

LUIZ HENRIQUE SOUZA CALDAS

**CONTROLE DE UM NAVIO AUTÔNOMO PARA
CONTRAMEDIDAS DE MINAGEM UTILIZANDO
O MOOS-IVP**

São Paulo
2021

LUIZ HENRIQUE SOUZA CALDAS

**CONTROLE DE UM NAVIO AUTÔNOMO PARA
CONTRAMEDIDAS DE MINAGEM UTILIZANDO
O MOOS-IVP**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Engenheiro Mecatrônico e de
Sistemas Mecânicos.

São Paulo
2021

LUIZ HENRIQUE SOUZA CALDAS

**CONTROLE DE UM NAVIO AUTÔNOMO PARA
CONTRAMEDIDAS DE MINAGEM UTILIZANDO
O MOOS-IVP**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Engenheiro Mecatrônico e de
Sistemas Mecânicos.

Orientador:

Eduardo Aoun Tannuri

Co-orientador:

Kazuo Nishimoto

São Paulo
2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

Agradeço aos meus orientadores, profs. Eduardo Aoun Tannuri e Kazuo Nishimoto, por aceitarem conduzir o meu trabalho de pesquisa e terem desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos meus pais, Elizete Nunes Souza e Luiz Fabiano Lima da Silva Caldas, pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

À minha esposa Marília Vilhena Verdi, pela compreensão e paciência demonstrada durante o período do projeto.

À minha amiga e dupla Paloma Rodrigues Rocha por todas as centenas de horas que dividimos fazendo trabalhos e estudando para provas, mesmo quando as aulas passaram a ser remotas.

Agradeço à Universidade de São Paulo e a todos os professores do meu curso pela elevada qualidade do ensino oferecido.

Também quero agradecer a Marinha do Brasil pela oportunidade que me foi concedida de estudar em uma universidade de prestígio como a USP.

RESUMO

Este trabalho consiste na implementação de um controlador para um navio autônomo de contramedidas de minagem baseado na arquitetura GNC (*Guidance-Navigation-Control*) utilizando o *framework* MOOS-IvP. Foi implementado para o sistema de controle um controlador do tipo PID e para o sistema de navegação um Filtro Estendido de Kalman. Para o sistema de governo, foi utilizado um módulo nativo do MOOS-IvP, capaz de calcular o rumo e a velocidade necessários para que o navio atinja os pontos desejados, além de já ter dentro dele um algoritmo de prevenção a colisão implementado. Para validar o controlador foi implementada uma interface com o simulador de manobras de navios do Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo (TPN-USP). Foi implementada também uma interface com o algoritmo de Posicionamento Dinâmico utilizado pelo TPN-USP. Além disso, para o planejamento das missões do navio autônomo, foi implementada uma interface gráfica para facilitar a configuração do controlador. Nesta interface gráfica também foi implementado um algoritmo genético para gerar o trajeto do navio de forma otimizada, com o menor caminho possível sem colidir com obstáculos.

Palavras-Chave – Navios autônomos, Contramedidas de minagem, Algoritmo Genético, Posicionamento Dinâmico, Filtro Estendido de Kalman, Prevenção de colisão

ABSTRACT

This work consists of the implementation of a controller for an autonomous mine countermeasure ship based on the GNC (Guidance-Navigation-Control) architecture using the MOOS-IvP framework. A PID-type controller was implemented for the control system and an Extended Kalman Filter for the navigation system. For the guidance system, a native MOOS-IvP module was used, capable of calculating the course and speed necessary for the ship to reach the desired waypoints, in addition to having a collision avoidance algorithm implemented within it. To validate the controller, an interface was implemented with the ship maneuver simulator of the Numerical Offshore Tank of the University of São Paulo (TPN-USP). An interface with the Dynamic Positioning algorithm used by TPN-USP was also implemented. Furthermore, for planning the autonomous ship's missions, a graphical interface was implemented to facilitate the configuration of the controller. In this graphical interface, a genetic algorithm was also implemented to generate the ship's path in an optimized way, with the shortest possible path without colliding with obstacles.

Keywords – Autonomous Ships, Mine Countermeasures, Genetic Algorithm, Dynamic Positioning, Extended Kalman Filter, Collision Avoidance.

LISTA DE FIGURAS

1	Minas marítimas de fundeio	12
2	Navio não-tripulado de superfície (USV)	13
3	Importância do setor aquaviário na corrente de comércio brasileira	13
4	a) Primeiras minas marítimas b) <i>Sea mine MK XVII</i>	14
5	Contramedidas de Minagem realizadas por múltiplos veículos autônomos .	15
6	Arquitetura fundamental de um típico USV	17
7	Sistema de Governo, Navegação e Controle (GNC)	18
8	Resultado experimental para o um sistema de DP	19
9	Topologia em estrela do MOOS-IvP	20
10	Diagrama de blocos ilustrando um sistema GNC	22
11	O seis graus de liberdade de um navio	22
12	Fluxograma básico de um algoritmo genético	24
13	a) Células numeradas b) Carta náutica decomposta em células	24
14	Resultado de um trajeto ótimo gerado por um algoritmo genético	25
15	Variáveis cinemáticas de um navio seguindo um trajeto em linha reta . . .	26
16	Representação esquemática do funcionamento do <i>line-of-sight</i>	26
17	Arquitetura básica de um controlador PID	28
18	Modelo conceitual do Navio Autônomo de Contramedidas de Minagem . .	31
19	Representação esquemática do movimento plano de um USV	33
20	Curvas J x K_t para os três propulsores	35
21	Representação esquemática das forças geradas pelo leme	36
22	Relação entre o ângulo do leme e a deflexão causada no empuxo	37
23	Diagrama de corpo livre do navio	37

24	Topologia simplificada do controlador	39
25	Arquitetura do <i>IvP-Helm</i>	42
26	Relação Hierárquica em um Arquivo <i>.bhv</i>	43
27	<i>Line-of-Sight</i> do comportamento <i>waypoint</i>	43
28	Aproximação da Função de Transferência da Velocidade	44
29	Diagrama de casos de uso do “Planejador de Missões do NACMM”	48
30	Painel lateral do “Planejador de Missões do NACMM”	48
31	Janela para carregar uma carta náutica	49
32	Posição da extremidade sul da ilha	50
33	Informações necessárias para a otimização da rota inseridas	51
34	População inicial	52
35	Resultado da otimização da rota para entrada no Complexo Naval de Itaguaí	53
36	Resultado da otimização da rota para passagem entre as Ilhas Irmãs	53
37	Resultado da otimização da rota para passagem entre três ilhas	54
38	<i>Waypoints</i> manualmente inseridos e posições inicial e final do navio	55
39	Simulação sendo executada	56
40	Simulação com trajeto com linhas paralelas	58
41	Resultados da simulação com trajeto com linhas paralelas	58
42	Simulação com trajeto poligonal	59
43	Resultados da simulação com trajeto poligonal	59
44	Resultados da simulação com o quadrado de 5 metros	60
45	Resultados da simulação com o quadrado de 10 metros	61
46	Simulação testando o algoritmo de prevenção de colisão	62
47	Simulação no TPN com o navio demandando o porto do Complexo Naval de Itaguaí	63
48	Simulação no TPN testando o algoritmo de prevenção de colisão	63

LISTA DE TABELAS

1	Dados do NACMM	31
2	Dados propulsores	32
3	Dados dos lemes	32
4	Massas, momentos de inércia e coeficientes de deriva do NACMM	34
5	Distâncias dos propulsores ao centro de gravidade do navio	38
6	Ganhos dos controladores de velocidade e rumo	44

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Motivação Econômica	13
1.2	Motivação Científica	15
1.3	Estrutura da Monografia	15
2	Objetivos	16
2.1	Objetivos principais	16
2.2	Objetivos secundários	16
3	Revisão Bibliográfica	17
3.1	Planejamento de Trajetória	18
3.2	Controle de Trajetória	18
3.3	Posicionamento Dinâmico	19
3.4	O uso do MOOS-IvP no controle de USVs	19
4	Sistemas GNC	21
4.1	Sistema de Governo	23
4.1.1	Algoritmo Genético	23
4.1.2	<i>Line-of-sight</i>	25
4.2	Sistema de Navegação	26
4.2.1	Filtro de Kalman Estendido	27
4.3	Sistema de Controle	28
4.3.1	Controle PID	28
5	Metodologia	29

5.1	Requisitos	29
6	Modelagem do Navio	31
6.1	Modelagem	32
6.1.1	Cinemática	32
6.1.2	Dinâmica do Navio	33
6.1.3	Dinâmica dos atuadores	35
6.1.3.1	Modelagem dos propulsores	35
6.1.3.2	Modelagem dos lemes	36
6.1.3.3	Forças e momentos resultantes	37
7	Projeto do Controlador	39
7.1	Simulação	39
7.1.1	Interface com o <i>Pydyna</i> (<i>iPydyna</i>)	39
7.1.2	Interface com o SMH (<i>iSMH</i>)	40
7.2	Sensoriamento	40
7.2.1	Simulador de GPS (<i>pSimGPS</i>)	40
7.2.2	Simulador de Girômetro (<i>pSimGyro</i>)	40
7.2.3	Simulador de DVL (<i>pSimDVL</i>)	41
7.2.4	Simulador de IMU (<i>pSimIMU</i>)	41
7.2.5	Fusão Sensorial <i>pEKF</i>	41
7.3	Planejamento de Trajetória (<i>IvP-Helm</i>)	41
7.4	Controlador PID (<i>pTrajectPID</i>)	43
7.5	Outros Módulos	45
7.5.1	iRemote	45
7.5.2	pNodeReporter	45
7.5.3	iDP	45
7.5.4	uSimRadar e uSimLidar	46

8	Planejador de missões	47
8.1	Carregar carta náutica	49
8.2	Definir origem	49
8.3	Verificar posição do clique	49
8.4	Modificar <i>waypoint</i> inicial/final	50
8.5	Inserir/remover obstáculos <i>waypoint</i> inicial/final	50
8.6	Otimizar rota	51
8.7	Inserir <i>waypoint</i> manual	54
8.8	Posição inicial/final do navio	54
8.9	Proa inicial do navio	55
8.10	Inserir nome do navio	55
8.11	Gerar arquivos .moos e .bhv	55
8.12	Simular	56
8.13	Limpar	56
9	Simulações	57
9.1	Validação do PID de rumo e velocidade	57
9.1.1	Missão com trajeto com linhas paralelas	57
9.1.2	Missão com trajeto poligonal	58
9.1.3	Discussões	59
9.2	Validação do módulo de Posicionamento Dinâmico	60
9.2.1	Discussões	61
9.3	Validação do comportamento de prevenção de colisões	61
9.3.1	Discussões	62
9.4	Simulações no Tanque de Provas Numérico	62
9.4.1	Discussões	64
10	Conclusão	65

10.1 Sugestões para trabalhos futuros	66
Referências	67
Apêndice A – Requisitos	71

1 INTRODUÇÃO

“O fato de o mar estar calmo na superfície não significa que algo não esteja acontecendo nas profundezas.”

-- Jostein Gaarder

Uma mina marítima é um artefato explosivo que tem como propósito avariar meios navais de superfície ou submarinos. São armas relativamente baratas e de grande poder de destruição e que tem um grande efeito psicológico no inimigo, negando o uso do mar por navios militares e mercantes nos locais onde há a possibilidade de existir um campo minado [1].

Figura 1: Minas marítimas de fundeio



Fonte: NATO AUTONOMOUS MINE SWEEPERS [2].

No contexto da Guerra Naval, a atividade responsável pela detecção e neutralização de minas submarinas é chamada de Contramedidas de Minagem (CMM). As CMM podem ser realizadas tanto por navios tripulados como por não-tripulados. Em face do inerente risco a vida humana envolvido em operações com minas submarinas, os navios não-tripulados permitem uma atuação mais segura e a consequente salvaguarda da vida humana durante as operações de CMM [3].

Um navio não-tripulado é toda embarcação capaz de conduzir-se sem que haja a presença humana a bordo [4]. São denominados pela Organização Marítima Internacional (IMO, em inglês) como *Maritime Autonomous Surface Ships* (MASS). Além disso, também podem ser chamados de *Autonomous Surface Vessel* (ASV) ou de *Unmanned Surface Vessel/Vehicle* (USV) [5].

Figura 2: Navio não-tripulado de superfície (USV)

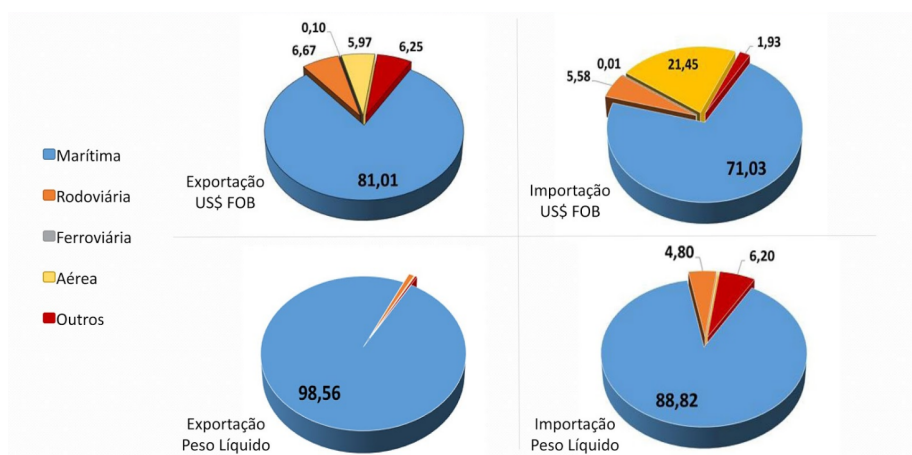


Fonte: Tanakitkorn [6].

1.1 Motivação Econômica

De acordo com a Estratégia Nacional de Defesa (END), o Estado deve coordenar as ações relacionadas com a defesa nacional, preservando a soberania e a integridade de nosso país [7]. Segundo a Secretaria de Comércio Exterior (Secex) do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), cerca de 98,6% da exportação líquida no Brasil em 2015 foi feita por vias marítimas [8], demonstrando a importância de que o Estado promova a segurança dos navios mercantes que trafeguem por nossas águas.

Figura 3: Importância do setor aquaviário na corrente de comércio brasileira



Fonte: adaptado de Érico Lins Leite [9].

Neste contexto, as minas submarinas representam um perigo cada vez maior, uma vez que possuem um alto poder destrutivo combinado com um baixo custo, sendo utilizadas

para negar o uso do mar ao inimigo [3]. Inicialmente, as minas marítimas eram apenas barris de pólvora lançados ao mar e que tinham como finalidade explodir ao se chocar com o casco de um navio inimigo, porém ao longo do tempo sofreram significativos avanços tecnológicos, se tornando cada vez mais perigosas. Podendo ser encontradas até mesmo no mercado negro, as minas marítimas se tornaram uma grande preocupação para Marinhas de todo o mundo [1].

Figura 4: a) Primeiras minas marítimas b) *Sea mine MK XVII*.



(a)

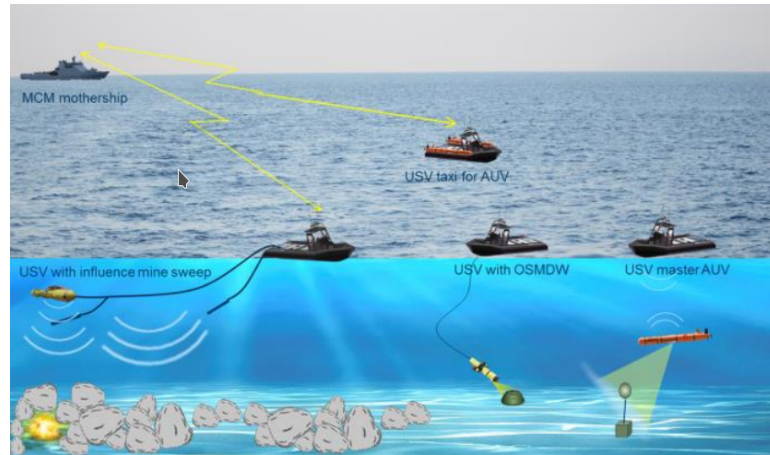


(b)

Fonte: a) *Library of Congress* [10]. b) *Imperial War Museums* [11].

Como dito anteriormente, para se contrapor às minas submarinas, são realizadas operações de Contramedidas de Minagem (CMM), que tem como objetivo detectar e neutralizar as mesmas, podendo ser realizadas tanto por navios tripulados como por não-tripulados, permitindo os últimos uma atuação mais segura em face ao inerente risco a vida humana envolvido em operações com minas submarinas. Durante operações de CMM podem ser usados não somente USVs, como também veículos submarinos autônomos (AUV, no inglês) e veículos remotamente operados (ROV, no inglês), que podem ser lançados e operados pelo próprio USV [12].

Figura 5: Contramedidas de Minagem realizadas por múltiplos veículos autônomos



Fonte: *Undersea Defence Technology* [12].

1.2 Motivação Científica

Navios autônomos são sistemas altamente não-lineares [13], exigindo linearizações ou a aplicação de técnicas de controle não-linear [6]. Além disso, para que possam operar de forma segura, necessitam de um sensoriamento preciso, o que pode ser obtido com sensores redundantes combinados técnicas de fusão sensorial [5]. O controle de USVs vem atraindo cada vez mais a atenção de acadêmicos ao redor do mundo, sendo um problema tanto no campo da teoria de controle como da robótica a obtenção de um controlador de alta qualidade para navios não-tripulados [14]. O estado-da-arte das técnicas de controle vem sendo continuamente desenvolvido para aprimorar o desempenho dos USVs [13].

1.3 Estrutura da Monografia

Primeiramente serão apresentados os objetivos deste trabalho. Depois, será feita uma revisão bibliográfica sobre as estratégias adotadas em artigos acadêmicos atuais sobre o controle de embarcações autônomas. Em seguida, será apresentado um pequeno resumo teórico sobre a estrutura GNC e os algoritmos adotados em cada um de seus subsistemas. Então, será apresentada a metodologia a ser utilizada neste trabalho. Em seguida, será apresentado um capítulo com as características e modelagem do navio a ser controlado. O desenvolvimento será dividido em dois capítulos, um sobre o projeto do controlador e outro sobre o software desenvolvido para o planejamento de trajeto. Após isso, serão apresentados os resultados das simulações realizadas para a validação do controlador. Por último, será feita uma conclusão sobre o trabalho como um todo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um controlador para um navio autônomo que possa realizar missões tanto de varredura quanto de caça-minas.

2.1 Objetivos principais

- Implementar um controlador capaz de, a partir de *waypoints* dados, realizar o governo, a navegação e o controle de um navio autônomo.
- Integrar o controlador com o simulador de manobras do Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo (TPN-USP) para validações de desempenho.

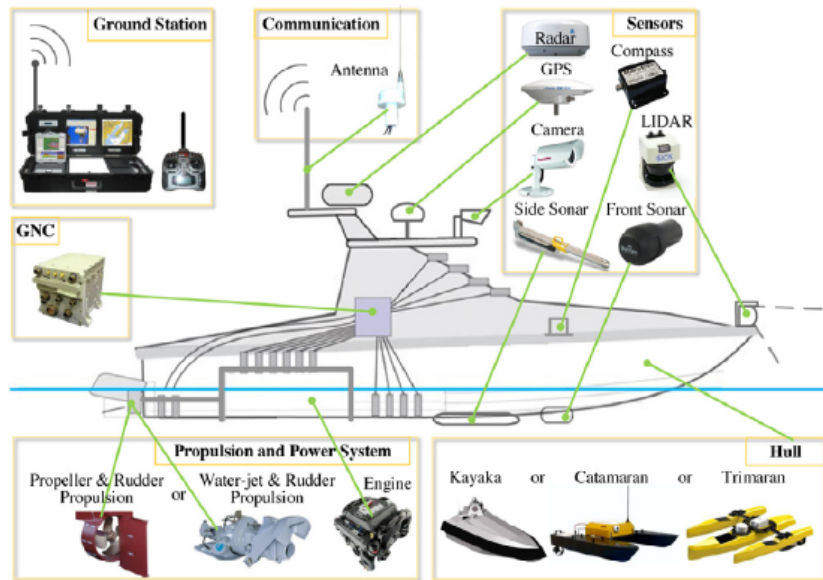
2.2 Objetivos secundários

- Implementar um *software* capaz de gerar um conjunto de *waypoints* de forma otimizada para que o navio possa realizar a sua missão.
- Implementar um sistema de posicionamento dinâmico para que o navio seja capaz de manter posição para a realização de tarefas inerentes das Contramedidas de Minagem, como por exemplo o lançamento de AUVs e ROVs para a neutralização de minas submarinas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Navios autônomos podem ter diversas funcionalidades e aparências, porém todos possuem alguns elementos básicos em comum: casco e estruturas auxiliares; propulsão e sistemas de força; sistemas de Governo, Navegação e Controle (GNC); Sistemas de comunicação; equipamentos de coleta de dados; e estações de terra [13].

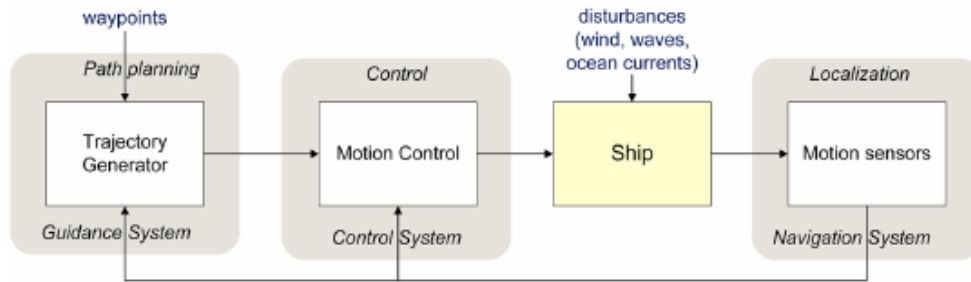
Figura 6: Arquitetura fundamental de um típico USV



Fonte: Liu et al. [13].

Os sistemas de Governo, Navegação e Controle formam o chamado sistema GNC, do inglês *Guidance - Navigation - Control*, muito utilizado na arquitetura de controladores para navios autônomos [6] [13] [15].

Figura 7: Sistema de Governo, Navegação e Controle (GNC)



Fonte: Lazarowska [15].

3.1 Planejamento de Trajetória

As técnicas de planejamento de trajetória podem ser divididas em globais e locais. As globais focam na geração de *waypoints* para que o veículo possa cumprir sua missão. Já as locais focam no cálculo da orientação e velocidades necessárias para que o veículo atinja os objetivos gerados pelo planejamento Global. Campos Potenciais Artificiais, Redes Neurais e Algoritmo Genético estão entre as técnicas mais utilizadas no planejamento global. Para o planejamento local, a técnica mais utilizada é a de Linha-de-Visão (*Line-of-Sight*) [13] [16].

3.2 Controle de Trajetória

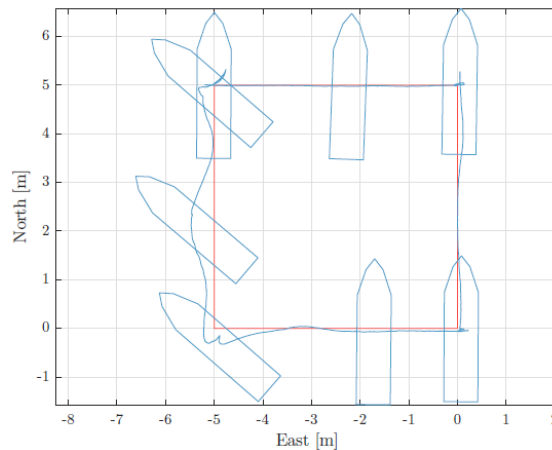
Na literatura podem ser encontradas série de técnicas avançadas de controle, como por exemplo Controle Adaptativo (AC), Linearização de Feedback (FLC) e Controle de Lógica Difusa (FLC), para realizar o controle de trajetória. Dificilmente o controlador de um USV se baseia em apenas um método, pois uma combinação entre diferentes métodos costuma ser mais apropriada para aprimorar o desempenho do sistema. Porém, apesar dos esforços para o desenvolvimento de técnicas de controle cada vez mais avançadas, o controle proporcional-integral-derivativo (PID) ainda é o mais utilizado [13].

Porém o PID é uma técnica de controle linear e só funciona em sistemas não lineares para uma pequena faixa de condições de operação próximas ao ponto de linearização do sistema. Uma técnica muito utilizada para contornar esse problema é o Escalonamento de Ganhos (*gain-scheduling*), na qual os ganhos dos controladores são modificados de acordo com a faixa que o ponto de operação desejado se encontra [6].

3.3 Posicionamento Dinâmico

Um Sistema de Posicionamento Dinâmico (DP) é um sistema de controle capaz de controlar os graus de liberdade de um navio considerando que este se move em um plano horizontal e em baixa velocidade [17]. Na literatura é possível encontrar diferentes técnicas de controle aplicadas ao DP, desde mais simples como o PID [18], como mais complexas como a chamada Controle por Modo Deslizante Difuso Adaptativo, onde a lei de controle utiliza o método de Controle por Modos Deslizantes e as incertezas do modelo dinâmico são aproximadas pela técnica da Lógica Difusa Adaptativa [19]. O uso de Redes Neurais aplicado ao DP também é encontrado na literatura [20].

Figura 8: Resultado experimental para o um sistema de DP

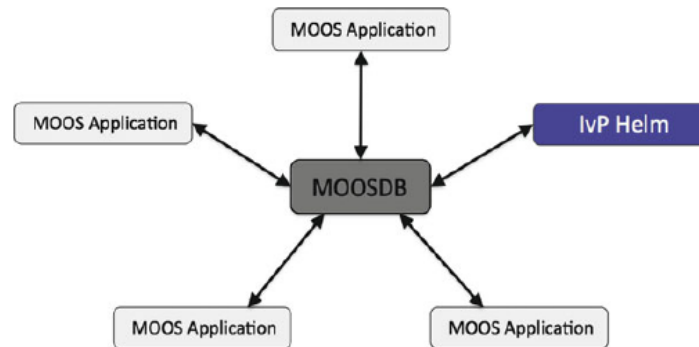


Fonte: Alfhein et al. [18].

3.4 O uso do MOOS-IvP no controle de USVs

O MOOS-IvP é um projeto *open-source* para a automação de veículos marítimos não-tripulados [21]. Ele consiste de dois componentes, o MOOSDB, que atua como servidor, e as aplicações MOOS, que atuam como clientes, formando uma topologia em estrela. As aplicações MOOS podem corresponder a sensores, ou módulos de algoritmo com funções específicas [22]. Dentre as aplicações MOOS, a principal é o IvP-Helm, um planejador de trajetória local que define rumo e velocidade desejados para o USV através de um método otimização multi-objetivo, onde cada função objetivo é proveniente de um comportamento pré-definido para o USV pelo usuário para que ele cumpra sua missão. Além disso o usuário pode programar em linguagem C++ as suas próprias aplicações MOOS para realizar alguma função específica [23].

Figura 9: Topologia em estrela do MOOS-IvP



Fonte: Benjamnin et al. [21].

Na literatura, é possível encontrar exemplos bem sucedidos do uso do MOOS-IvP para o controle de navios autônomos. Sua arquitetura modular faz com que o sistema de controle possa ser facilmente adaptado para diferentes navios autônomos, pois os módulos podem ser facilmente criados ou alterados [5] [22]. O sistema de controle feito utilizando o MOOS-IvP é estável, com baixo consumo de energia e se adaptando ao uso por longas horas de trabalho [24].

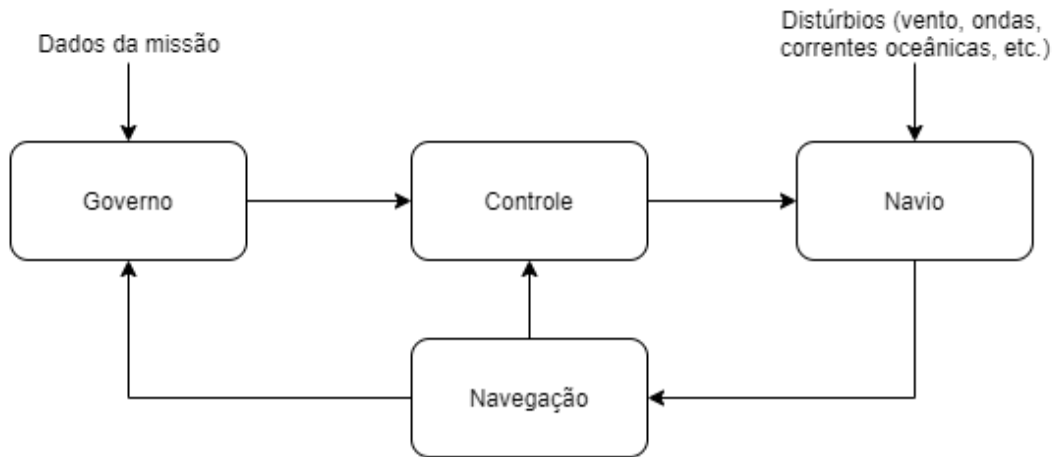
4 SISTEMAS GNC

Um sistema GNC (*Guidance, Navigation and Control*) é aquele que controla automaticamente ou remotamente um veículo submarino, aéreo ou de superfície. A história da aplicação de sistemas GNC para navios começa 1908 com a invenção da Bússola Giros cópica, que permitiu a implementação de sistemas de malha fechada para o controle de aproamento do navio. O próximo avanço tecnológico importante foi a invenção dos Sistemas de Navegação por Satélite (GNSS), conhecidos comercialmente como: GPS (EUA), GLONASS (Rússia) e GALILEO (União Europeia). Após atingirem uma cobertura de nível global em 1994, os sistemas GNSS permitiram o desenvolvimento de sistemas de controle de posição [17].

Um sistema GNC é constituído a partir de três sub-sistemas interconectados:

- Governo (*Guidance*): responsável por calcular continuamente os valores desejados de rumo e velocidade a partir de dados provenientes do sistema de navegação, de dados do ambiente e de dados inseridos previamente de acordo com a missão do veículo. O computador processa esses dados e a partir daí alimenta o sistema de controle com valores de referência desejados [17].
- Navegação (*Navigation*): responsável por determinar posição, rumo e distância navegada. Em alguns casos, pode determinar velocidades e acelerações também. Os sensores geralmente utilizados em um sistema de navegação para navios autônomos são o GNSS e os sensores de movimento como acelerômetros e girômetros [17].
- Controle (*Control*): responsável por determinar os esforços de controle necessários para se atingir os valores de referência provenientes do sistema de governo a partir dos dados de estado provenientes do sistema de navegação [17].

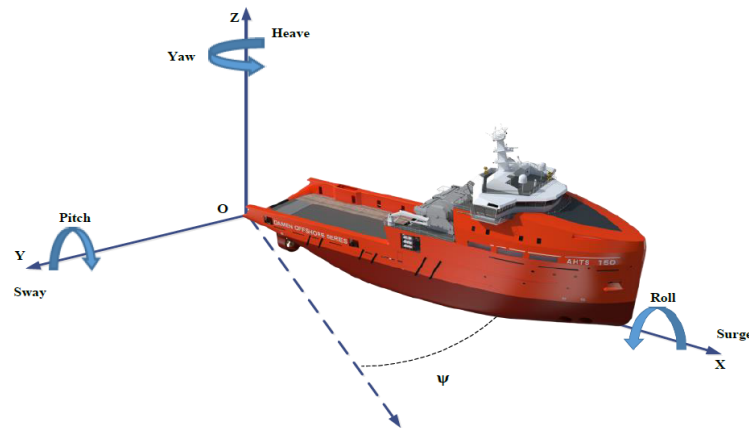
Figura 10: Diagrama de blocos ilustrando um sistema GNC



Fonte: Adaptado de Fossen [17].

Um veículo que se move no espaço possui 6 graus de liberdade, 3 lineares chamados de *surge*, *sway* e *heave*, e 3 angulares chamados de *roll*, *pitch* e *yaw* [17]. Os 6 graus de liberdade estão ilustrados na figura 11.

Figura 11: O seis graus de liberdade de um navio



Fonte: Mehrzadi et al. [25].

Assumindo-se que um veículo marítimo de superfície autônomo tem seu movimento restrito a um plano horizontal, podemos considerar somente 3 graus de liberdade (movimentos de *surge*, *sway* e *yaw*), que definem seu “espaço de configuração” $n = 3$. O “espaço de trabalho” é um espaço reduzido de dimensão $m < n$ no qual o objetivo de controle é definido. Um sistema é dito totalmente atuado se o número de atuadores (r) é igual ao número de graus de liberdade, ou seja, $n = r$, e subatuado se $r < n$. Um sistema subatuado ainda pode ser controlado se $n > m = r$, pois é considerado subatuado

no espaço de configuração, porém totalmente atuado no espaço de trabalho. Um piloto automático convencional de rumo possui $m = 1$, pois o único movimento a ser controlado é o de *yaw*, necessitando de apenas um atuador (e.g. leme). Um controle que tenha como objetivo fazer com que o navio siga uma determinada trajetória, pode ter como espaço de trabalho apenas os movimentos de *surge* e *yaw*, exigindo o uso de no mínimo 2 atuadores (e.g. leme e propulsor). Já um Posicionamento Dinâmico (DP) exige o controle dos 3 movimentos, *surge*, *sway* e *yaw*, fazendo com que seja necessário o uso de 3 atuadores (e.g. leme, propulsor e pelo menos um *thruster* lateral) [17].

4.1 Sistema de Governo

As técnicas de planejamento utilizadas no sistema de governo podem ser divididas como globais e locais. As globais tem como objetivo gerar um trajeto (e.g. *waypoints*) para o navio seguir, enquanto que as locais tem como objetivo gerar uma trajetória (e.g. rumo e velocidade) para que um navio siga um determinado trajeto, que pode ter sido inserido diretamente pelo usuário ou gerada automaticamente por uma técnica global. Um planejamento híbrido, combinando técnicas globais e locais, aumenta a segurança e a efetividade do sistema de governo [13].

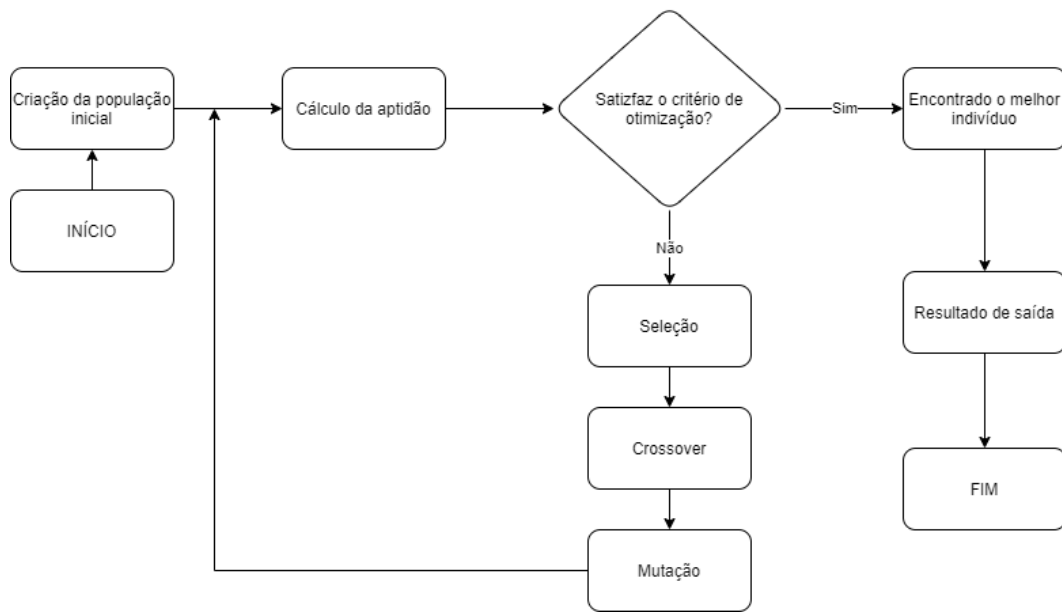
4.1.1 Algoritmo Genético

Algoritmo Genético é uma técnica de otimização que é amplamente utilizada como técnica de planejamento de global [13]. Ele é baseado na teoria da “sobrevivência do mais adaptado”, que elimina características indesejadas e forma indivíduos cada vez mais adaptados a cada iteração [26].

O primeiro passo do Algoritmo Genético é a criação de conjuntos, denominados “cromossomos”, de valores possíveis para todas as variáveis de projeto. Cada cromossomo possui um valor para cada variável de projeto, denominado “gene”. A esse grupo inicial de cromossomos, no qual cada cromossomo representa um “indivíduo”, dá-se o nome de “população”. Cada indivíduo da população inicial é utilizado como entrada em uma função de aptidão e é verificado se o valor atingido para cada cromossomo satisfaz o critério de parada. Se sim, o algoritmo é parado, se não, os indivíduos são ordenados de acordo com o valor que atingiram na função de aptidão e um grupo de indivíduos é selecionado para a próxima geração, sendo que quanto melhor a aptidão de um indivíduo, maior a chance dele ser selecionado. Então são criados novos indivíduos a partir do cruzamento

dos genes dos indivíduos selecionados, o que é chamado de “*crossover*”. Após o *crossover*, alguns genes de alguns indivíduos são aleatoriamente alterados, o que é chamado de “mutação”. Após a mutação, a nova geração de indivíduos é testada com a função de aptidão, dando início a um novo ciclo [26] [27].

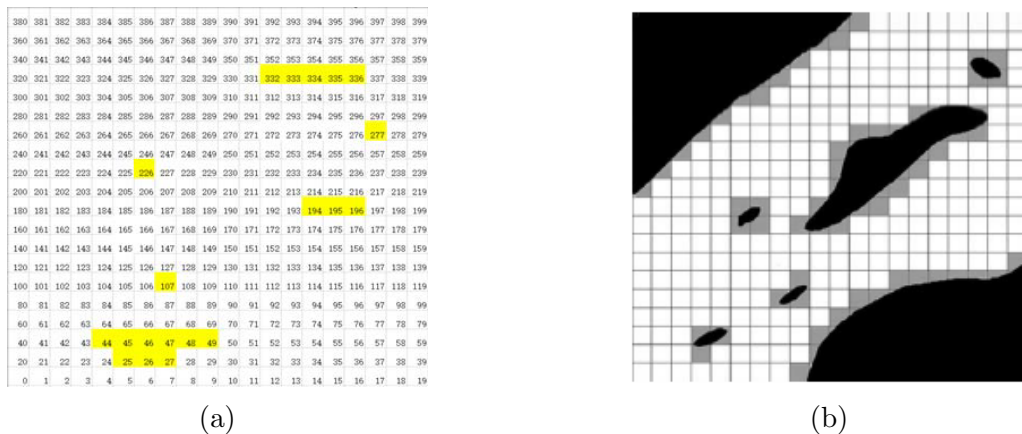
Figura 12: Fluxograma básico de um algoritmo genético



Fonte: Adaptado de Zhang et al. [26].

Utilizando-se coordenadas retangulares, é possível utilizar o Algoritmo Genético uma técnica de planejamento global. A carta náutica é modelada decompondo-a em células e para cada célula é associado um número inteiro. As células em branco representam águas navegáveis, as cinzas águas rasas e as pretas representam obstáculos [26].

Figura 13: a) Células numeradas b) Carta náutica decomposta em células

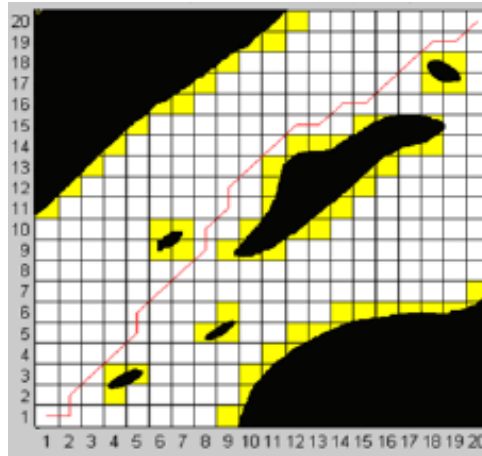


Fonte: a) Zhang et al. [26]. b) Zhang et al. [26].

Neste caso, os genes serão as células, os cromossomos um trajeto viável e a função de

aptidão será o inverso do comprimento do trajeto, de forma que quanto menor o trajeto, maior o valor da função de aptidão. Um operador de inserção deve ser implementado de forma que complete possíveis descontinuidades no trajeto, garantindo sempre um trajeto contínuo e viável [26].

Figura 14: Resultado de um trajeto ótimo gerado por um algoritmo genético



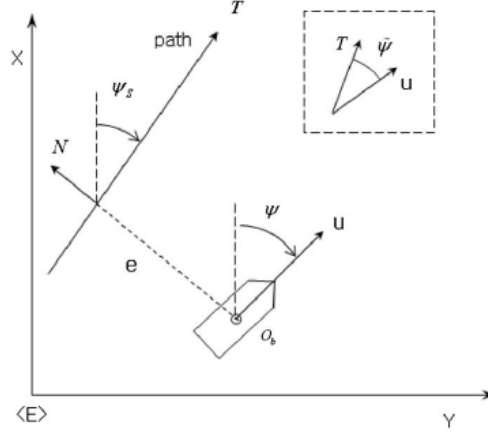
Fonte: Zhang et al. [26].

4.1.2 *Line-of-sight*

Line-of-sight (LOS) é uma técnica de planejamento local que é amplamente utilizada com sucesso em sistemas de governo [13].

Seja ψ o rumo atual do navio e ψ_s a direção do trajeto desejado, definido como uma linha reta entre o *waypoint* anterior e o próximo. O erro transversal e é a menor distância entre o centro de gravidade do navio e o trajeto desejado e o erro de aproamento $\bar{\psi}$ pode ser definido como $\bar{\psi} = \psi - \psi_s$ [28].

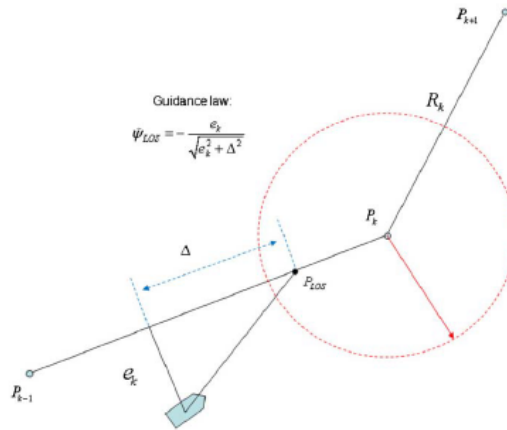
Figura 15: Variáveis cinemáticas de um navio seguindo um trajeto em linha reta



Fonte: Oh e Sun(2010) [28].

O objetivo do LOS é levar $\bar{\psi}$ e e para zero. Para isso, um rumo desejado é calculado a partir de $\bar{\psi}_{LOS} = -\frac{e}{\sqrt{e^2 + \Delta^2}}$, onde $\Delta > 0$ é chamado de distância de *lookahead* (olhar para frente, em inglês), um parâmetro utilizado como guia para modelar a convergência do navio para o trajeto desejado. O critério para se saber se o navio atingiu o *waypoint* objetivo e deve seguir para o próximo é o raio R , usualmente definido como o dobro do comprimento do navio [28].

Figura 16: Representação esquemática do funcionamento do *line-of-sight*



Fonte: Oh e Sun [28].

4.2 Sistema de Navegação

O controle seguro e eficiente de USVs depende de um sensoriamento adequado, com o uso de diferentes sensores de forma de se obter o melhor das características de cada um.

Geralmente os sensores obtêm apenas posição e orientação do USV, sendo necessário o uso de um estimador de estados para complementar a informação dos estados do USV com dados de velocidade e aceleração [13].

Os sensores mais utilizados em USVs para a obtenção de seus estados de posição e orientação são o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS, em inglês) e a Unidade de Medição Inercial (IMU, em inglês), onde o GNSS é utilizado para se obter a posição do navio e a IMU para se obter a sua orientação [6] [5] [13]. A velocidade pode ser obtida derivando-se a posição do GNSS ou utilizando um *Doppler Velocity Log* (DVL) [6].

Também é importante que o sistema de navegação seja capaz de filtrar o efeito das ondas, que agem como uma perturbação no sistema e podem resultar em condições operacionais inaceitáveis para o sistema de propulsão devido ao consumo de potência e possível desgaste dos atuadores. Um algoritmo capaz de fazer a fusão sensorial, estimar os estados não medidos e ainda filtrar o efeito das ondas para sistemas não-lineares é o Filtro de Kalman Estendido (EKF) [17].

4.2.1 Filtro de Kalman Estendido

Seja um sistema não-linear escrito na forma de espaço de estados

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + Bu + Ew \\ y &= Hx + v\end{aligned}\tag{4.1}$$

onde $f(x)$ é uma função vetorial não linear, w é um erro Gaussiano de média nula assumido para o processo, com matriz de covariância Q , e v é um erro Gaussiano de média nula assumido para o processo, com matriz de covariância R .

O Filtro de Kalman Estendido em tempo discreto pode ser dividido em duas etapas. A primeira é uma etapa de predição, onde os estados x_k e a matriz de covariância do erro dos estados P_k são propagados a partir de seu valor anterior usando as fórmulas

$$\begin{aligned}\bar{x}_{k+1} &= F(\hat{x}_k, u_k) \\ \bar{P}_{k+1} &= \Phi_k P_k \Phi_k^T + \Gamma Q \Gamma^T\end{aligned}\tag{4.2}$$

onde $F(\hat{x}_k, u_k) = \hat{x}_k + (f(\hat{x}_k) + Bu_k)\Delta t$, $\Phi_k = I + \Delta t \frac{\partial f(\hat{x}_k) + Bu_k}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k}$ e $\Gamma \approx E\Delta t$. As variáveis $\bar{x}_{k+1}$ e $\bar{P}_{k+1}$ são chamadas, respectivamente, de estimativas *a priori* de x_k e P_{k+1} .

A segunda etapa é a de atualização, onde os valores de $\bar{x}_{k+1}$ e $\bar{P}_{k+1}$ são corrigidos com o uso do Ganho de Kalman K_k , o qual é calculado a cada iteração desta etapa e também

com a leitura dos sensores y_k . A formulação da etapa de atualização é

$$\begin{aligned} K_k &= \bar{P}_{k+1} H^T (H \bar{P}_{k+1} H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_{k+1} &= \bar{x}_{k+1} + K_k (y_k - H \bar{x}_{k+1}) \\ \hat{P}_{k+1} &= (I - K_k H) \bar{P}_{k+1} (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T \end{aligned} \quad (4.3)$$

As variáveis $\hat{x}_{k+1}$ e $\hat{P}_{k+1}$ são chamadas, respectivamente, de estimativas *a posteriori* de x_k e P_{k+1} [17].

4.3 Sistema de Controle

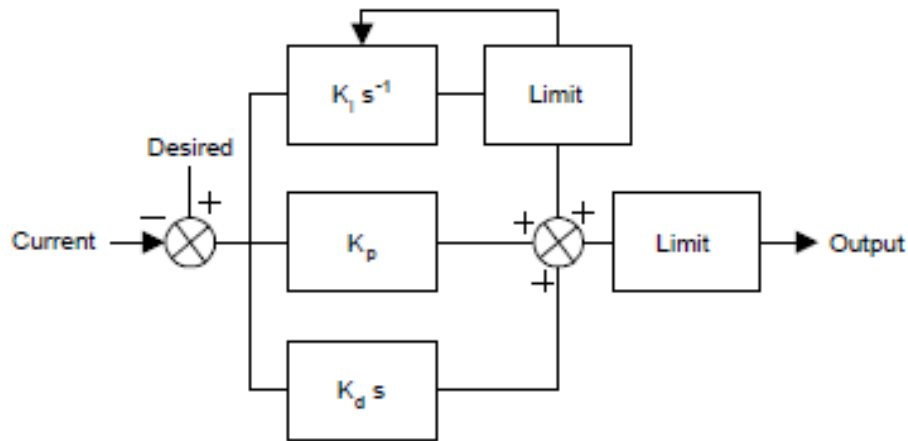
O sistema de controle tem como objetivo o cálculo das forças e momentos necessários para que o navio siga a trajetória definida pelo sistema de governo a partir dos estados obtidos pelo sistema de navegação [13].

4.3.1 Controle PID

Apesar dos esforços que tem sido dedicados para o desenvolvimento de metodologias de controle mais avançadas, o controlador Proporcional-Integral-Derivativo ainda é o mais utilizado em sistemas de controle de USVs [13].

O controle PID é um controle formulado em 3 termos e foi proposto por Minorsky em 1922 motivado pela observação da dificuldade que timoneiros de navios tinham ao alterar o rumo do navio [17].

Figura 17: Arquitetura básica de um controlador PID



Fonte: Newman [29].

5 METODOLOGIA

O controlador do USV seguirá a arquitetura de um sistema GNC e será implementado utilizando como base a estrutura modular do MOOS-IvP, sendo alguns módulos nativos do *framework* e outros implementados pelo autor. O Sistema de Governo utilizará o módulo IvP-Helm, nativo do MOOS-IvP e que tem já implementado um algoritmo de *line-of-sight*. Para o Sistema de Controle, será implementado pelo autor um módulo de controlador PID. Para o Sistema de Navegação, o autor implementará módulos para simular cada sensor e um módulo com um algoritmo de Filtro de Kalman Estendido, para fazer a fusão sensorial e filtrar os ruídos dos sensores. Para a realização de simulações e validação do controlador, será implementado um módulo de interface entre o MOOS-IvP e o *Pydyna*, biblioteca de simulação de dinâmica de embarcações do TPN. Também, será implementado pelo autor também um módulo de interface entre o MOOS-IvP e o *InHouse DP*, *software* de Posicionamento Dinâmico utilizado pelo TPN. Alguns módulos implementados pelo autor serão na linguagem C++ e outros na linguagem *Python*, utilizando a biblioteca *pymoos* para a comunicação com o MOOSDB.

Além disso, será implementado pelo autor um *software* em linguagem *Python* com interface gráfica (GUI) para realizar o planejamento de trajeto em nível global, que utilizará Algoritmo Genético para otimizar a trajetória e selecionar os *waypoints* de acordo com a missão do USV. O *software* terá como saída os arquivos *.moos* e *.bhv*, utilizados como entrada para a configuração do MOOS-IvP.

5.1 Requisitos

Os requisitos de projeto encontram-se no apêndice A. Este trabalho se limitará aos requisitos relacionados à Engenharia Mecatrônica. Os requisitos pertinentes à Engenharia Naval serão o foco de outro Trabalho de Conclusão de Curso, realizado por dois Primeiros-Tenentes da Marinha do Brasil: Diogo Cavalcante Rodrigues Lopes e Samuel Magno Ribeiro da Silva, ambos alunos do último ano do curso de Engenharia Naval da

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os requisitos pertinentes à Engenharia Mecatrônica podem ser resumidos em:

1. Controle e planejamento de trajetória (item 2.a do apêndice A);
2. Posicionamento Dinâmico (itens 3.a, 10.k e 10.l apêndice A);
3. Arquitetura modular do controlador (item 10.q do apêndice A).

6 MODELAGEM DO NAVIO

O Navio Autônomo de Contramedidas de Minagem (NACMM), como o nome diz, é um navio empregado para contramedidas de minagem, na realização de missões tanto de caça-minas quanto de varredura, podendo ser adaptado também para desempenhar atividade de minagem, levantamento hidrográfico e de auxílio à patrulha antissubmarino.

Figura 18: Modelo conceitual do Navio Autônomo de Contramedidas de Minagem



Fonte: Projeto do NACMM.

Tabela 1: Dados do NACMM

Comprimento	13,095 m
Boca	3,379 m
Pontal	1,65 m
Deslocamento	18,79 ton

Fonte: Projeto do NACMM.

O navio possui dois propulsores e dois lemes na popa e um propulsor do tipo *tunnel bow thruster* na proa.

Tabela 2: Dados propulsores

Propulsor	1	2	3
Localização	popa/bombordo	popa/boreste	proa/túnel
Fabricante	TEMA	TEMA	<i>Max Power</i>
Modelo	LPMR-350.6.06.AW	LPMR-350.6.06.AW	CT 125
Tipo de motor	elétrico	elétrico	elétrico
Passo	fixo	fixo	fixo
Azimute	fixo	fixo	fixo
Potência	350 KW	350 KW	8,58 KW

Fonte: Projeto do NACMM.

Tabela 3: Dados dos lemes

Perfil	NACA 0025
Altura (<i>span</i>)	0,57m
Comprimento (corda média)	0,56m
Área do leme	0,32m ²

Fonte: Projeto do NACMM.

6.1 Modelagem

Para o projeto de um controlador eficiente e para simulações, se faz necessário uma modelagem suficientemente precisa da dinâmica de um navio [13].

6.1.1 Cinemática

Um modelo simplificado da cinemática de um navio se movendo na superfície da água é dado por

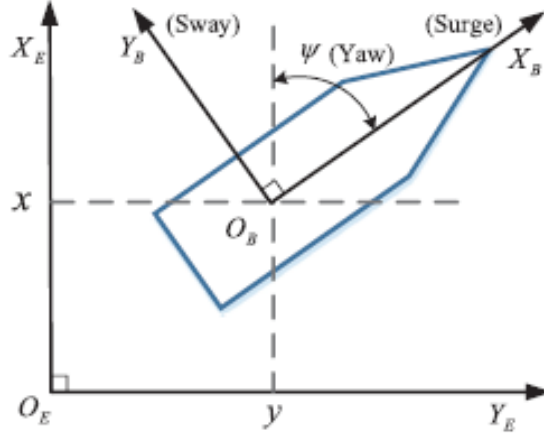
$$\dot{\eta} = R(\psi)\nu \quad (6.1)$$

onde $\eta = [x, y, \psi]^T$ denota o vetor de posição e orientação do USV em um sistema de coordenadas fixo na terra e $\nu = [u, v, r]^T$ representa as velocidades lineares e angular do navio em um sistema de coordenadas que se move junto ao corpo e

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

é uma matriz de rotação [30].

Figura 19: Representação esquemática do movimento plano de um USV



Fonte: Liu et al. [13].

6.1.2 Dinâmica do Navio

A dinâmica do USV pode ser dada por:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau \quad (6.3)$$

A matriz

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

é a chamada matriz de massa, onde m_{11} e m_{22} são as somas da massa do navio com as massas adicionais geradas pelo deslocamento de água que o navio causa em cada eixo do plano e m_{33} o momento de inércia do navio somado com o momento de inércia adicional.

A matriz

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

é chamada de matriz de Coriolis.

O vetor de entradas é

$$\tau = \begin{Bmatrix} \tau_u \\ \tau_v \\ \tau_r \end{Bmatrix} \quad (6.6)$$

onde cada componente é resultante dos atuadores em um dos graus de liberdade [30].

A matriz $D(\nu)$ representa os amortecimentos aos quais o navio se encontra exposto, como amortecimento potencial, arrasto friccional, ondas de deriva e forças de empuxo. A resultante dessas forças de amortecimento, $D(\nu)\nu$, pode ser aproximada por

$$D(\nu)\nu \approx \begin{bmatrix} \frac{\rho L T C_x(\beta)}{2} (u^2 + v^2) \\ \frac{\rho L T C_y(\beta)}{2} (u^2 + v^2) \\ \frac{\rho L^2 T C_z(\beta)}{2} (u^2 + v^2) + \frac{\rho L^4 T C_y(\beta)}{32} r^2 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

onde ρ é a densidade da água, L é o comprimento entre perpendiculares do navio, T é o calado e $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$ e $C_z(\beta)$ são os coeficientes de forças e de momento de deriva, que dependem do ângulo de deriva $\beta = \arctg(\frac{v}{u})$ [31] [32].

Os valores de massa adicional foram fornecidos pelos projetistas do navio e, ao serem somados a massa m e ao momento de inércia I_z do navio formam os elementos da matriz de massas M . Os valores de $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$ e $C_z(\beta)$ também foram fornecidos e, para eles, foi adotada uma simplificação na qual são considerados apenas $C_x(180^\circ)$, $C_y(90^\circ)$ e $C_z(90^\circ)$.

Tabela 4: Massas, momentos de inércia e coeficientes de deriva do NACMM

m	18,79 ton
I_z	240,19 ton · m ²
m_{11}	19,80115 ton
m_{22}	29,27726 ton
m_{33}	331,14633 ton · m ²
$C_x(180^\circ)$	0,10900
$C_y(90^\circ)$	3,27607
$C_z(90^\circ)$	0,02246

Fonte: Projeto do NACMM.

6.1.3 Dinâmica dos atuadores

6.1.3.1 Modelagem dos propulsores

A força de empuxo gerada por cada propulsor é dada por

$$T = K_t \rho n^2 D^4 \quad (6.8)$$

onde ρ é a densidade da água, n é a rotação no eixo do propulsor, D é o diâmetro do hélice e K_t é o coeficiente de empuxo, que é função do coeficiente de avanço

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (6.9)$$

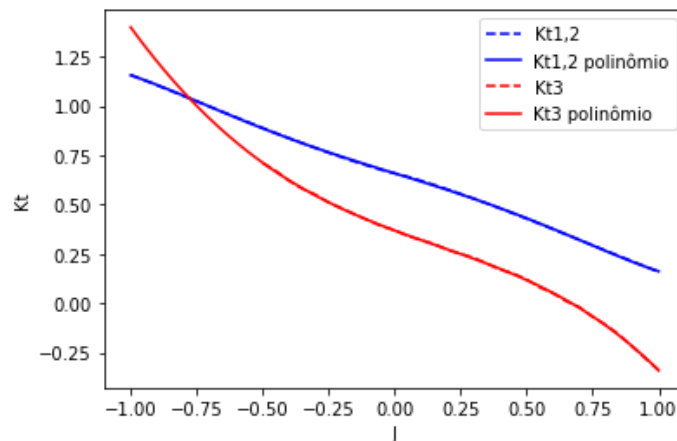
onde V_a é a velocidade de avanço, que é a velocidade do fluxo de água passando pelo propulsor, sendo calculada por

$$V_a = (1 - w)u \quad (6.10)$$

sendo w um coeficiente experimental conhecido como fração de esteira e que depende principalmente do formato do casco [33].

A relação entre K_t e J foi obtida pelos projetistas do navio utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para 41 valores de J e então interpoladas por um polinômio de quinto grau.

Figura 20: Curvas $J \times K_t$ para os três propulsores



Fonte: autoria própria.

Para os dois propulsores de popa, propulsores 1 e 2, as curvas $J \times K_t$ se sobrepõem, pois os propulsores são idênticos. Já a curva do propulsor da proa, propulsor 3, é bem

diferente.

$$K_{t_{1,2}}(J) = 0,109J^5 - 1,897 \cdot 10^{-05}J^4 - 0,191J^3 + 6,595 \cdot 10^{-06}J^2 - 0,414J + 0,658 \quad (6.11)$$

$$K_{t_3}(J) = 0,014J^5 - 0,031J^4 - 0,384J^3 + 0,192J^2 - 0,499J + 0,368 \quad (6.12)$$

6.1.3.2 Modelagem dos lemes

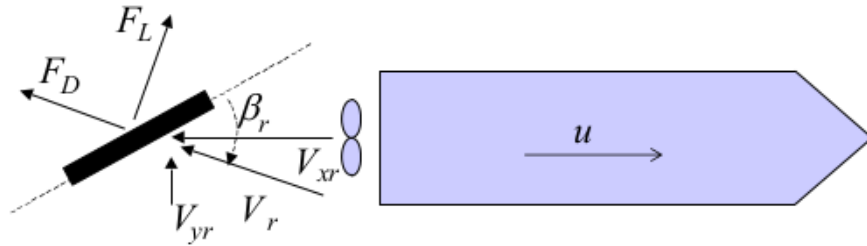
A força gerada pelo leme é decomposta em duas componentes, arrasto (F_D) e empuxo (F_L), sendo modeladas por

$$F_D(\beta_r) = 0,5\rho A_r C_D(\alpha_E) V_r^2 \quad (6.13)$$

$$F_L(\beta_r) = 0,5\rho A_r C_L(\alpha_E) V_r^2 \quad (6.14)$$

onde β_r é o ângulo do leme, A_r é a área do leme, V_r a velocidade relativa do fluxo de água passando pelo leme, C_D e C_L coeficientes adimensionais e α_E é um ângulo efetivo do leme [32].

Figura 21: Representação esquemática das forças geradas pelo leme



Fonte: Tannuri et al [32].

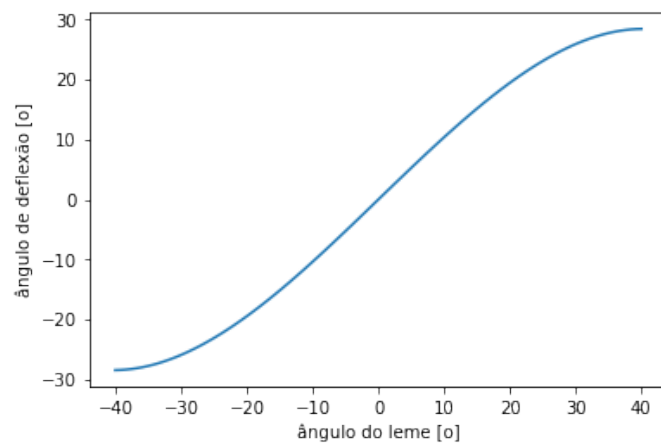
A determinação do ângulo efetivo α_E é complexa e foge ao escopo deste trabalho. Por isso foi considerada uma simplificação do modelo do leme no qual o efeito do leme é considerado como uma deflexão na força de empuxo do propulsor que está associado a ele.

Usando a biblioteca *pydyna*, desenvolvida em linguagem *Python* pelo Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo (TPN-USP) para a simulação da dinâmica

de navios é possível variar o ângulo do leme de 1 em 1 grau e medir as componentes da força resultante nos eixos x e y. Com isso, é possível calcular as deflexões α_1 e α_2 nas forças de empuxo T_1 e T_2 geradas pelos propulsores da popa em função dos ângulos de leme β_1 e β_2 . Este conjunto de pontos gerados, simétrico para os dois lemes, foi então interpolado por um polinômio do terceiro grau.

$$\alpha(\beta) = -2.18 \cdot 10^{-04} \beta^3 + 1.06 \beta \quad (6.15)$$

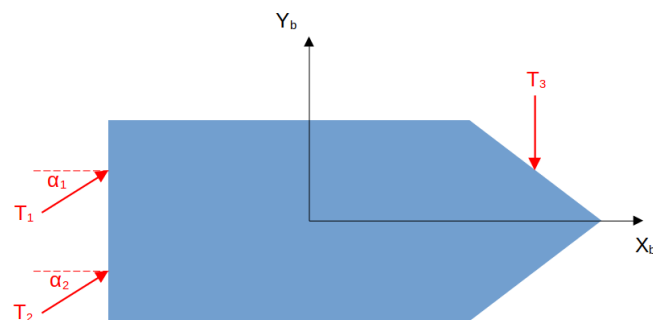
Figura 22: Relação entre o ângulo do leme e a deflexão causada no empuxo



Fonte: autoria própria.

6.1.3.3 Forças e momentos resultantes

Figura 23: Diagrama de corpo livre do navio



Fonte: autoria própria.

Os elementos do vetor de entradas τ podem ser calculadas então como as forças resultantes em X_b e Y_b e o momento resultante em Z_b .

$$\tau_u = \sum F_{X_b} = T1 \cos \alpha_1 + T2 \cos \alpha_2 \quad (6.16)$$

$$\tau_v = \sum F_{Y_b} = T1 \sin \alpha_1 + T2 \sin \alpha_2 - T3 \quad (6.17)$$

$$\tau_r = \sum M_{Z_b} = -T1 \cos \alpha_1 y_1 - T1 \sin \alpha_1 x_1 + T2 \cos \alpha_2 y_2 - T2 \sin \alpha_2 x_2 - T3 x_3 \quad (6.18)$$

onde x_1 , x_2 , x_3 , y_1 , y_2 e y_3 são as componentes das distâncias dos propulsores ao centro de gravidade do navio. Seus valores foram fornecidos pelos projetistas do NACMM.

Tabela 5: Distâncias dos propulsores ao centro de gravidade do navio

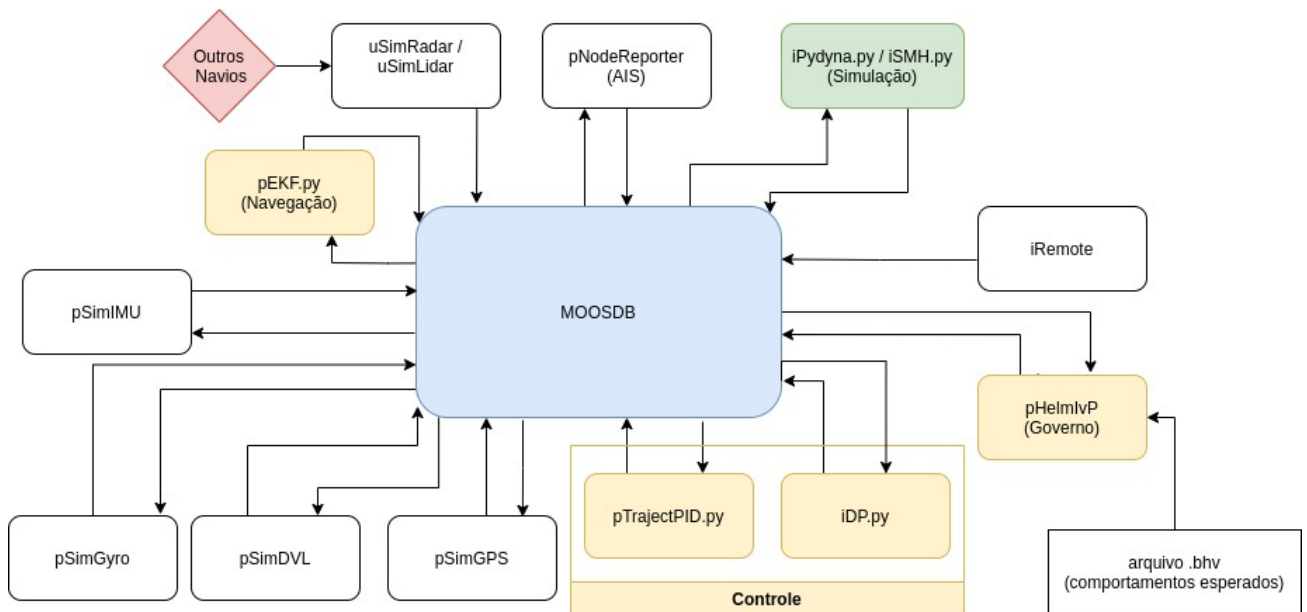
	propulsor 1	propulsor 2	propulsor 3
x	4,82 m	4,82 m	6,48 m
y	0,67 m	0,67 m	0 m

Fonte: Projeto do NACMM.

7 PROJETO DO CONTROLADOR

O controlador baseado na arquitetura do MOOS-IvP possui a topologia apresentada na figura 24. Os códigos de todos os módulos descritos neste capítulo e implementados pelo autor encontram-se no repositório <https://github.com/lhscaldas/TCC.git>, distribuídos entre as pastas “Python” e “C++” de acordo com a linguagem de programação utilizada.

Figura 24: Topologia simplificada do controlador



Fonte: autoria própria.

7.1 Simulação

7.1.1 Interface com o *Pydyna* (*iPydyna*)

Para a interface entre o *Pydyna* e o MOOS-IvP, foi programado em *Python* um módulo para o MOOS-IvP utilizando a biblioteca *pymoos*. Em sua inicialização ele se registra para

receber do MOOSDB as rotações desejadas nos 3 eixos e os ângulos desejados para os 2 lemes e a cada iteração realiza um passo de integração numérica e envia ao MOOSDB as variáveis de estado do navio, que são as posições e velocidades lineares e angulares considerando seu movimento no plano.

7.1.2 Interface com o SMH (*iSMH*)

Módulo programado em *Python* para realizar a interface entre o controlador e o Simulador Marítimo Hidroviário (SMH) do TPN-USP. Recebe e envia as mesmas variáveis que o *iPydyna*, porém ao invés de realizar ele mesmo os cálculos da dinâmica do navio, ele envia ao SMH os esforços de controle e recebe de volta as variáveis de estado do navio. Esta comunicação é feita usando protocolo NMEA através de uma biblioteca desenvolvida pelo TPN chamada *Pybuzz*, que facilita a implementação da comunicação sem ter que utilizar diretamente o protocolo NMEA.

7.2 Sensoriamento

7.2.1 Simulador de GPS (*pSimGPS*)

Este módulo implementado em C++ simula um sistema de posicionamento global (GPS) baseado nas especificações do GNSS comercial AsteRx-U MARINE [34]. Ele recebe as variáveis de posição e velocidade lineares provenientes do módulo que está executando a simulação, aplica uma taxa de amostragem e um ruído branco para simular o erro de medição e depois envia essas variáveis com erro e taxa de amostragem para o MOOSDB. Além disso, ele também calcula a latitude/longitude do navio a partir da posição xy fornecida pelo módulo de simulação e de uma latitude/longitude de origem que é configurada no controlador no início da missão.

7.2.2 Simulador de Girômetro (*pSimGyro*)

Este módulo implementado em C++ simula um girômetro baseado nas especificações do girômetro comercial MGC R1 COMPASS [35]. Ele recebe a variável de posição angular proveniente do módulo que está executando a simulação, aplica uma taxa de amostragem e um ruído branco para simular o erro de medição e depois envia essa variável com erro e taxa de amostragem para o MOOSDB.

7.2.3 Simulador de DVL (*pSimDVL*)

Este módulo implementado em C++ simula um Registrador de Velocidade *Doppler* (DVL, em inglês) baseado nas especificações do DVL comercial SeaPILOT [36]. Ele recebe a variável de velocidade linear proveniente do módulo que está executando a simulação, aplica uma taxa de amostragem e um ruído branco para simular o erro de medição e depois envia essa variável com erro e taxa de amostragem para o MOOSDB.

7.2.4 Simulador de IMU (*pSimIMU*)

Este módulo implementado em C++ simula uma Unidade de Medição Inercial (IMU, em inglês) baseado nas especificações da IMU comercial Ekinox-D [37]. Ele recebe as variáveis de posição e velocidade lineares e posição angular provenientes do módulo que está executando a simulação, aplica uma taxa de amostragem e um ruído branco para simular o erro de medição e depois envia essas variáveis com erro e taxa de amostragem para o MOOSDB.

7.2.5 Fusão Sensorial *pEKF*

Este módulo implementado em C++ recebe todas as variáveis provenientes dos sensores com seus devidos erros e taxas de amostragem e é responsável por fazer a fusão sensorial e a filtragem dos ruídos, devolvendo ao MOOSDB as variáveis de posição e velocidade lineares e posição angular. Utilizando a modelagem descrita na seção 6.1 e o equacionamento da seção 4.2.1, foi implementado neste módulo um Filtro de Kalman Estendido.

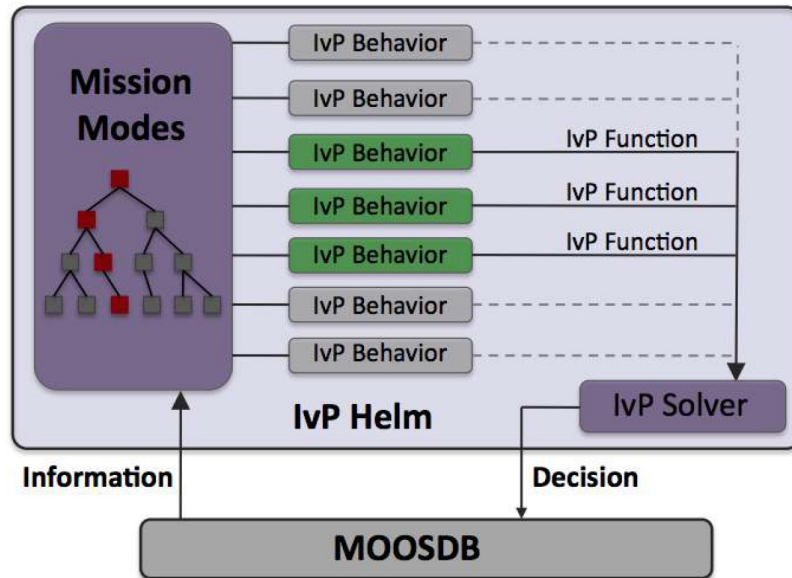
7.3 Planejamento de Trajetória (*IvP-Helm*)

O *IvP-Helm* é um planejador de trajetória nativo do MOOS-IvP. Ele recebe de um arquivo *.bhv* os comportamentos esperados para o USV para uma determinada missão e a partir deles calcula a melhor solução de rumo e velocidade desejados para o navio. Os comportamentos desejados podem ser, por exemplo, seguir um conjunto de *waypoints*, manter uma determinada velocidade, manter um determinado rumo, ou até mesmo evitar colisões [23].

Conforme ilustrado na figura 25, o *IvP-Helm* possui uma Arquitetura Orientada ao Comportamento [38], na qual cada comportamento possui um peso e gera uma função-

objetivo. A partir do conjunto de funções-objetivo e dos seus respectivos pesos, o solucionador (*solver*) do *IvP-Helm* utiliza um Método de Programação por Intervalo [39] para resolver o problema de Otimização Multi-Objetivo e encontrar a melhor solução de Rumo e Velocidade desejados [23].

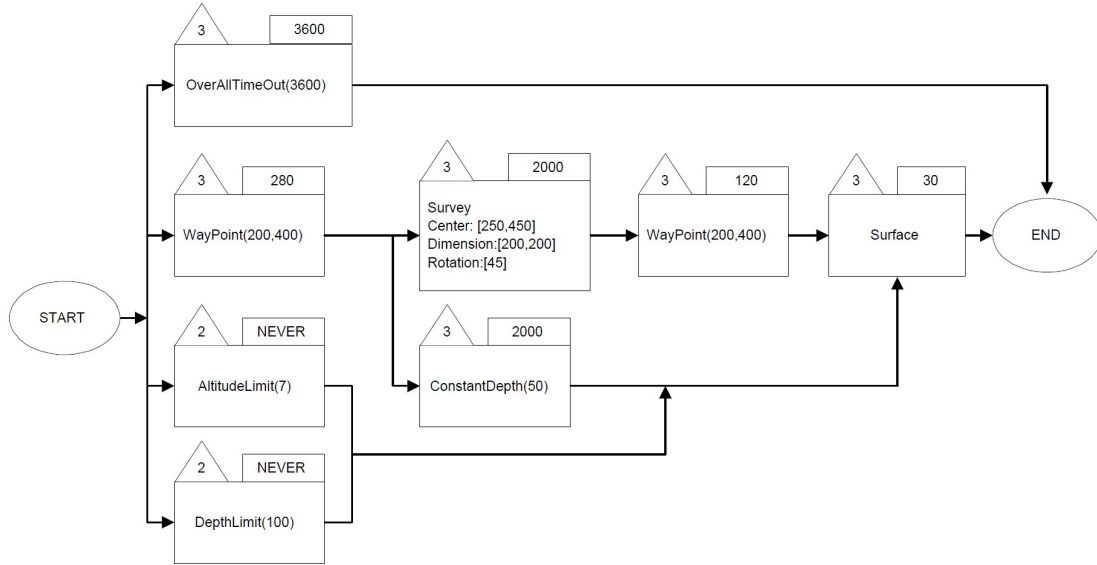
Figura 25: Arquitetura do *IvP-Helm*



Fonte: Benjamin et al. [23].

Nos arquivos *.bhv*, cada comportamento representa uma tarefa que o USV deverá realizar. Para cada comportamento está associado um peso, um *flag* de início e um *flag* de fim, podendo também ser associado um tempo de expiração da tarefa. Assim, cada tarefa ativa a próxima ao ser completada ou ao atingir o seu tempo limite [29]. Na figura abaixo, os números dos triângulos representam o peso de cada comportamento e os números nos retângulos representam o seu tempo de expiração em segundos.

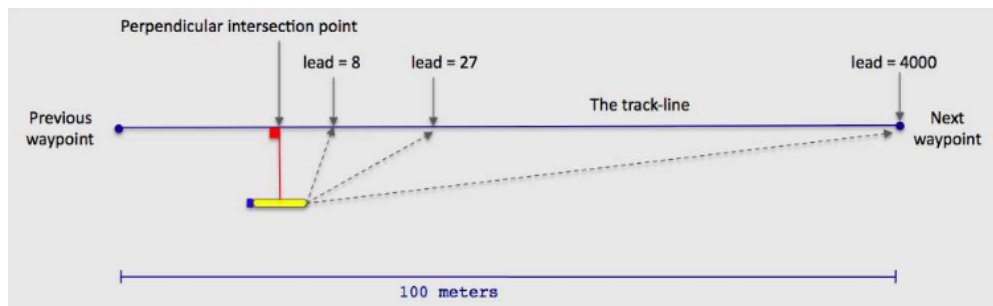
Figura 26: Relação Hierárquica em um Arquivo .bhv



Fonte: Newman [29].

Dentre os comportamentos que podem ser configurados no arquivo .bhv, um dos mais importantes é o *waypoint*, no qual o navio deve se deslocar para um determinado *waypoint*. A função-objetivo gerada pelo comportamento *waypoint* é baseada no algoritmo *Line-of-Sight*, que foi apresentado na seção 4.1.2.

Figura 27: *Line-of-Sight* do comportamento *waypoint*



Fonte: Benjamin et al. [23].

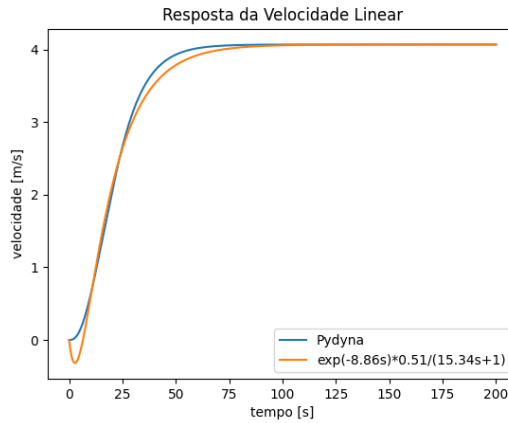
7.4 Controlador PID (*pTrajectPID*)

Para o controle de velocidade e de rumo, foi implementado um controlador do tipo PID como o da figura 17.

Foi utilizado um método de identificação de sistemas [40], no qual a resposta da velocidade linear a uma entrada degrau na rotação dos propulsores foi aproximada por

uma função de primeira ordem com atraso.

Figura 28: Aproximação da Função de Transferência da Velocidade



Fonte: autoria própria.

Devido ao atraso nesta resposta, foi possível calibrar um controlador do tipo PI utilizando a regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta do processo [41] para controlar a velocidade linear do navio.

Já a resposta da posição angular para uma entrada degrau no leme, por ser um sistema naturalmente instável, foi utilizado a regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico e no período crítico [41] para se calibrar um controlador do tipo PID para controlar o rumo do navio.

Tabela 6: Ganhos dos controladores de velocidade e rumo

	P	I	D
Velocidade	3,044	0,103	0
Rumo	3,6	0,9	3,6

Fonte: autoria própria.

O controlador PID foi implementado como um módulo do MOOS-IvP programado em *Python*, utilizando a biblioteca *pymoos*. Em sua inicialização ele se registra para receber do MOOSDB a velocidade e o rumo desejados que foram publicados pelo módulo *IvP-Helm* e também a velocidade e o rumo calculados pelo EKF. A cada iteração envia ao MOOSDB as rotações desejadas para cada um dos dois propulsores da popa e também o ângulo desejado para os dois lemes.

7.5 Outros Módulos

7.5.1 iRemote

Este módulo foi implementado em C++ e tem como objetivo controlar manualmente o navio. Assim que acionado pelo teclado com a “barra de espaço”, interrompe o funcionamento do IvP-Helm e passa o controle do navio para o modo manual. As teclas “a” e “z”, respectivamente aumentam e diminuem rotação desejada nos propulsores 1 e 2, consequentemente aumentando ou diminuindo a velocidade do USV. Já as teclas “n” e “m”, respectivamente guinam o navio para bombordo (esquerda) ou boreste (direita), alterando o ângulo de leme desejado para ambos os lemes. A tecla “o” devolve o comando do navio ao IvP-Helm, retornando o controlador para o modo autônomo e continuando a missão de onde havia parado.

7.5.2 pNodeReporter

Este módulo nativo do MOOS-IvP simula um Sistema de Identificação Automática (AIS, em inglês). Ele recebe todas as variáveis dos *pSensor* e dados da missão e gera a partir deles um relatório que é enviado para outros navios nas proximidades, podendo ser utilizado como auxílio a decisão para a prevenção de colisão. Além disso, o módulo *pMarineViewer* utiliza esses relatórios pra saber a posição e atitude do navio durante as simulações.

7.5.3 iDP

Este módulo foi implementado em *Python* e tem como objetivo fazer a interface entre o MOOS-IvP e o *InHouse DP*, *software* de Posicionamento Dinâmico utilizado pelo TPN. O módulo recebe as variáveis de posição e aproamento desejados, além das variáveis de navegação provenientes do módulo *pEKF* e à partir destes dados executa o *InHouse DP*, que calcula os valores desejados de rotação para cada um dos propulsores para atingir o objetivo e envia estes valores ao MOOSDB. Dentro do *InHouse DP* também está presente um controlador do tipo PID, porém seus ganhos são calculados de forma automática, sendo fornecido a ele apenas a frequência natural e o amortecimento desejados. Foi fornecida uma frequência natural de $0,01 \text{ Hz}$ e um amortecimento de $0,9$. Para utilizar esta módulo, foi necessário também implementar um novo comportamento, o BHV_DP. Este comportamento tem como objetivo manter o navio em Posicionamento Dinâmico em uma

determinada posição e com um determinado aproamento desejado. Apesar de ser um comportamento e não um módulo, seu código também se encontra na pasta “C++” do repositório.

7.5.4 uSimRadar e uSimLidar

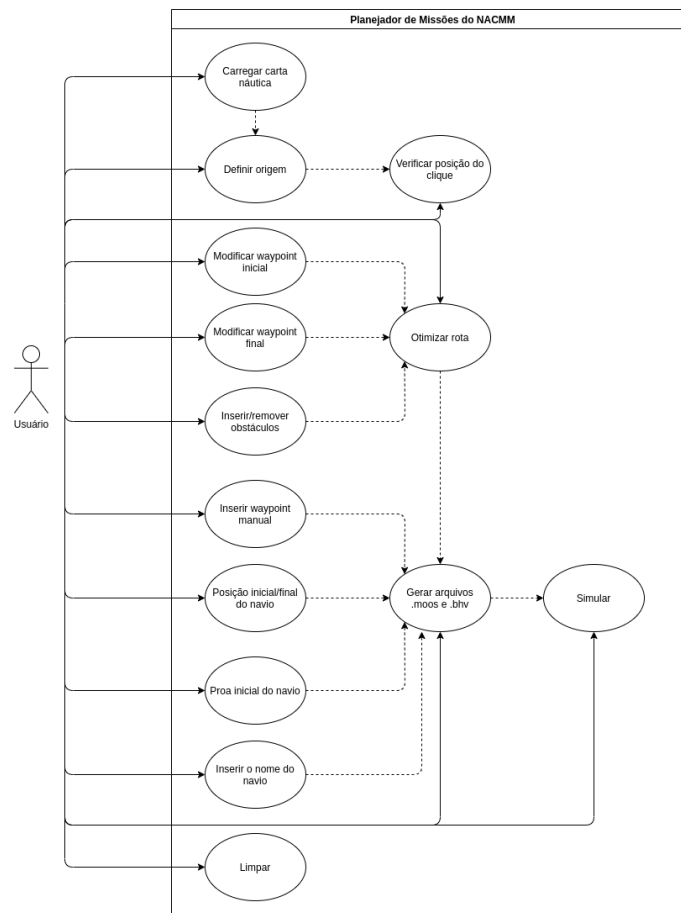
Estes dois módulos implementados em C++ recebem os relatórios do *pNodeReporter* de cada navio na simulação e a partir de suas posições calculam as distâncias entre eles, sendo possível configurar a taxa de amostragem, o alcance, o erro gaussiano e o ângulo de abertura do feixe do equipamento, simulando Radares e Lidares reais. O erro e a taxa de amostragem configurados foram baseados no radar comercial Raymarine Quantum 2 [42] e no lidar OPAL™ Performance Series [43].

8 PLANEJADOR DE MISSÕES

A interface gráfica foi nomeada “Planejador de Missões do NACMM”, onde a sigla NACMM significa Navio Autônomo para Contramedidas de Minagem, nome provisório do navio para o qual o controlador desta trabalho está sendo desenvolvido. A interface foi desenvolvida em *Python* utilizando a biblioteca *tkinter*. Nela é possível carregar uma carta náutica e definir os *waypoints* que o navio deve percorrer tanto de forma manual como de forma otimizada. O produto final gerado pela interface são os arquivos *.moos* e *.bhv* utilizados para a configuração do controlador. Além disso, a interface também permite a realização de uma simulação da missão utilizando o módulo *pMarineViewer* do MOOS-IvP e simulando a dinâmica do navio com a biblioteca *Pydyna* do TPN. O programa funciona nos sistemas operacionais *Windows* e *Linux*, porém o MOOS-IvP foi desenvolvido apenas para *Linux*, não sendo possível então utilizar a função de simulação em ambiente *Windows*. Os códigos com a implementação da interface encontram-se no repositório <https://github.com/lhscaldas/TCC.git>, na pasta “Interface”.

No diagrama de casos de uso da figura abaixo, as linhas cheias indicam que os casos de uso são acessados diretamente pelo usuário através de botões. Já as linhas tracejadas representam as relações de dependência entre os casos de uso, indicando que alguns deles necessitam que outros sejam realizados antes. Todos os casos de uso dependem do carregamento da carta náutica e da definição da origem, porém algumas linhas tracejadas destes casos de uso para outros foram omitidas de forma a garantir a clareza do diagrama.

Figura 29: Diagrama de casos de uso do “Planejador de Missões do NACMM”



Fonte: autoria própria.

No painel lateral do programa é possível identificar cada caso de uso.

Figura 30: Painel lateral do “Planejador de Missões do NACMM”

A captura de tela mostra o painel lateral do software, com os seguintes elementos visíveis:

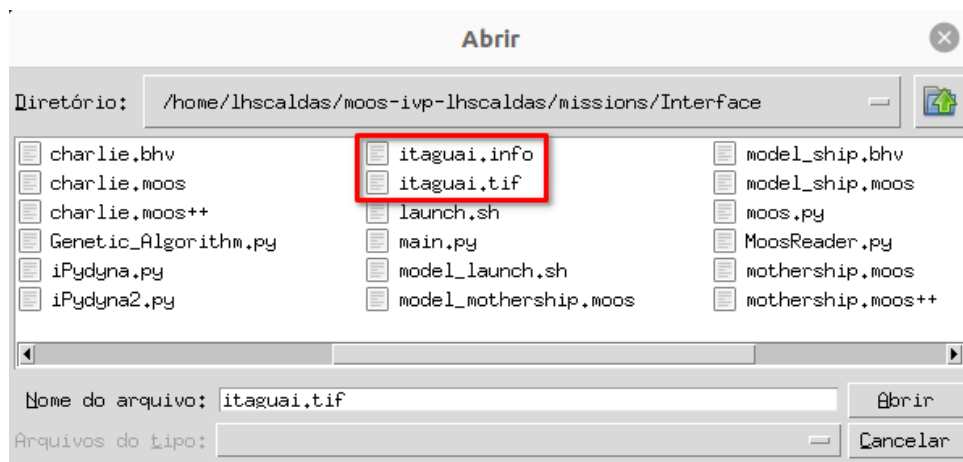
- Botão "Carregar Carta"
- Campos de texto para "Lat_origem =" (-22,9269) e "Long_origem =" (-43,867)
- Botão "Definir origem"
- Grupo de opções "Posição do clique:" com sub-opções:
 - ☒ Posição do clique: (com campos para x=0, y=0, Lat=0, Long=0)
 - ☐ Inserir ponto
 - ☐ Modificar ponto inicial
 - ☐ Modificar ponto final
 - ☐ Inserir/remover obstáculos
 - ☐ Posição inicial do navio
 - ☐ Posição final do navio
- Campos de texto para "Proa inicial" (0) e "Nome do navio" (alfa)
- Botões "Otimizar rota", "Limpar", "Gerar arquivos" e "Simular"

Fonte: autoria própria.

8.1 Carregar carta náutica

O botão “carregar carta” abre uma janela no qual é possível selecionar um arquivo .tif com a carta náutica desejada e carregá-la no programa. Além do arquivo .tif, também é necessário um arquivo de texto .info com o mesmo nome do arquivo .tif e que contenha os quatro limites de latitude e longitude da carta náutica. Após a carta náutica ser carregada, são definidos três sistemas de coordenadas: um global em latitude e longitude para uso do usuário, um local em metros também para uso do usuário e outro global em pixels para uso interno do programa.

Figura 31: Janela para carregar uma carta náutica



Fonte: autoria própria.

8.2 Definir origem

Inserir a latitude e a longitude da origem na caixa de texto e clicar no botão “definir origem” redefine a origem (ponto 0,0) do sistema de coordenadas local (em metros).

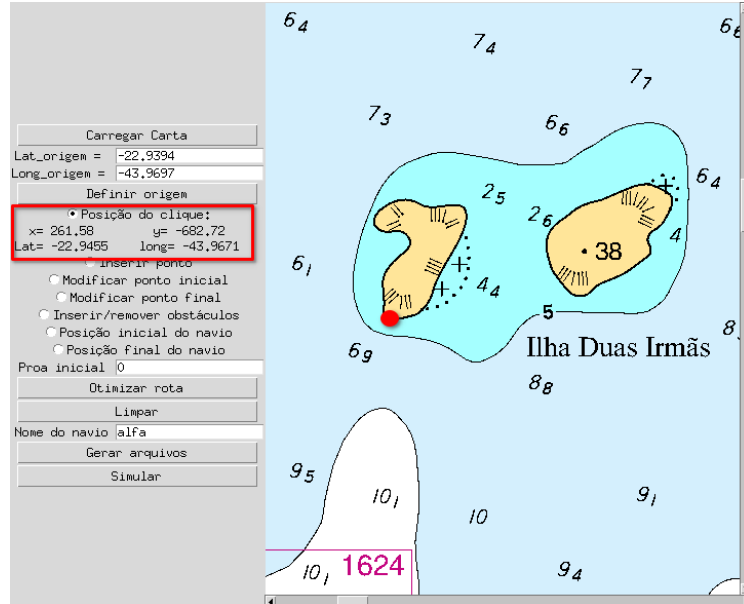
8.3 Verificar posição do clique

Se esta opção estiver selecionada no painel lateral, qualquer posição que o usuário clicar na carta náutica terá suas coordenadas exibidas no painel lateral tanto em latitude e longitude como em metros. Este caso de uso também pode ser utilizado antes de ser definida a origem para verificar a latitude e a longitude de qualquer ponto da carta.

Na figura abaixo é possível visualizar a posição da extremidade sul da ilha esquerda das Ilhas Duas Irmãs, destacada na imagem por um círculo vermelho. A origem do sistema

cartesiano encontra-se no canto superior esquerdo da parte exibida da imagem da carta náutica.

Figura 32: Posição da extremidade sul da ilha



Fonte: autoria própria.

8.4 Modificar *waypoint* inicial/final

Se esta opção estiver selecionada no painel lateral, a posição do *waypoint* inicial ou final da rota que o navio deve percorrer será inserida ou alterada para qualquer posição da carta náutica que o usuário clicar. O *waypoint* inicial é representado por um ponto verde e o final por um ponto vermelho.

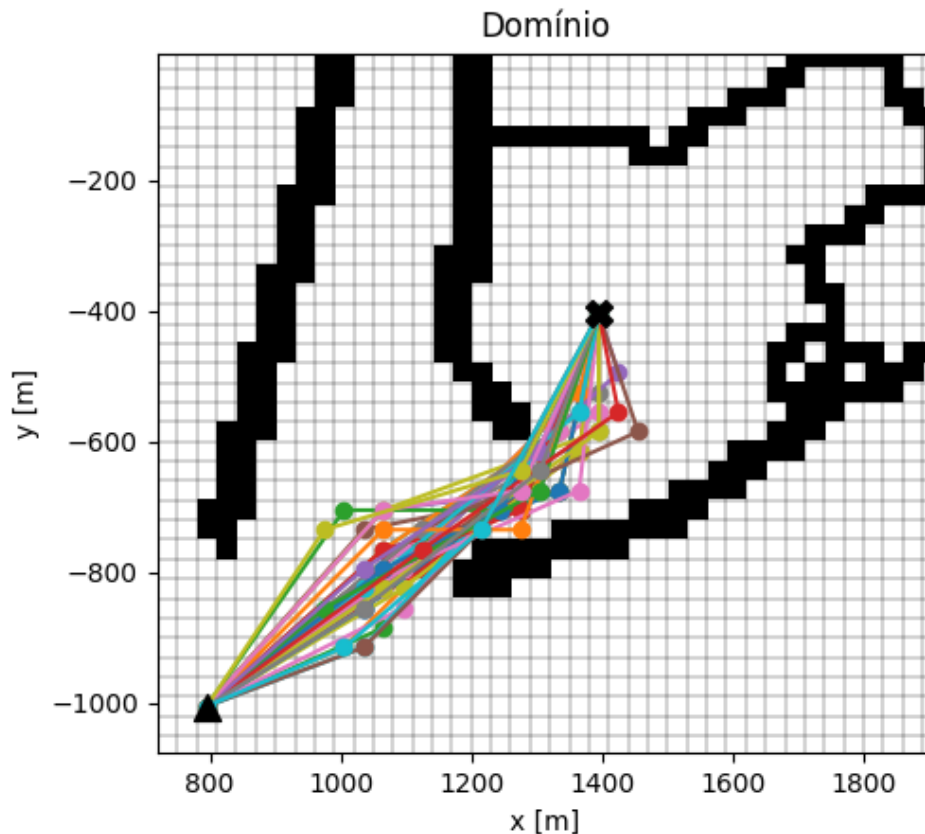
8.5 Inserir/remover obstáculos *waypoint* inicial/final

Se esta opção estiver selecionada no painel lateral, em qualquer posição da carta náutica que o usuário clicar será inserido um quadrado preto de 30 metros de lado indicando uma área que o navio não pode passar, seja por conta da presença de terra, por causa da profundidade ou por qualquer outro motivo que o usuário julgar necessário. Se no local já houver um obstáculo, o mesmo será removido.

mutação de $\frac{1}{n_{pop}\sqrt{L_c}} \times 100\%$, onde n_{pop} é o tamanho da população a cada iteração e L_c é o comprimento de cada cromossomo em bits [44].

A população inicial é gerada de forma que nenhum indivíduo achesse obstáculos. Esta restrição é verificada a cada gene que é gerado de forma aleatória e caso não seja satisfeita, o gene é descartado e gerado novamente.

Figura 34: População inicial

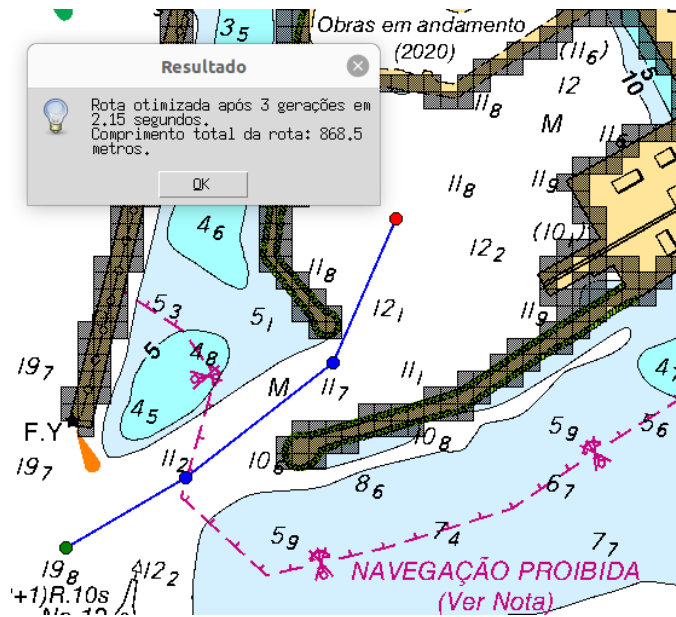


Fonte: autoria própria.

Cada gene representa a posição de um *waypoint* codificada em 13 *bits* e o caminho completo é representado por um cromossomo cujo comprimento varia de acordo com a quantidade de *waypoints* intermediários.

Ao ser finalizada a otimização, o caminho ótimo é plotado na carta náutica e é exibida uma caixa de texto com o comprimento total da rota, o número de gerações que foi necessário para atingir este valor e o tempo de execução total do Algoritmo Genético. Os *waypoints* intermediários são representados por pontos azuis.

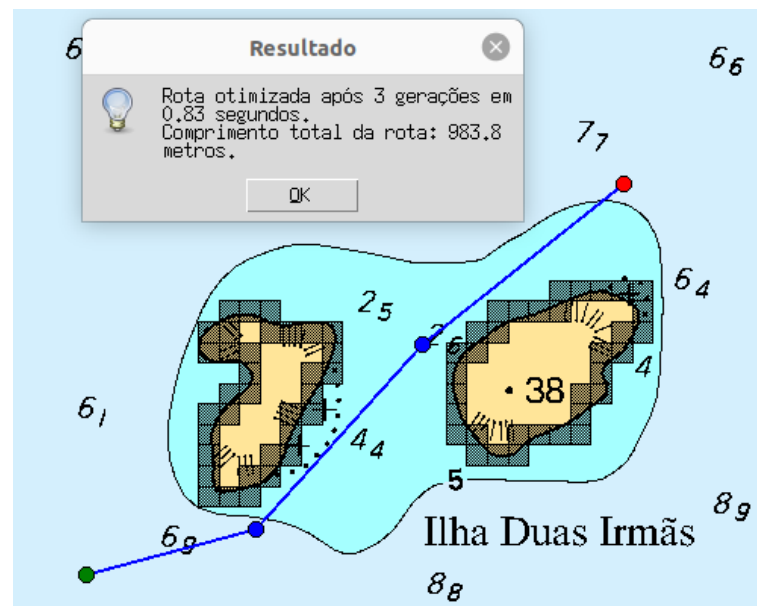
Figura 35: Resultado da otimização da rota para entrada no Complexo Naval de Itaguaí



Fonte: autoria própria.

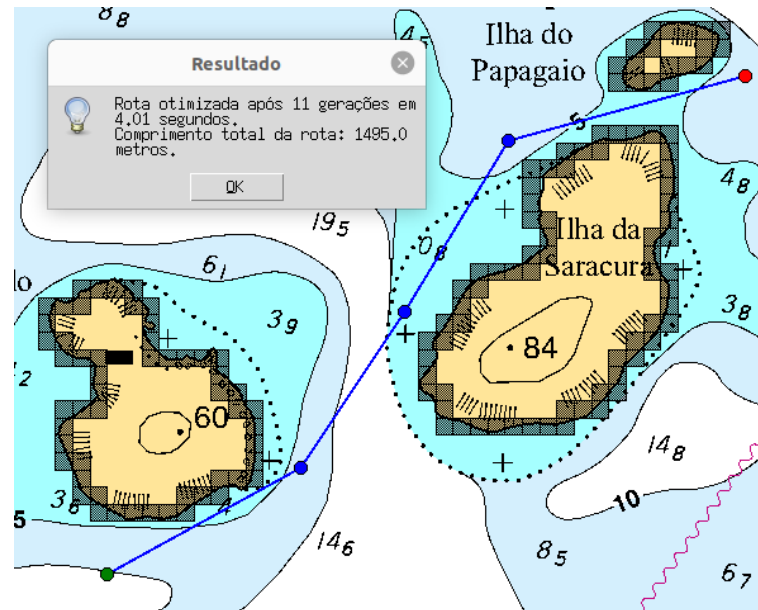
Abaixo são exibidos mais alguns resultados do otimizador.

Figura 36: Resultado da otimização da rota para passagem entre as Ilhas Irmãs



Fonte: autoria própria.

Figura 37: Resultado da otimização da rota para passagem entre três ilhas



Fonte: autoria própria.

8.7 Inserir *waypoint* manual

Se esta opção estiver selecionada no painel lateral, em qualquer posição da carta náutica que o usuário clicar será inserido um novo *waypoint*. Eles serão considerados na mesma ordem em que foram inseridos para definir a rota. Se no local já houver um *waypoint*, o mesmo será removido. Caso após inserir uma rota manualmente seja executada a função de otimizar a rota, serão considerados apenas o primeiro e o último *waypoints*, sendo os intermediários descartados.

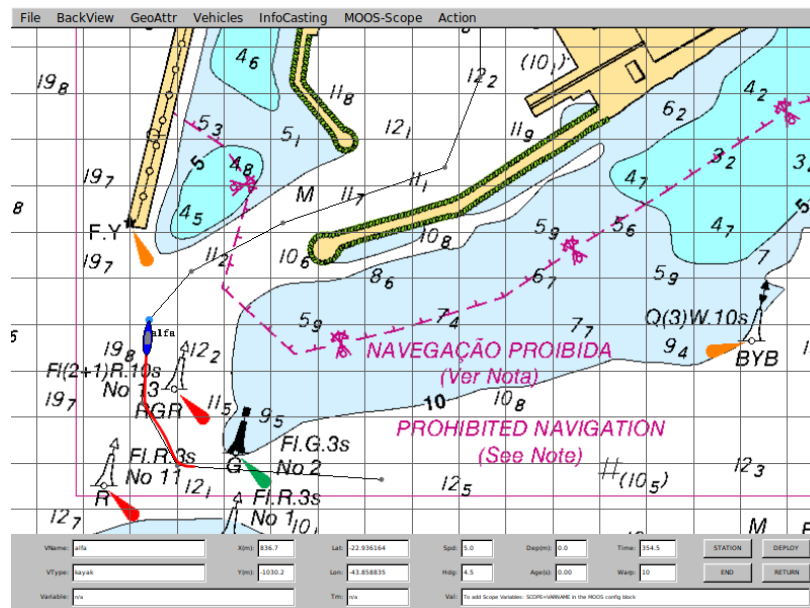
8.8 Posição inicial/final do navio

Se uma destas opções estiverem selecionadas no painel lateral, em qualquer posição da carta náutica que o usuário clicar será inserida a posição inicial do navio no início da missão (antes dele iniciar o movimento para ir para o ponto inicial da rota) ou a posição final do navio (aquela que ele se dirige e para após passar pelo ponto final da rota). A posição inicial é representada por um ponto amarelo e a final por um ponto laranja.

8.12 Simular

Após serem gerados os arquivos .bhv e .moos, ao clicar neste botão será aberta uma nova janela com o *pMarineViewer* e será realizada uma simulação da missão que foi planejada. Como dito anteriormente, este caso de uso funciona apenas em ambiente operacional *Linux*.

Figura 39: Simulação sendo executada



Fonte: autoria própria.

8.13 Limpar

Exclui todos os obstáculos e *waypoints*, além da posição inicial e final do navio.

9 SIMULAÇÕES

Para a validação do controlador, foram realizadas simulações utilizando o módulo *iPydyna* para simular a dinâmica do navio e o módulo *pMarineViewer* para a visualização da simulação.

Também foram realizadas simulações utilizando o módulo *iSMH*. Nestas simulações, tanto os cálculos da dinâmica do navio quanto a visualização da simulação foram realizados pelo próprio simulador do TPN.

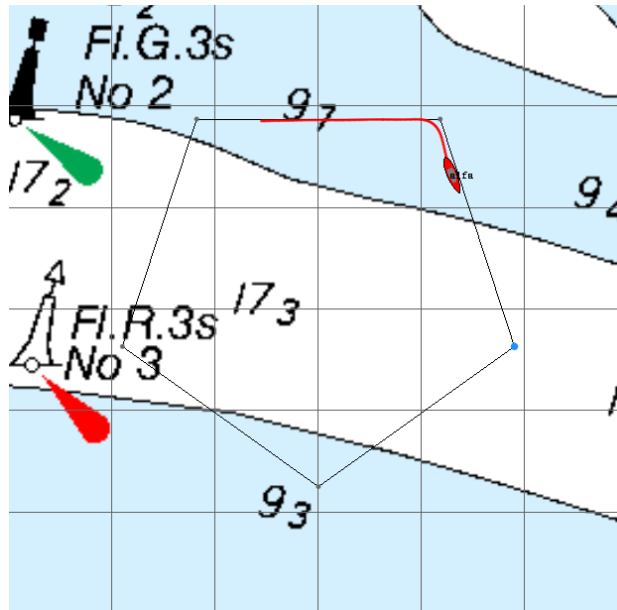
Devido a algum problema na modelagem do navio ou na implementação do Filtro de Kalman Estendido, este não foi capaz de estimar os estados. Por isso, nas simulações abaixo, foi utilizado como sistema de navegação um módulo implementado em C++ que fazia apenas a média aritmética simples das leituras dos sensores.

9.1 Validação do PID de rumo e velocidade

9.1.1 Missão com trajeto com linhas paralelas

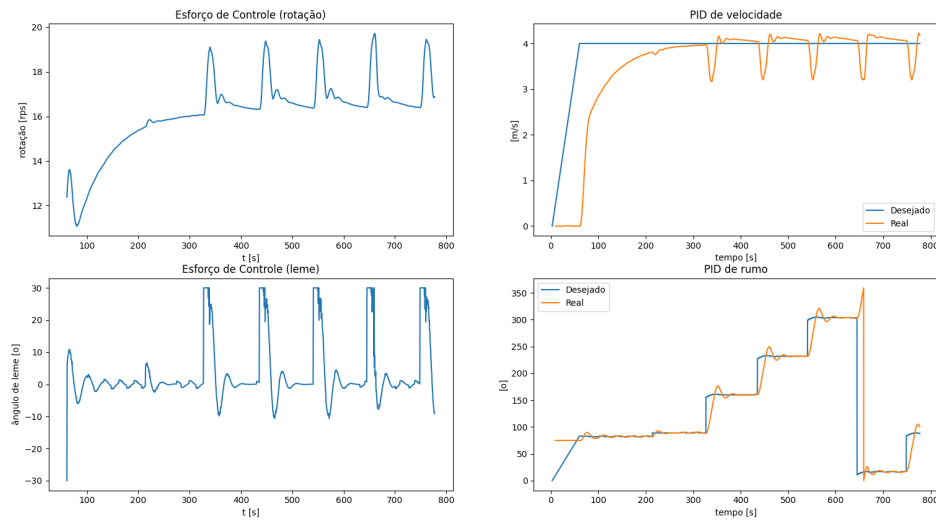
Primeiramente, o controlador foi testado em um trajeto com rumos paralelos, como se estivesse fazendo uma sondagem ou uma varredura no canal.

Figura 42: Simulação com trajeto poligonal



Fonte: autoria própria.

Figura 43: Resultados da simulação com trajeto poligonal



Fonte: autoria própria.

9.1.3 Discussões

Em ambas simulações o controlador conseguiu levar o navio para o rumo e velocidades desejados, sem muito sobressinal e com um tempo de resposta razoável. A rotação dos propulsores não saturou em nenhum momento e o leme saturou apenas nas guinadas mais bruscas, o que é aceitável.

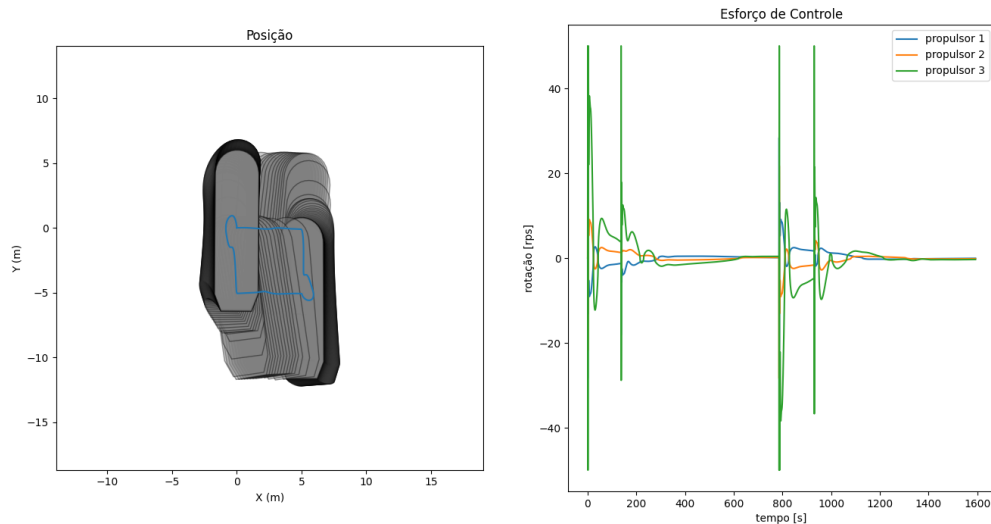
O controlador de velocidade não conseguiu manter a velocidade durante as guinadas, o que era esperado uma vez que os movimentos são acoplados, porém rapidamente retornou a velocidade para a referência aplicada.

O ângulo do leme deu uma leve oscilada quando a velocidade do navio foi para 2 m/s na primeira simulação. Isto ocorre pois o navio é um sistema altamente não-linear, como foi mostrado na seção 6.1, e o controlador PID foi calibrado considerando uma velocidade constante de 4 m/s . Apesar dessa oscilação no esforço de controle, o controlador foi capaz de manter o rumo desejado. Uma melhoria que poderia ser feita para resolver esse problema seria implementar uma técnica de ganhos escalonados, na qual os ganhos do controlador PID muda dependendo da faixa na qual o ponto de operação se encontra.

9.2 Validação do módulo de Posicionamento Dinâmico

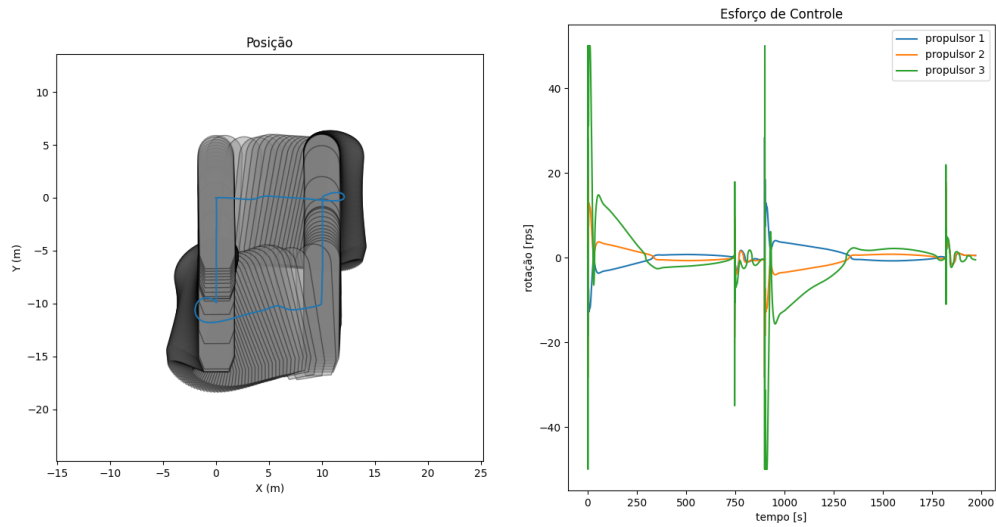
Para a validação do módulo de Posicionamento Dinâmico foram feitas duas simulações na qual o navio devia seguir um trajeto de forma quadrada. Foram feitos testes com trajetos quadrados de 5 e de 10 metros de lado.

Figura 44: Resultados da simulação com o quadrado de 5 metros



Fonte: autoria própria.

Figura 45: Resultados da simulação com o quadrado de 10 metros



Fonte: autoria própria.

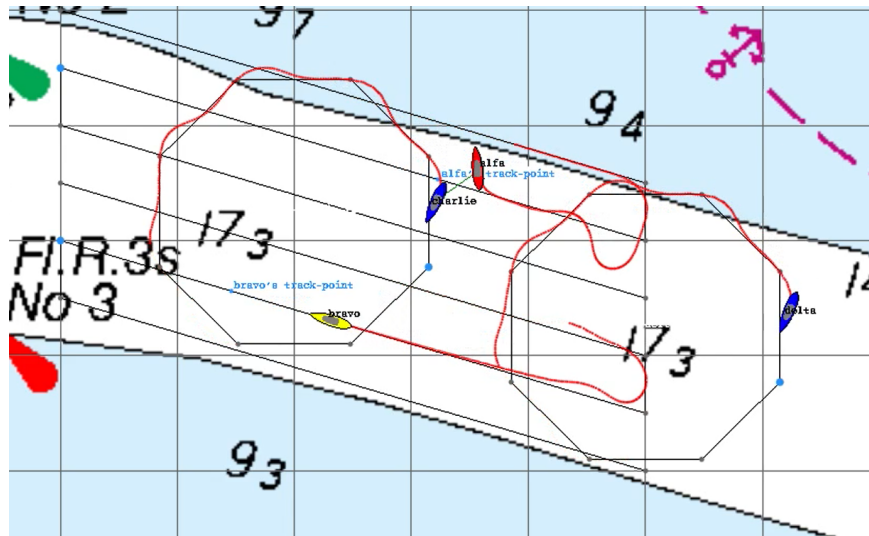
9.2.1 Discussões

O navio conseguiu fazer uma trajetória reta, porém houve um certo sobressinal no momento de trocar o lado do quadrado. Um provável motivo para esse excesso de sobressinal é que o navio tem apenas um propulsor lateral e sua potência é bem mais baixa que as dos propulsores de popa.

9.3 Validação do comportamento de prevenção de colisões

Para a validação do comportamento de prevenção de colisão foi realizada uma simulação com dois navios percorrendo linhas paralelas, parecida com a da seção 9.1.1. Além dos dois navios autônomos percorrendo as linhas paralelas, foram introduzidos mais dois navios passando no meio do trajeto dos navios autônomos. A simulação completa é exibida no video abaixo.

Figura 46: Simulação testando o algoritmo de prevenção de colisão



[Clique aqui para acessar o vídeo da simulação.](#)

Fonte: autoria própria.

9.3.1 Discussões

Os navios autônomos conseguiram evitar as colisões, saindo de seu trajeto e depois retornando para ele em segurança.

9.4 Simulações no Tanque de Provas Numérico

No Simulador Marítimo Hidroviário foram realizadas duas simulações para validar a interface entre o controlador e o simulador.

Na primeira, foi simulado o navio navegando em um trajeto demandando o porto do Complexo Naval de Itaguaí. Esta simulação pode ser vista no vídeo abaixo.

Figura 47: Simulação no TPN com o navio demandando o porto do Complexo Naval de Itaguaí



[Clique aqui para acessar o vídeo da simulação.](#)

Fonte: autoria própria.

Na segunda simulação o navio autônomo estava percorrendo um trajeto de linhas paralelas e foi introduzido um rebocador que tentou colidir com o navio autônomo.

Figura 48: Simulação no TPN testando o algoritmo de prevenção de colisão



[Clique aqui para acessar o vídeo da simulação.](#)

Fonte: autoria própria.

9.4.1 Discussões

A interface com o simulador utilizando o *iSMH* funcionou perfeitamente e o navio autônomo se comportou da mesma forma que teria se comportado com a simulação rodando de forma local utilizando o *iPydyna*.

Na primeira simulação, navio autônomo conseguiu se manter no trajeto desejado e na velocidade desejada de 8 nós.

Na segunda, o rebocador não consegue colidir com o navio autônomo, pois este sai de sua trajetória e evita a colisão. Quando considerou seguro, o navio autônomo retornou para o seu trajeto e seguiu com sua missão.

10 CONCLUSÃO

A mina marítima é uma arma capaz de negar o uso do mar tanto por navios mercantes quanto por militares, afetando seriamente a segurança da navegação e consequentemente a economia de um país. A atividade responsável pela detecção e neutralização de minas marítimas é chamada de Contramedidas de Minagem. Por ser uma atividade de risco inerente a vida humana, é preferível que seja realizada por navios autônomos.

Neste trabalho foi desenvolvido um controlador capaz de realizar o governo, navegação e controle de um navio autônomo, sendo capaz inclusive de realizar o posicionamento dinâmico do navio. Foi desenvolvido também uma interface gráfica para ajudar no planejamento das missões, a qual conta com um algoritmo genético para gerar o trajeto de forma otimizada. Também foi implementada uma interface com o simulador do TPN para realizar simulações de forma a validar o controlador.

Na literatura é possível encontrar vários artigos sobre o controle de navios autônomos. Existem muitos exemplos de algoritmos utilizados para o governo, a navegação e o controle dos mesmos. No sistema de governo, para o planejamento local o algoritmo *line-of-sight* vem sendo amplamente utilizado com sucesso. Já para o planejamento global, o Algoritmo Genético tem se mostrado uma técnica eficiente. No sistema de navegação, o Filtro Estendido de Kalman é útil para filtrar o efeito das ondas nos sensores e ainda realizar a fusão sensorial. No caso do sistema de controle, o controlador PID ainda é o mais utilizado.

O *framework* utilizado para implementar o controlador foi o MOOS-IvP e sua estrutura modular facilitou a implementação de cada funcionalidade, mantendo elas independentes entre si. Alguns módulos foram implementados em linguagem *Python* e outros em C++. Para o sistema de governo foi utilizado um módulo nativo do MOOS-IvP. No sistema de navegação, foi implementado um módulo para simular cada sensor e também um módulo para realizar a fusão sensorial usando um Filtro de Kalman Estendido. Para o sistema de controle foi implementado um módulo para o controle PID e um módulo para funcionar de interface com o programa de Posicionamento Dinâmico do TPN-USP. Além disso,

também foi implementado um módulo para simulações locais utilizando o *Pydyna* e para simulações utilizando o simulador do TPN-USP. Por ultimo, foi implementado também um módulo de controle remoto, permitindo que um operador possa intervir na operação do navio autônomo, se necessários.

A interface gráfica se mostrou muito útil no planejamento de missões permitindo carregar a carta náutica da localidade onde o navio vai operar e configurar os *waypoints* tanto de maneira otimizada com o algoritmo genético, quanto de forma manual. É possível, inclusive, configurar mais de um navio autônomo, permitindo o planejamento de uma operação conjunta.

Nas simulações, apesar de o Filtro de Kalman Estendido ter falhado, fazendo necessário o uso de um sistema de navegação mais simples que fazia apenas a média aritmética simples das leituras dos sensores, o controlador conseguiu manter o navio no rumo e velocidade desejados, com um tempo de resposta aceitável, pouco sobressinal e sem saturar o esforço de controle por muito tempo. O posicionamento dinâmico foi capaz de fazer o navio seguir um trajeto na forma de quadrado, porém apresentou um certo sobressinal. Este sobressinal pode ter sido causado porque o navio possui apenas um propulsor capaz de gerar força lateral e a versão do *InHouse DP* utilizada calculava os esforços de controle apenas para os propulsores, sem considerar os lemes. O algoritmo de prevenção de colisões conseguiu evitar que o navio autônomo colidisse, saindo de sua trajetória para evitar a colisão e retornando para ele quando considerou seguro.

10.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Implementação de um Algoritmo Genético com tamanho do cromossomo variável e não fixo, para melhorar o desempenho do mesmo quando há muitos obstáculos.
- Utilização de um controle PID com ganhos escalonados ou uma técnica de controle não-linear para se contrapor as não-linearidades inerentes da dinâmica de um navio.
- Correção e sintonia do Filtro de Kalman Estendido, possivelmente com a utilização de um modelo mais rebuscado, principalmente na modelagem do leme que foi a possível causa da falha no EKF implementado.
- Melhoria do módulo de Posicionamento Dinâmico, utilizando uma versão mais nova do *InHouse DP*, que também leva em consideração os lemes na hora de calcular os esforços de controle.

REFERÊNCIAS

- [1] MACIEL, D. L. A. *A Marinha do Brasil no Atual Cenário de Guerra de Minas*. Dissertação (Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas) — Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, 2020.
- [2] Naval Mines and Countermeasures. Disponível em: <https://www.bluebird-electric.net/submarines/naval_mines_mine_countermeasures_hunting_sweeping_destroyer_neutralization_counter_measures.htm>. Acesso em: 12/05/2021.
- [3] CHAVES, R. O. *Atualidade e Perspectivas das Operações de Contramedidas de Minagem na Marinha do Brasil*. Tese (Curso de Política e Estratégia Marítimas) — Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2018.
- [4] CAPRARIO, A. M. *Navios Autônomos: As perspectivas de uma nova era nos mares*. Dissertação (Curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Náutica) — Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2018.
- [5] PEETERS, G. et al. An unmanned inland cargo vessel: Design, build, and experiments. *Elsevier*, p. 17, 2020.
- [6] TANAKITKORN, K. A review of unmanned surface vehicle development. *Maritime Technology and Research*, v. 1, n. 1, p. 2–8, jan. 2019. ISSN 2651-205X. Number: 1. Disponível em: <<https://so04.tci-thaijo.org/index.php/MTR/article/view/140730>>.
- [7] BRASIL. Ministério da Defesa. *Estratégia Nacional de Defesa*. 2016.
- [8] BRASIL. Ministério da Infraestrutura. *Portos do Brasil movimentam 98,6% das exportações em 2015*. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/portos-do-brasil-movimentam-986-das-exportacoes-em-2015>>. Acesso em: 09/05/2021.
- [9] LEITE, L. *O Transporte Marítimo no Comercio Exterior Brasileiro*. 2018. Disponível em: <<http://ericolinsleite.blogspot.com/2018/02/o-transporte-maritimo-no-comercio.html>>. Acesso em: 09/05/2021.
- [10] WAUD, A. R. A. R. still image, *Infernal machines discovered in the Potomac [near Aquia] Creek by the flotilla ...* Archive Location: United States. Disponível em: <<https://www.loc.gov/pictures/resource/cph.3g12570>>. Acesso em: 09/05/2021.
- [11] Imperial War Museums. *Sea Mine Mk XVII*. Disponível em: <<https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30021858>>. Acesso em: 09/05/2021.
- [12] MIDTGAARD, ; NAKJEM, M. Unmanned systems for stand-off underwater minehunting. In: . Kjeller, Norway: [s.n.], 2016.

- [13] LIU, Z. et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, v. 41, p. 71–93, jan. 2016. ISSN 1367-5788. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578816300219>>.
- [14] LV, C. et al. Speed and Heading Control of an Unmanned Surface Vehicle Based on State Error PCH Principle. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2018, p. e7371829, jan. 2018. ISSN 1024-123X. Publisher: Hindawi. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/7371829/>>.
- [15] LAZAROWSKA, A. Research on algorithms for autonomous navigation of ships. *WMU Journal of Maritime Affairs*, v. 18, n. 2, p. 341–358, jun. 2019. ISSN 1654-1642. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13437-019-00172-0>>.
- [16] NOEL, A. et al. Autonomous Ship Navigation Methods: A Review. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- [17] FOSSEN, T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 1ª edição. ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011. ISBN 978-1-119-99149-6.
- [18] ALFHEIM, H. L. et al. Development of a Dynamic Positioning System for the ReVolt Model Ship. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 29, p. 116–121, jan. 2018. ISSN 2405-8963. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318321682>>.
- [19] WANG, Y. et al. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Dynamic Positioning of FPSO Vessels. In: *OCEANS 2019 - Marseille*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.
- [20] ZHANG, D. et al. Dynamic modeling and adaptive controlling in GPS-intelligent buoy (GIB) systems based on neural-fuzzy networks. *Ad Hoc Networks*, v. 103, p. 102149, jun. 2020. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870520300421>>.
- [21] BENJAMIN, M. et al. Autonomy for unmanned marine vehicles with MOOS-IvP. *Marine Robot Autonomy*, p. 47–90, nov. 2013.
- [22] KIM, T. et al. A study on the effectiveness of MOOS-IvP for Unmanned Surface Vehicle. In: *2017 IEEE Underwater Technology (UT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–3.
- [23] BENJAMIN, M. R.; SCHMIDT, H.; NEWMAN, P. An Overview of MOOS-IvP and a Users Guide to the IvP Helm - Release 19.8. p. 707, 2019.
- [24] DONG, L.; XU, H. Design of heading control system for USV based on MOOS-IvP. In: *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 68–71.
- [25] MEHRZADI, M. et al. Review of Dynamic Positioning Control in Maritime Microgrid Systems. jun. 2020.
- [26] ZHANG, W.; XU, Y.; XIE, J. Path Planning of USV Based on Improved Hybrid Genetic Algorithm. In: *2019 European Navigation Conference (ENC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.

- [27] ARORA, J. *Introduction to Optimum Design*. 3^a edição. ed. Waltham, MA: Academic Press, 2011. ISBN 978-0-12-381376-3.
- [28] OH, S.-R.; SUN, J. Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control. *Ocean Engineering*, v. 37, n. 2, p. 289–295, fev. 2010. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801809002431>>.
- [29] NEWMAN, P. MOOS -Mission Orientated Operating Suite. *Mass. Inst. Technol. Tech. Rep.*, v. 2299, jan. 2006.
- [30] LIU, T. et al. Path following control of the underactuated USV based on the improved line-of-sight guidance algorithm. *Polish Maritime Research*, nr 1, 2017. ISSN 1233-2585. Disponível em: <<http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-274b093d-d3ed-45b0-9313-07452d7b79b5>>.
- [31] SASAKI, H. A. U. et al. Digital Twin of a Maneuvering Ship: Real-Time Estimation of Derivatives and Resistance Coefficient Based on Motion Sensor. In: . American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2021. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings/OMAE2021/85161/V006T06A021/>>.
- [32] TANNURI, E. et al. Modular mathematical model for a low-speed maneuvering simulator. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, v. 1, 06 2014.
- [33] HASELTALAB, A.; NEGENBORN, R. R. Adaptive control for autonomous ships with uncertain model and unknown propeller dynamics. *Control Engineering Practice*, v. 91, p. 104116, out. 2019. ISSN 0967-0661. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066118306221>>.
- [34] AsteRx-U. Disponível em: <<https://www.septentrio.com/en/products/gnss-receivers/rover-base-receivers/integrated-gnss-receivers/asterx-u>>. Acesso em: 03/12/2021.
- [35] GYRO Compass MGC R1. Disponível em: <<https://www.kongsberg.com/maritime/products/b-systems-and-control-centres/navigation-system/gyro-compass-systems/gyro-compass-mgc-r1/>>. Acesso em: 03/12/2021.
- [36] SeaPILOT - DVL Underwater Navigation. Disponível em: <<http://www.rowetechinc.com/seapilot/>>. Acesso em: 03/12/2021.
- [37] EKINOX Series - Advanced Inertial Navigation Sensors. Disponível em: <<https://www.sbg-systems.com/products/ekinox-series/>>. Acesso em: 03/12/2021.
- [38] BROOKS, R. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, v. 2, n. 1, p. 14–23, mar. 1986. ISSN 2374-8710. Conference Name: IEEE Journal on Robotics and Automation.
- [39] BENJAMIN, M. R. The Interval Programming Model for Multi-objective Decision Making. set. 2004. Accepted: 2005-12-19T23:28:02Z. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/30416>>.

- [40] ISERMANN, R.; MÜNCHHOF, M. *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. ISBN 978-3-540-78878-2. Disponível em: <<https://www.springer.com/gp/book/9783540788782>>.
- [41] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5^a edição. ed. São Paulo (SP): Pearson Universidades, 2010. ISBN 978-85-7605-810-6.
- [42] QUANTUM 2 - CHIRP Radar with Doppler Collision Avoidance | Marine Electronics by Raymarine. Disponível em: <<https://www.raymarine.com/marine-radar/radomes/quantum2/>>. Acesso em: 03/12/2021.
- [43] NEPTEC Technologies | LiDAR for Robotics and Autonomous Systems. Disponível em: <<https://www.neptectechnologies.com/>>. Acesso em: 03/12/2021.
- [44] TU, J.; YANG, S. X. Genetic algorithm based path planning for a mobile robot. *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, 2003.

APÊNDICE A – REQUISITOS

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENGENHARIA NAVAL**

TRABALHO DE FORMATURA EM ENGENHARIA NAVAL

**REQUISITOS DE ALTO NÍVEL DE SISTEMAS (RANS) ACADÊMICOS E
SIMPLIFICADOS PARA UM NAVIO DE CONTRAMEDIDAS DE MINAGEM
AUTÔNOMO**

1. EMPREGO

- a. O Navio de Contramedidas de Minagem Autônomo deverá ser capaz de desempenhar o emprego híbrido de caça-minas e de varredura, assim como deverá ser adaptável a desempenhar atividades de minagem, levantamento hidrográfico e de auxílio à patrulha antissubmarino. Seu modo de operação deverá ser autônomo, podendo ser também controlado remotamente por meio de estação em terra ou em navios de superfície, e deverá ser previsto modos eficientes para seu emprego em flotilhas de navios similares.

2. TAREFAS PRIMÁRIAS

- a. Contramedidas de minagem por meio de ações de caça-minas e de varredura.

3. TAREFAS SECUNDÁRIAS

- a. Minagem.
- b. Levantamento hidrográfico
- c. Patrulha antissubmarino.

4. ÁREA DE OPERAÇÕES E RAIOS DE AÇÃO

- a. **Área de Operação** – Pontos focais de navegação em águas interiores e em mar aberto na América Latina, África Ocidental e Península Antártica.
- b. **Raio de Ação** – Um raio de ação significativo para o porte da embarcação pode ser necessário, pois o navio pode ser obrigado a operar sem suporte por longos períodos em áreas distantes do navio-mãe ou de estação em terra.

5. DURAÇÃO DAS MISSÕES E AUTONOMIA

- a. A duração das missões e a autonomia não estão claras, devendo ser otimizadas para o emprego na tarefa primária, de acordo com as recomendações sugeridas pela análise operacional. É admissível que a autonomia seja inferior à duração das missões, entretanto, uma vez iniciada a missão, não deverá haver interrupção

completa da operação em virtude da ação/busca de suporte externo para renovação/extensão da autonomia, sendo admissível o revezamento entre meios similares.

6. TRIPULAÇÃO E ACOMODAÇÕES

- a. **Tripulação** – A embarcação deverá ser não-tripulada.
- b. **Acomodações** – Deve-se considerar a permanência prolongada de técnicos a bordo, para fins de comissionamento e manutenção. Para tanto, deverá ser previsto o embarque ou a existência de um módulo habitacional para permanência de três pessoas por todo o período de autonomia da embarcação.
- c. **Suporte à tripulação** – Módulo habitacional excepcionalmente austero será aceito.

7. VIDA ESPERADA E INCORPORAÇÃO

- a. **Vida do Navio** – 15 a 20 anos de vida sem atualização tecnológica. A vida total deve ser escolhida pelo projetista para maximizar o investimento.
- b. **Incorporação** – A entrada do navio em serviço será em 2035.
- c. **Desincorporação e Fim de Vida** – O projeto deve incluir um plano de reciclagem compatível com a legislação atual e suas tendências futuras.

8. DISPONIBILIDADE E APOIO LOGÍSTICO INTEGRADO

- a. O emprego do navio está previsto de ocorrer em conjunto com meios destinados a até três operações de longa duração por ano. Apesar de não ser esperado um emprego contínuo por longos períodos, o projeto deverá apresentar um alto nível de Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade, compatível com as operações do seu navio-mãe.

9. POLÍTICA DE SUPORTE E REABASTECIMENTO

- a. **Reabastecimento no mar** – O navio deve ser capaz de receber energia/combustível a contrabordo de outras embarcações ou no cais. Entretanto, são incentivados projetos com possibilidade de reabastecimento durante a operação, por meio de embarcações auxiliares ou de estações de reabastecimento móveis, a fim de aumentar a autonomia do meio.
- b. **Suporte ao navio** – A embarcação será suportada por um navio-mãe ou estação fixa ou móvel em terra.

10. RESTRIÇÕES / ESTUDOS ESPECIAIS

- a. **Análise Operacional** – As características da embarcação não especificadas neste documento ou necessitando de detalhamento deverão ser definidas com base em uma análise operacional das hipóteses de emprego, com o objetivo de otimizar os custos e os benefícios dos requisitos avaliados individualmente e/ou de forma integrada. A tarefa de contra-minagem deverá prevalecer sobre as demais, quando houver requisitos conflitantes.

Para as hipóteses de emprego, o binômio velocidade de varredura versus área de cobertura deverá ser estudado, assim como deve ser prevista a possibilidade de emprego conjunto de uma flotilha de embarcações similares para a diminuição da duração das missões. Deve-se ter como referência a caça a minas no canal de Sepetiba, Rio de Janeiro, em alto grau de limpeza, considerando a cobertura completa do leito do canal pelo cone do sonar selecionado para a tarefa de caça-minas. Ressalta-se que neste caso, o emprego de uma flotilha em formatura é impossibilitado, em virtude da possível interferência mútua entre sensores, entretanto, não se exclui a possibilidade de caça a minas ocorrer de forma simultânea em áreas distintas do canal, por embarcações distintas e/ou em revezamento. Paralelamente, deverá ser avaliada a operação de varredura individual ou em flotilha, com emprego de “martelos” ou dispositivos acústico/magnético, em uma configuração que resulte em menor tempo de varredura completa do canal.

Outras hipóteses de emprego deverão complementar/validar a análise operacional, considerando estuários distintos como a foz do Rio Amazona, a foz do Rio da Prata etc. Deverão, ainda, ser consideradas as características do navio-mãe no estabelecimento das missões hipotéticas.

- b. **Custo** – Não há limite de custo para este navio, dada a flexibilidade e novidade de seu papel, no entanto, deve haver um foco em minimizar os custos unitários e de vida útil. Para fins de planejamento, os custos deverão ser apresentados em moeda corrente de janeiro de 2022.
- c. **Velocidade e Perfil de Operação** – Compatíveis com as tarefas primárias e secundárias, a ser determinada pela análise operacional.
- d. **Deslocamento** – Compatível com as tarefas primárias e secundárias, a ser determinada pela análise operacional.
- e. **Formas do Casco** – Não há requisitos quanto à escolha do formato do casco, contudo, deve possibilitar a navegação em regiões de baixo calado. O arranjo e os materiais empregados deverão ser eficientes, possuírem baixas assinaturas e alta capacidade de sobrevivência.
- f. **Comportamento no mar** – Fortemente associado à eficácia dos sensores e dispositivos empregados nas tarefas do navio. Deverão ser priorizadas as regiões de

estuários para o projeto, entretanto, a operação em regiões focais em mar aberto em estado de mar até 3 na escala Douglas deve ser considerada.

g. **Sobrevivência**

- i. **Assinaturas** – Deverão ser ressaltadas as características do projeto destinadas ao cumprimento das tarefas primárias e secundárias.
 - ii. **Redução de Vulnerabilidade e Recuperabilidade** – A estrutura do casco e a seleção de equipamentos, suas disposições a bordo e suas fundações deverão ser destinadas a resistir a explosões de minas, seja de forma intencional ou não. Para tanto, a estrutura deverá ser projetada atendendo aos preceitos das normas BV-0230 e BV-0430, quanto à resistência à explosão submarina.
- h. **Propulsão e Sistemas Elétricos** – Um sistema de propulsão “ecológico” é necessário devido ao emprego e área de operação pretendidos. Os vários modos diferentes de operação, incluindo patrulha silenciosa, reboque de dispositivos e perfis de operação para diferentes empregos, devem ser descritos junto com os modos de propulsão revisados. Poderá ser considerado o emprego de dispositivos de recuperação de energia na planta propulsiva e/ou no casco, assim como dispositivos para assistência à propulsão, que utilize o vento, por exemplo, e justifique a escolha. O sistema de energia deve ser projetado para receber modernizações com sensores de potência elevada.
- i. **Auxiliares** – O navio deve estar em conformidade com o necessário para uma embarcação autônoma.
- j. **Combustíveis e Emissões de poluentes** – Será aceita a utilização de combustíveis de alto poder calorífico, que se justifiquem com o aumento de autonomia/raio de ação da embarcação. Contudo deve-se priorizar a utilização de combustíveis disponíveis no navio-mãe. Deve-se considerar futuras escolhas de combustível naval para esquadras próprias e aliadas, assumindo que o preço dos combustíveis que contêm carbono aumentará de forma proibitiva até o final da vida útil do navio e que as regulamentações de emissões de poluentes se tornarão extremamente rígidas, devendo-se minimizar o risco de sucateamento do navio antes do final da vida prevista. Há o interesse por combustíveis que ofereçam reduções potenciais nas emissões, mas prevalece as preocupações com questões de segurança e resistência a explosões submarinas.
- k. **Lançamento e recolhimento** – O navio será capaz de lançar e recolher sonar rebocado ou ROV, para emprego em caça-minas e, de forma não simultânea, “martelo” ou dispositivos para despistamento acústico/magnético, para emprego em varredura. O navio deverá ser capaz de embarcar módulos para realização da

operação de minagem. Deverá, ainda, ser capaz de rebocar dispositivos para realização das tarefas secundárias de levantamento hidrográfico e patrulha antissubmarino sem a necessidade de incremento de características do projeto destinadas ao cumprimento da tarefa primária.

- l. **Veículos Não-Tripulados (UXV)** – Além das embarcações serem autônomas, deverá ser considerada a possibilidade de lançamento de veículos autônomos menores, sejam aéreos (drones) ou submarinos, para auxílio às tarefas primárias e secundárias e ainda para o reconhecimento e patrulha.
- m. **Armamento** – É desejável que o navio seja capaz de neutralizar minas de qualquer tipo, seja de influência ou de contato, sendo, para tanto, provido de armamento ou dispositivos adequados. Deve-se considerar o uso de alça optrônica para confirmação de alvos de superfície.
- n. **Guerra Nuclear, Biológica, Química e Radiológica (NBQR)** – A embarcação deve ser projetada para permitir o trânsito através de uma área contaminada por NBQR. Não há requisito para o navio operar sob ataque próximo.
- o. **Comando, Controle, Comunicações, Computação e Inteligência (C4I)** – O navio deve ser capaz de ser controlado pelo navio-mãe, ter capacidade de interagir com demais navios de uma flotilha de embarcações similares e de servir de ponte para controle de UXV lançados do navio.
- p. **Interoperabilidade** – é provável que a embarcação opere como parte de uma força-tarefa multinacional e, portanto, devem ser consideradas as características que irão maximizar sua interoperabilidade ao longo da vida.
- q. **Modularidade** – É incentivada a construção modular, a fim de prover flexibilidade de configuração e de transporte.
- r. **Inserção Tecnológica e Modernização de Meia-Vida** – Assumindo uma longa vida útil em serviço, presume-se que poderá haver uma modernização de meia vida para aumentar a capacidade de detecção ou ampliar o embarque de UXV lançados do meio.
- s. **Exportabilidade** – uma embarcação com tal flexibilidade de reconfiguração inerente deve ser atraente para uma variedade de clientes no exterior, desde que a consideração apropriada tenha sido dada ao potencial de exportação do projeto. O projeto deve ter um alto potencial de exportação, idealmente sem novos requisitos de infraestrutura.