta numa maior propulsão.

Deste modo, surgiu o conceito de VMG (*Velocity Made Good*) e para se obter o VMG num dado momento, apenas é necessário realizar um cálculo trigonométrico:

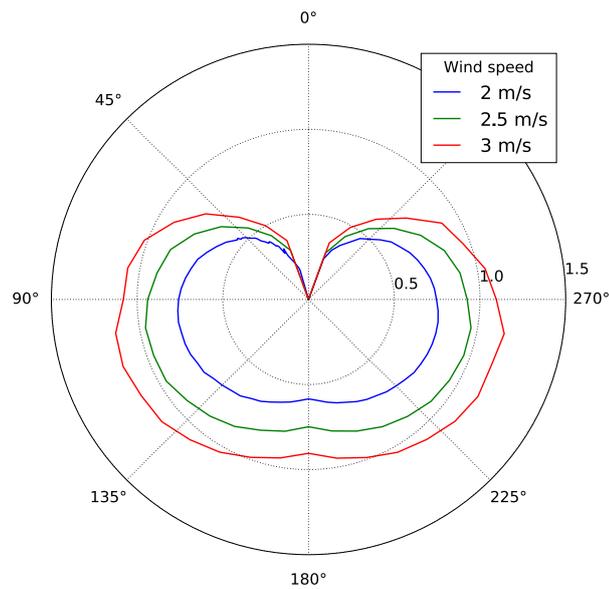


Figura 34: Diagrama polar de um veleiro para diferentes velocidades de vento. Mostra a velocidade esperada do veleiro para cada ângulo de ataque.

$$VMG = v * \cos(\text{deslocamento} - \text{de} - \text{curso}) \quad (5.3)$$

A medida que o ângulo do veleiro é variado dentro da região orça fechada (45° - 60°) a velocidade do veleiro varia de acordo com o diagrama polar. A componente de velocidade em direção ao ponto de destino é chamada de VMG (Figura 35) e pode ser calculada pela Equação 5.4.

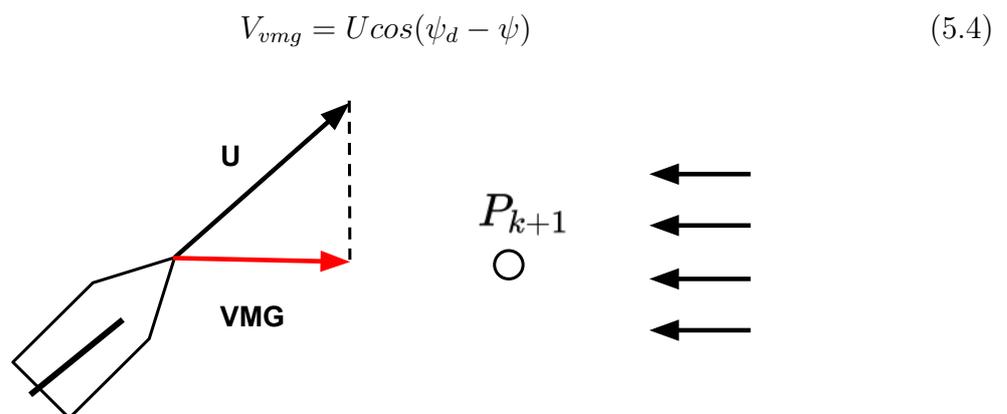


Figura 35: Representação gráfica do VMG.

Para testar a eficácia dos controladores idealizados, além do nosso projeto arquitetônico, planejamos um experimento simulado no qual o sistema de controle deve realizar pelo menos um recuo para navegação. O diagrama resultante para esta tarefa pode ser visto na

Figura 37. Basicamente, existem duas zonas nas quais o veleiro não deve navegar, uma é contra vento e outra a favor do vento. Na prática, o barco pode ir totalmente a favor do vento, mas não é tão eficaz quanto os zigue-zagues, que em termos técnicos são chamados de virada a favor do vento. Para realizar essas manobras, é necessário um comando de alto nível para analisar se é ou não possível para o barco realizar uma determinada manobra e como fazê-lo. Observe que um barco com hélices pode se mover em qualquer orientação e condições climáticas, sem um impacto significativo em seu movimento. Por outro lado, a direção do vento afeta fortemente o curso de um veleiro, o que torna seu controle mais complexo. Felizmente, para uma dada velocidade e direção do vento, é possível deduzir o ângulo máximo que a vela deve ter para conseguir os valores de velocidade usando a previsão de velocidade polar (VPP) (GILBERT, s.d.) (ALVES, 2010).

Esses diagramas são obtidos pela combinação de vários fatores como velocidade e direção do vento, ângulo do veleiro com o vento real, velocidade do veleiro, ângulo de ataque da vela com o vento aparente, fator de atrito, arrasto, propulsão, coeficiente de sustentação e arrasto, entre outros. Portanto, é possível obter os valores de saída do ângulo máximo da vela e da velocidade máxima conforme 36. Após esta análise dos resultados obtidos por (ALVES, 2010), e simulado no matlab. Foram realizados os testes com os valores médios dos ângulos máximos, considerando a seguinte equação: (GILBERT, s.d.).

$$\delta_{smax} = 0.0986\alpha_{tw}^2 + 0.55\alpha_{tw} - 0.1362 \quad (5.5)$$

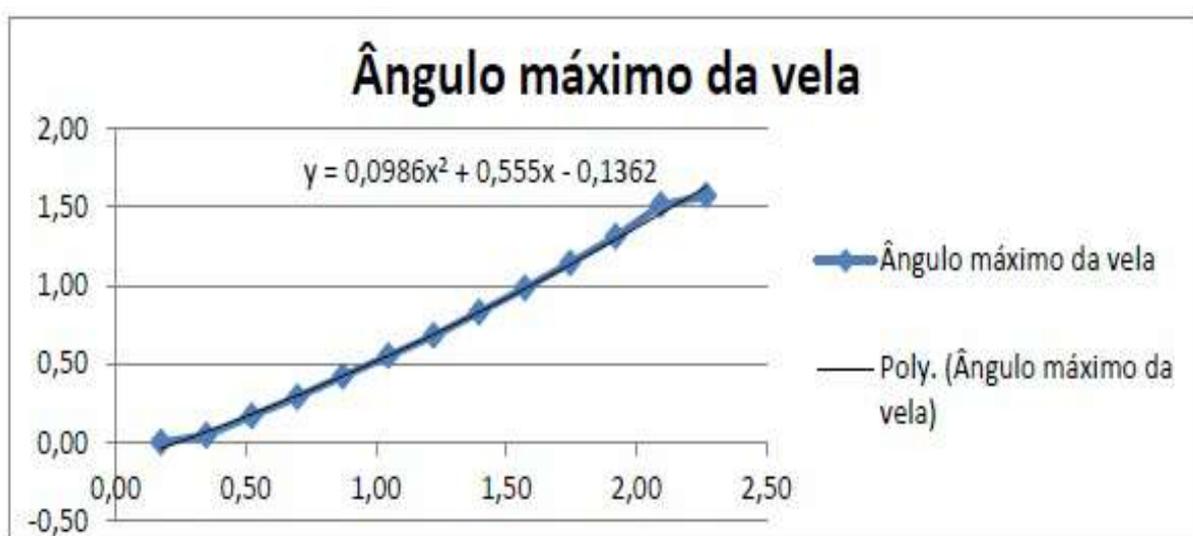


Figura 36: Ângulos máximos
(ALVES, 2010)

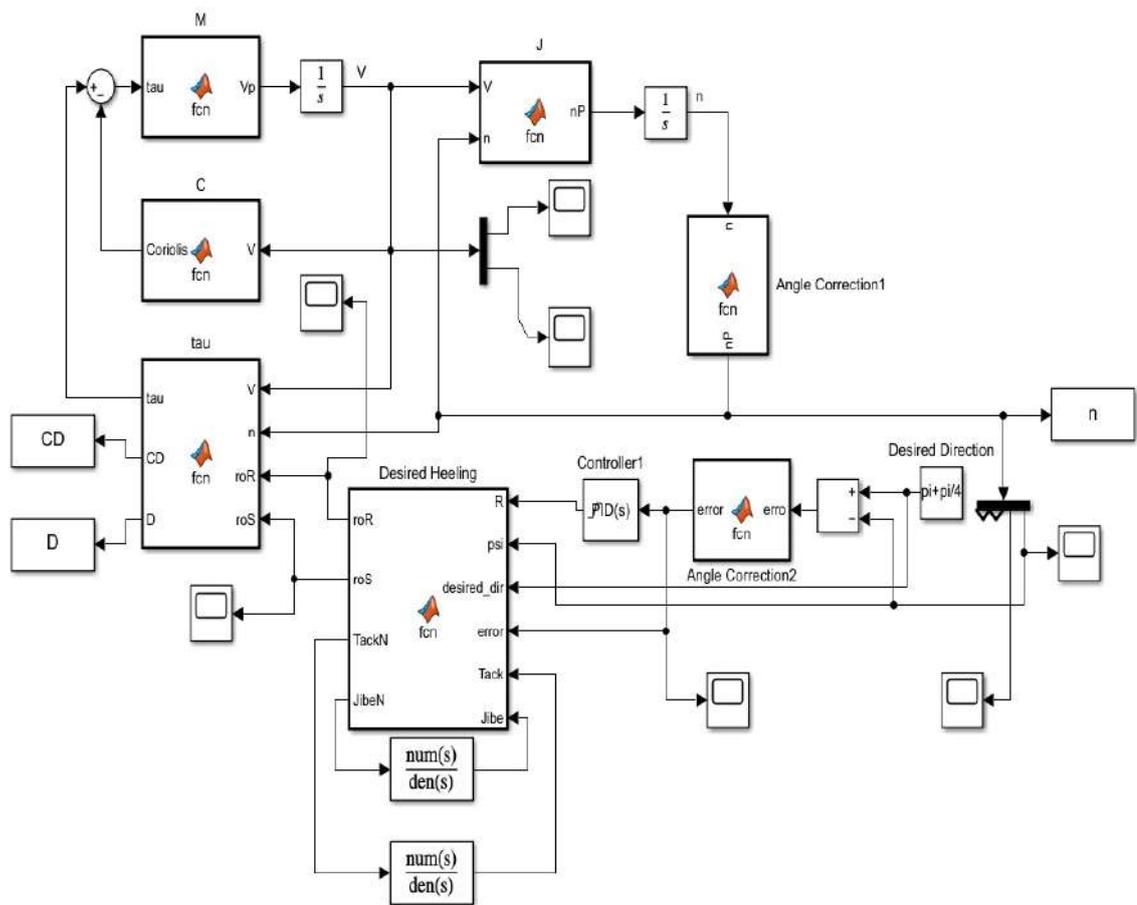


Figura 37: Estrutura de controle com jibe

Na Figura 38 e Figura 39 podemos verificar os resultados da trajetória da embarcação, realizando os vários cálculos de *waypoints* para que o veleiro execute as manobras necessárias para chegar a um determinado destino.

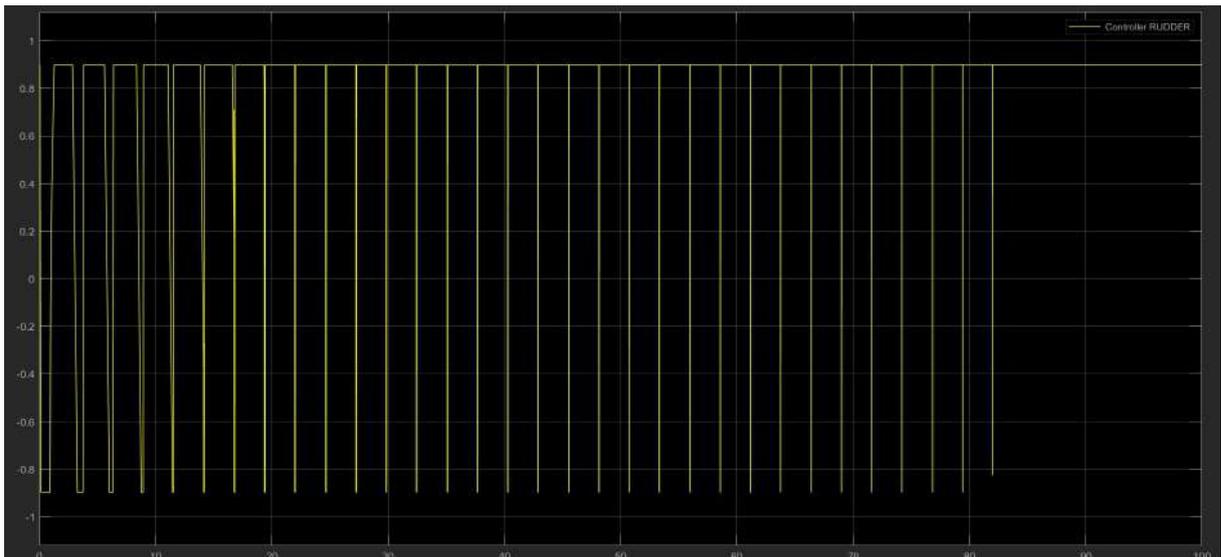


Figura 38: Representação gráfica do ângulo do leme ao longo do tempo

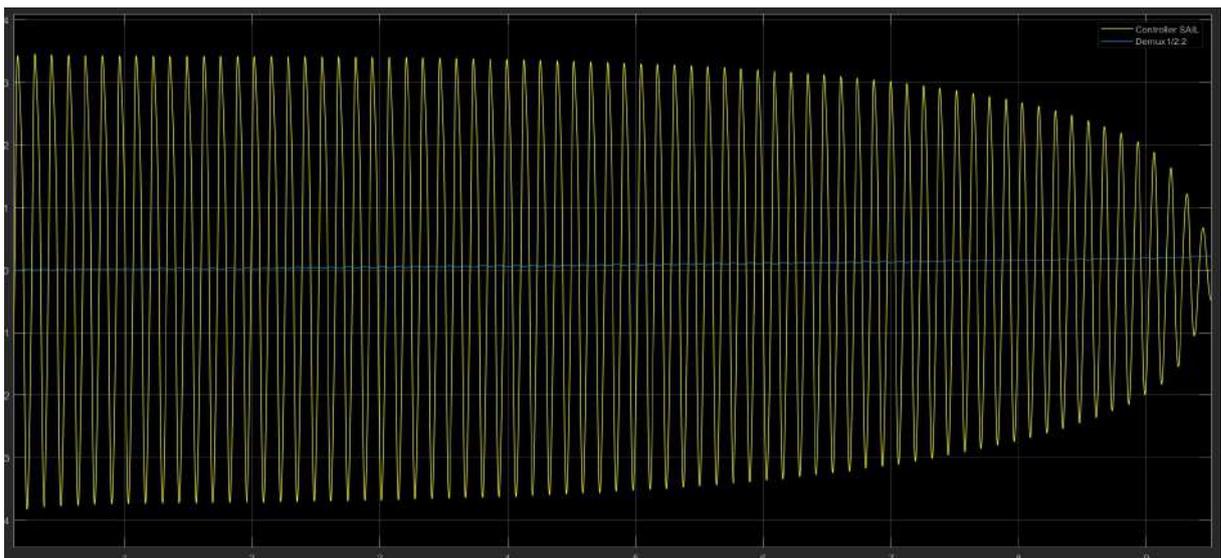


Figura 39: Representação gráfica do ângulo da vela ao longo do tempo

Nas figuras 40 e 41 são mostrados os resultados dos comportamentos ângulo de rotação - roll e ângulo de guinada - yaw respectivamente.

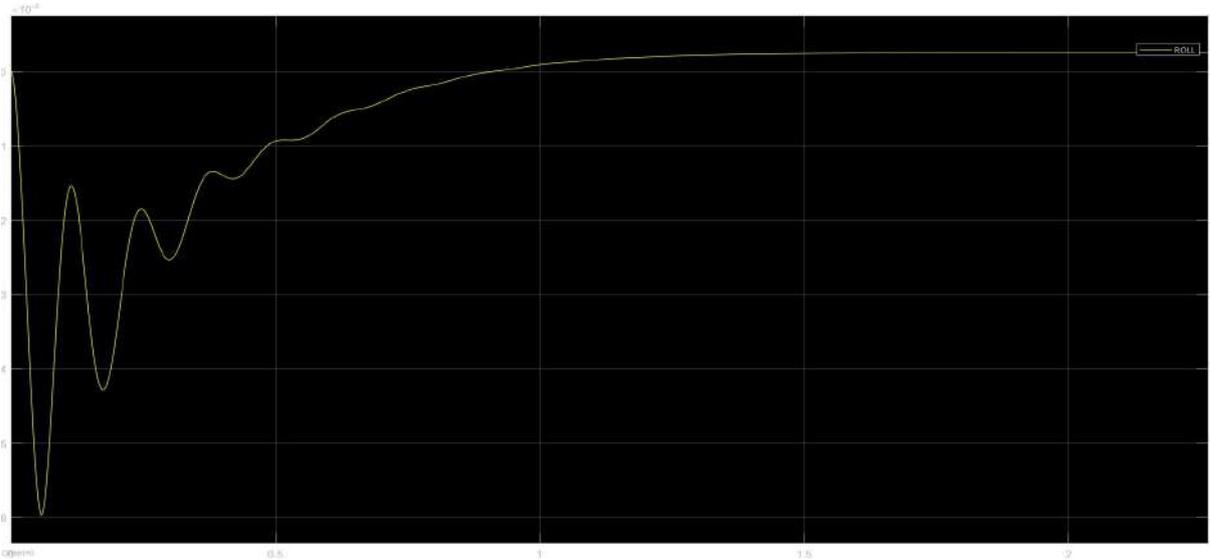


Figura 40: Representação gráfica do ângulo de rolagem - roll ao longo do tempo

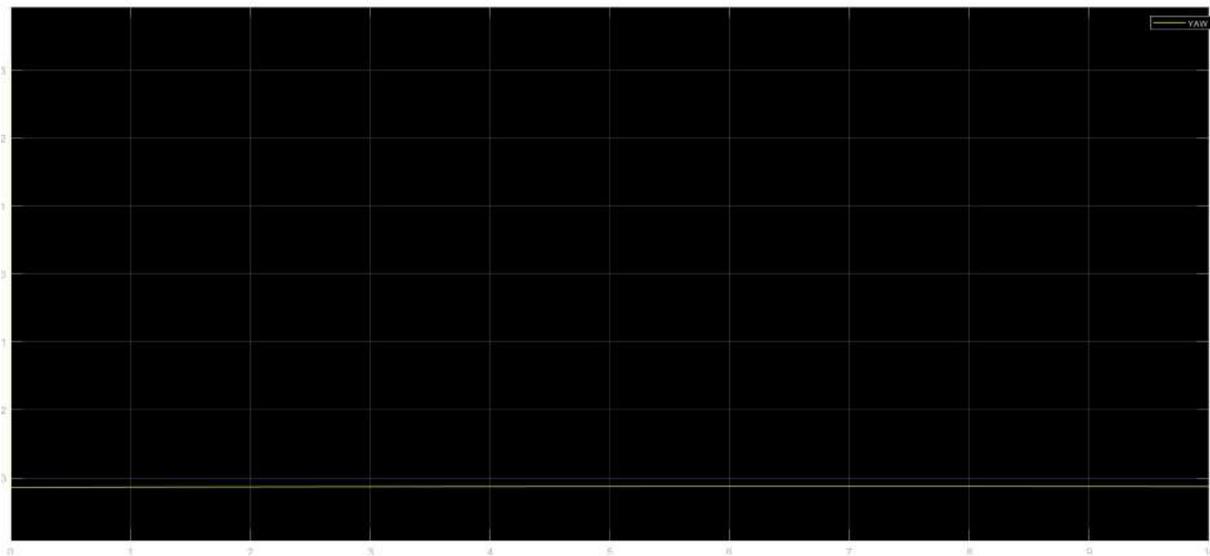


Figura 41: Representação gráfica do ângulo de guinada - yaw ao longo do tempo

Assim, começamos a realizar cálculos dos valores da janela de histerese para obter o diagrama e os resultados dos controles da vela e do leme, em seguida são gerados aleatoriamente novos pontos para que a embarcação realize as manobras necessárias até chegar a uma determinada posição. Após algumas pesquisas para entender as limitações dos movimentos de um veleiro, controles de alto nível são realizados para determinar a vela e o ângulo do leme, dependendo do status do controle: PID para leme e *Fuzzy* para vela e uma fórmula matemática para jibe / zig- zag usando coordenadas polares.

Ao entrar no modo jibe, os valores de histerese são calculados para que os *waypoints*

sejam estimados. Como através da aproximação difusa o ângulo da vela é corrigido, ela terá duas entradas (o erro de orientação e sua derivada) e uma saída que será o ângulo da vela, que em termos práticos está relacionado a como a vela esticou a corda e como ela deveria estar.

O método Takagi-Sugeno para velejar revelou-se ineficiente pois considera apenas o erro de orientação e sua derivada, não prestando atenção aos valores do vento, que é o aspecto mais importante de um barco a vela. Por este motivo, optamos por controlar a vela usando o modo de navegação jibe.

Podemos notar que controlar a vela usando o zigue-zague para o movimento é bastante interessante e complexo. As mudanças para os ângulos do leme e da vela durante essas manobras são mostradas nas Figuras [38](#) e [39](#).

6 Resultados alcançados

Como colocado no Capítulo 1, a parte experimental deste trabalho foi realizada parte em simulação e parte usando o veleiro robótico F-Boat, construído pela equipe do projeto. Ensaios na Baía da Guanabara verificaram e validaram a arquitetura nova de hardware e o controle em um veleiro, como descrito a seguir. Inicialmente tratamos da construção, seguindo a arquitetura proposta nesta dissertação.

6.1 Experimentos práticos

Um teste inicial, de estanqueidade foi realizado, com o veleiro ainda sem os equipamentos e componentes eletro-eletrônicos, sendo jogado água por cima da embarcação, onde se pode notar que não entrou água nos compartimentos. Após finalizada a construção, o F-Boat fez seus testes iniciais em outubro de 2021, sendo realizado dois testes práticos com a embarcação nas águas da Baía da Guanabara, na região do Saco de São Francisco, em Niterói. Os testes realizados foram bem sucedidos, sendo que todos os equipamentos foram utilizados, com exceção da câmera ZED e da Jetson Xavier que não estavam instalados. O guincho automotivo, o atuador linear e o motor elétrico funcionaram perfeitamente.

Inicialmente, foi usado controle remoto manual para guiar a embarcação, com o rádio-controle citado anteriormente. Contudo, em seguida foram realizados testes do controle automático também. Para isso, foi acionada a função ACRO do sistema operacional instalado na Pixhawk chamado Ardupilot, o que fez com que a vela e o leme fossem controlados por um controlador do tipo PI (similar ao introduzido neste trabalho). No último teste prático, após quase três horas de navegação, com vários testes usando o piloto automático, foram gerados os logs que serão mostrados e comentados a seguir.

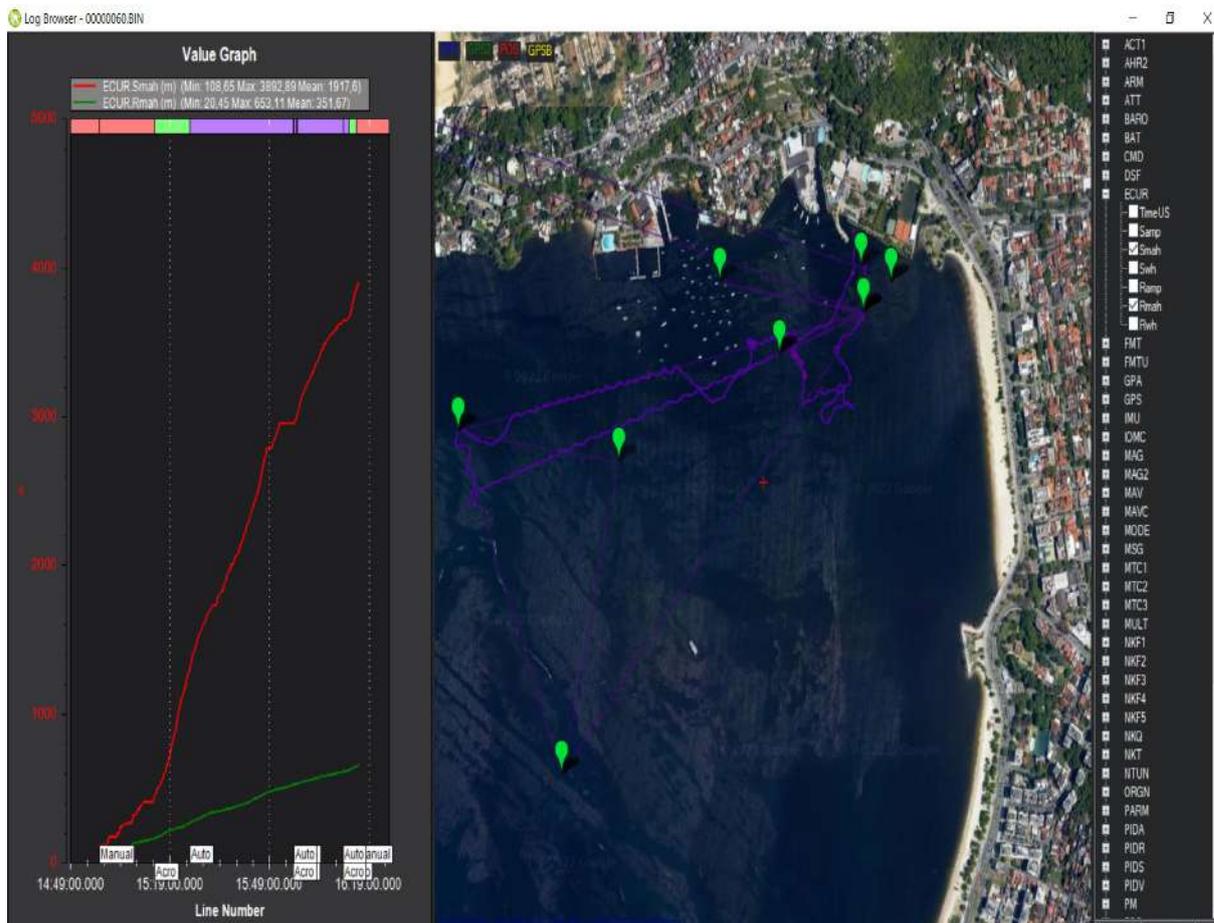


Figura 42: Representação gráfica do consumo de Energia do Leme na cor verde e da Vela na cor vermelho

O consumo de energia do leme e da vela foram bastante interessantes, como mostrado na Figura 42, sendo que o leme consumiu menos que a vela: 1000 mAh e 4000 mAh respectivamente. Para a vela daria $4000/1,5 = 2,67$ A. O F-Boat possui duas bateria de 105 Ah que por sua vez são um recurso finito, além de existir um painel solar que consegue proporcionar a produção de toda energia necessária para a completa autonomia do veículo. Ou seja, a partir deste segundo teste ficou constatado que não há, pelo menos inicialmente, com o que se preocupar em relação ao consumo de energia, mesmo sabendo que ainda não conseguimos gerenciar o quanto de energia o painel gera para as baterias em tempo real. A Figura 43 mostra a situação total do consumo da embarcação. Tensão da bateria permanecendo entre 11v e 12v e a corrente mantendo-se constante entre 231,68mA e 5562,85mA.

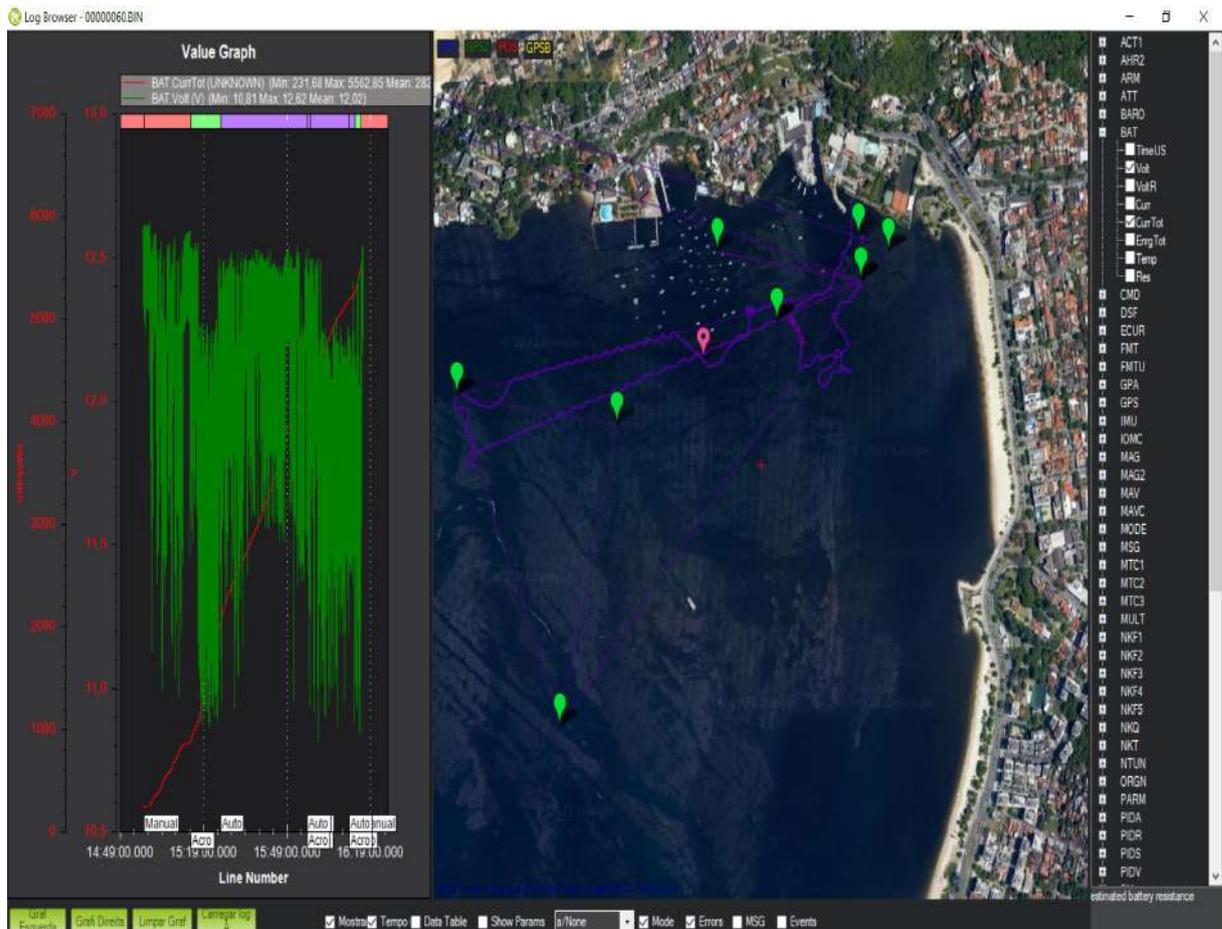


Figura 43: Representação gráfica do consumo de Energia em relação à tensão na cor vermelha e corrente na cor verde

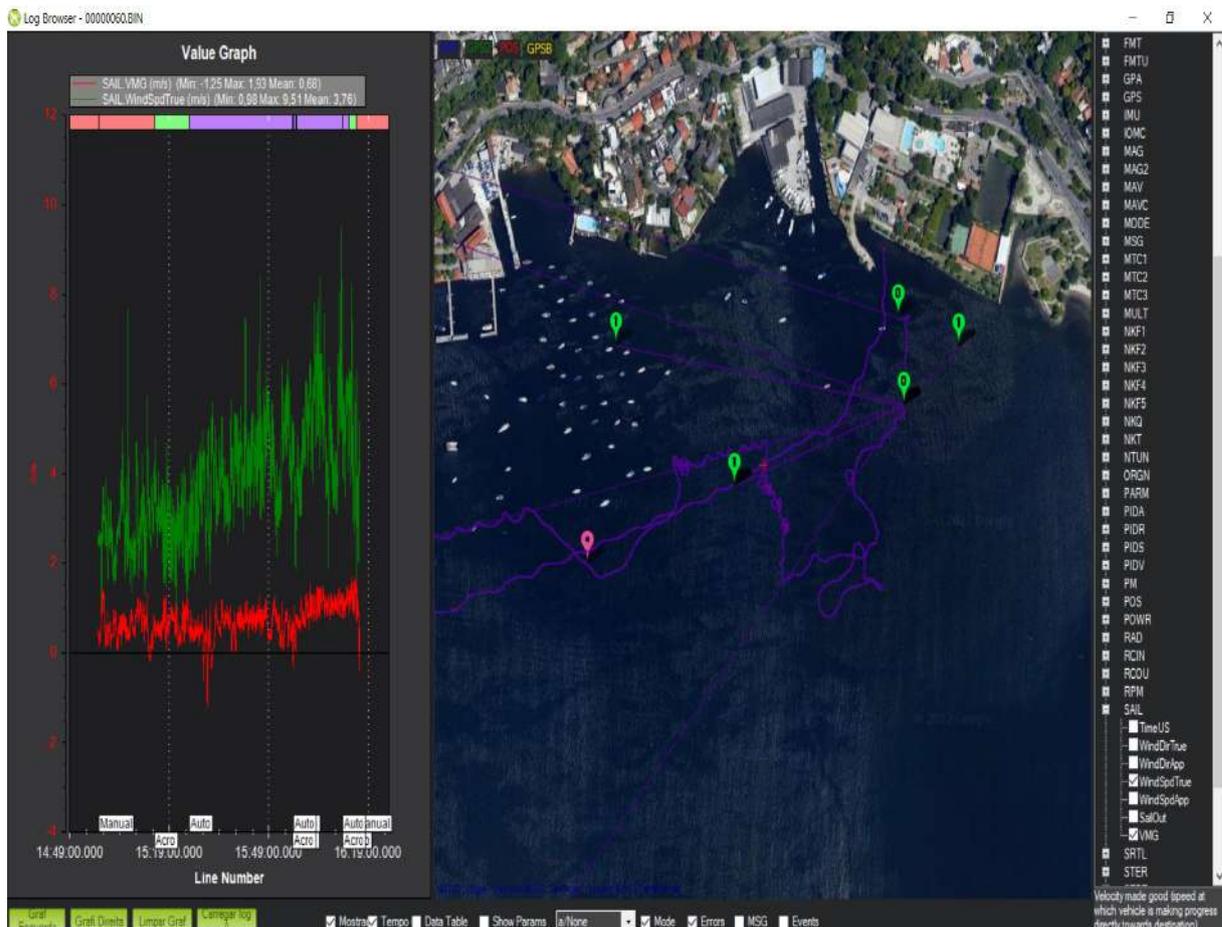


Figura 44: Representação gráfica da velocidade do vento real na cor vermelha e aparente na cor verde

O gráfico mostrado na Figura 44 ilustra a velocidade no barco, onde se encontra o VMG (Velocidade correta ou velocidade na qual o veículo está avançando diretamente em direção ao destino) e o vento real (dois metros por segundo). O vento VMG da embarcação está próximo de 1,5m/s, já o vento real possui valores entre 2m/s à 8m/s.

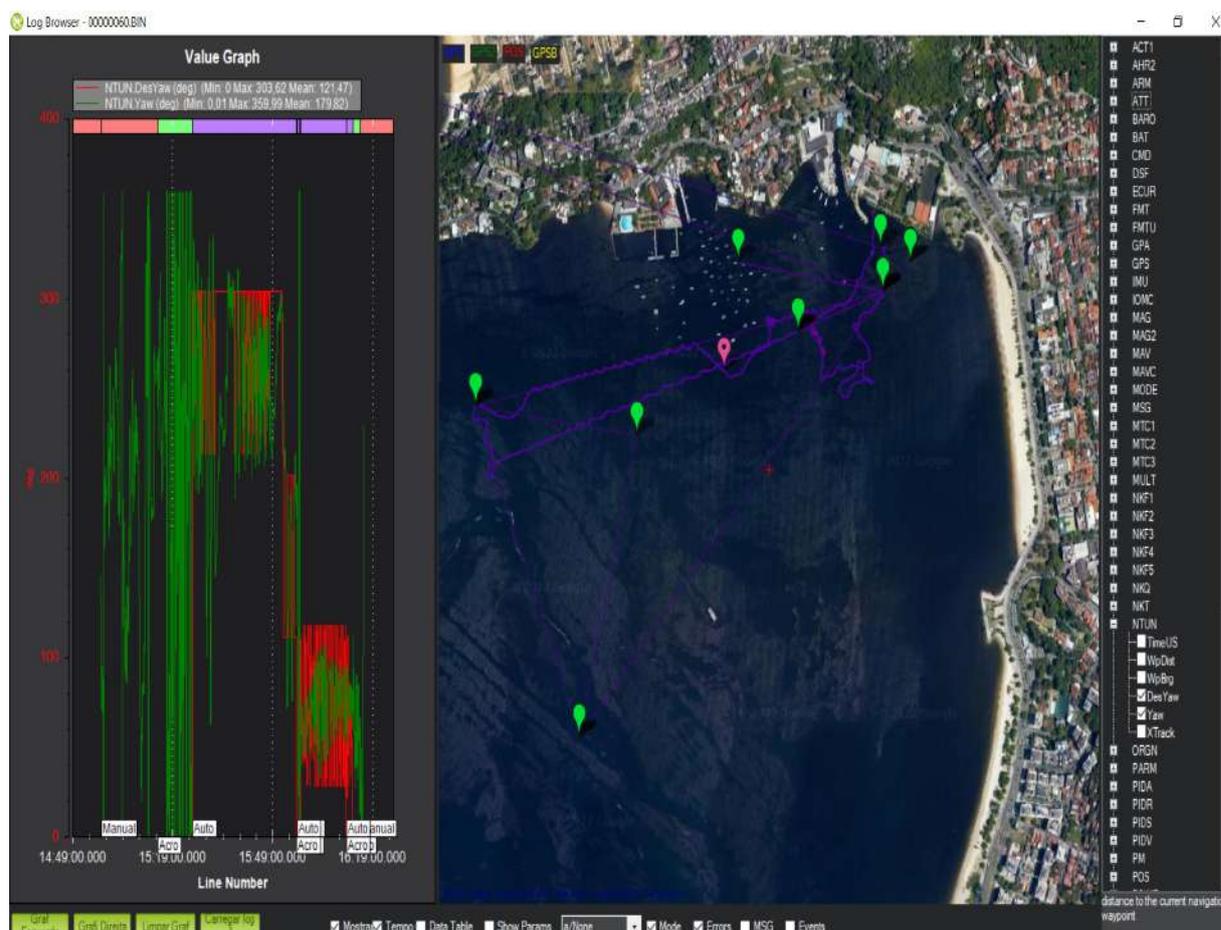


Figura 45: Representação gráfica da direção atual na cor verde e desejada na cor vermelha

Neste gráfico é possível ver o caminho percorrido pelo F-Boat, dados os *waypoints* definidos. O caminho navegado pela embarcação conforme Figura 45 é iniciado de forma manual em alguns *waypoints* e depois é passado via o modo ACRO para o piloto automático.

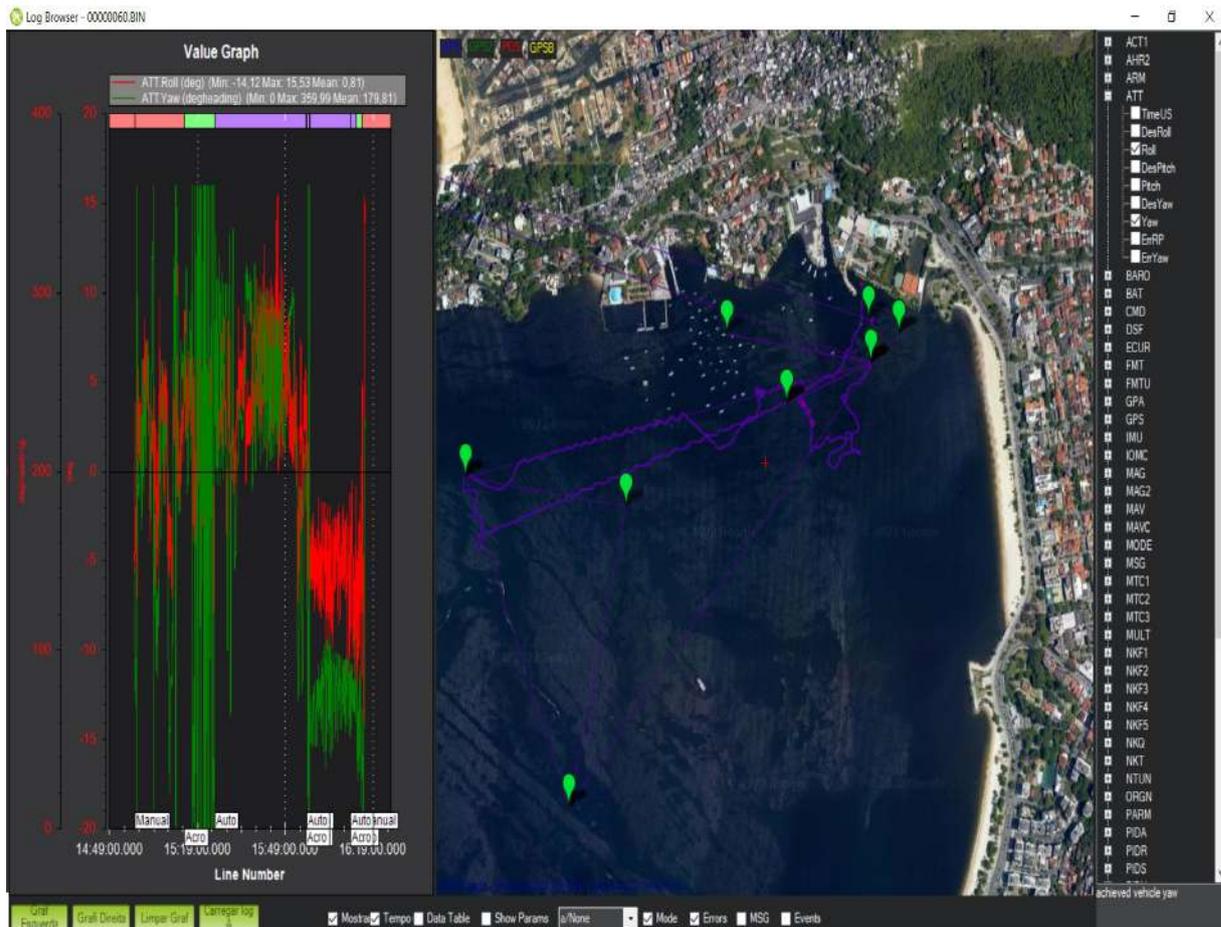


Figura 46: Representação gráfica da direção do Roll na cor vermelha e da direção do Yaw na cor verde

No gráfico mostrado na Figura 46 é ilustrado o rumo da embarcação, medido em graus dos ângulos de rolagem (*roll*) e de arfagem (*yaw*) que estão variando entre 15 e -15 para o *roll* e 0 à 400 para o *yaw*.

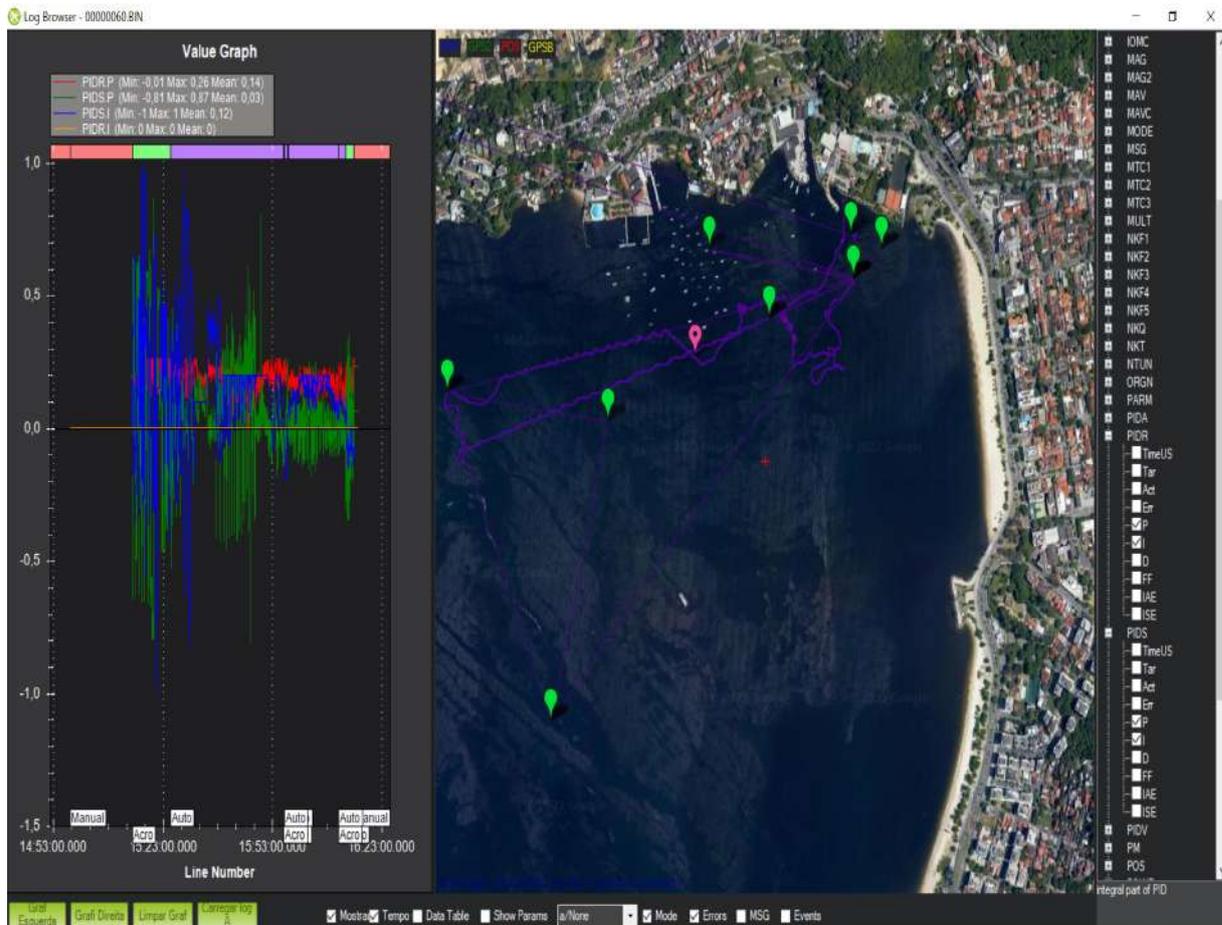


Figura 47: Representação gráfica do Controle PI da embarcação para o Leme na cor vermelho e para a Vela nas cores azul e verde

Conforme citado anteriormente, a embarcação utilizou o controlador PI nos testes reais para corrigir os erros das respostas de entrada do sistema de navegação nos atuadores. O gráfico da Figura 47 mostra nas cores verde e azul o controle do atuador do guincho para controle da vela usando o PI, e com a cor vermelha pode-se observar o controle do atuador do leme usando PI.

Inicialmente tínhamos proposto para o controle dos atuadores do veleiro autônomo F-Boat outros controladores. Fizemos uma análise de como os modelos de baixo nível dos controladores mais comumente usados e como eles podem fornecer feedback para outras aplicações autônomas para o sistema. Após essa análise, decidimos usar os controladores PID e *Fuzzy* Takagi-Sugeno para o leme e a vela, respectivamente. Incluímos outro modelo de controle para a vela usando uma fórmula matemática baseada em coordenadas polares. Além dessa arquitetura, criamos uma estratégia muito simples para executar um *jibe*, o que demonstra que nossa abordagem pode ser usada para realizar manobras simples. Mas

para os testes práticos só aplicamos o controle PI para o leme e vela. Falta testar nosso controlador final no F-Boat. Ainda é necessário ajustar alguns parâmetros, considerando apenas o erro de orientação e sua derivada, levando em consideração o aspecto mais importante de um veleiro, que é o vento. Precisamos também realizar mais pesquisas para tornar os controladores mais robustos e entender as limitações dos movimentos de um veleiro. Uma estratégia de controle mais robusto deve determinar o ângulo da vela e o movimento do leme dependendo do estado de controle. Também temos que incluir as estratégias de visão computacional ao controlador, a fim de desenvolver operações mais complexas.

7 Conclusão

Nesta dissertação foi detalhado o estudo realizado sobre a arquitetura utilizada, a modelagem desenvolvida e a aplicação do controle. Testes práticos com o veleiro construído segundo nossa proposta de arquitetura e utilizando um dos controladores introduzidos na dissertação foram realizados. Para isso, houve a necessidade de se embarcar o sistema desenvolvido nos hardwares Arduino e Pixhawk para possibilitar a sua navegabilidade de forma automatizada. Assim, inicialmente foram realizados estudos náuticos para barcos autônomos já existentes na atualidade. Partindo desses estudos, posteriormente foram feitos outros estudos relacionados à modelagem e escolha de um modelo matemático que pudesse alcançar um resultado mais eficiente possível. Também foram realizados estudos bibliográficos de diversos autores relacionados a veleiros autônomos. Desta forma, observou-se a necessidade de desenvolver, apesar do pouco tempo, uma arquitetura que fizesse uma junção de outras em estudos já feitos nas bibliografias para poder chegar a um modelo adequado de hardware e de controle para veleiros autônomos monocascos.

Com a obtenção dos resultados positivos neste trabalho, foi realizada uma análise de como seriam feitos a aplicação do modelo em controladores que pudessem propiciar inteligência ao projeto, após esse processo decidiu-se a utilização dos controladores PI e coordenadas polares, sendo o primeiro para o leme e segundo para a vela. No entanto, o modelo retrata exaustivamente as forças que atuam no veleiro, bem como os resultados das simulações, que permitiram validar alguns termos do modelo, embora ainda seja preciso ajustar certos parâmetros, pois apenas foi considerado o erro da orientação, não tendo atenção o aspecto mais importante num barco à vela e o vento, tornando desta forma sem futuro a pesquisa nessa direção. Para contornar, visando tornar os controladores mais robustos, foram realizadas pesquisas para se conhecer as limitações dos movimentos de um veleiro e, a partir desses estudos, foi aplicado um controle de alto nível para a determinação do ângulo da vela e do leme, com relação à orientação desejada, velocidade e direção do vento e posição angular do leme.

Sobre a arquitetura de hardware foi verificado na literatura quais eram os modelos mais

usados. Após essa análise, foi sugerido, conforme explicado na dissertação, no Capítulo 4 o nosso modelo proposto, que nos testes práticos de validação obteve bons resultados.

Assim, a dissertação caracteriza-se em sua completude pelo desenvolvimento de um sistema que torna o veleiro totalmente autônomo, sendo movido por propulsão a vela e tendo sua direção ditada pelo leme, sendo para isso foi elaborado um projeto que pudesse controlar este conjunto de dados (a arquitetura de hardware e de software).

Ressalta-se que esses dados apresentam um certo grau de dificuldade, pois envolvem variáveis matemáticas não lineares. Controlar a posição da vela quando há vento de uma determinada posição ou mesmo controlar o leme indicando para que lado o barco vai virar gera um grau de complexidade muito alto. Essas complexidades foram estudadas e entendidas de tal forma que chegamos a um sistema de controle que determina qual ângulo de vela e leme o barco terá que cumprir para atingir determinada posição, tendo obtido sucesso em testes práticos.

7.1 Perspectivas de novos desenvolvimentos

Para o futuro existem grandes desafios. Um deles é a implementação e o embarque dos sistemas baseados em coordenadas polares para controle da vela. Outro exemplo de trabalho futuro é a finalização total do hardware com vistas a estimar o consumo que pode ser fornecido pelo painel solar, de modo que a bateria opere em seu limite aceitável, em tempo real. Ainda, realizar a comunicação dos controles com a imagens das câmeras para ajudar na navegação autônoma baseada em modelos dirigidos a dados (Q-Learning e Deep Neural Networks). Temos plano de incluir um Lidar para mapeamento 3D do ambiente ao redor do F-Boat para que possa nos ajudar nas atracações, desatracações, desvio de obstáculos etc, bem como um sistema de batimetria para verificação de obstáculos submersos estáticos e dinâmicos. Há também a necessidade de ajustes finos nos controladores depois de testes feitos no barco real. Ou seja, este trabalho abre uma vasta gama de possibilidades de trabalhos futuros na linha, sem falar na parte de monitoramento por sí, que acreditamos seja o objetivo maior de pesquisadores bem como de entidades de fomento que apoiam este projeto.

REFERÊNCIAS

ABRIL, Jaime; SALOM, Jaime; CALVO, Oscar. Fuzzy control of a sailboat.

International Journal of Approximate Reasoning, v. 16, n. 3, p. 359–375, 1997.

ISSN 0888-613X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(96\)00132-6](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(96)00132-6).

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888613X96001326>>.

ABROUGUI, Helmi; NEJIM, Samir; DALLAGI, Habib. Modeling and Autopilot Design for an Autonomous Catamaran Sailboat Based on Feedback Linearization. In: 2019 International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET). [S. l.: s. n.], 2019. p. 130–135. DOI: [10.1109/ASET.2019.8871049](https://doi.org/10.1109/ASET.2019.8871049).

ALVES, Carlos. **SailBot – Autonomous Marine Robot Of Eolic Propulsion**. 2010. f. 121. Diss. (Mestrado) – Unoversidade Técnica de Lisboa.

ARAÚJO, Fábio Meneghetti Ugulino de. **Sistemas de Controle**. [S. l.: s. n.]. Online; acessado em 25 de fevereiro de 2022. Disponível em:

<<https://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle/scv20071.pdf>>.

ASTROV, Igor; UDAL, Andres. Neural Predictive Tracking Control of Catamaran Model Sailboat for Situation Awareness Applications. In: 2020 IEEE 24th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). [S. l.: s. n.], 2020. p. 153–158. DOI: [10.1109/INES49302.2020.9147126](https://doi.org/10.1109/INES49302.2020.9147126).

BELCHER, B. **Wind-vane Self-Steering: How to plan and make your own**. [S. l.: s. n.], 1982. v. 1, p. 128. ISBN 978-0877421580.

BOAS, J.M. Vilas et al. Towards the Electromechanical Design of an Autonomous Robotic Sailboat. In: 2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR). [S. l.: s. n.], 2016. p. 43–48. DOI: [10.1109/LARS-SBR.2016.15](https://doi.org/10.1109/LARS-SBR.2016.15).

CHACON-MOSQUERA, E.F. Autonomous Sailboat Prototype Sensors and Electronics Implementation with Machine Learning for Navigation. **Master's Thesis Barcelona: Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona**, 2021.

- COELHO, José Augusto Filho. **Habilidades Náuticas: Iniciação a Navegação em Barco à Vela**. [S. l.: s. n.]. <http://www.velaacia.com.br/Arquivos/VELEJAR.doc>. [Online; accessed 12-May-2021].
- CORREA, Wanderson et al. Energy Management in Autonomous Vessels Using Restricted Boltzmann Machine. In: 2021 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE). [S. l.: s. n.], 2021. p. 66–71. DOI: [10.1109/LARS/SBR/WRE54079.2021.9605413](https://doi.org/10.1109/LARS/SBR/WRE54079.2021.9605413).
- DENG, Yingjie et al. Event-triggered composite adaptive fuzzy control of sailboat with heeling constraint. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 211, p. 107627, 2020.
- ESTEVEES, João; GOMES, Lu is; COSTA, Anikó. Collision avoidance system for an autonomous sailboat. In: IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S. l.: s. n.], 2017. p. 3539–3544. DOI: [10.1109/IECON.2017.8216599](https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216599).
- FOSSSEN, Thor I. A nonlinear unified state-space model for ship maneuvering and control in a seaway. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, World Scientific, v. 15, n. 09, p. 2717–2746, 2005.
- _____. **Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- GERON, Aurelien. **Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow : concepts, tools, and techniques to build intelligent systems**. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2017. ISBN 1491962291.
- GILBERT, Lester. **Technical & theoretical aspects of RC yacht racing**. [S. l.: s. n.]. [Online; accessed 15-JULY-2021]. Disponível em: <http://www.onemetre.net/design/VPP/PoorVPP.htm>.
- HUANG, Dan; NGUANG, Sing Kiong. Takagi–Sugeno Fuzzy Control System. In: **ROBUST Control for Uncertain Networked Control Systems with Random Delays**. London: Springer London, 2009. p. 87–91. ISBN 978-1-84882-678-6. DOI: [10.1007/978-1-84882-678-6_8](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-678-6_8). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-84882-678-6%5C_8.
- JÚNIOR, Andouglas G.S. et al. N-BOAT: An Autonomous Robotic Sailboat. In: 2013 Latin American Robotics Symposium and Competition. [S. l.: s. n.], 2013. p. 24–29. DOI: [10.1109/LARS.2013.52](https://doi.org/10.1109/LARS.2013.52).

- KANG, Mengqi et al. Autonomous Sailboat Local Route Planning. In: **ROBOTIC Sailing 2016: Proceedings of the 9th International Robotic Sailing Conference**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 33–43.
- KLIR, GEORGE J.; YUAN, BO. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. In: New Jersey: Prentice Hall, 1995. p. 574. ISBN 0-13-101171-5.
- LE BARS, Fabrice; JAULIN, Luc. The world robotic sailing championship, a competition to stimulate the development of autonomous sailboats. In: **OCEANS 2015 - Genova**. [S. l.: s. n.], 2015. p. 1–5. DOI: [10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271767](https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271767).
- LEMAIRE, Sébastien et al. Adaptive Probabilistic Tack Manoeuvre Decision for Sailing Vessels. **arXiv preprint**, 2019.
- LIU, Chuan et al. Motion Control of an One-meter Class Autonomous Sailboat. In: IEEE. 2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). [S. l.: s. n.], 2018. p. 1–6.
- MARTINS, Filipe Miguel Guerreiro. **eVentos 2 – Autonomous sailboat control**. 2013. Diss. (Mestrado) – Universidade nova de Lisboa, Portugal.
- MICROTRANSAT. **The Microtransat Challenge**. [S. l.: s. n.]. Online; acessado em 25 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.microtransat.org/index.php>.
- OLIMPICO, Dicionario. **Jibe**. [S. l.: s. n.]. [Online; accessed 25-AGOSTO-2021]. Disponível em: <http://www.dicionarioolimpico.com.br/vela/cenario/jibe>.
- PLUMET, Frédéric et al. Toward an Autonomous Sailing Boat. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 40, n. 2, p. 397–407, 2015. DOI: [10.1109/JOE.2014.2321714](https://doi.org/10.1109/JOE.2014.2321714).
- REHM, Bill et al. CHAPTER TWO - Situational Problems in MPD. In: REHM, Bill et al. (Ed.). **Managed Pressure Drilling**. [S. l.]: Gulf Publishing Company, 2008. p. 39–80. ISBN 978-1-933762-24-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-933762-24-1.50008-5>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781933762241500085>.
- SANTOS, Davi H. dos; GONÇALVES, Luiz M. G. Performance Evaluation of Propulsion Control Techniques for Autonomous Sailboat. In: 2020 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2020 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2020 Workshop on Robotics in Education (WRE). [S. l.: s. n.], 2020. p. 1–6. DOI: [10.1109/LARS/SBR/WRE51543.2020.9307155](https://doi.org/10.1109/LARS/SBR/WRE51543.2020.9307155).

- SANTOS, Davi H. dos; GONÇALVES, Luiz M. G. A gain-scheduling control strategy and short-term path optimization with genetic algorithm for autonomous navigation of a sailboat robot. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 16, n. 1, p. 1729881418821830, 2019. DOI: [10.1177/1729881418821830](https://doi.org/10.1177/1729881418821830).
- SANTOS, Davi H.; JUNIOR, Andouglas G. Silva et al. Design and Implementation of a Control System for a Sailboat Robot. **Robotics - MDPI**, n. 24, 2016. ISSN 1424-8220. DOI: [doi:10.3390/robotics5010005](https://doi.org/10.3390/robotics5010005). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/6/1550>.
- SANTOS, Davi Henrique dos. **Framework para comparação de sistemas de controle de veleiros autônomos**. 2020. f. 128. Tese (Doutorado) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.
- SHEN, Zhipeng et al. Online speed optimization with feedforward of unmanned sailboat via extremum seeking without steady-state oscillation. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 189, p. 106393, 2019.
- SILVA JUNIOR, Andouglas Gonçalves da et al. High-Level Path Planning for an Autonomous Sailboat Robot Using Q-Learning. **Sensors**, v. 20, n. 6, 2020. ISSN 1424-8220. DOI: [10.3390/s20061550](https://doi.org/10.3390/s20061550). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/6/1550>.
- SNAME. **Naval architecture and marine engineering**. [S. l.: s. n.]. Online; acessado em 25 de agosto de 2021. Disponível em: <https://www.sname.org/>.
- STELZER, R. **Autonomous Sailboat Navigation: Novel Algorithms and Experimental Demonstration**. Dez. 2012. Tese (Doutorado) – Centre for Computational Intelligence, De Montfort University, Leicester, UK.
- STELZER, Roland; PRÖLL, Tobias; JOHN, Robert. Fuzzy Logic Control System for Autonomous Sailboats. In: p. 1–6. ISBN 1-4244-1210-2. DOI: [10.1109/FUZZY.2007.4295347](https://doi.org/10.1109/FUZZY.2007.4295347).
- SULTANA, Farhana; SUFIAN, Abu; DUTTA, Paramartha. Evolution of Image Segmentation using Deep Convolutional Neural Network: A Survey. **Knowledge-Based Systems**, Elsevier BV, v. 201-202, p. 106062, ago. 2020. ISSN 0950-7051. DOI: [10.1016/j.knosys.2020.106062](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106062). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106062>.
- VIEL, Christophe et al. Platooning control for sailboats using a tack strategy. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Springer, v. 17, n. 9, p. 2310–2320, 2019.

- XIAO, L.; JOUFFROY, J. Modeling and Nonlinear Heading Control of Sailing Yachts. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 39, n. 2, abr. 2014.
- YANG, Shaolong et al. Generic and Flexible Unmanned Sailboat for Innovative Education and World Robotic Sailing Championship. **Frontiers in Robotics and AI**, 2021. DOI: [10.3389/frobt.2021.630081](https://doi.org/10.3389/frobt.2021.630081).
- YING, Hao. The Takagi-Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controllers. **Automatica**, v. 34, n. 2, p. 157–167, 1998. ISSN 0005-1098. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(97\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(97)00173-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109897001738>.

APÊNDICE A - ANEXO A – EQUIPAMENTOS USADOS

A.1 Características do F-Boat

Alguns detalhes de sua construção podem ser vistos na Tabela 23 que lista as dimensões do veleiro F-Boat, incluindo suas descrições.



Figura 48: Construção do F-Boat, foto mostrando a carcaça



Figura 49: Construção F-Boat com os compartimentos delineados

Dimensões	Descrição
4kg	Massa do veleiro
0,8kg	Massa da quilha
5,0kg	Massa do casco
2,5m	Comprimento do casco
1m	Largura do casco
0,8m	Profundidade do casco
1,0m	Comprimento do leme
0,3m	Largura do leme
0,6m	Espessura do leme
1,6m	Comprimento da quilha
0,4m	Largura da quilha
0,3m	Espessura da quilha
2,0m	Comprimento da vela
2,5m	Largura da vela
3m	Comprimento do mastro

Tabela 23: Especificações do veleiro

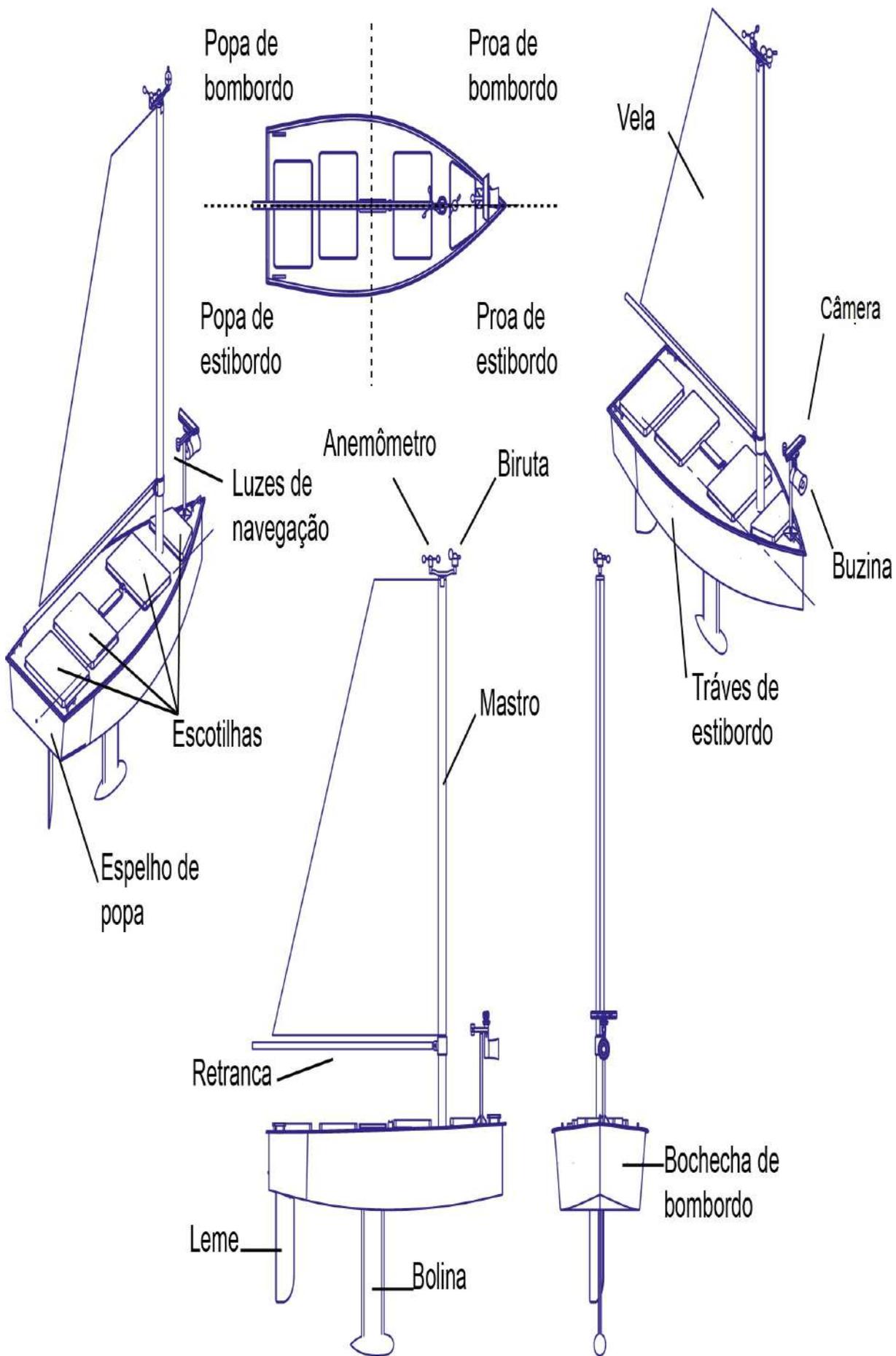


Figura 50: Partes do F-Boat

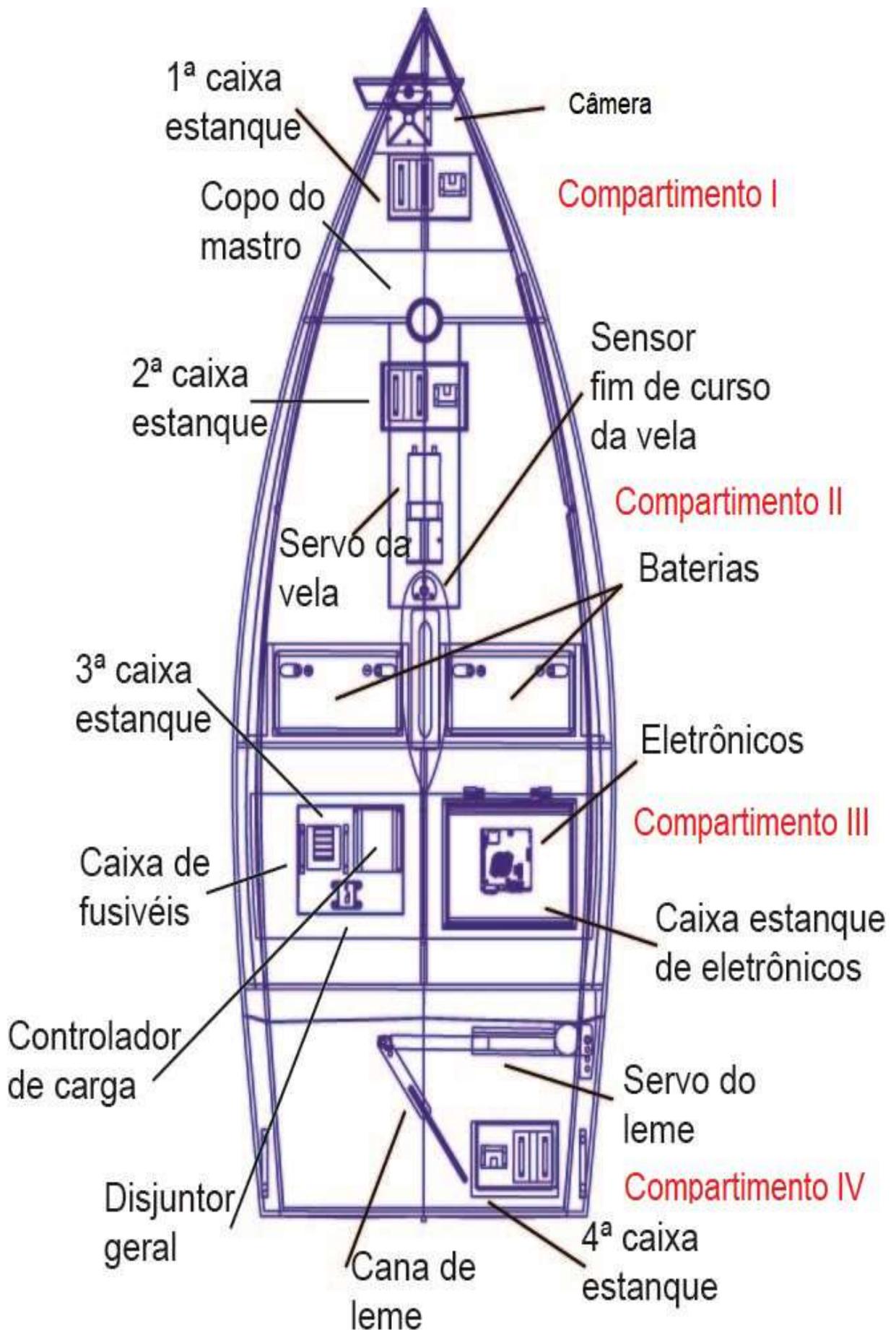


Figura 51: Planta baixa

A.1.1 Equipamentos usados no F-Boat:

- GUINHO



Figura 52: Guincho

- ATUADOR LINEAR



Figura 53: Atuador Linear

- MOTOR DE POPA



Figura 54: Motor de popa

- JETSON XAVIER



Figura 55: Jetson Xavier

- PIXHAWK E ACESSÓRIOS



Figura 56: Pixhawk e acessórios

- ARDUINO MEGA

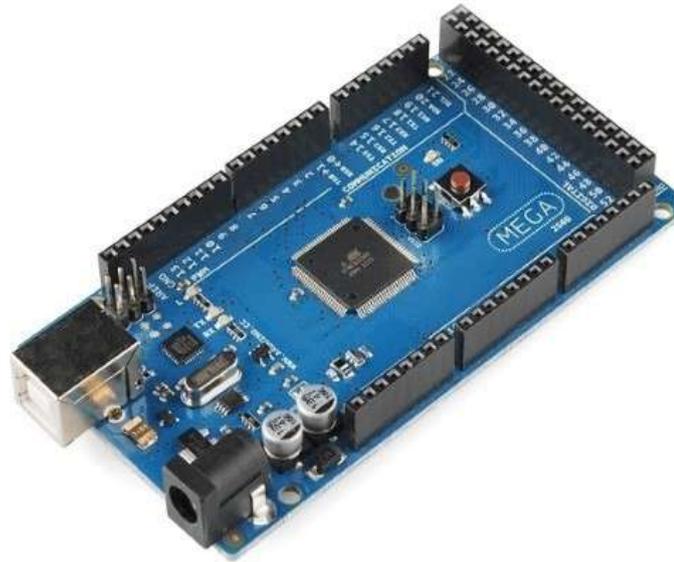


Figura 57: Arduino Mega

- ARDUINO UNO

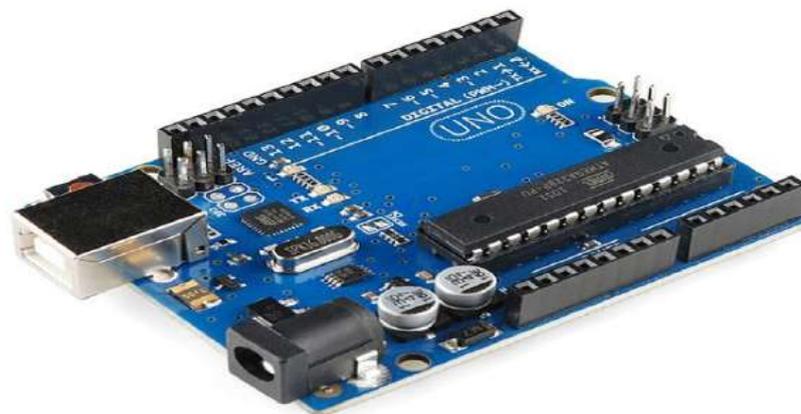


Figura 58: Arduino Uno

- PONTE H LEME E GUINCHO

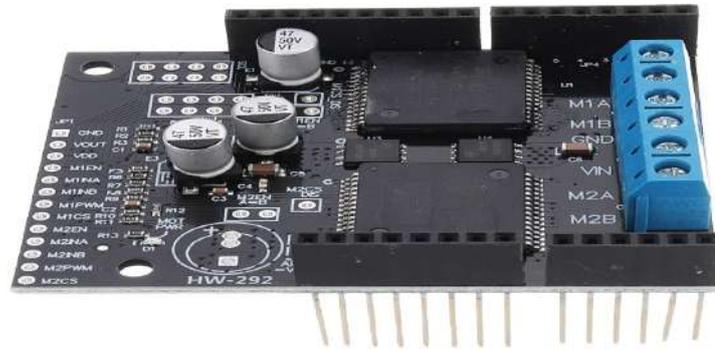


Figura 59: Ponte H vnh5019

- CONTROLADORA DO MOTOR DE POPA

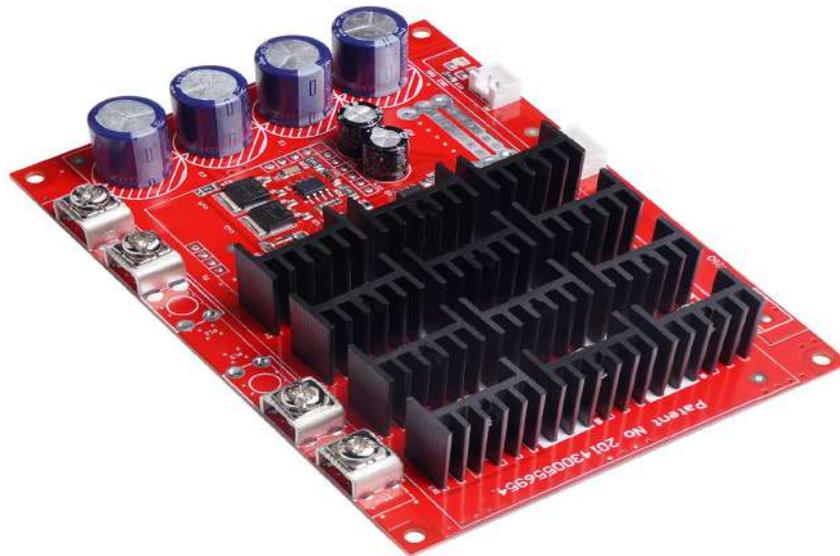


Figura 60: Motor Controller, DROK PWM DC Motor Speed Controller 10-50V 60A High Power HHO RC Driver PWM Controller Module 12V 24V 48V 3000W Extension Cord with Switch

- BATERIAS NÁUTICAS



Figura 63: Disjuntor Som Automotivo 70a 80a 100a 120a 140a 150a 200a

- CONTATORA



Figura 64: GIGAVAC GX16CE DC Contatora - Continuous Current (Amps) 600A Coil Voltage 24Vdc Dielectric At Sea Level (Leakage < 1mA) 2200 Vrms Contact Voltage, Operating Max 800 Vdc

- BOTÃO DE EMERGÊNCIA



Figura 65: Botão Emergência Vermelho Stop / Gira Jng + 1nf

- POTENCIÔMETRO



Figura 66: Potenciômetro de 10k

- ANEMÔMETRO e BIRUTA



Figura 67: Anemômetro e Biruta

- MODEM 4G



Figura 68: Modem 4g wi-fi md-4000

- REGULADORES DE TENSÃO

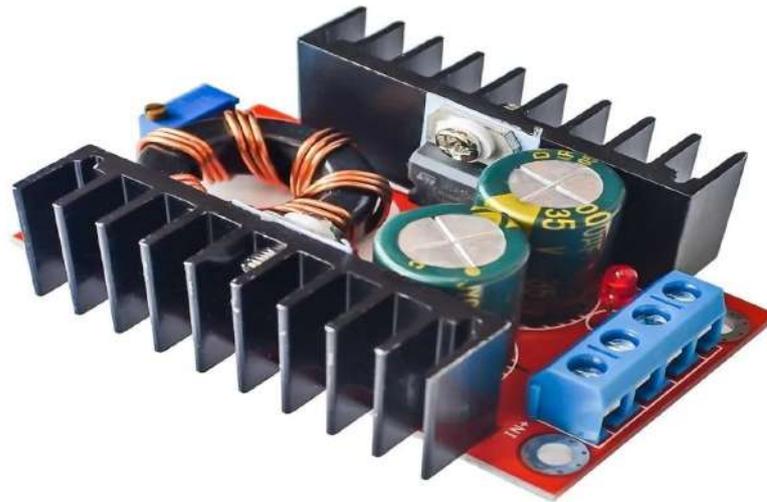


Figura 69: Conversor Dc Dc Entrada 10-32v Step Up Saída 12-35v 150w

- MPPT



Figura 70: Controlador de Carga MPPT

- PLACA SOLAR



Figura 71: Painel solar 150W Resun Solar - RS6E 150P

- PORTA FUSÍVEL

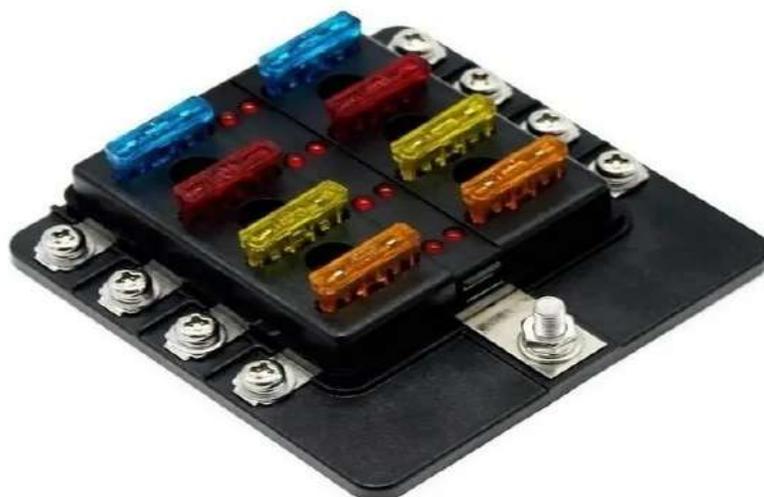


Figura 72: Caixa Porta Fusível 8 Vias Led Universal Fueltech Pandoo

- CAIXA ESTANQUE



Figura 73: Caixa Estanque Seasub Grande

- PRENSADOR DE CABO



Figura 74: Prensa cabo

- BARRAMENTO NEUTRO/TERRA



Figura 75: Barramento Neutro/terra 10 Furos

- RÁDIO



Figura 76: FrSky Taranis X9D Plus 2019 ACCESS w/ X8R 16CH Receiver - Silver

- CÂMERA ZED 2



Figura 77: ZED 2 Stereo Câmera

- CÂMERA 360



Figura 78: SP360 4K - DUAL PRO PACK - INCLUDES (2) SP360 4K VR CÂMERAS

- RJ45 CONECTORES

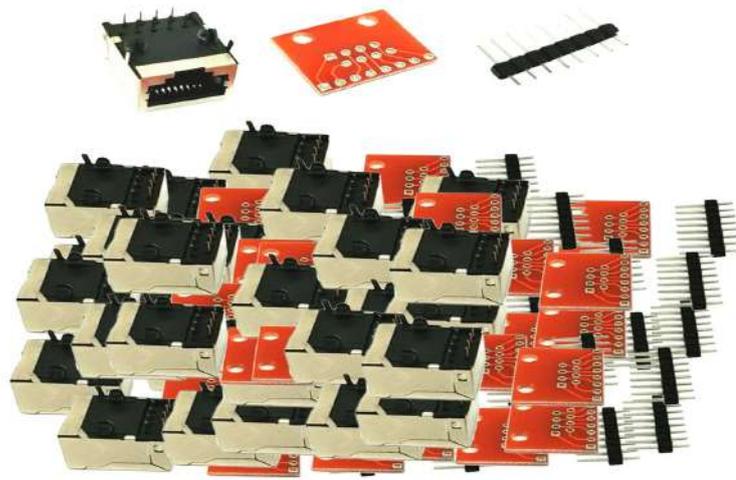


Figura 79: 8 P Rj45 Conector Pcb E Kit De Placa De Fuga Para Verificação Ethernet Não Solda X30

Além de todos esses materiais, é necessário ter cabos de rede, cabos de energia, material para eletrônica tipo (resistores, soldas, cola quente, ferramentas de uso geral).

APÊNDICE B - ANEXO B – Códigos-fontes

Código principal do Arduino Mega encontram-se na página (https://github.com/Natalnet/nboat/tree/master/Arduino/fboat_main_code).

Adicionalmente, experimentos de campo para testar estrutura da plataforma F-Boat foram realizados em Outubro de 2021 encontra-se na plataforma de vídeos pelo link: (<https://www.youtube.com/watch?v=S5Qi1rFyclI>).