

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
PROPULSÃO NAVAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO DE SUPERFÍCIE E
ANÁLISE DO CONTROLE DO LEME: UMA ABORDAGEM DA ENGENHARIA DE
SISTEMAS



RODRIGO DE ALCÂNTARA GRUNEWALD

Rio de Janeiro

2023

RODRIGO DE ALCÂNTARA GRUNEWALD

PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO DE SUPERFÍCIE E
ANÁLISE DO CONTROLE DO LEME: UMA ABORDAGEM DA ENGENHARIA DE
SISTEMAS

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Alexandrino como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado
em Propulsão Naval.

Orientadores:

Prof. Dr. Luiz Antônio Vaz Pinto
CT(EN) Victor Hugo Almeida Cruz

CIAA
Rio de Janeiro
2023

RODRIGO DE ALCÂNTARA GRUNEWALD

PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO DE SUPERFÍCIE E
ANÁLISE DO CONTROLE DO LEME: UMA ABORDAGEM DA ENGENHARIA DE
SISTEMAS

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Prof. Luiz Antônio Vaz Pinto, D.Sc – UFRJ

CC (RM1-EN) Carlos Alfredo Órfão Martins, M.Sc – CIAA

CT (EN) Victor Hugo Almeida Cruz

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico este trabalho à minha namorada Ruanne, que apesar das dificuldades deste ano, sempre esteve ao meu lado. Sem o seu incentivo diário, nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Ao final deste ano de maior abnegação da minha vida só tenho a agradecer a todos que de alguma maneira fizeram parte. Primeiramente, agradeço a Deus por todas as bênçãos, e por sempre iluminar meu caminho.

Aos meus pais, e meu irmão minha eterna gratidão pelo amor incondicional e incentivo ao longo de toda a minha vida.

À minha família, em especial ao meu tio Ângelo, e minha tia Mara Cristina, agradeço de coração pelo apoio constante.

Aos meus amigos que caminharam ao meu lado e aqueles que acreditaram em mim, meu sincero obrigado.

Aos meus orientadores CT (EN) Hugo e Professor Luiz Vaz, expresso minha gratidão pelo suporte, motivação e pelo tempo disponibilizado.

Por fim, ao CC (RM1-EN) Carlos Martins, minha admiração e agradecimento pela excelente condução do Curso de Aperfeiçoamento Avançado. Sua liderança é exemplar.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo”.

(Peter Drucker)

PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO DE SUPERFÍCIE E ANÁLISE DO CONTROLE DO LEME: UMA ABORDAGEM DA ENGENHARIA DE SISTEMAS

RESUMO

O presente trabalho propõe uma abordagem sistêmica para a concepção de um Veículo Autônomo de Superfície (VSNT ou USV) destinado à Contramedidas de Minagem (CMM), fundamentando-se nos princípios da Engenharia de Sistemas. O USV para uso em CMM foi descrito em alto nível através da linguagem SysML. Adicionalmente, estudou-se o sistema de controle do leme, que é um dos subsistemas mais importantes em embarcações do tipo autônoma onde é crucial a manutenção estável de um aproamento desejado. Nesse estudo, foi feita uma análise de sensibilidade de parâmetros do controlador PID de um modelo consagrado na literatura e aberto. Além disso, incluiu-se uma breve explicação sobre o sistema de controle de um VSNT experimental da Marinha do Brasil cujas informações foram obtidas junto ao Centro de Análise de Sistemas Navais.

Palavras-chave: Engenharia de Sistemas; Guerra de Minas; Leme; Sistema de controle; Veículos autônomos.

DESIGN PROJECT OF AN AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE AND ANALYSIS OF RUDDER CONTROL: A SYSTEMS ENGINEERING APPROACH

ABSTRACT

The present work proposes a systemic approach to the design of an Autonomous Surface Vehicle (ASV or USV) intended for Mine Countermeasures (MCM), based on the principles of Systems Engineering. The USV for use in MCM was described at a high level using the SysML language. Additionally, the rudder control system was studied, which is one of the most important subsystems in autonomous vessels where maintaining a stable desired heading is crucial. In this study, a sensitivity analysis of the parameters of the PID controller of a well-established model in the literature was conducted. Furthermore, a brief explanation of the control system of an experimental ASV of the Brazilian Navy was included, the information for which was obtained from the Naval Systems Analysis Center.

Keywords: Autonomous Vehicles; Control system; Mine warfare; Rudder; Systems Engineering.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DE DOCUMENTOS RELACIONADOS AO USV.	15
FIGURA 2 – VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADO URCA-III.....	17
FIGURA 3 – CONTEXTUALIZAÇÃO DA GUERRA DE MINAS.	23
FIGURA 4 – TAXONOMIA DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS.	24
FIGURA 5 – UTILIZAÇÃO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS NO CENÁRIO DE GUERRA.....	25
FIGURA 6 – RELAÇÃO ENTRE DIAGRAMAS SysML.....	28
FIGURA 7 – TAXONOMIA DOS DIAGRAMAS SysML.....	29
FIGURA 8 – MODELO V.	31
FIGURA 9 – MOVIMENTO E NOTAÇÕES EM SEIS GRAUS DE LIBERDADE.	33
FIGURA 10 – ÂNGULO DE APROAMENTO (YAW).....	34
FIGURA 11 – SISTEMA GNC.	36
FIGURA 12 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONTROLE URCA-III.	41
FIGURA 13- DISPLAY DA TRAJETÓRIA DA URCA-III.	41
FIGURA 14 – METODOLOGIA APLICADA NO MODELO V.	44
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE CASOS DE USO.	46
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE ATIVIDADES.....	48
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE REQUISITOS.	49
FIGURA 18 – DIAGRAMA DE DECOMPOSIÇÃO FUNCIONAL.	51
FIGURA 19 – DECOMPOSIÇÃO ESTRUTURAL.	53
FIGURA 20 – DIAGRAMA INTERNO DE BLOCOS.....	54
FIGURA 21 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SIMULINK.	55
FIGURA 22 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO FILTRO PASSA BAIXAS.	58
FIGURA 23 – ELEMENTO DE SATURAÇÃO.....	59
FIGURA 24 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLADOR PID.....	62
FIGURA 25 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO DO REMUS100.	63
FIGURA 26 – TAXA DE YAW PELO TEMPO.....	65
FIGURA 27 – ÂNGULO DE YAW DE SAÍDA E DESEJADO.	66
FIGURA 28 – TAXA DE YAW PARA PI.	67
FIGURA 29 – ÂNGULO DE YAW DE SAÍDA E DESEJADO PARA PI.....	67
FIGURA 30 – TAXA DE YAW PARA PD.....	68
FIGURA 31 – ÂNGULO DE YAW DE SAÍDA E DESEJADO PARA PD.	69
FIGURA 32 – TAXA DE YAW PARA PID.	70

FIGURA 33 – ÂNGULO DE YAW DE SAÍDA E DESEJADO PARA PID.....	70
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NOTAÇÃO PARA VEÍCULOS MARÍTIMOS.	32
TABELA 2 – PARÂMETROS DO CONTROLADOR PROPORCIONAL.	65
TABELA 3 – PARÂMETROS DO CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL.	66
TABELA 4 – PARÂMETROS CONTROLADOR PD.	68
TABELA 5 – PARÂMETROS CONTROLADOR PID.	69

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – TIPOS DE CONTROLADORES.....	40
QUADRO 2 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.	71

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
BID	Base Industrial de Defesa
CMM	Contramedidas de Minagem
CASNAV	Centro de Análises de Sistemas Navais
DEN	Diretoria de Engenharia Naval
DMN	Doutrina Militar Naval
IMO	Organização Marítima Internacional
MASS	<i>Maritime Autonomous Surface Ships</i>
MOOS-IvP	<i>Mission Oriented Operating Suite-InterVal Programming</i>
MB	Marinha do Brasil
MSS	<i>Marine Systems Simulator</i>
NCM	Navios Caça Minas
NCM	Navio de Contramedidas de Minagem
NV	Navios Varredores
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
RANS	Requisitos de Alto Nível de Sistemas
ROV	<i>Remotely Operated Vehicles</i>
SdI	Sistema de Interesse
SNAME	Sociedade de Arquitetos Navais & Engenheiros Marítimos
SYSML	<i>Systems Modeling Language</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicles</i>
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>
VSNT	Veículos de Superfície não Tripulado

LISTAS DE SÍMBOLOS

$U(t)$	Saída do controlador
K_p	Ganho Proporcional
K_i	Ganho Integral
\int	Integral
$\frac{d}{dt}$	Derivada
ψ_d	Ângulo <i>yaw</i> desejado
ψ_r	Ângulo <i>yaw</i> atual
ω_d	Frequência natural amortecida
ω_n	Frequência natural não amortecida
$ r_d $	Rate <i>yaw</i> absoluto
$r_{máx}$	Rate <i>yaw</i> máximo
a_d	Aceleração desejada
ξ	Fator de amortecimento
T	Constante de tempo de Nomoto
K	Ganho de Nomoto
δ	Ângulo do leme
m	Momento de inércia
d	Coefficiente linear de amortecimento
t_n	Saída do controlador PID de Nomoto
τ_{FF}	Saída do controlador <i>FeedForward</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Apresentação do Problema	16
1.2	Justificativa e Relevância	18
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo Geral.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos.....	18
1.4	Etapas do Trabalho	19
2	CONTEXTUALIZAÇÃO	20
2.1	Guerra de Minas	20
2.1.1	Operações de Minagem.....	21
2.1.2	Operações de Contramedidas de Minagem (CMM)	21
2.1.3	Veículos não tripulados nas CMM.....	23
2.2	O uso da abordagem da Engenharia de Sistemas na concepção de USVs	26
2.3	Modelo lógico do Sistema de Interesse	28
2.4	Uso da Engenharia de Sistemas no desenvolvimento de USVs	31
2.5	Introdução ao controle de embarcações	32
2.6	Sistema de Controle de Embarcações	35
2.7	Tipos de Controladores mais utilizados	37
2.7.1	Controlador Proporcional (P).....	38
2.7.2	Controlador Proporcional-Integral (PI).....	38
2.7.3	Controlador Proporcional-Derivativo (PD)	39
2.7.4	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	39
2.8	URCA-III	40
3	METODOLOGIA	42
3.1	Quanto aos fins	42
3.2	Quanto aos meios	42
3.3	Limitações do Método	43
3.4	Coleta e Tratamento de Dados	43
4	MODELAGEM DESCRITIVA DO USVE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR DO LEME DE UMA EMBARCAÇÃO AUTÔNOMA	44
4.1.1	Desenvolvimento do Sistema.....	45

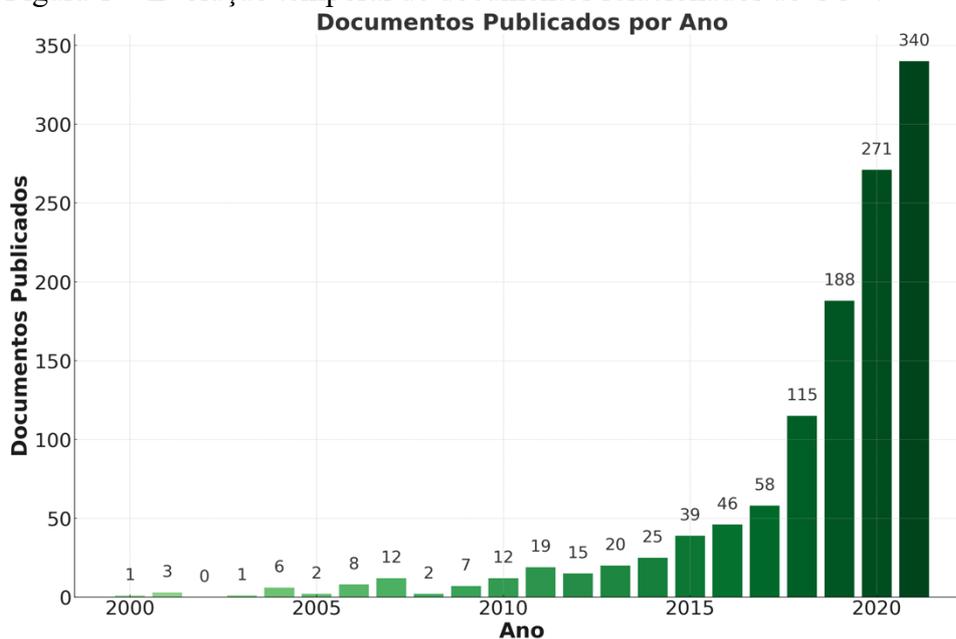
4.1.2	Diagrama de Casos de Uso	46
4.1.3	Diagramas de Atividades	47
4.1.4	Diagrama de Requisitos	48
4.2	Desenvolvimento de Elemento de Alto Nível do Sistema.....	49
4.2.1	Decomposição Funcional.....	49
4.3	Desenvolvimento de Elemento de Baixo Nível do Sistema	53
4.4	Descrição do SIMULINK implementado no REMUS100.....	54
4.4.1	Descrição do Filtro Passa Baixa de 3ª ordem:	56
4.5	Análise do Controle PID implementado no REMUS100.....	59
4.5.1	Modelo linearizado de Nomoto de Segunda Ordem.....	60
4.5.2	Referência Feedforward.....	61
4.5.3	Estrutura do controlador PID	62
4.5.4	Modelo dinâmico da embarcação no SIMULINK.....	63
4.6	Análise de sensibilidade do controlador PID.....	64
4.6.1	Controlador Proporcional.....	65
4.6.2	Controlador Proporcional Integral	66
4.6.3	Controlador Proporcional Derivativo.....	68
4.6.4	Controlador Proporcional Integral Derivativo	69
5	CONCLUSÃO	73
5.1	Sugestões para Futuros Trabalhos	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – Diagrama de Casos de Uso	77
	APÊNDICE B – Diagrama de Atividades.....	78
	APÊNDICE C – Diagrama de Requisitos dos Stakeholders.....	79
	APÊNDICE D – Diagrama de Decomposição Funcional	80
	APÊNDICE E – Diagrama de Decomposição Estrutural.....	81
	APÊNDICE F – Diagrama Interno de Blocos	82
	APÊNDICE G – SIMULINK REMUS100.....	85
	ANEXO A–REQUISITOS DE ALTO NÍVEL DE PROJETO	86

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, os veículos autônomos emergiram como um dos avanços tecnológicos mais significativos no cenário global. Originários de pesquisas científicas e militares, passaram de meros conceitos teóricos para implementações práticas em variados ambientes e aplicações. Tal evolução é resultado de uma combinação sinérgica de avanços em computação, sensoriamento e inteligência artificial, resultando em máquinas capazes de redefinir estratégia defensiva, logística e mobilidade global.

Cano *et al.* (2022), realizaram um mapeamento de pesquisas relacionadas aos Veículos Autônomos de Superfície (USV) e, por análise cienciométrica, identificaram que, entre 2000 a 2010, houve 54 publicações na área. Entre 2010 a 2015, o número cresceu para 130 publicações. Contudo, o período de 2015 a 2020 se destaca com um total de 717 publicações, marcando um crescimento de quase 595% em comparação com o início da década, conforme ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 – Evolução temporal de documentos relacionados ao USV.



Fonte: Cano *et al.*, 2022, p. 5.

Por outro lado, Bae e Hong, J Survei (2023), discutiram a aplicação prática dessa tecnologia em diversos países. Os Estados Unidos, por exemplo, têm conduzido pesquisas e implementações desde a década de 1990. O Japão tem focado no desenvolvimento de embarcações não tripuladas de alta velocidade e veículos voltados para pesquisa

oceanográfica. O Reino Unido investiu em tecnologias para monitorar a qualidade da água, enquanto a Noruega se destaca no desenvolvimento de embarcações autônomas para transporte de contêineres e balsas.

A crescente importância dos veículos autônomos é sublinhada pelo aumento exponencial nos investimentos e pesquisas a eles dedicados. Com sua habilidade de atuar em ambientes desafiadores, executar tarefas críticas com precisão e reduzir riscos humanos, são vistos como ferramentas essenciais. Além de seu uso em defesa e segurança, os veículos autônomos sinalizam transformações significativas em diversos setores, evidenciando sua influência fundamental no futuro da mobilidade e na relação entre homem e máquina.

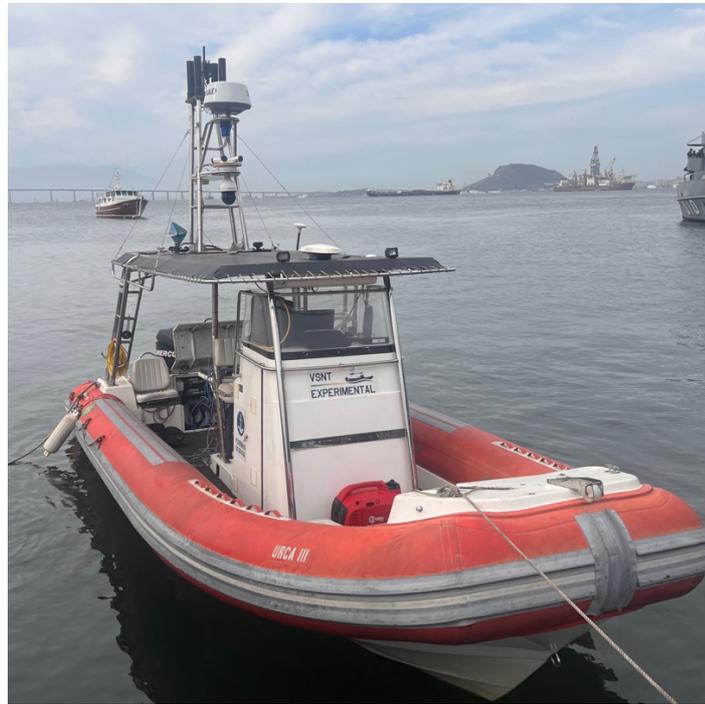
1.1 Apresentação do Problema

A Marinha do Brasil (MB), movida por missões complexas e na busca contínua pelo aprimoramento tecnológico, tem investido em projetos relacionados aos Veículos de Superfície não Tripulados (VSNT¹). Um exemplo marcante é a conversão da lancha URCA-III em um Veículo de Superfície não Tripulado Experimental (VSNT-E) em 2021, ilustrado pela Figura 2.

No entanto, apesar desses progressos, a MB ainda enfrenta desafios em relação à adoção dessa tecnologia, principalmente ao se comparar com as Marinhas de nações desenvolvidas.

¹ VSNT – Veículos de Superfície não Tripulados: No texto deste trabalho, será adotada a sigla USV (*Unmanned Surface Vehicle*), que é equivalente ao termo VSNT (Veículos de Superfície não Tripulados). A partir deste ponto, o termo USV será utilizado para referir-se a tais veículos.

Figura 2 – Veículo de Superfície não Tripulado URCA-III.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A literatura existente sobre veículos autônomos muitas vezes se restringe a abordagens focadas em sistemas específicos ou componentes individuais. Ainda que tais estudos promovam avanços relevantes, existe uma lacuna notável em recursos que abordem os USV de maneira holística, desde sua concepção até sua implementação. No atual panorama da engenharia, é importante que se estabeleça uma ponte eficiente entre o projeto conceitual ao nível de sistema e o projeto detalhado de seus componentes.

Esta lacuna de conhecimento representa um desafio significativo para a MB e, de maneira mais ampla, para a consecução bem-sucedida de futuros projetos de desenvolvimento de USV. Além disso, há uma escassez de trabalhos acadêmicos em português sobre o tema. Deste modo, este estudo visa contribuir academicamente com a discussão desse tema e escolheu como pano de fundo para o seu desenvolvimento um USV. A missão dele é relacionada à Guerra de Minas, mais especificamente, em Contramedidas de Minagem (CMM).

1.2 Justificativa e Relevância

Ao estabelecer um quadro abrangente, este trabalho visa proporcionar uma abordagem sistêmica que servirá para estudos futuros, já que fornece uma metodologia para a pesquisa e desenvolvimento de USVs, em particular. Esta pesquisa não apenas fomenta a discussão científica sobre o tema, mas também tem implicações práticas significativas, como o uso da Engenharia de Sistemas. Esta disciplina trata os sistemas como um todo, não apenas os componentes de maneira individualizada. Ressalta-se ainda que, o desenvolvimento de um veículo autônomo é uma possibilidade de interação com o meio acadêmico e com a base industrial de defesa (BID). Ou seja, a tríplice hélice da inovação governo, indústria e universidade.

1.3 Objetivos

A seguir serão apresentados os objetivos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal é apresentar uma estrutura de trabalho sistêmica que auxilie na análise conceitual de um USV, considerando-se aspectos operativos e técnicos. Para ilustrar o uso dessa abordagem sistêmica, escolheu-se o subsistema de controle do leme de um USV, um dos principais subsistemas desse tipo de embarcação dada a sua característica de ser autônoma.

1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) contextualizar Guerra de Minas e Contramedidas de Minagem;
- b) apresentar os principais tipos de veículos autônomos;
- c) apresentar o uso dos USVs nas Contramedidas de Minagem;
- d) aplicar a Engenharia de Sistemas para o desenvolvimento de uma abordagem sistêmica que auxilie na análise e projeto da arquitetura conceitual de um USV;
- e) ilustrar o uso dessa abordagem para o sistema de controle do leme de um USV;

- f) exemplificar a escolha de um design para o sistema de controle através de um modelo numérico.

1.4 Etapas do Trabalho

Para que se permita a completa compreensão do desenvolvimento dessa pesquisa, o presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 1 introduz a temática do estudo, destacando a crescente importância dos USVs no panorama atual. Esse capítulo define o problema, destaca sua relevância no contexto da MB e elenca os objetivos que norteiam a pesquisa.

O Capítulo 2 fundamenta-se no alicerce teórico que conduz o estudo. Nele é apresentado a contextualização de Guerra de Minas e a integração de veículos autônomos nesse contexto. A partir disso, aprofunda-se na Engenharia de Sistemas, dando ênfase à linguagem SysML e ao modelo V e, por fim, o capítulo apresenta a teoria sobre o controle e essa aplicação em embarcações marítimas.

O Capítulo 3 é voltado para a descrição da metodologia adotada, detalhando os procedimentos, técnicas e ferramentas utilizadas ao longo da pesquisa.

O Capítulo 4 é dedicado à análise e discussão dos resultados. Apresenta-se a modelagem descritiva do USV, realizada por meio dos diagramas SysML. Em seguida, explora-se a análise de sensibilidade dos parâmetros de controle do leme de uma embarcação autônoma.

O Capítulo 5, por fim, consolidam-se os resultados da pesquisa, apresentando as principais conclusões. Adicionalmente, propõe-se diretrizes para pesquisas futuras.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nesta seção será apresentada a contextualização teórica do trabalho.

2.1 Guerra de Minas

Segundo Flahert (2019), as minas navais configuram-se como uma das armas mais mortíferas em ambientes marítimos, frequentemente denominadas “Armas que Esperam” ou “O Inimigo Invisível”. A inovação nesse segmento remonta a 1776, com David Bushnell, pioneiro no desenvolvimento do primeiro submarino e na concepção de minas navais.

Historicamente, minas navais tiveram papel fundamental em conflitos significativos. Durante a Guerra Russo-Japonesa, sua utilização pelos japoneses foi determinante para a derrota da Rússia. A Primeira e Segunda Guerras Mundiais também evidenciou sua eficácia, como nas operações de Dardanelos-Gallípoli e na barragem de minas do Mar do Norte, bem como no emprego de minas como armas ofensivas, incluindo o uso pioneiro de aeronaves como plataformas para o lançamento de minas (National Research Council, 2001). Nos anos seguintes à Segunda Guerra Mundial, observou-se um aumento na utilização de minas navais por nações menos desenvolvidas em conflitos contra superpotências maiores. As capacidades ofensivas e defensivas que as minas oferecem as tornam uma opção de excepcional relação custo-benefício (National Research Council, 2001).

A Guerra de Minas representa uma prática naval antiga que, com o tempo, evoluiu para um campo altamente sofisticado. Atualmente, essa atividade raramente recebe a atenção merecida na mídia especializada, possivelmente obscurecida pela visibilidade de outras operações, como as conduzidas por navios-aeródromo, fragatas e submarinos. No entanto, dada a natureza potencialmente devastadora das minas em conflitos, é motivo de preocupação a escassa visibilidade e a falta de discussão aberta e abrangente sobre essa questão (Vogt, 2019).

Embora existam há muito tempo, essas armas continuam a exibir atributos fundamentais para a Guerra Naval: causam danos desproporcionalmente maiores em relação ao seu custo, são economicamente viáveis, simples de implantar e desafiadoras de eliminar. Sendo assim, as minas navais se sobressaem como uma opção de excepcional relação custo-benefício, representando um eficaz multiplicador de força

Dentre seus empregos mais comuns estão a defesa de áreas estratégicas, negação do uso do mar ao adversário e o uso ofensivo para incapacitar ou afundar embarcações de

superfície e submarinos. Seus efeitos podem se traduzir tanto em danos diretos às unidades navais quanto no estrangulamento das rotas de comunicação marítima, afetando tanto as forças navais quanto as embarcações comerciais. O que reforça a necessidade de atenção não apenas por parte de estados com ameaças iminentes de conflito, mas também por aqueles com orçamentos limitados destinados à salvaguarda de sua soberania.

2.1.1 Operações de Minagem

De acordo com a Doutrina Militar Naval (DMN), as operações de minagem referem-se à estratégia detalhada de posicionar minas em áreas estratégicas para atacar embarcações ou forças terrestres adversárias. A eficácia dessas operações não se restringe à capacidade destrutiva direta das minas. Elas também possuem um forte potencial de dissuasão, podendo limitar, controlar ou retardar o movimento das forças inimigas. Segundo a classificação da DMN, essas operações são categorizadas em dois tipos: as ofensivas, realizadas em zonas marítimas contestadas ou sob controle adversário, e as defensivas, implementadas em áreas sob domínio aliado com o objetivo de proteção.

2.1.2 Operações de Contramedidas de Minagem (CMM)

Ainda de acordo com a DMN, as ações de CMM abrangem medidas tanto ativas quanto passivas, voltadas a mitigar os riscos impostos por minas adversárias. O cerne destas operações é assegurar a navegação segura para embarcações, sejam elas militares ou comerciais, sobretudo em zonas marítimas de alta relevância, como entradas portuárias ou vias de acesso a bases navais. O propósito central destas operações é gerenciar e neutralizar minas potencialmente implantadas pelo adversário. Em geral, essas tarefas são executadas por Navios Caça Minas (NCM) ou Navios Varredores (NV). Enquanto os NCM focam na identificação e neutralização pontual de minas, os NV priorizam a reflutuação das mesmas, empregando técnicas para desancorar minas de fundeio, seguidas de coleta para análises de inteligência. Como alternativa, existe a possibilidade de neutralizar as minas através do armamento do próprio navio, visando sua destruição.

No II Congresso Internacional de Guerra de Minas, ocorrido em Salvador no ano de 2019, o Almirante de Esquadra Silva Lima destacou:

A História das Contramedidas de Minagem no nosso país, [sic] se inicia com a importância dada pela Marinha do Brasil em 1961, com a criação da Força de Minagem e Varredura, subordinada ao 1º Distrito Naval, o qual dispunha inicialmente de dois navios varredores da classe Javari, de origem Norte Americana, e mais tarde mais dois navios varredores e três navios Patrulha da Classe Piranha.

Em 1975, foi transferida sua subordinação para o comando do 2º Distrito Naval, onde se encontra até hoje. No final da década de 60, devido a evolução das técnicas de varredura, foi encomendada a Alemanha a construção de seis navios varredores, construídos pelo estaleiro Abeking Rasmussen, então, a partir de 1961, a Guerra de Minas ganhou novas dimensões e responsabilidades, trazendo técnicas novas e ampliando a capacidade operativa do Poder Naval. Na última década, os navios varredores foram modernizados com tecnologia nacional, e tornaram-se mais eficazes no desempenho de suas tarefas e atribuições.

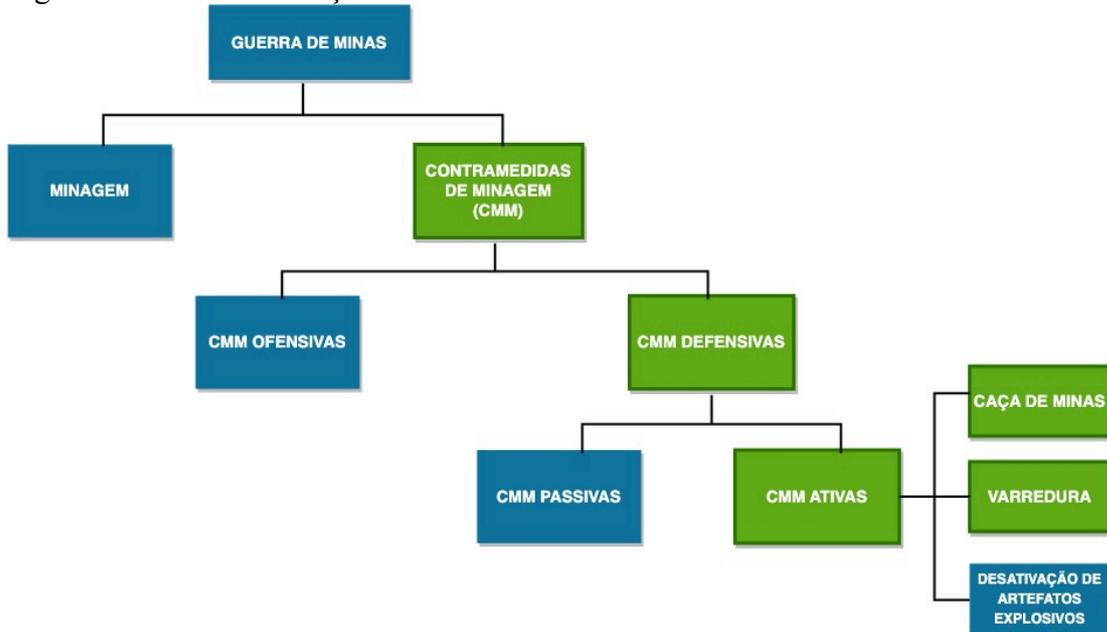
Nos dias atuais, as marinhas estão evoluindo para o emprego de meios com capacidade de realizar operações de caça de minas e varredura. Sabe-se também, que com a doutrina da retirada total do homem do campo minado, a tarefa de destruição ou neutralização de minas vem sofrendo evoluções em diversos países, sendo rotineiro o uso de robôs não tribulados, bem como nas tarefas de detecção, classificação, neutralização, identificação de artefatos explosivos (AE Silva Filho, 2019).

Conforme ressaltado pelo Almirante Silva Lima, torna-se notória a importância dos veículos não tripulados no cenário contemporâneo das operações navais, em particular, no contexto de CMM.

A Figura 3 proporciona um panorama geral do exposto, desde a trajetória histórica da Guerra de Minas, passando pela Minagem e Contramedidas de Minagem, até o objeto central deste trabalho: a missão de CMM, notadamente as Defensivas e Ativas, voltadas para neutralizar a ameaça específica das minas, concentrando-se nas ações de Varredura e Caça de Minas via USV.

Dentro deste cenário, é fundamental distinguir entre Varredura e Caça de Minas para a compreensão do estudo. A Varredura é uma técnica de CMM que se vale de dispositivos variados para remover ou aniquilar minas de maneira coletiva, ativando-as mediante a produção do campo de influência necessário. Já a Caça de Minas visa estabelecer áreas ou canais com um grau específico de limpeza em um intervalo de tempo determinado, atuando mina a mina, diferentemente das técnicas coletivas de varredura.

Figura 3 – Contextualização da Guerra de Minas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.1.3 Veículos não tripulados nas CMM

A integração progressiva de sistemas não tripulados nas operações militares não apenas se estabeleceu como uma realidade, mas se tornou uma exigência estratégica devido ao leque expansivo de aplicações que tais inovações oferecem (Letorneau, 2009).

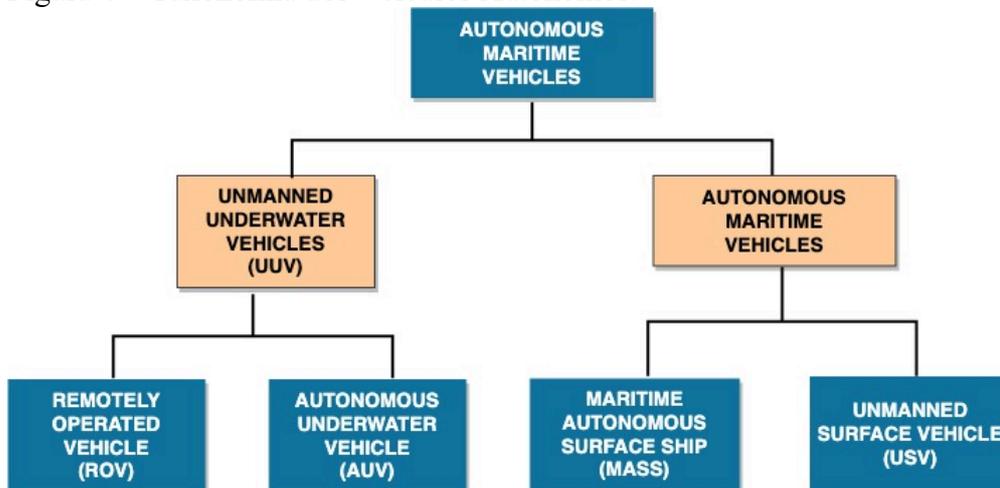
Historicamente, o primeiro uso desses veículos remonta a 1946, primariamente para varredura de minas e avaliações pós-combate (Estados Unidos, 2007). O marco inicial foi durante a Segunda Guerra Mundial com o desenvolvimento do Comox em 1944 no Canadá. Destinado à Operação *Normandy*, seu papel incluía operações de cortina de fumaça e varredura de minas. Entretanto, apesar de testes bem-sucedidos, nunca foi operacionalmente implantado. No mesmo período, os EUA desenvolveram USVs como 'Porcupine', 'Bob-Sled' e 'Woofus120', focados na remoção de minas (Bae; Hong, 2023).

Atualmente, o papel desses sistemas em operações militares tornou-se cada vez mais central. Um exemplo emblemático de seu uso ocorre no conflito entre Rússia e Ucrânia, onde USVs equipados com explosivos foram utilizados no ataque à base naval russa em Sevastopol, na Criméia (Padilha, 2023). Em geral, objetivo principal é minimizar riscos humanos sem comprometer a eficácia das missões (Letorneau, 2009).

Os veículos autônomos marítimos dividem-se em duas categorias: Veículos Marítimos Autônomos (*Autonomous Maritime Vehicles*) e Veículos Submarinos Autônomos (UUVs) (*Unmanned Underwater Vehicles*). Os UUVs subdividem-se em ROVs (*Remotely Operated Vehicles*), ligados a navios por cabos, e AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), que operam autonomamente.

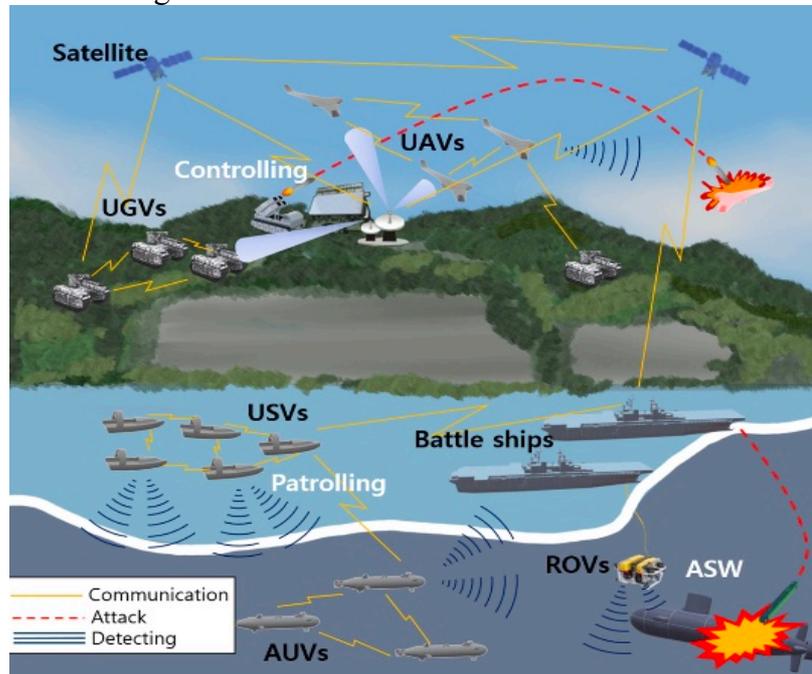
Já os Veículos Marítimos Autônomos, frequentemente referidos na literatura como Veículos Autônomos de Superfície, ganharam uma nova terminologia em 2018, pela Organização Marítima Internacional (IMO) com a introdução do termo MASS (*Maritime Autonomous Surface Ships*). Este termo denota um navio que se distingue por sua habilidade de operar em diversos graus de autonomia, reduzindo a necessidade de interação humana. A IMO estabeleceu quatro categorias de autonomia para os MASS: operação com tripulação, onde todas as funções são desempenhadas com intervenção humana direta; operação remota, onde o navio é controlado à distância por um humano; autonomia avançada, na qual a embarcação pode operar de forma quase independente, mas ainda sob supervisão e operação totalmente autônoma, onde o navio opera sem qualquer intervenção humana (IMO, 2018). A principal diferenciação entre um MASS e um USV está em seu porte e aplicação. MASS são frequentemente associados a navios mercantes e comerciais de grande porte sem uso militar, enquanto USVs são geralmente embarcações autônomas menores. Com a introdução do termo MASS, a nomenclatura para Veículos Marítimos Autônomos se bifurcou, reservando-se "USV" para designar embarcações de menor porte em comparação ao MASS. A Figura 4 sintetiza essa taxonomia, enquanto a Figura 5 ilustra o emprego militar deles.

Figura 4 – Taxonomia dos Veículos Autônomos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 5 – Utilização dos Veículos Autônomos no cenário de guerra.



Fonte: BAE; HONG, 2023, p. 2.

A Marinha Americana possui um plano diretor específico para os USVs, intitulado *USV Master Plan*, que foi elaborado pelo Diretor Executivo do Programa de Guerra e Minas em 2007 e visa:

- a) mapear as necessidades de capacidade dos USVs a curto, médio e longo prazo;
- b) definir níveis de desempenho e classificações para cada capacidade identificada dos USVs;
- c) avaliar as necessidades tecnológicas dos USVs, sua prontidão e direcionar os investimentos necessários para alcançar as metas estabelecidas.

Ainda segundo essa referência, os sistemas não tripulados têm a capacidade de minimizar riscos para embarcações tripuladas, realizar operações que veículos tripulados não conseguem fornecer multiplicação de força e oferecer soluções custo-efetivas (ESTADOS UNIDOS, 2007). Além disso, o plano prevê a hierarquização das missões destinadas aos USVs da seguinte maneira:

- a) Contramedidas de Minagem

- b) Guerra Antissubmarino
- c) Segurança Marítima
- d) Suporte a Operações Especiais
- e) Guerra Eletrônica
- f) Suporte a Operações de Interdição Marítima

A importância dada pela US Navy para as CMM sinaliza que a utilização desses sistemas deve priorizar tal atividade, mesmo que tais sistemas usualmente sejam concebidos para serem versáteis. Sendo assim, optou-se por considerar essa como a missão de referência (*Design Reference Mission*²) do sistema autônomo que será exemplificado neste trabalho. A concepção desse sistema seguirá a filosofia da Engenharia de Sistemas que busca enxergar o problema de forma holística.

2.2 O uso da abordagem da Engenharia de Sistemas na concepção de USVs

Dentro das dificuldades inerentes ao contexto da Guerra de Minas e tendo em vista que os USV no âmbito da MB carecem de uma doutrina específica, especialmente no que tange seu uso para CMM, o sucesso na concepção e desenvolvimento de um sistema autônomo requer a adoção de uma abordagem sistêmica que lide corretamente com esse nível de complexidade.

No cenário atual de uma engenharia em constante evolução, é essencial a capacidade de preencher a lacuna entre o projeto conceitual no nível de abstração mais alto e o projeto detalhado de seus componentes. Para isso, a Engenharia de Sistemas desempenha um papel importantíssimo e por esse motivo, optou-se por adotar essa abordagem neste estudo.

Conforme o INCOSE (2015), a Engenharia de Sistemas é uma abordagem trans disciplinar e integrativa que permite a realização bem-sucedida, uso e desativação de sistemas artificiais, utilizando princípios e conceitos de sistemas, bem como métodos científicos, tecnológicos e de gestão. Sendo assim, esta disciplina se propõe a desenvolver, comparar e equilibrar requisitos, funções e recursos alternativos do sistema de interesse (SdI), resultando em um produto eficaz sob a ótica de custos e equilíbrio ao longo do seu ciclo de vida, alinhado às necessidades das partes interessadas. Ainda de acordo com o INCOSE, um SdI é

² Design Reference Mission – É um cenário representativo de missão usado para guiar o desenvolvimento, avaliação e comunicação de sistemas e tecnologias, proporcionando um contexto específico e realista para análise e design (Giammarco; Paul, 2018).

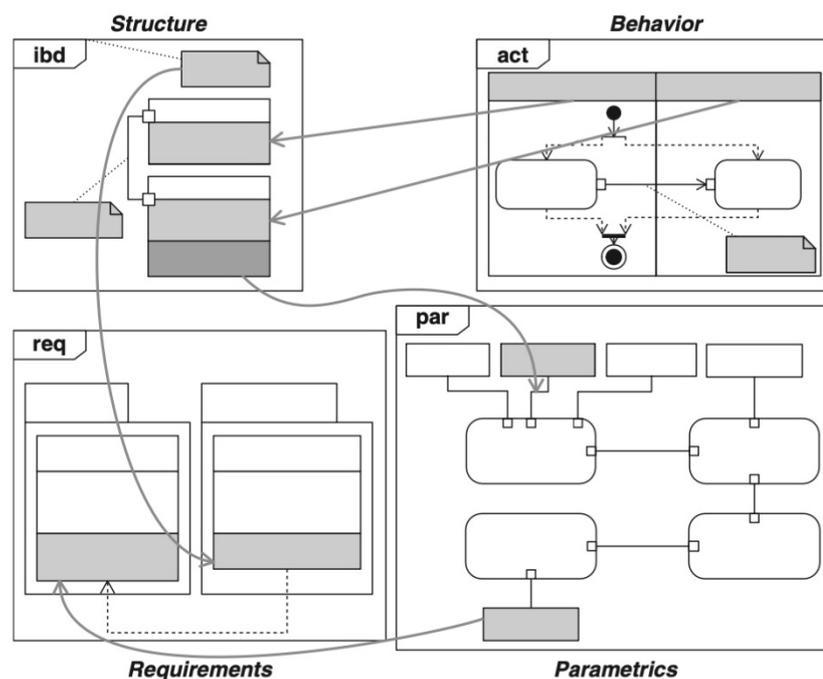
um conjunto organizado de elementos ou componentes que juntos exibem um comportamento ou significado que individualmente não possuem. Neste estudo o SdI é um USV.

As ferramentas e métodos desse campo de conhecimento desempenham um papel central na concepção e desenvolvimento de sistemas complexos, pois permitem partir de uma ideia inicialmente vaga e a transformar em um conceito preciso e estruturado. Esta abordagem holística considera as interações do sistema com o ambiente externo e as dinâmicas entre seus componentes, assegurando o atendimento das necessidades que lhe deram origem.

2.3 Modelo lógico do Sistema de Interesse

Como todas as áreas da engenharia, a Engenharia de Sistemas possui uma maneira própria de modelar seu objeto de estudo que é a linguagem *Systems Modeling Language* (SysML). A SysML permite modelar sistemas de forma robusta e eficaz (Friedenthal *et al.*, 2008) e foi derivada como uma extensão da *Unified Modeling Language* (UML) que é amplamente utilizada na engenharia de software. A SysML foi especificamente moldada para atender aos desafios da Engenharia de Sistemas, oferecendo através de um conjunto de diagramas uma forma de representar requisitos, estruturas, comportamentos e limitações conforme ilustrado na Figura 6.

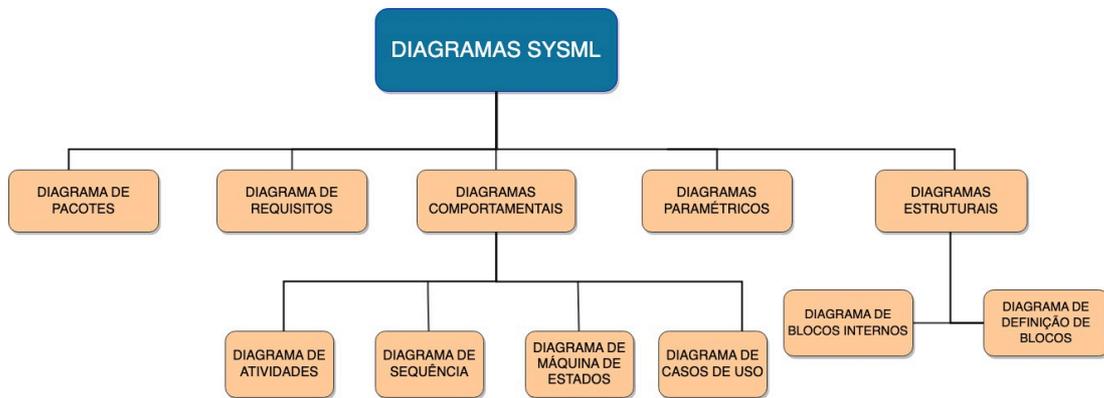
Figura 6 – Relação entre diagramas SysML.



Fonte: Friedenthal; Moore; Steiner, 2011, p. 17.

A importância da SysML está na sua capacidade de criar uma perspectiva holística de um sistema, aprimorando a comunicação entre *stakeholders*, validando requisitos e verificando projetos propostos. A SysML engloba um conjunto de nove tipos de diagramas que permitem uma representação lógica de sistemas complexos. Esses diagramas são explicados a seguir e ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – Taxonomia dos Diagramas SysML.



Fonte: Adaptado de Friedenthal; Moore; Steiner, 2011, p. 33.

- a) Diagramas de Atividades: Modelam o fluxo de atividades e sua lógica sequencial, sendo pertinentes para processos de negócios (Weilkiens, 2011);
- b) Diagramas de Requisitos: Cruciais para assegurar a satisfação das necessidades das partes interessadas, focam na especificação, rastreamento e análise de requisitos (Weilkiens,2011);
- c) Diagramas de Sequência: Segundo Weilkiens (2008), diagramas de sequência ilustram as interações entre objetos em uma sequência temporal, permitindo aos engenheiros visualizar a troca de mensagens em cenários específicos (OMG, 2017);
- d) Diagramas de Casos de Uso: Ilustram a interação entre usuários (ou sistemas) e seus atores externos, abordando funcionalidades e interações (Friedenthal *et al.*, 2008);
- e) Diagramas de Definição de Blocos: Representam a estrutura estática, definindo blocos e suas relações, como associações e dependências (Friedenthal *et al.*, 2008);
- f) Diagramas de Máquinas de Estados: Segundo Harel (1987), capturam os diferentes estados de um objeto e as transições entre esses estados, fornecendo uma visão clara do comportamento do objeto ao longo do tempo;
- g) Diagramas Paramétricos: Definem restrições entre as propriedades do sistema associadas aos blocos (Weilkiens, 2011);
- h) Diagramas Internos de Blocos: Detalham a arquitetura interna de um bloco, abordando componentes e conexões (Friedenthal *et al.*, 2008).
- i) Diagramas de Pacotes: É um diagrama estrutural geralmente usado para simplificar os diagramas de classe complexos e organizar as classes em pacotes. Um pacote é

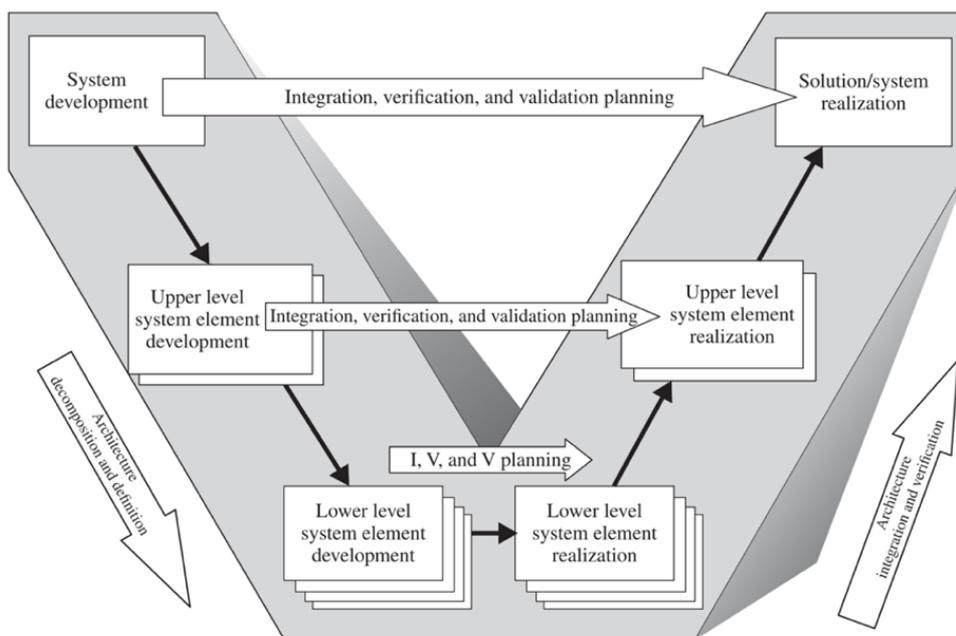
uma coleção de elementos relacionados, incluindo diagramas, documentos, classes e pacotes de eventos.

2.4 Uso da Engenharia de Sistemas no desenvolvimento de USVs

A aplicação da abordagem sistêmica seguiu a lógica do modelo V. Esse modelo é composto por duas colunas principais. A primeira trata do desenvolvimento do sistema, iniciando desde a definição de requisitos até o seu design. A segunda é responsável pela realização do sistema e engloba toda a produção, integração, verificação e validação. A escolha deste modelo se deve ao seu foco na validação contínua junto às partes interessadas e ênfase na verificação dos requisitos, garantindo uma evolução segura do projeto. O Modelo V destaca-se ainda pela sua estruturação de atividades de teste, conectando eficientemente desenvolvimento e testes. A Figura 8 ilustra o Modelo V.

Tendo em vista as limitações inerentes a uma produção acadêmica como esta, o modelo V não será utilizado em sua totalidade. Serão realizadas apenas as etapas pertencentes ao desenvolvimento do sistema, ou seja, a primeira coluna deste modelo. Sendo assim, primeiramente ocorrerá a definição de como o sistema será utilizado e seus requisitos, em seguida será construída a arquitetura funcional e física do sistema e por fim serão estudadas soluções de design específicas para o controle do leme. Como de todos os subsistemas e componentes do USV, será dado foco apenas para o responsável pelo controle do leme, o próximo item tratará do arcabouço teórico necessário para a realização desse controle.

Figura 8 – Modelo V.



Fonte: INCOSE, 2015, p. 34.

2.5 Introdução ao controle de embarcações

Para o completo estudo do controle de embarcações, é necessária uma introdução ao sistema de coordenadas que será estudado. Segundo Fossen, uma embarcação em movimento possui seis graus de liberdade (*Degrees of Freedom – DOF*), portanto, é preciso de seis coordenadas independentes para determinar sua posição e orientação. As três primeiras coordenadas e suas derivadas correspondem a posição e ao movimento de translação ao longo dos eixos x , y e z , ao passo que as últimas três coordenadas e as suas derivadas são utilizadas para descrever a orientação e os movimentos de rotação.

No meio naval, as seis componentes de movimento são conhecidas como: *surge* ou avanço, *sway* ou deriva, *heave* ou afundamento, *roll* ou arfagem, *pitch* e guinada ou *yaw*. A tabela a seguir, apresenta essa nomenclatura, definida de acordo com a Sociedade de Arquitetos Navais & Engenheiros Marítimos (SNAME).

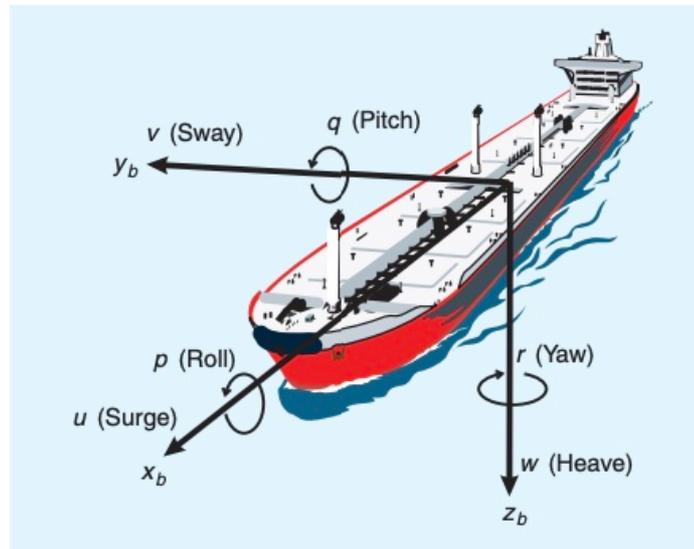
Tabela 1 – Notação para veículos marítimos.

Definição	Forças e momentos	Velocidades lineares e angulares	Posições e ângulos de Euler
Movimento na direção x (<i>surge</i>)	X	u	x
Movimento na direção y (<i>sway</i>)	Y	v	y
Movimento na direção z (<i>heave</i>)	Z	w	z
Rotação na direção x (<i>roll</i>)	K	p	ϕ
Rotação na direção y (<i>pitch</i>)	M	q	θ
Rotação na direção z (<i>yaw</i>)	N	r	ψ

Fonte: Adaptado de SNAME 1950, p. 33

Os seis graus de liberdade são ilustrados conforme a Figura 9:

Figura 9 – Movimento e notações em seis graus de liberdade.



Fonte: Fossen; Perez, 2009, p. 36.

A terminologia que descreve o movimento nas direções x , y e z , assim como as rotações nos eixos x , y e z , conforme definida pela SNAME, é fundamental no contexto da engenharia naval e no domínio das ciências marítimas. Esses parâmetros são empregados para caracterizar e quantificar o deslocamento e orientação de embarcações e estruturas marítimas, desempenhando um papel crucial na análise, projeto e operação.

Conforme aponta a SNAME:

[...] Essas terminologias são de extrema importância na descrição precisa do comportamento cinemático das embarcações e estruturas marítimas, permitindo uma comunicação eficaz entre os profissionais da engenharia naval e marítima, bem como servindo como base para análises e projetos relacionados a sistemas marítimos[...] (SNAME, 1950, p. 134).

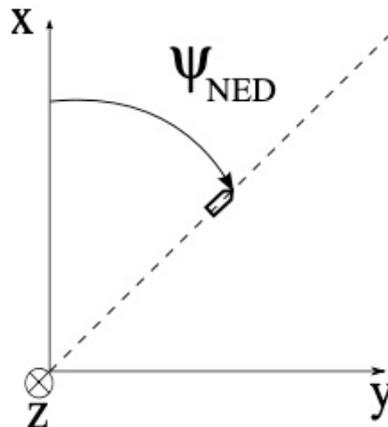
Na cinemática de navios, o ângulo NED (Norte-Leste-Descente, ou North-East-Down em inglês) é uma convenção usada para descrever a orientação ou atitude de uma embarcação em relação a um sistema de coordenadas tridimensional. Especificamente, o sistema de coordenadas NED é um sistema de coordenadas locais que é frequentemente usado em navegação, oceanografia e engenharia marítima para descrever a posição e a orientação de uma embarcação ou objeto subaquático em relação à superfície da Terra (Mendonça, 2020).

A notação NED refere-se aos seguintes componentes:

- a) Norte (*North*): Refere-se ao eixo que aponta na direção norte geográfica, ou seja, na direção do Polo Norte da Terra.
- b) Leste (*East*): Refere-se ao eixo que aponta na direção leste geográfica, ou seja, na direção da rotação da Terra.
- c) Descente (*Down*): Refere-se ao eixo que aponta na direção descendente, ou seja, na direção perpendicular à superfície da Terra

No contexto da engenharia naval, o ângulo *yaw* (também conhecido como "*heading angle*") refere-se à rotação ao redor do eixo vertical (ou eixo Z) de um corpo ou veículo. Especificamente, no sistema de coordenadas NED (Norte, Leste, Baixo), que é comumente usado em navegação e controle de veículos aéreos e marítimos, esse ângulo descreve a orientação da proa do veículo em relação ao Norte verdadeiro. Assim, este referencial é adotado para este estudo, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Ângulo de aproamento (*yaw*).



Fonte: Yoshimatsu, Moreira, 2013, p. 6.

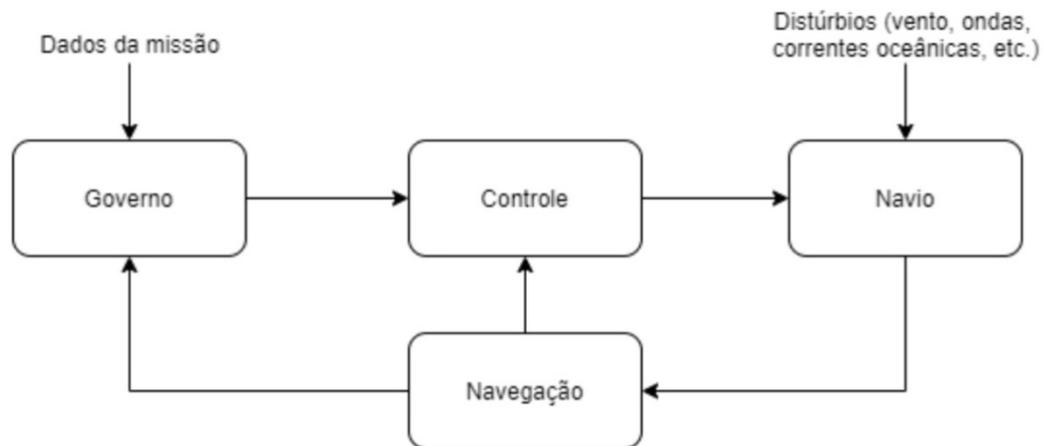
2.6 Sistema de Controle de Embarcações

A evolução do controle baseado em modelos de embarcações tem origem com o surgimento do giroscópio em 1908, instrumento que permitiu um *feedback* automático e confiável do ângulo de guinada. Tal equipamento foi pioneiro nos sistemas de controle de direção que, atualmente, são conhecidos como pilotos automáticos. Esses são projetados para gerenciar e controlar a trajetória de aeronaves, embarcações e outros veículos sem a necessidade de intervenção humana contínua.

O inventor Elmer Sperry, no início do século XX, fez contribuições significativas ao criar o primeiro mecanismo de direção automática para navios, conhecido como Metal Mike. Este dispositivo replicava habilmente o comportamento de um piloto experiente, ajustando-se automaticamente conforme as variações das condições marítimas. Com o avanço tecnológico, os pilotos automáticos modernos em navios adquiriram a capacidade de executar manobras complexas, como viradas e operações de atracação, e até controlar veículos historicamente instáveis, como submarinos e grandes petroleiros. Avanços ainda mais expressivos ocorreram com a criação de sistemas de posicionamento local na década de 1970 e, mais tarde, em 1994, com a disponibilização do primeiro sistema de navegação por satélite com cobertura global, o Navstar GPS. Isso desencadeou inovações em rastreamento de trajetórias e seguimento de caminhos (Fossen, 2011).

Posteriormente, Nicholas Minorsky introduziu uma análise detalhada de sistemas de controle de feedback de posição, resultando no que hoje é conhecido como controle proporcional-integrativo-derivativo (PID). A inspiração para essa inovação veio da observação de como um timoneiro conduzia uma embarcação. Ambos, Sperry e Minorsky, utilizaram sistemas de controle de entrada única e saída única (SISO), com o giroscópio desempenhando um papel crucial na medição do ângulo de guinada do navio. Atualmente, esses sinais são processados por computadores que implementam sistemas de controle PID. Usualmente, o conjunto de componentes responsáveis por esse controle é chamado de Sistema de Governo, Navegação e Controle (GNC) e que são interconectados entre si, conforme representa a Figura 11.

Figura 11 – Sistema GNC.



Fonte: Caldas, 2023, p. 22.

"Governo" diz respeito à ação que constantemente calcula a posição, velocidade e aceleração desejadas de um navio. Esta parte se baseia em dados de sensores de movimento, informações externas como condições meteorológicas e processamento computacional. A "Navegação" se concentra em, determinando a posição da embarcação, determinar o rumo, distância, velocidade e aceleração, geralmente, utilizando dados de um sistema de navegação por satélite e outros sensores. Por fim, o "Controle" trata da determinação e aplicação das forças e momentos de controle necessários para alcançar um objetivo de controle específico.

2.7 Tipos de Controladores mais utilizados

De acordo com Sarda (2016), o desenvolvimento bem-sucedido de USVs requer a integração de sistemas de controle sofisticados, sistemas de sensores, sistemas de comunicação e, em certos casos, sistemas de armas e ainda conforme destacado por Perez (2006), a escolha do sistema de controle adequado é crucial e é influenciada por fatores como o tipo de embarcação e a natureza da missão a ser realizada.

Os pilotos automáticos modernos, em particular, fornecem uma variedade de funções, de ajustes manuais e automáticos a detecção e diagnóstico de falhas. Eles desempenham um papel significativo na arquitetura de controle geral e têm sido um foco de pesquisa contínua devido à sua influência decisiva no desempenho das embarcações.

Segundo Fossen, ao projetar sistemas de controle, o objetivo deve ser bem definido para atender aos requisitos do operador. Os USV em particular, exigem sistemas de controle altamente sofisticados para operar eficazmente em ambientes marítimos complexos.

Determinar a capacidade de manobra e o comportamento de uma embarcação em variadas situações é essencial para a segurança na navegação e o sucesso de novos projetos. Da mesma forma, a presença de um modelo para sistemas a serem controlados é fundamental para uma compreensão aprofundada do processo e para uma avaliação precisa de seu desempenho (Morgado, 2016).

No campo da automação e controle, a seleção adequada de um controlador é fundamental para garantir que um sistema atinja o desempenho desejado. Há diversos tipos de controladores disponíveis, cada um com suas peculiaridades e aplicações ideais.

Os autores (Campbell; Naeem; Irwin, 2012) discutem diversas opções de controle, incluindo técnicas de controle adaptativo difuso, como o *fuzzy adaptive control*, que busca replicar o comportamento humano na condução de embarcações. Também abordam o controle ótimo linear quadrático (LQR), estendido para o método LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) com uso de Filtro de Kalman para estimar estados desconhecidos. A abordagem de *Loop Transfer Recovery* (LTR), que reintroduz robustez ao sistema por meio da adição de ruído na entrada para cancelamento de polos e zeros, também é discutida, proporcionando uma visão abrangente das estratégias de controle no contexto de sistemas de navegação autônoma.

Este estudo se pautará em quatro tipos de controladores bastante utilizados: os do tipo Proporcional (P), Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD) e Proporcional Integral Derivativo (PID). Embora todos tenham o objetivo comum de regular e controlar

sistemas, eles diferem em suas abordagens e, conseqüentemente, nos resultados que proporcionam.

2.7.1 Controlador Proporcional (P)

O controlador proporcional, ou simplesmente controlador P, é a forma mais simples de implementar controle entre os tipos que serão apresentados. Sua ação é proporcional ao erro, ou seja, a diferença entre o valor desejado e o valor atual. O controlador P age multiplicando o erro por uma constante conhecida como ganho proporcional (K_p) (Ogata, 2010). A saída do controlador P é diretamente proporcional ao erro conforme mostrado a seguir:

$$\boxed{U(t) = K_p * e(t)} \quad (1)$$

Sendo:

- j) $U(t)$ é a saída do controlador;
- k) K_p é o ganho proporcional;
- l) $e(t)$ é o erro no tempo t .

2.7.2 Controlador Proporcional-Integral (PI)

O controlador PI inclui uma ação integrativa ao controlador P. Além de responder ao erro atual, o controlador PI acumula os erros passados e corrige-os ao longo do tempo (Åström; Murray, 2008). Isso ajuda a eliminar o erro em regime permanente e melhora a precisão do controle. O termo integral calcula uma média ponderada dos erros passados e é multiplicado por uma constante conhecida como ganho integral (K_i):

$$\boxed{U(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau} \quad (2)$$

Sendo:

- m) $U(t)$ é a saída do controlador;
- n) K_p é o ganho proporcional;
- o) K_i é o ganho integral;

p) $e(t)$ é o erro no tempo t .

2.7.3 Controlador Proporcional-Derivativo (PD)

O controlador PD combina a ação proporcional com a ação derivativa. A ação derivativa é calculada com base na taxa de mudança do erro. Isso significa que o controlador PD responde não apenas ao valor atual do erro, mas também à sua taxa de mudança, Franklin, Powell e Emami-Naeini (2006). O termo derivativo é multiplicado por uma constante conhecida como ganho derivativo (K_d).

$$\boxed{U(t) = K_p * e(t) + K_d * \frac{d}{dt}[e(t)]} \quad (3)$$

Sendo:

- q) $U(t)$ é a saída do controlador;
- r) K_p é o ganho proporcional;
- s) K_d é o ganho derivativo;
- t) $e(t)$ é o erro no tempo t .

2.7.4 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

O controlador PID é uma combinação dos três tipos de controle mencionados anteriormente: proporcional, integral e derivativo. A saída do controlador PID é a soma dos termos proporcional, integral e derivativo (Ogata, 2010).

$$\boxed{U(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d * \frac{d}{dt}[e(t)]} \quad (4)$$

Sendo:

- a) $U(t)$ é a saída do controlador;
- b) K_p é o ganho proporcional;
- c) K_i é o ganho integral;
- d) $e(t)$ é o erro no tempo t .

No Quadro 1, é destacada as características de cada controlador em relação à resposta transitória e ao erro em regime permanente, dois critérios fundamentais na avaliação do desempenho de um sistema de controle.

Quadro 1– Tipos de Controladores.

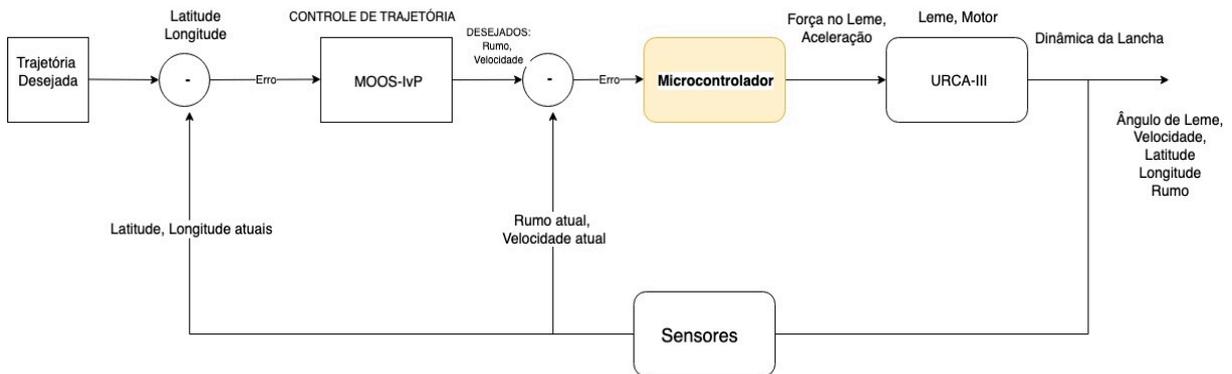
Controlador	Resposta Transitória	Erro em Regime Permanente
Controlador P	- Reduz o tempo de estabilização	- Pode haver erro em regime permanente, especialmente em sistemas com perturbações.
Controlador PI	- Melhora o tempo de estabilização, reduzindo o sobressinal e oscilações.	- Elimina o erro em regime permanente, garantindo que a resposta do sistema alcance o valor desejado com precisão.
Controlador PD	- Reduz o sobressinal e as oscilações na resposta do sistema.	- Pode haver um pequeno erro em regime permanente, especialmente em sistemas sujeitos a perturbações.
Controlador PID	- Combina as vantagens dos controladores P, I e D, oferecendo uma resposta rápida com reduzido sobressinal e oscilações.	- É capaz de eliminar o erro em regime permanente, garantindo uma resposta precisa, mesmo na presença de perturbações.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.8 URCA-III

Após visita ao USV URCA-III, constatou-se o empenho e dedicação que a MB, especialmente o Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV) junto aos engenheiros técnicos e militares envolvidos, têm desempenhado para a adequada operação dessa nova tecnologia. Em agosto deste ano ocorreu a homologação para operação completa embarcada no Navio Patrulha Oceânico Apa. Já entre dias 23 a 27 de outubro, a URCA-III estará presente no Exercício MINEX-23 em Salvador, onde ocorrerá o lançamento real de minas marítimas de exercício, sem cargas explosivas onde poderá atuar na prática em exercícios de Contramedidas de Minagem, tendo o Navio de Patrulha Oceânica Apa como “Navio-mãe”.

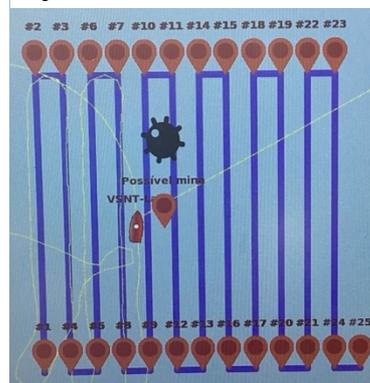
Figura 12 - Diagrama de blocos de controle URCA-III.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No decorrer deste estudo, foi possível acompanhar um exercício da URCA-III, onde inicialmente foi estabelecida uma trajetória desejada, e a embarcação teve como objetivo localizar uma mina na Baía de Guanabara, operando de forma autônoma, ilustrado pela Figura 13. A operação da URCA-III, segue inicialmente uma trajetória desejada, conforme ilustrado pela Figura 12 em seu diagrama de blocos, e um dos seus controladores atuam nesta trajetória desejada, que através de um framework conhecido como MOOS-IvP (*Mission Oriented Operating Suite-InterVal Programming*)³. O microcontrolador é implementado através de um controlador PID que atua diretamente corrigindo o leme para seguir a trajetória desejada, o que corrobora com o mesmo tipo de controlador encontrado na seção anterior, através de simulação e análise.

Figura 13- Display da trajetória da URCA-III.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

³ MOOS-IvP é um conjunto de módulos de código aberto desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) e pela Universidade de Oxford utilizado para o controle de navios não-tripulados, implementado em linguagem C++ ou Python.

3 METODOLOGIA

O presente estudo adotou uma metodologia que se concentra na aplicação da Engenharia de Sistemas por meio da linguagem SysML para criar o modelo lógico do sistema em estudo. A pesquisa também envolveu simulações de controle de leme no software SIMULINK. Conforme Gil (2008), a metodologia é crucial em pesquisas acadêmicas para definir estratégias de coleta, análise e interpretação dos dados.

3.1 Quanto aos fins

Dentro do contexto acadêmico e da necessidade de uma abordagem sistematizada, este trabalho se categoriza em uma pesquisa exploratória e descritiva. A pesquisa exploratória busca proporcionar um aprofundamento e uma clara definição do problema em questão, possibilitando a formulação de hipóteses. Esse processo muitas vezes se beneficia de revisões bibliográficas, entrevistas e análises de exemplos práticos (Gil, 2008). A abordagem descritiva, por sua vez, se dedica a detalhar as nuances de um fenômeno ou estabelecer conexões entre variáveis, valendo-se de métodos como análises e observações sistemáticas (Lakatos; Marconi, 2003).

3.2 Quanto aos meios

O presente estudo adotou uma abordagem metodológica ancorada em pesquisa bibliográfica, utilizando-se de materiais previamente publicados, incluindo livros, artigos, teses e dissertações. Tal abordagem possibilita ao pesquisador abranger uma variedade mais ampla de fenômenos do que uma investigação direta permitiria (Lakatos; Marconi, 2003). Adicionalmente, empregou-se o método de estudo de caso, que envolve a observação direta dos acontecimentos em seu contexto real, seguida da coleta e análise dos dados relacionados ao problema em foco (Gil, 2008).

3.3 Limitações do Método

Todas as pesquisas têm limitações, sejam elas metodológicas, teóricas, financeiras ou temporais. Estas limitações podem afetar a amplitude e a profundidade da pesquisa. É fundamental reconhecê-las para entender as possíveis fragilidades e restrições do estudo (Richardson, 1999). Dentro do contexto deste trabalho, uma limitação evidente é a dependência de ferramentas específicas. Além disso, ao abordar uma tecnologia e práticas emergentes, como veículos de superfície não tripulados, o campo está em constante evolução. Embora o estudo seja um reflexo do estado atual do campo, ele pode não representar completamente o cenário futuro devido à rápida evolução da tecnologia.

3.4 Coleta e Tratamento de Dados

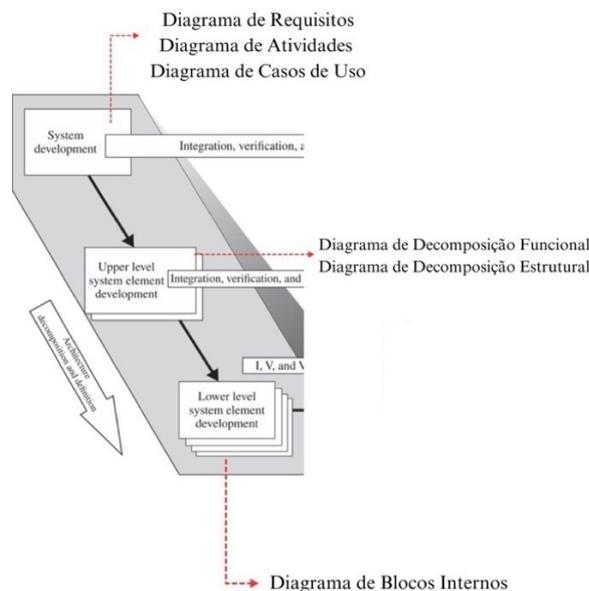
A coleta de dados é uma fase fundamental de qualquer pesquisa. Neste estudo, utilizou-se diversas abordagens, incluindo análise de documentos, simulações e visitas práticas. Já o tratamento dos dados se deu por meio de uma análise sistêmica e crítica. Para isso, empregou-se a linguagem SysML na elaboração de diagramas e o SIMULINK para as simulações. Esta etapa também envolveu uma análise de sensibilidade para os parâmetros do controlador PID, interpretando os resultados à luz da literatura e dos objetivos estabelecidos para o estudo. Como destaca Vergara (2009), tanto a coleta quanto o tratamento de dados são cruciais para garantir a extração de conclusões que sejam ao mesmo tempo válidas e confiáveis.

4 MODELAGEM DESCRITIVA DO USVE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR DO LEME DE UMA EMBARCAÇÃO AUTÔNOMA

Para criar um modelo descritivo que auxilie na concepção do USV foram utilizados os seguintes diagramas daqueles apresentados na Figura 14 divididos da seguinte forma em função das etapas do Modelo V, conforme apresentado abaixo. Além de sua apresentação no corpo do texto, os diagramas produzidos foram adicionados aos Apêndices para facilitar sua visualização e compreensão neste estudo.

A seguir, serão apresentados esses diagramas bem como uma breve explicação sobre o que cada um deles ilustra.

Figura 14 – Metodologia aplicada no modelo V.



Fonte: Adaptado de INCOSE (2005).

- Desenvolvimento do sistema (*System development*): Diagrama de Requisitos, Diagrama de Atividades e Diagrama de Casos de Uso.
- Desenvolvimento de elemento de alto nível do sistema (*Upper level system element development*): Diagrama de Decomposição Funcional e de Decomposição Estrutural.
- Desenvolvimento de elemento de baixo nível do sistema (*Lower level system element development*): Diagrama de Interno de Blocos.

4.1.1 Desenvolvimento do Sistema

Inicialmente, é preciso estabelecer as necessidades dos *stakeholders*. Em virtude da inviabilidade do levantamento mais formal dessas necessidades através de entrevistas e reuniões, utilizou-se os Requisitos de Alto Nível de Sistemas (RANS) que foram obtidos a partir de (Caldas, 2023), e que podem ser consultados no Anexo A deste trabalho. Esse Anexo representa as necessidades da MB sob a perspectiva da Diretoria de Engenharia Naval (DEN) o que é um excelente ponto de partida para compor o *background* deste trabalho. A partir de sua leitura, foram elencadas as seguintes necessidades:

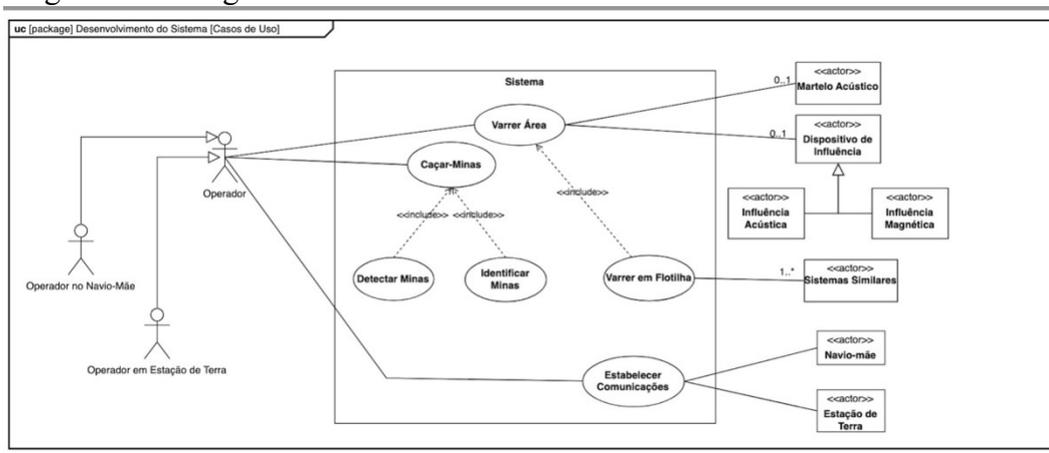
- a) o sistema deve realizar tarefa de caça-minas;
- b) o sistema deve realizar tarefa de varredura;
- c) o sistema pode realizar varredura de forma individual ou trabalhar em flotilha;
- d) o sistema empregará martelos ou dispositivos acústicos/magnético;
- e) o sistema irá operar a partir de um navio-mãe;
- f) o modo de operação será autônomo;
- g) o sistema deve permitir controle remoto;
- h) o sistema deverá ser não-tripulado;
- i) o sistema deve ser capaz de receber energia/combustível a contrabordo de outras embarcações ou no cais;
- j) o sistema será suportado por um navio-mãe ou estação fixa ou móvel em terra;
- k) o sistema deve operar até estado de mar 3 na escala Douglas;
- l) o sistema deve apresentar resistência à explosão submarina;
- m) o sistema será capaz de lançar e recolher sonar rebocado ou ROV.
- n) O sistema deve ser capaz de neutralizar qualquer tipo de mina.
- o) A limpeza na tarefa de caça-minas de ser em alto grau de limpeza.

Sabendo-se as necessidades, pôde-se iniciar o estudo conceitual do sistema, que será representado em três diagramas.

4.1.2 Diagrama de Casos de Uso

Um diagrama de Casos de Uso foi utilizado para ilustrar as interações entre os atores externos e o sistema, conforme Figura 15 e Apêndice A. O diagrama proporciona uma visão de alto nível das capacidades que o sistema deve possuir e como os atores externos interagem com essas capacidades (BOEHM, 2006).

Figura 15 – Diagrama de Casos de Uso.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Do diagrama apresentado na Figura 15, podemos inferir que:

- São Atores: Operador, Navio-mãe, Estação de Terra, Martelo Acústico, Dispositivo de Influência, Sistemas Similares (outros USV da mesma classe);
- São Casos de Uso:
 - a) Caçar Minas: Nesse caso de uso a interação ocorre somente com o Operador. Nessa interação o Operador envia comandos e recebe dados e informações do sistema. Esse caso de uso inclui outros dois: Detectar Minas e Identificar Minas;
 - b) Varrer Área: Nesse caso de uso, além da interação com o Operador explicada acima, o sistema interage externamente com o martelo acústico e o dispositivo de influência. Essa interação se dá pelo fato de que o sistema deve ter uma interface para rebocar tais equipamentos. Esse caso de uso inclui a varredura em flotilha, onde ocorre a interação com sistemas similares;
 - c) Estabelecer Comunicações: Nesse caso de uso a interação ocorre com o Navio-mãe, Estação de Terra e Operador. A capacidade de comunicação é essencial para

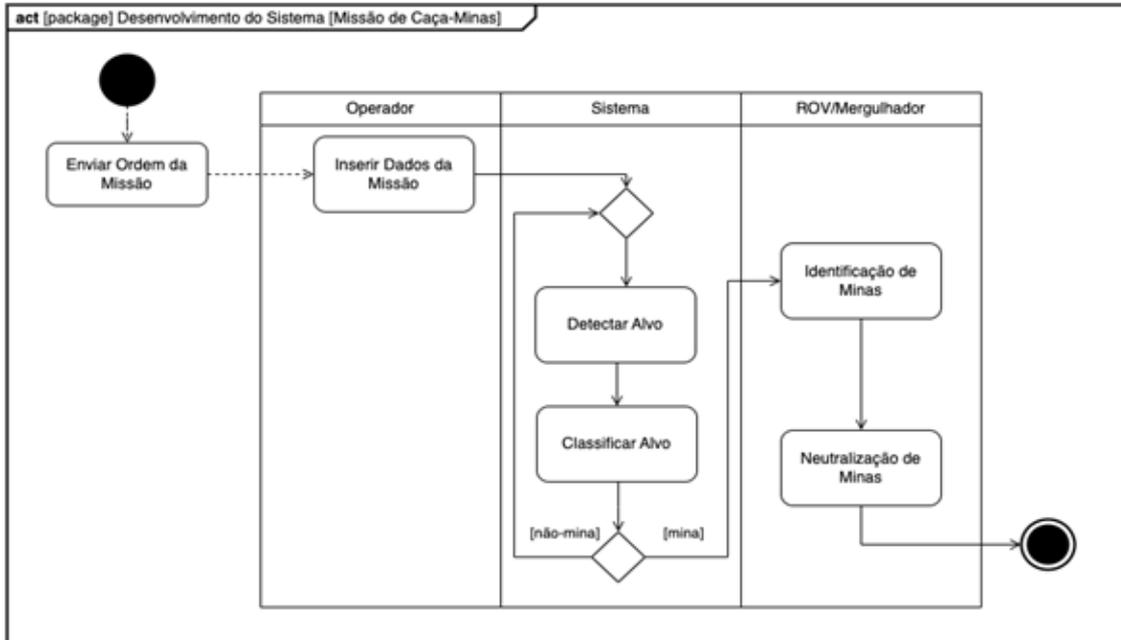
garantir a coordenação e a troca de informações entre as partes envolvidas, seja para compartilhar dados de missão, atualizações de status ou alertas.

4.1.3 Diagramas de Atividades

Por simplicidade, foi construído apenas o diagrama de atividades para a caça de minas. No diagrama apresentado na Figura 16 e no Apêndice B podemos observar uma sequência de atividades que incluem:

- a) Envio da Ordem da Missão: Esta é a etapa inicial onde a missão é concebida e uma ordem é gerada para ser realizada pelo sistema;
- b) Operador Insere os Dados da Missão: O operador, após receber a ordem da missão, insere os dados pertinentes no sistema. Isso pode incluir informações como área de busca, parâmetros de detecção, critérios de classificação, entre outros;
- c) Sistema Detecta o Alvo: O sistema começa a operação de busca baseado nos dados fornecidos. Usando sensores, sonares ou outros dispositivos de detecção, o sistema busca alvos no ambiente aquático;
- d) Classificação do Alvo: Uma vez que um alvo é detectado, o sistema trabalha para classificar o alvo. Ele determina se o objeto é uma mina ou outro objeto não ameaçador;
- e) Decisão: É uma mina? Esta é uma atividade de decisão, que envolve não só o sistema, mas também o operador. Se o alvo for classificado como uma mina, o fluxo segue para a etapa de neutralização, que não será feita pelo sistema. Se não for uma mina, o processo pode retornar para continuar a busca ou finalizar, dependendo do protocolo;
- f) Neutralização da Mina: Se o alvo for identificado como uma mina, a informação é enviada para o Operador esteja ele em terra ou no navio-mãe. Essa etapa é executada por um ROV (Veículo Operado Remotamente) ou por mergulhadores. Eles então se aproximam do alvo e implementam procedimentos para neutralizar a ameaça, seja por desarme, remoção ou destruição controlada.

Figura 16 – Diagrama de Atividades.

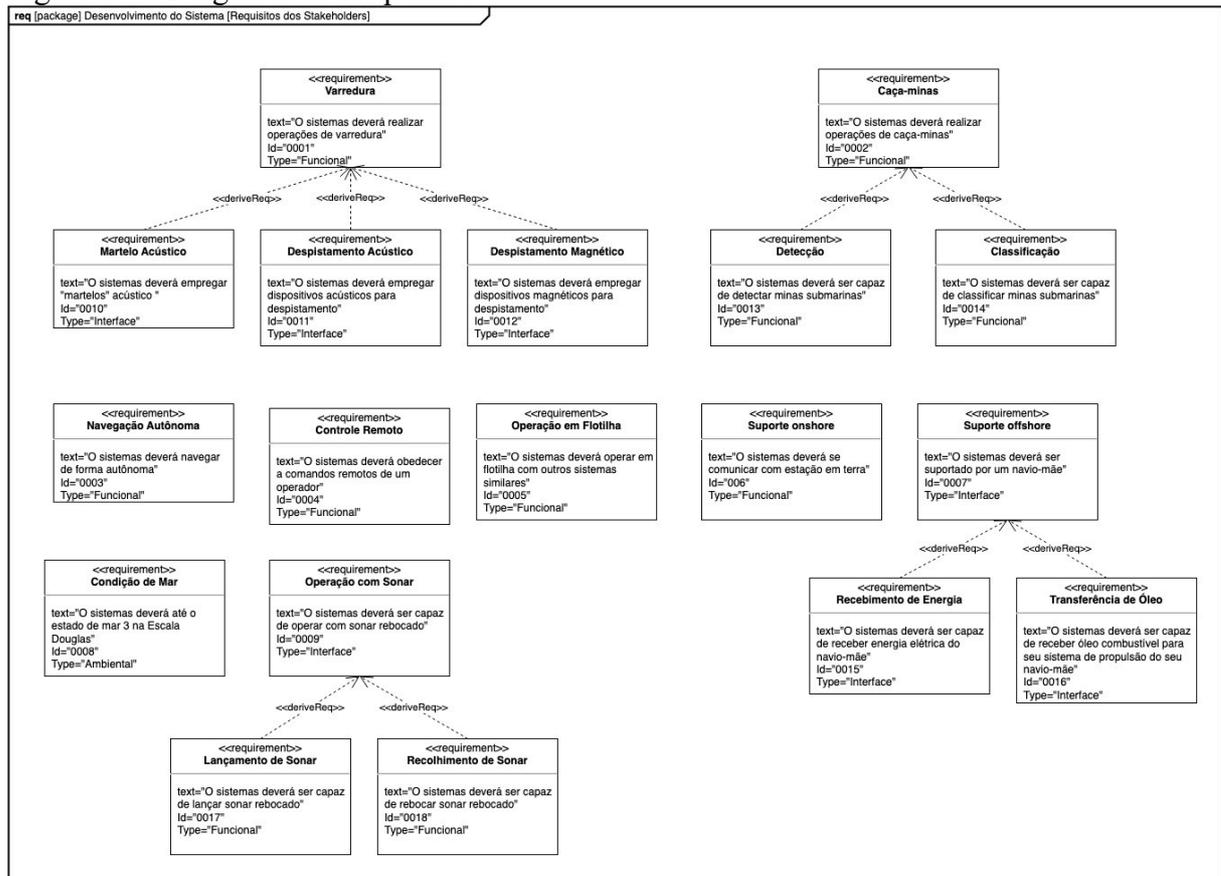


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.1.4 Diagrama de Requisitos

Após o levantamento das necessidades e o correto entendimento de como o sistema interagem com outros atores e demais sistemas envolvidos nas atividades de CMM, pode-se estabelecer o primeiro conjunto de requisitos representado na Figura 17 e no Apêndice C. O texto dos requisitos desse diagrama foi escrito utilizando-se as orientações constantes na publicação DGEPMARINST 21-01.

Figura 17 – Diagrama de Requisitos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.2 Desenvolvimento de Elemento de Alto Nível do Sistema

Nessa etapa o sistema foi primeiramente decomposto em suas funcionalidades e em seguida estruturalmente, conforme apresentado na Figura 18 e no Apêndice D.

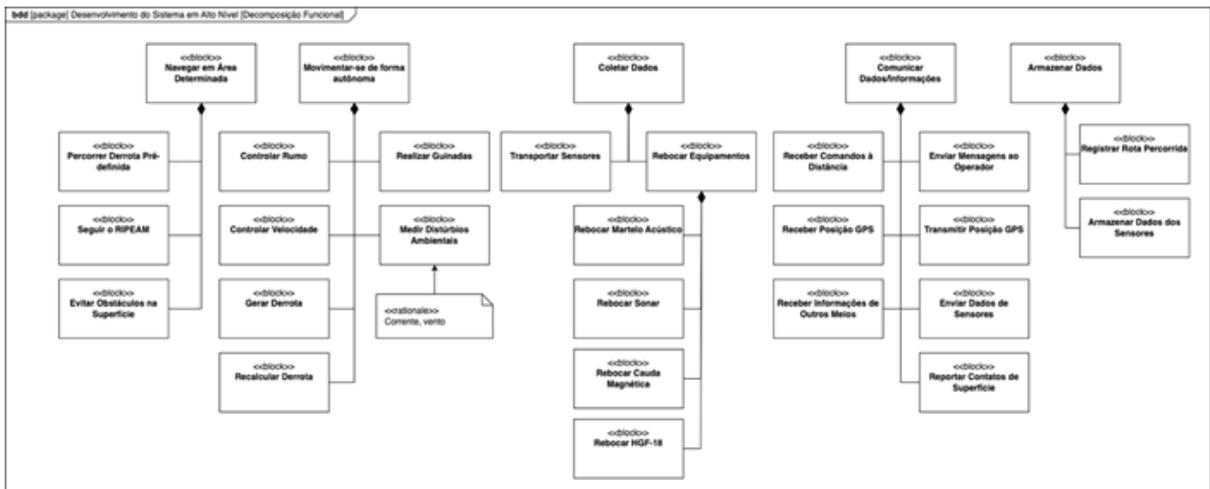
4.2.1 Decomposição Funcional

O diagrama de decomposição de decomposição funcional permite que os engenheiros de sistemas compreendam e categorizem claramente as responsabilidades e operações de um sistema. Ele serve como um guia útil durante o processo de desenvolvimento e pode ajudar a identificar áreas que requerem atenção especial ou desenvolvimento adicional (Blanchard;Fabrycky, 2010). Para a decomposição funcional, utilizou-se um diagrama de definição de blocos. Foram identificadas cinco macro funções que estão destrinchadas a seguir.

- a) Navegar em área pré-determinada:
 - percorrer derrota pré-definida: Seguir uma rota ou caminho especificado previamente;
 - seguir o RIPEAM: Cumprir as regras e diretrizes estabelecidas pelo Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar;
 - evitar obstáculos: Desviar-se de obstáculos físicos ou outros impedimentos durante a navegação.
- b) Movimentar-se de forma Autônoma:
 - controlar rumo: Manter ou alterar a direção de deslocamento;
 - controlar velocidade: Ajustar a velocidade de deslocamento conforme necessário;
 - gerar derrota: Criar uma rota ou caminho a ser seguido;
 - recalcular derrota: Modificar a rota, ou o caminho em resposta a alterações ou impedimentos.
- c) Coletar Dados:
 - transportar sensores: Carregar e operar dispositivos de detecção;
 - rebocar equipamentos: Possuir uma interface para efetuar o reboque de determinados equipamentos;
 - rebocar martelo acústico: Rebocarum dispositivo específico para detecção acústica;
 - rebocar sonar: Rebocarum dispositivo de sonar para detecção subaquática.
 - rebocar cauda magnética: Transportar um dispositivo para detecção magnética;
 - rebocar HGF-18: Deslocar um dispositivo ou equipamento específico (HGF-18).
- d) Comunicar Dados/Informações:
 - receber comandos à distância: Aceitar instruções remotas;
 - receber posição GPS: Obter dados de localização via GPS;
 - receber informações de outros meios: Aceitar dados de fontes externas ou outros sistemas;
 - enviar mensagens ao operador: Comunicar-se diretamente com o operador ou usuário;
 - transmitir posição GPS: Enviar dados de localização via GPS;
 - enviar dados de sensores: Transmitir informações coletadas pelos sensores;

- reportar contatos de superfície: Informar sobre detecções ou observações na superfície.
- e) Armazenar Dados:
- registrar rota percorrida: Manter um registro do caminho ou rota seguidos.
 - armazenar dados dos sensores: Guardar as informações coletadas pelos sensores.

Figura 18 – Diagrama de Decomposição Funcional.



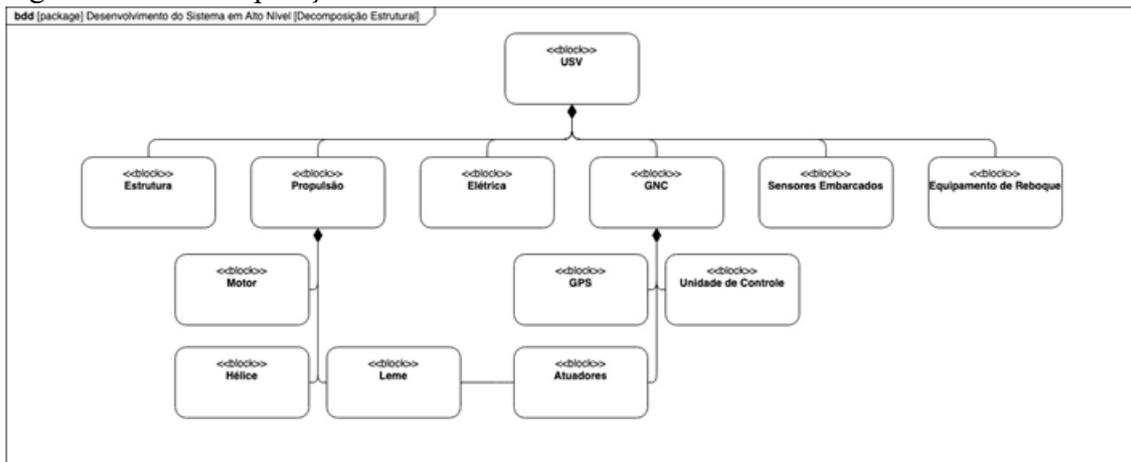
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.2.2 Decomposição estrutural

A decomposição estrutural, ao focar nos componentes físicos do sistema, fornece uma visão clara da composição do USV e de como os diferentes componentes interagem entre si. Utilizou-se outro diagrama de definição de blocos para a decomposição estrutural. Esse diagrama basicamente apresenta uma hierarquização entre subsistemas e componentes do USV, conforme ilustrado na Figura 19 e no Apêndice E. Ressalta-se que foram mais detalhados os subsistemas de propulsão e GNC e que a interface de controle entre esses que será, posteriormente, objeto de um estudo mais aprofundado. Os subsistemas principais encontram-se descritos a seguir:

- a) Estrutura: Esse subsistema compreende o casco e demais elementos estruturais do USV.
- b) Propulsão: É o subsistema responsável pela movimentação do USV na superfície da água.
- c) Elétrica: É o subsistema que fornece energia para todos os componentes elétricos e eletrônicos do USV.
- d) GNC: Conjunto de subsistemas que se encontram interligados e que permitem um gerenciamento da orientação e a manutenção e estabilidade do rumo desejado. É o subsistema de maior interesse no escopo desse trabalho.
- e) Sensores Embarcados: Nesse subsistema encontram-se todos os sensores instalados ou transportados pelo USV. Incluem-se nesse subsistema sonares, câmeras, radares e demais sensores.
- f) Equipamentos de Reboque: Interface que permite a conexão de equipamentos e sensores que serão rebocados pelo USV.

Figura 19 – Decomposição estrutural.

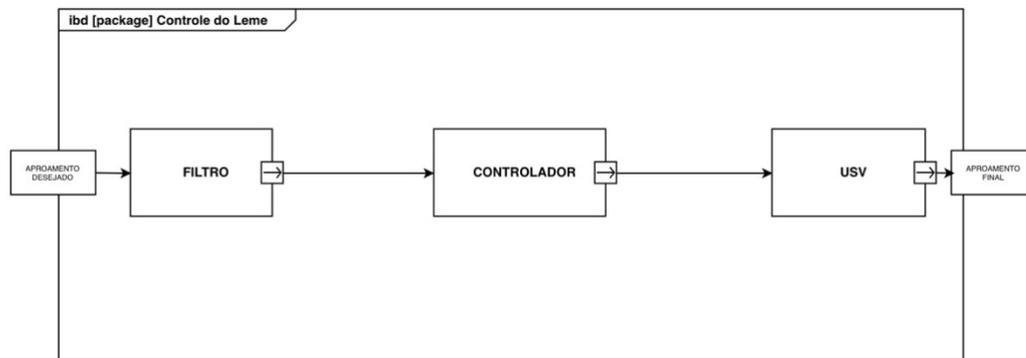


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.3 Desenvolvimento de Elemento de Baixo Nível do Sistema

Por fim, chegou-se no ponto em que a arquitetura conceitual apresentada acima deve começar a ser detalhada. Em um projeto real de Engenharia de Sistemas, haveria uma equipe multidisciplinar responsável pela especificação, desenvolvimento e aquisição desses componentes. Entretanto, em razão do contexto acadêmico desse trabalho, decidiu-se que o foco seria no estudo dos parâmetros de controle do leme realizado pelo subsistema de GNC. Sendo assim, desenvolveu-se um diagrama de blocos internos, que representa de forma mais detalhada alguns componentes físicos que serão utilizados no design deste controle. A Figura 20 e o Apêndice F apresentam esse diagrama.

Figura 20 – Diagrama interno de blocos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir de uma necessidade de um alto grau de limpeza, que está relacionado com o requisito de caça minas, a contextualização a seguir mostrará qual o melhor design para verificar o requisito imposto, que será um ângulo de aproamento de 15° , ou seja, o subsistema do GNC, mais especificamente o controle do leme.

4.4 Descrição do SIMULINK implementado no REMUS100

Tendo em vista o embasamento teórico abordado até o momento, optou-se por realizar uma simulação prática para o controle automático de aproamento (*heading autopilot*), que se refere ao ângulo *yaw*. Segundo Clarke (2003) são extremamente úteis para corrigir desvios a partir de uma direção de equilíbrio desejada.

Como esse tipo de controle para embarcações possui modelos consagrados na literatura e que, tecnologicamente, a aplicação de controladores P, PI, PD e PID abrange um vasto espectro de veículos e embarcações optou-se por realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros do controle de um modelo físico já implementado.

Essa escolha deve-se ao fato desse veículo possuir um grande arcabouço teórico e científico, com uma modelagem já realizada em “*Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*”, uma *Toolbox* do software MATLAB e a plataforma Simulink, conhecida

como *Marine Systems Simulator (MSS)*⁴, do mesmo autor, e também um código aberto disponível na linguagem Python⁵.

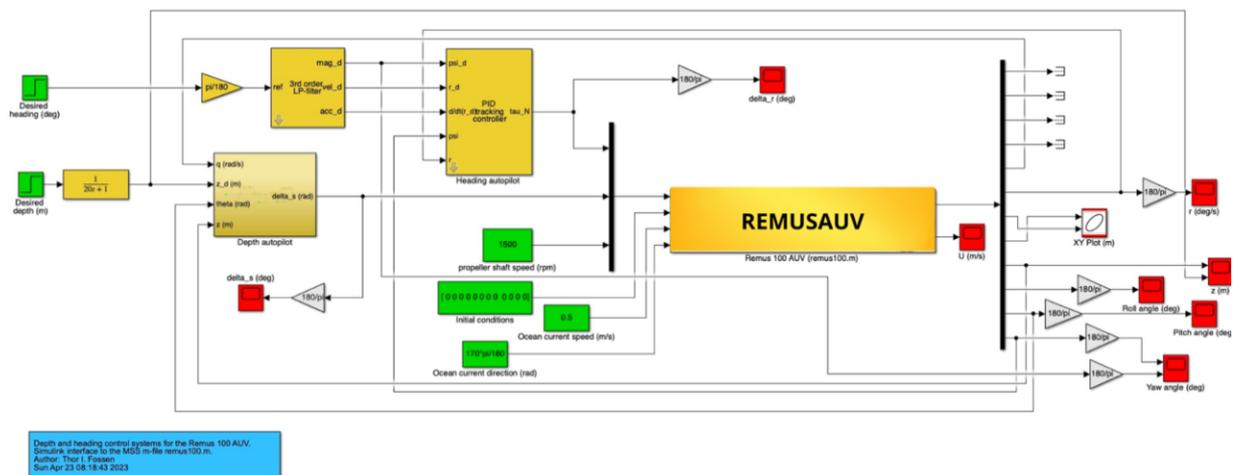
Essa linguagem aberta, acessível e de alta fidelidade em seis graus de liberdade considera todas as características dinâmicas da embarcação. Ou seja, esse modelo é uma boa aproximação do que seria um USV navegando na superfície da água.

Para realização da descrição do controle implementado do REMUS100, seguiram-se os seguintes passos:

- Visão completa do diagrama de blocos do SIMULINK;
- Descrição do Filtro Passa Baixa de 3° ordem;
- Análise do controle PID implementado no REMUS100 (*heading autopilot*);
- Descrição da embarcação REMUS100.

A Figura 21 permite uma visão completa do diagrama de blocos do sistema, é valido ressaltar que para uma melhor visualização, este Diagrama de blocos encontra-se no Apêndice G.

Figura 21 – Diagrama de blocos do SIMULINK.



Fonte: Adaptado de Fossen (2023).

Onde as variáveis de entradas e saída do estudo em questão são:

- Entradas:

⁴O Marine Systems Simulator (MSS) é uma biblioteca do MATLAB e SIMULINK para sistemas marítimos. Inclui modelos hidrodinâmicos para navios, veículos submarinos e estruturas flutuantes.

⁵ Script disponível em: <https://github.com/cybergalactic/MSS>

- *Desired Heading (deg)*: é o ângulo de aproamento de saída desejado, neste estudo será adotado como ângulo *yaw*;
- *Desired depth (m)*: é a profundidade desejada da embarcação. Neste estudo tomou-se como premissa o valor de 0 metros, de modo que o REMUS100 se comporte como um USV.

b) Saídas:

- Taxa de *yaw* ($r(\text{deg/s})$), ou conhecida como taxa de guinada;
- *Yaw angle (deg)*.

4.4.1 Descrição do Filtro Passa Baixa de 3ª ordem:

Um Filtro Passa-Baixas (*low-pass filter*) é um circuito eletrônico projetado para permitir a passagem de sinais de baixa frequência enquanto atenua ou bloqueia sinais de alta frequência (Nise, 2018). De acordo com Fossen, a função de transferência que relaciona a entrada e a saída do Filtro Passa Baixas do REMUS100 é dada por:

$$\frac{\psi_d}{\psi_r} = \frac{\omega_d^3}{(s + \omega_d)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (5)$$

De modo que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_d(t) = \psi_r \quad (6)$$

Sendo que na prática, a equação 6 significa que, à medida que o tempo t se aproxima do infinito (∞), a variável $\psi_d(t)$ se estabiliza em um valor constante ψ_r . Isso indica que, em um cenário real ou em um sistema dinâmico, após um período, a variável $\psi_d(t)$ converge para um valor fixo, que é representado por ψ_r .

Essa expressão é frequentemente utilizada em contextos de análise de sistemas dinâmicos, controle e estabilidade para descrever o comportamento de um sistema à medida que o tempo avança indefinidamente. Indica que, com o tempo, o sistema atinge um estado de equilíbrio ou estabilidade, onde $\psi_d(t)$ não varia mais e se mantém em $\psi_r(t)$. Sendo relevante para compreender como sistemas evoluem e alcançam estados estacionários ou de equilíbrio em cenários práticos.

Em muitos casos é vantajoso limitar a taxa de guinada (*yaw rate*) desejado $|r_d| \leq r_{m\acute{a}x}$ durante a sintonia do filtro. Isto pode ser feito incluindo um elemento saturante no modelo de refer\encia (IMO, 1982).

Al\em disso, a acelera\c3o do yaw $a_d = \ddot{\psi}_d$ tamb\em pode ser limitada de modo que $|a_d| \leq a_{m\acute{a}x}$ usando um segundo elemento saturante. O modelo de espa\co de estados resultante, incluindo elementos saturantes de velocidade e acelera\c3o, torna-se:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_d = & \text{sat}(r_d) \\ \dot{r}_d = & \text{sat}(a_d) \\ \dot{a}_d = & -(2\zeta + 1)\omega_n \text{sat}(a_d) - (2\zeta + 1)\omega_n^2 \text{sat}(r_d) + \omega^3(\psi_r - \psi_d) \end{cases} \quad (7)$$

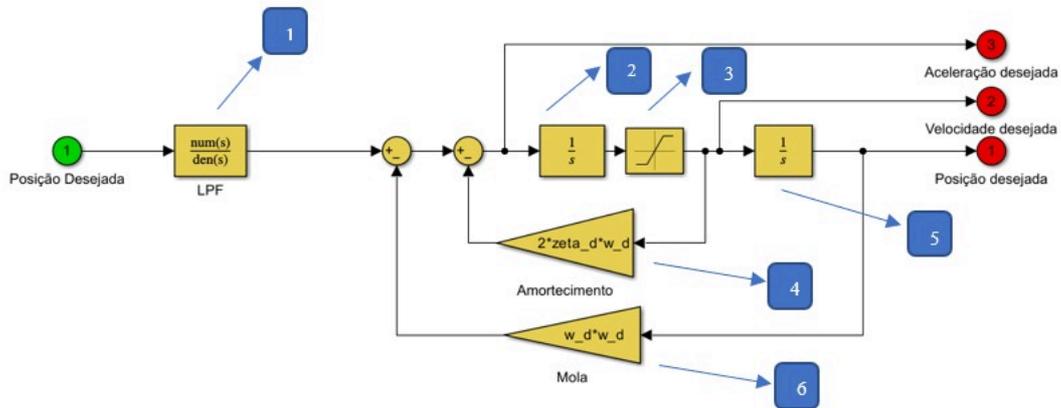
O modelo do elemento de satura\c3o \e definido como sendo:

$$\text{sat}(V_{h\acute{e}lice}) = \begin{cases} \text{sgn}(V_{h\acute{e}lice}) & \text{se } |V| \geq V_{m\acute{a}x} \\ V_{h\acute{e}lice} & \text{caso contr\ario} \end{cases} \quad (8)$$

A equa\c3o 8 representa um elemento de satura\c3o que limita um sinal $V_{h\acute{e}lice}$ a um valor m\acute{a}ximo $V_{m\acute{a}x}$, mantendo o sinal inalterado se estiver dentro desse limite e ajustando-o para o valor m\acute{a}ximo permitido se estiver acima desse limite. Isso \e \u00fal para o sistema de controle garantir que um sinal n\ao os limites permitidos para a velocidade da h\acute{e}lice, evitando danos ou comportamentos indesejados no sistema.

A implementa\c3o do diagrama de blocos no SIMULINK da equa\c3o (5) \e dada conforme abaixo:

Figura 22 – Diagrama de Blocos do Filtro Passa Baixas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Sendo os blocos numerados:

- a) Low Pass Filter (LPF): condicionamento do sinal de entrada para o filtro de 3º ordem, sua função de transferência é dada por:

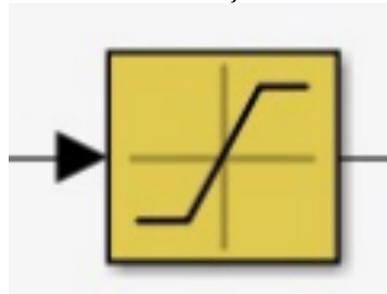
$$G(s) = \frac{\omega_d^3}{s + \omega_d} \quad (9)$$

- b) Elemento integrador:

$$\frac{1}{s} \quad (10)$$

- c) Elemento de saturação: onde seu valor máximo ($V_{m\acute{a}x}$) é dado pela velocidade máxima da hélice e o seu valor mínimo ($V_{m\acute{i}n}$) pela velocidade mínima da hélice.

Figura 23 – Elemento de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

- d) Amortecimento: Segundo a teoria clássica de controle, o amortecimento é dado por:

$$\xi = 2\zeta\omega_d \quad (11)$$

- e) Mola: este bloco representa a frequência natural não amortecida desejada elevada ao quadrado para o controle do sistema.

$$\omega_d^2 \quad (12)$$

Desta forma, realizada a álgebra do diagrama de blocos da figura 22, a função de transferência do bloco do filtro Passa-Baixas de 3° ordem é:

$$\frac{\text{posição desejada } (\psi_d)}{\text{posição atual } (\psi_r)} = \frac{\omega_d^3}{(s + \omega_d)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (13)$$

4.5 Análise do Controle PID implementado no REMUS100

Para o completo entendimento do controlador implementado no MSS, faz-se necessário a apresentação deste modelo.

4.5.1 Modelo linearizado de Nomoto de Segunda Ordem

O modelo de Nomoto, também conhecido como o modelo de segunda ordem de Nomoto, é uma simplificação comum usada em engenharia para representar a resposta de um sistema dinâmico, como um barco ou um navio, a comandos de leme (Nomoto *et al.*, 1957). Este modelo é usado para entender e controlar o movimento de embarcações e outras estruturas flutuantes.

Duas das variáveis-chave no modelo de Nomoto são " T " e " K " que representam o tempo característico e a ganho do sistema, respectivamente (Fossen, 2011; Lewis; Vrabie, 2008). O tempo característico, denotado como " T " no modelo de Nomoto, é uma medida do quão rapidamente o sistema responde a um comando de controle. Em um contexto de sistemas de controle, é chamado de "constante de tempo" (Nomoto *et al.*, 1957). No contexto do modelo de Nomoto, ele está relacionado ao tempo que leva para a embarcação mudar sua trajetória em resposta a uma ação do leme. Quanto maior o valor de T , mais lenta é a resposta do sistema, e vice-versa.

Em relação ao ganho do sistema, denotado como " K ", ele é uma medida da magnitude da resposta do sistema a uma ação de controle. No contexto do modelo de Nomoto, K representa a efetividade do leme ou da ação de controle no que diz respeito à alteração da trajetória da embarcação. Um valor maior de K significa que uma pequena ação de controle terá um impacto mais significativo na trajetória da embarcação (Fossen, 2011).

Segundo Fossen, o modelo de Nomoto de segunda ordem é descrito como:

$$\boxed{T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta} \quad (14)$$

Onde ψ é ângulo *yaw*, δ é o ângulo do leme, K é o ganho da planta e T o tempo de resposta da planta.

Tabela 2 – Parâmetros da equação de Nomoto.

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Velocidade angular em <i>yaw</i>	$\dot{\psi}$	graus/s
Ângulo do leme	δ	graus
Ganho do modelo de controle	K	s^{-1}
Tempo de resposta	T	s

Fonte: Yoshimatsu, 2013, p. 10.

4.5.2 Referência Feedforward

O termo "*feedforward*" refere-se a uma técnica de controle utilizada em sistemas de controle de veículos, especialmente em manobras de mudança de rumo. A ideia por trás do *feedforward* é antecipar as necessidades do sistema de controle, levando em consideração informações sobre a trajetória desejada e outras variáveis para melhorar o desempenho do veículo durante a manobra.

Assim, o *feedforward* (τ_{FF}) é determinado de tal forma que o rastreamento e os dados durante a mudança de rumo nas manobras são obtidos. Usando o modelo de segunda ordem de Nomoto como base para este controle, Fossen sugere que o *feedforward* de referência seja implementado de acordo com:

$$\tau_{FF} = m \left(\dot{r}_d + \frac{1}{T} r_d \right) \quad (15)$$

Sendo:

$$m = I_z - N_r \quad (16)$$

$$T = \frac{m}{d} = \frac{I_z - N_r}{-N_r} \quad (17)$$

Onde:

- m : é o momento de inércia;
- d : coeficiente linear de amortecimento negativo;

- c) r_d : taxa de *yaw* desejada;
- d) \dot{r}_d : derivada da taxa de *yaw* desejada.

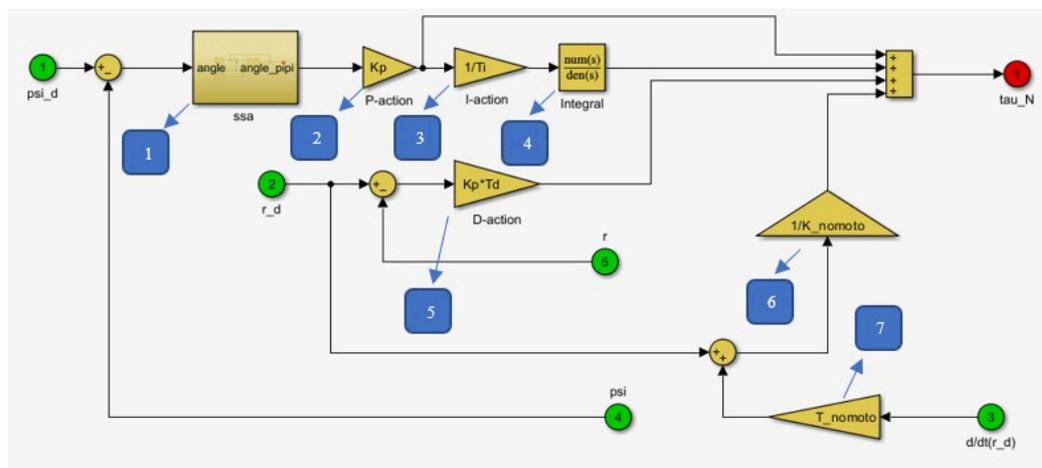
4.5.3 Estrutura do controlador PID

Ainda segundo Fossen, o controlador PID para a embarcação pode ser implementada seguindo a seguinte equação:

$$\tau_n = \tau_{FF} - K_P(\psi - \psi_d) - \underbrace{K_P T_d}_{K_d}(r - r_d) - \underbrace{\frac{K_P}{T_i}}_{K_i} \int_0^{t_i} (\psi(\tau) - \psi_d(\tau)) d\tau \quad (18)$$

A Figura 24 mostra a implementação no SIMULINK do controlador PID da equação 18.

Figura 24 – Diagrama de blocos do controlador PID.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Sendo:

- a) SSA (Bloco da Biblioteca): biblioteca do MATLAB para conversão de graus para radianos;
- b) K_P : Ganho da Ação Proporcional;
- c) K_i : Ganho da Ação Integral;
- d) Elemento integrador:

$$\boxed{\frac{1}{s}}$$

e) K_d : Ganho da Ação Derivativa

$$\boxed{K_d = K_p * T_d}$$

f) Inverso do Ganho de Nomoto:

$$\boxed{(K_{\text{Nomoto}})^{-1}}$$

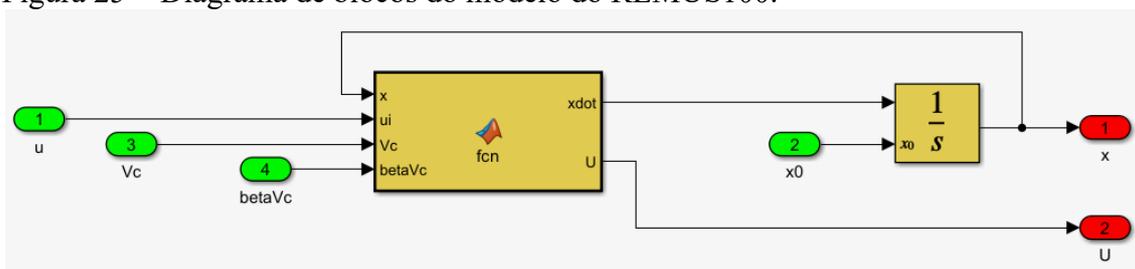
g) Constante de Tempo de Nomoto:

$$\boxed{T_{\text{Nomoto}}}$$

4.5.4 Modelo dinâmico da embarcação no SIMULINK

Ainda de acordo com a modelagem matemática realizada em “*Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*”, e também tendo como base o script em MATLAB que integra os dados de entrada do sistema (u, V_c e β_{V_c}), a resposta do sistema e as saídas \dot{x} e U , no caso, com foco no comportamento do ângulo yaw , sendo este representando na modelagem por \dot{x} [4].

Figura 25 – Diagrama de blocos do modelo do REMUS100.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Sendo:

- u = velocidade *surge* (m/s)
- X_o = condição inicial
- V_c = Velocidade da corrente (m/s)
- β_{V_c} = ângulo da direção da corrente (graus)

Devido ao fato da saída x_{dot} do bloco do REMUS100 ter sido modelada no espaço dos estados, sua saída está da seguinte forma:

$$\begin{array}{l} x_{dot}[1] = [\dot{r}] \\ x_{dot}[2] = [\hat{\text{ângulo}}\text{Roll}] \\ x_{dot}[3] = [\hat{\text{ângulo}}\dot{\text{Pitch}}] \\ x_{dot}[4] = [\hat{\text{ângulo}}\text{Yaw}] \end{array} \quad (19)$$

Assim, em série com a saída x_{dot} há um elemento integrador $\frac{1}{s}$, de modo que seja possível obter os valores nas grandezas adequadas, desta forma, após passar pelo integrador as saídas do x_{dot} do REMUS são dadas por:

$$\begin{array}{l} x_{dot}[1] = [r] \quad \left[\frac{\text{rad}}{s} \right] \\ x_{dot}[2] = [\hat{\text{ângulo}}\text{Roll}] \quad [\text{rad}] \\ x_{dot}[3] = [\hat{\text{ângulo}}\text{Pitch}] \quad [\text{rad}] \\ x_{dot}[4] = [\hat{\text{ângulo}}\text{Yaw}] \quad [\text{rad}] \end{array} \quad (20)$$

4.6 Análise de sensibilidade do controlador PID

Assim, essa análise de sensibilidade prosseguiu utilizando o software abordado, através do uso de quatro diferentes tipos de controladores: Proporcional (P), Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD) e Proporcional Integral Derivativo (PID).

Para a simulação, algumas premissas foram estabelecidas para garantir a consistência e foco nos parâmetros de controle. A constante de Nomoto (T) foi definida como 5, e o ganho de Nomoto (K) foi estabelecido como 1. Mantendo essas constantes fixas, foram variados os parâmetros associados a cada tipo de controlador: o ganho proporcional, o tempo derivativo e o tempo integral. Estes foram ajustados de forma específica para cada controlador, de modo a observar suas particularidades em ação. Além disso, tomou-se como premissa no controlador de profundidade do REMUS100, que o valor final seria 0, para que assim se comportasse como um USV, atuando na superfície.

O objetivo da simulação foi alcançar e manter um ângulo de aproamento de 15° graus, conforme especificado no subsistema GNC em estudo. Esta meta permitiu observar como

cada controlador se comporta ao tentar alcançar e manter um requisito pré-definido, e foram obtidas as seguintes respostas:

4.6.1 Controlador Proporcional

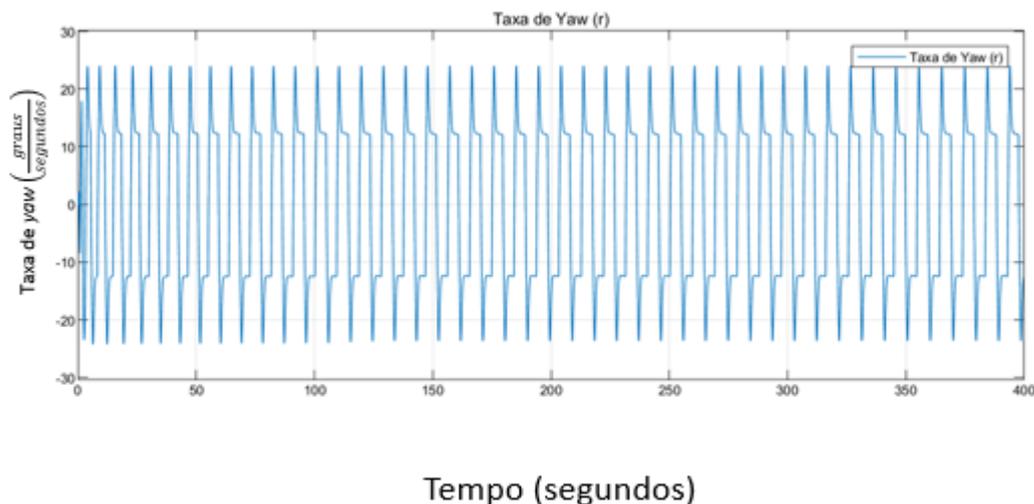
Para o controlador proporcional, consideraram-se os seguintes parâmetros do controlador Proporcional (P), para um ângulo *yaw* desejado de 15°:

Tabela 2 – Parâmetros do controlador Proporcional.

Constante de tempo de Nomoto (T)	5
Ganho de Nomoto (K)	1
Ganho Proporcional (P)	2
Tempo derivativo (T _d)	0
Tempo Integral (T _i)	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

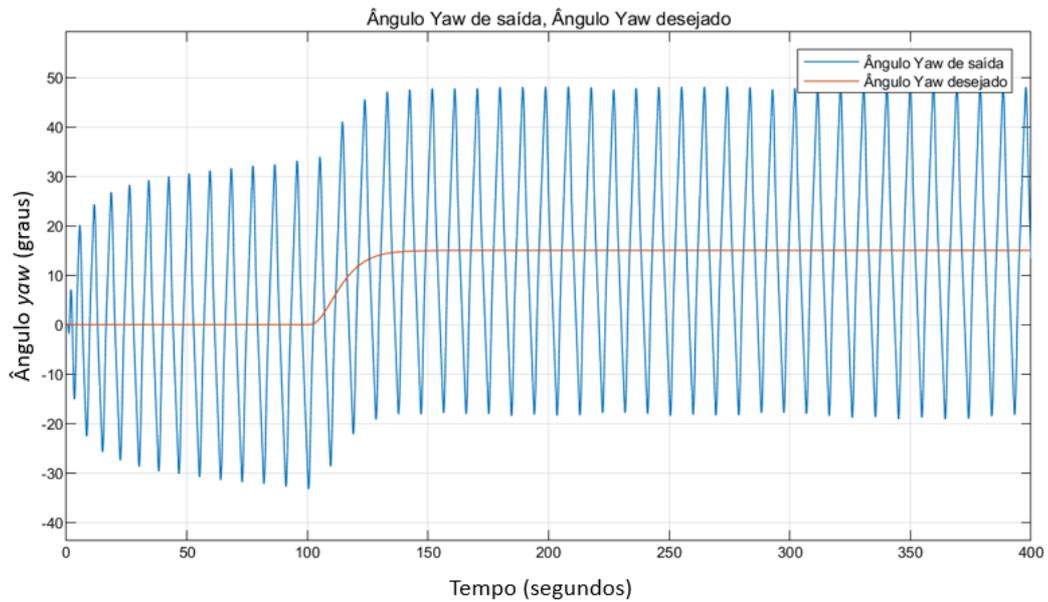
Figura 26 – Taxa de *yaw* pelo tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O controlador proporcional P apresentou um comportamento marcado por oscilações consideráveis, tanto na taxa de *yaw* quanto no ângulo de *yaw*. Isso indica que a resposta transitória desse controlador é caracterizada por flutuações notáveis, o que pode comprometer a eficiência e precisão do sistema. Na análise de regime permanente, o controlador P não conseguiu estabilizar a saída no valor desejado. Em vez disso, o sistema sob controle P continuou a oscilar indefinidamente, indicando um erro persistente que pode ser problemático em aplicações práticas.

Figura 27 – Ângulo de yaw de saída e desejado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.6.2 Controlador Proporcional Integral

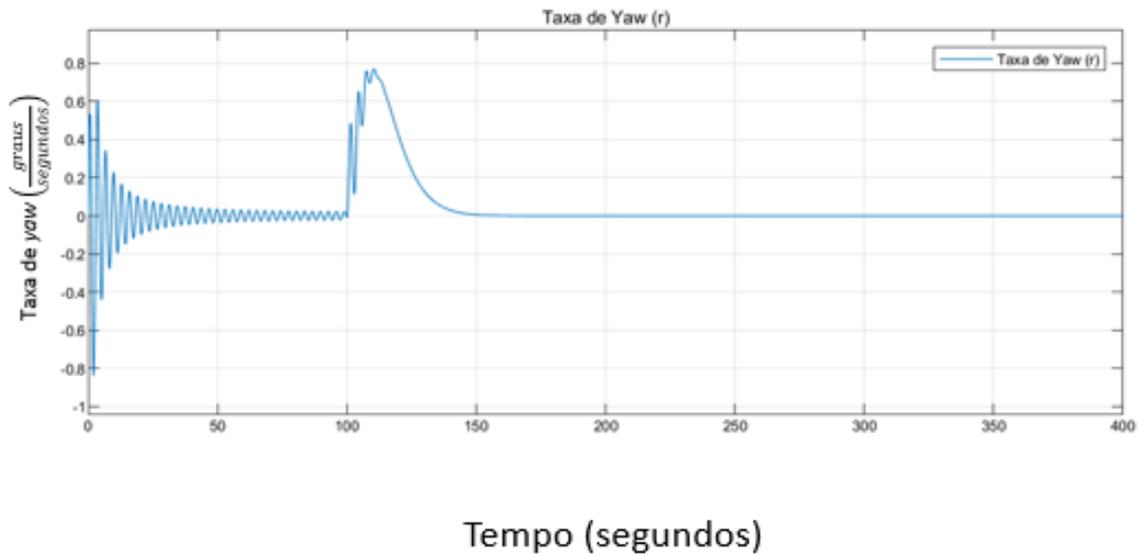
Para este controlador, consideraram-se os seguintes parâmetros do controlador Proporcional-Integral (PI), para um ângulo yaw desejado de 15° .

Tabela 3 – Parâmetros do controlador Proporcional Integral.

Constante de tempo de Nomoto (T)	5
Ganho de Nomoto (K)	1
Ganho Proporcional (P)	2
Tempo derivativo (T_d)	0
Tempo Integral (T_i)	1000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

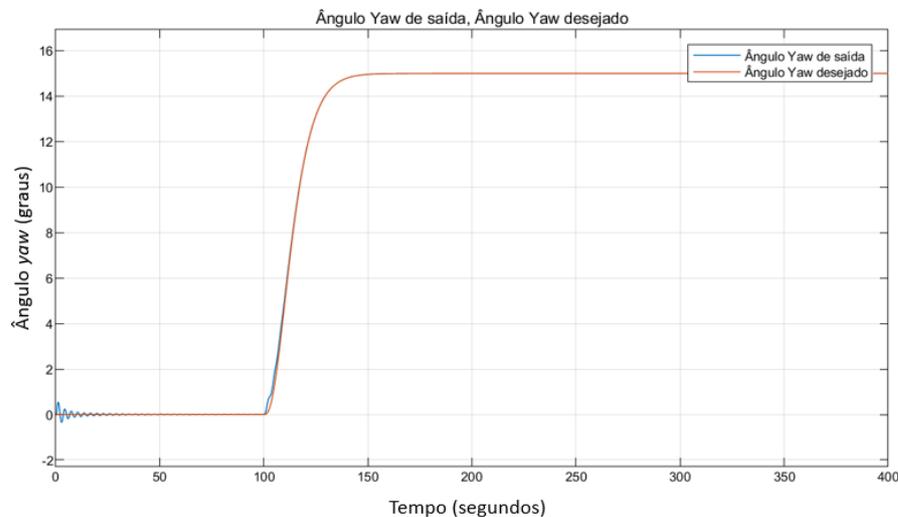
Figura 28 – Taxa de *yaw* para PI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O controlador Proporcional Integral (PI) apresentou oscilações na taxa de *yaw*, no entanto, com magnitude menor em comparação aos controladores P e PD. Isso sugere que a introdução do termo integral ajudou a atenuar as oscilações, proporcionando uma resposta mais suavizada. Em relação ao erro em regime permanente, o controlador PI demonstrou um desempenho superior, alcançando um erro nulo. Isso implica que o sistema foi capaz de estabilizar no valor desejado, validando a eficácia do termo integral em eliminar erros acumulados ao longo do tempo.

Figura 29 – Ângulo de *yaw* de saída e desejado para PI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.6.3 Controlador Proporcional Derivativo

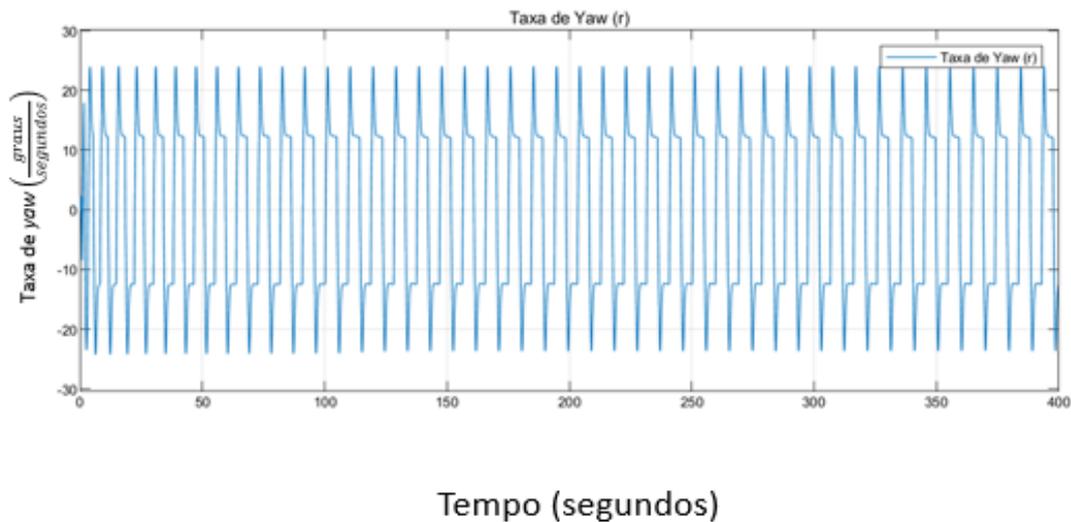
Para este controlador, consideraram-se os seguintes parâmetros do controlador Proporcional-Derivativo (PD), para um ângulo *yaw* desejado de 15°:

Tabela 4 – Parâmetros controlador PD.

Constante de tempo de Nomoto (T)	5
Ganho de Nomoto (K)	1
Ganho Proporcional (P)	2
Tempo derivativo (T_d)	0.1
Tempo Integral (T_i)	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

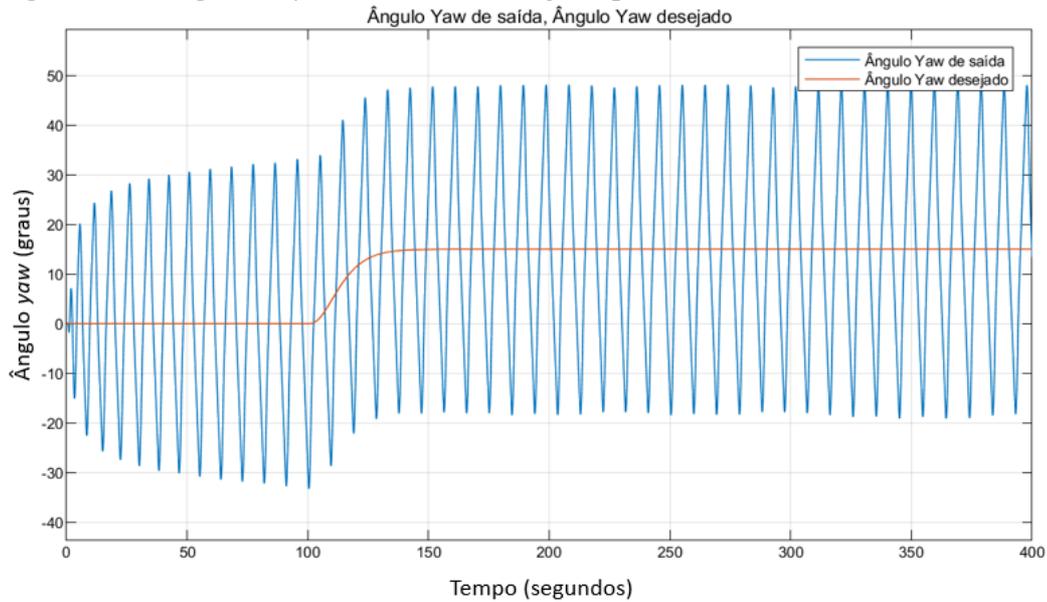
Figura 30 – Taxa de *yaw* para PD.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Similar ao controlador P, o controlador PD também exibiu oscilações significativas na taxa e no ângulo de *yaw*. Isso sugere que, embora o componente derivativo possa ajudar a prever e corrigir variações, ele não foi suficiente, neste caso, para estabilizar completamente a resposta transitória. O controlador PD, assim como o P, mostrou um erro infinito em regime permanente. Isso implica que sistemas regulados por PD, neste contexto, não conseguem atingir e manter o valor desejado, persistindo em oscilações contínuas.

Figura 31 – Ângulo de *yaw* de saída e desejado para PD.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.6.4 Controlador Proporcional Integral Derivativo

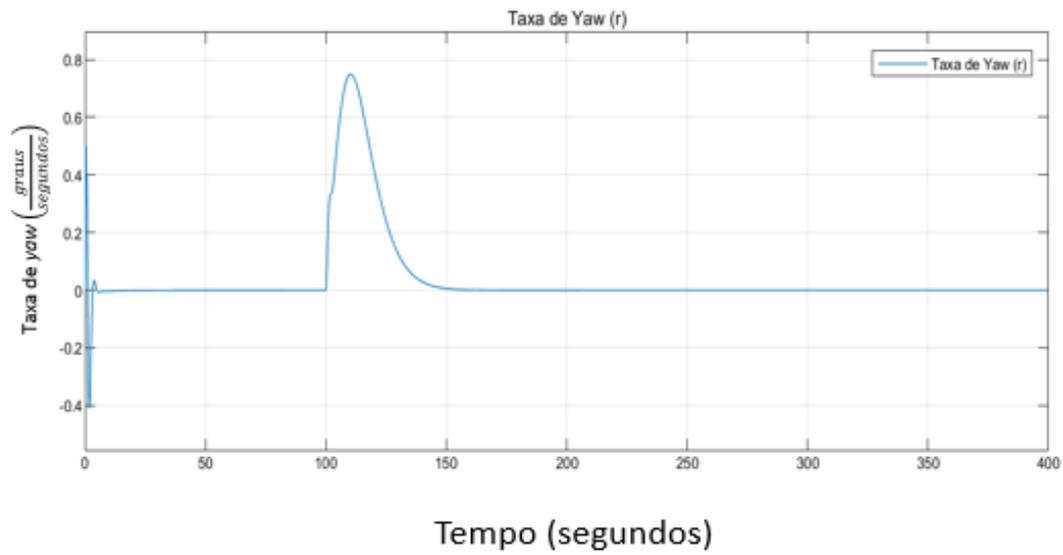
Para este controlador, consideraram-se os seguintes parâmetros do controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), para um ângulo *yaw* desejado de 15°.

Tabela 5 – Parâmetros controlador PID.

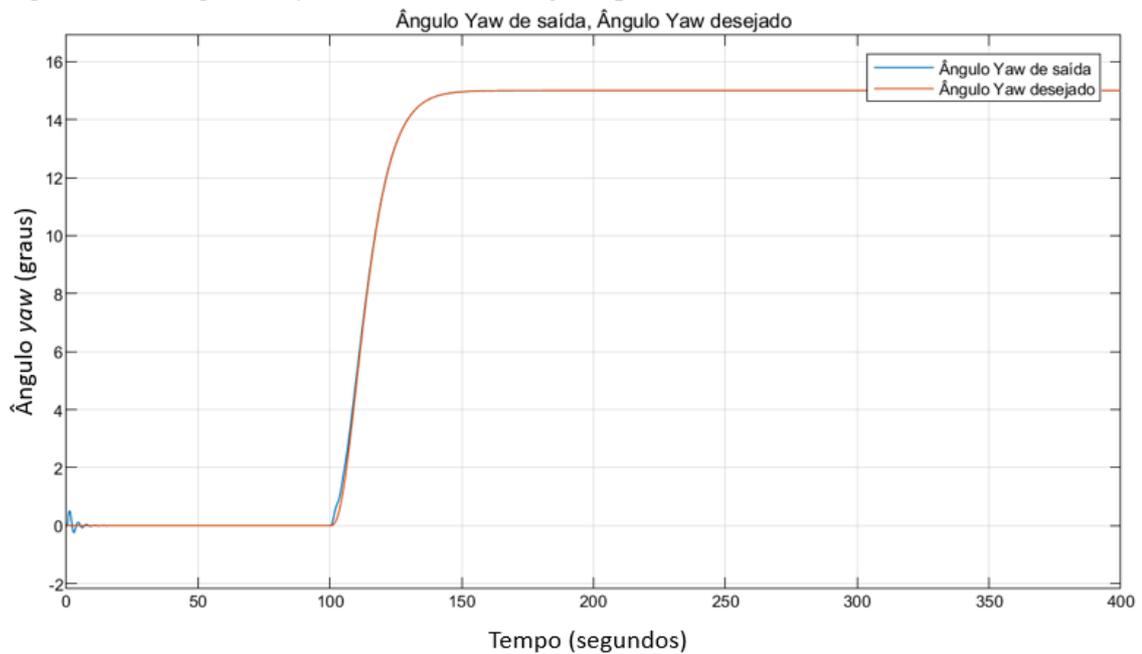
Constante de tempo de Nomoto (T)	5
Ganho de Nomoto (K)	1
Ganho Proporcional (P)	2
Tempo derivativo (T_d)	0.1
Tempo Integral (T_i)	1000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) se destacou por apresentar baixas oscilações tanto na taxa de *yaw* quanto no ângulo de *yaw*. A combinação dos termos proporcional, integral e derivativo resultou em uma resposta transitória otimizada, que é suave e bem controlada. No que tange ao erro em regime permanente, o controlador PID, assim como o PI, mostrou um desempenho exemplar, alcançando um erro nulo. Isso reforça sua capacidade de ajustar e estabilizar o sistema de maneira precisa, garantindo que o valor desejado seja atingido e mantido.

Figura 32 – Taxa de *yaw* para PID.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 33 – Ângulo de *yaw* de saída e desejado para PID.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Quadro 2 – Comparação de resultados.

Controlador	Resposta Transitória		Erro em Regime Permanente	
	Taxa de <i>Yaw</i> (rad/s)	Ângulo de <i>Yaw</i> (rad)	Taxa de <i>Yaw</i> (rad/s)	Ângulo de <i>Yaw</i> (rad)
Controlador P	Alta oscilação	Alta oscilação	Infinito	Infinito
Controlador PI	Alta oscilação	Média	Nulo	Nulo
Controlador PD	Alta oscilação	Alta oscilação	Infinito	Infinito
Controlador PID	Baixa oscilação	Baixa Oscilação	Nulo	Nulo

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A simulação realizada revelou características distintas para cada tipo de controlador analisado. Tais características são cruciais quando é considerada a necessidade de precisão e estabilidade em embarcações marítimas, especialmente em contextos de Guerra de Minas, onde o veículo autônomo pode precisar manter um ângulo de aproamento estável para cumprir sua missão. Com base nos gráficos gerados e apresentados, conclui-se que:

- a) Controladores P e PD: Estes controladores apresentaram oscilações significativas tanto na taxa de *yaw* quanto no ângulo de *yaw*. Na prática, tais oscilações podem resultar em manobras imprecisas e ineficientes. Oscilações constantes na direção podem comprometer a eficiência do AUV, consumindo mais energia e tornando a operação menos previsível. Além disso, o erro em regime permanente infinito indica que esses controladores não são capazes de estabilizar o AUV no valor desejado, um fator crítico para operações de detecção de minas;
- b) Controlador PI: A adição do termo integral trouxe melhorias na estabilidade do sistema, reduzindo a magnitude das oscilações. Na teoria de controle, o termo integral é frequentemente introduzido para eliminar o erro em regime permanente, proporcionando uma correção baseada no acúmulo histórico de erros;
- c) Controlador PID: Este controlador demonstrou ser o mais eficaz, com baixas oscilações e nulo erro em regime permanente. O termo derivativo contribui para prever as tendências futuras do sistema, agindo de forma preventiva contra. Assim, no contexto de aproamento, um controlador PID permite que a embarcação se ajuste rapidamente a perturbações, mantendo seu rumo de forma eficiente.

Para operações marítimas que exigem precisão e estabilidade, especialmente em missões críticas como a Guerra de Minas, recomenda-se o uso do controlador PID para o aproamento automático. Sua capacidade de fornecer uma resposta rápida e estável,

minimizando oscilações e eliminando erros em regime permanente, o torna o controlador mais adequado para tais operações.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, a aplicação da Engenharia de Sistemas foi vital para o correto entendimento das necessidades que um USV deve satisfazer para realizar missões ligadas as Contramedidas de Minagem. Além disso, a confecção dos diagramas em SysML apresentados, servirão de base para análises cada vez mais aprimoradas sobre o tópico. Adicionalmente, buscou-se exemplificar algumas possibilidades de design para o controle do leme que atendam a arquitetura proposta em SysML como as do REMUS100, enfatizando a relação que surge entre a necessidade e o design de um sistema. A fim de ilustrar essa relação, efetuou-se uma análise de sensibilidade de parâmetros de um controlador PID.

Desta forma, exemplificou-se como criar uma estrutura de trabalho que possibilite uma visão holística de missões CMM. Por fim, buscou-se contribuir para futuras pesquisas científicas, sobretudo na MB, na área de veículos autônomos e em seus subsistemas.

5.1 Sugestões para Futuros Trabalhos

Trabalhos futuros podem abranger a descrição de outras missões do USV em SysML e suas implicações na missão de CMM. Além disso, podem se aprofundar no detalhamento de outros sistemas, de forma a contribuir com essa tecnologia para os futuros meios da MB.

Da mesma forma, incentiva-se a exploração no estudo do aprendizado de máquina e outras técnicas de controle, com o objetivo de otimizar o desempenho e eficiência dos veículos autônomos.

REFERÊNCIAS

- ASTROM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers**. Princeton University Press, 2008.
- BAE, I.; HONG, J. Survey on the developments of unmanned marine vehicles: Intelligence and cooperation. **Sensors** (Basel, Switzerland), v. 23, n. 10, p. 4-18, 2023.
- BENJAMIN, M.R. *et al.* **An overview of moos-ivp and a brief users guide to the ivp helm autonomy software**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/45569/MIT-CSAIL-TR-2009-028.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- BOARD, O. **Oceanography and mine warfare**. [s.l.] National Academies Press, 2000.
- BRASIL. Marinha do Brasil. Estado-Maior da Armada. **EMA-305: Doutrina Militar Naval**. Brasília: EMA, 2017.
- CALDAS, L. H. S. **Controle de um navio autônomo para contramedidas de minagem utilizando o MOOS-IVP**. 2021. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/163b23ff-9638-402a-bd55-91250a044375/LUIS%20HENRIQUE%20SOUZA%20CALDAS%20TCC21.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.
- CANO, É. V.; CANO, P. L. G.; ENCINA, C.C.C.; MIOTO, C. L.; RIBEIRO, A. A.; PARANHOS-FILHO, A.C. Mapeamento de pesquisas relacionadas aos veículos de superfície não tripulado (USV). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. 1-11, 2022.
- CLARKE, D. The foundations of steering and manoeuvring. *In*: IFAC CONFERENCE ON MANOEUVRING AND CONTROL MARINE CRAFTS (MCMC). 6. 2003, Girona. **Anais [...]**. Girona: [s.n.] set. 2003. p. 10-25.
- DONG, L.; XU, H.. Design of heading control system for USV based on MOOS-IvP. *In*: IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2. 2017. [S.l.]. **Anais [...]**. [S.l.]: IEEE, 2017. p. 68-71.
- ESTADOS UNIDOS. US NAVY. **The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan**. Washington, DC: Department of the Navy. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA504867.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2023.
- FOSSSEN, T. I.; PEREZ, T. Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs. **IEEE control systems magazine**, v. 29, p. 32–46, 2009.
- FOSSSEN, T. I.; PEREZ, T. **Marine Systems Simulator (MSS)**. [S. l.], 2004. Lista mantida por GITHUB. Disponível em: <https://github.com/cybergalactic/MSS>. Acesso em: 15 jul. 2023.

FOSSEN, Thor. **Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Feedback Control of Dynamic Systems**. 7. ed. Pearson, 2014.

FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A. C.; STEINER, R. **A practical guide to SysML: The systems modeling language**. 2. ed. Oxford: Morgan Kaufmann, 2011.

GIAMMARCO, K.; SHEBALIN, P. **An instructional design reference mission: Tactical disc clearance system**. Monterey: Naval Postgraduate School, 2018.

GIL, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

HAREL, D. Statecharts: **A visual formalism for complex systems**. Science of computer programming, v. 8, n. 3, p. 231–274, 1987.

IMO. Annex: **Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (mass)**. Londres: IMO, 2021. MSC.1/Circ.1638.

LETOURNEAU, J. P. **Incorporating multi-criteria optimization and uncertainty analysis in the model-based systems engineering of an autonomous surface craft**. Monterey: Naval Postgraduate School, 2009.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisa; amostragens e técnicas de pesquisa; elaboração, análise e interpretação de dados**. 2012. p. 277-277.

MENDONÇA, Emerson Coelho. **Piloto automático de direção aplicada a um veículo autônomo submarino**. 2020.

MORGADO, M. N. Modelagem, **Identificação e Simulação da Dinâmica de um Pequeno Veículo Flutuante**. 2016. 82 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia, Universidade de Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/PG/2016/PG-Identificacao-Pequeno-Barco-2016.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Oceanography and Mine Warfare**. Washington, DC: National Academies Press, 2000.

NISE, N. S. Sistemas de Controle: **Teoria e Aplicações**. 5. ed. LTC, 2011.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, L. C. B. **Modelagem e Controle de um Veículo Aquático de Superfície**. 2013. 86 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília. 2013. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/8233/1/2013_LaraChristinaBragadeOliveira.pdf. Acesso em: 15 jul. 2023.

PADILHA, L. **Drones navais, armas letais!** In: Wiltgen, G.; Padilha, L. Defesa Aérea e Naval, 22 maio 2023. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/drones-navais-armas-letais>. Acesso em: 25 jun. 2023.

PEREZ, T. **Ship motion control: Course keeping and roll stabilisation using rudder and fins.** Londres: Springer, 2005.

PEREZ, T.; SMOGELI, N, FOSSEN, T. I.; SØRENSEN A. J. An overview of the marine systems simulator (MSS): **A Simulink toolbox for marine control systems.** Modeling Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin, v. 27, n. 4, p. 259–275, 2006.

SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers). Alexandria, EUA: SNAME, c2023. Disponível em: <https://www.sname.org/>. Acesso em: 18 out. 2023.

SILVA LIMA, Almirante de Esquadra. **2º Congresso Internacional de Contramedidas de Minagem.** YouTube. 05 de novembro de 2019. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=C10Iq7VgT1g&ab_channel=TonyAvilaProdu%C3%A7%C3%B5esAudiovisuais. Acesso em: 05 de julho de 2023.

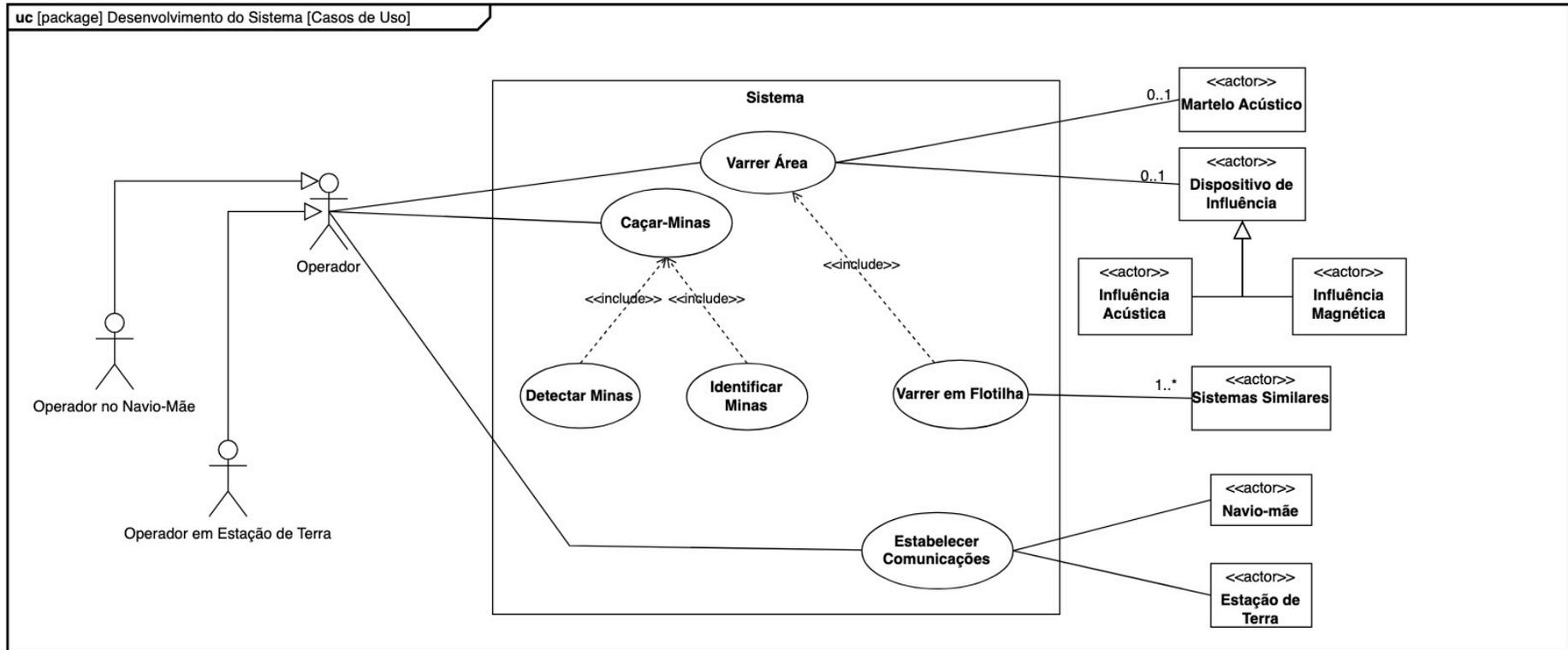
SOUSA, Davi Juvêncio Gomes de et al. **Modelagem e controle de um veículo aquático de superfície autoguiado.** 2018.

VOGT, René. **Guerra de minas.** Revista Marítima Brasileira, v. 139, n. 10/12, p. 126-142, 2019.

WEILKIENS, Tim. **Systems engineering with SysML/UML: modeling, analysis, design.** Elsevier, 2011.

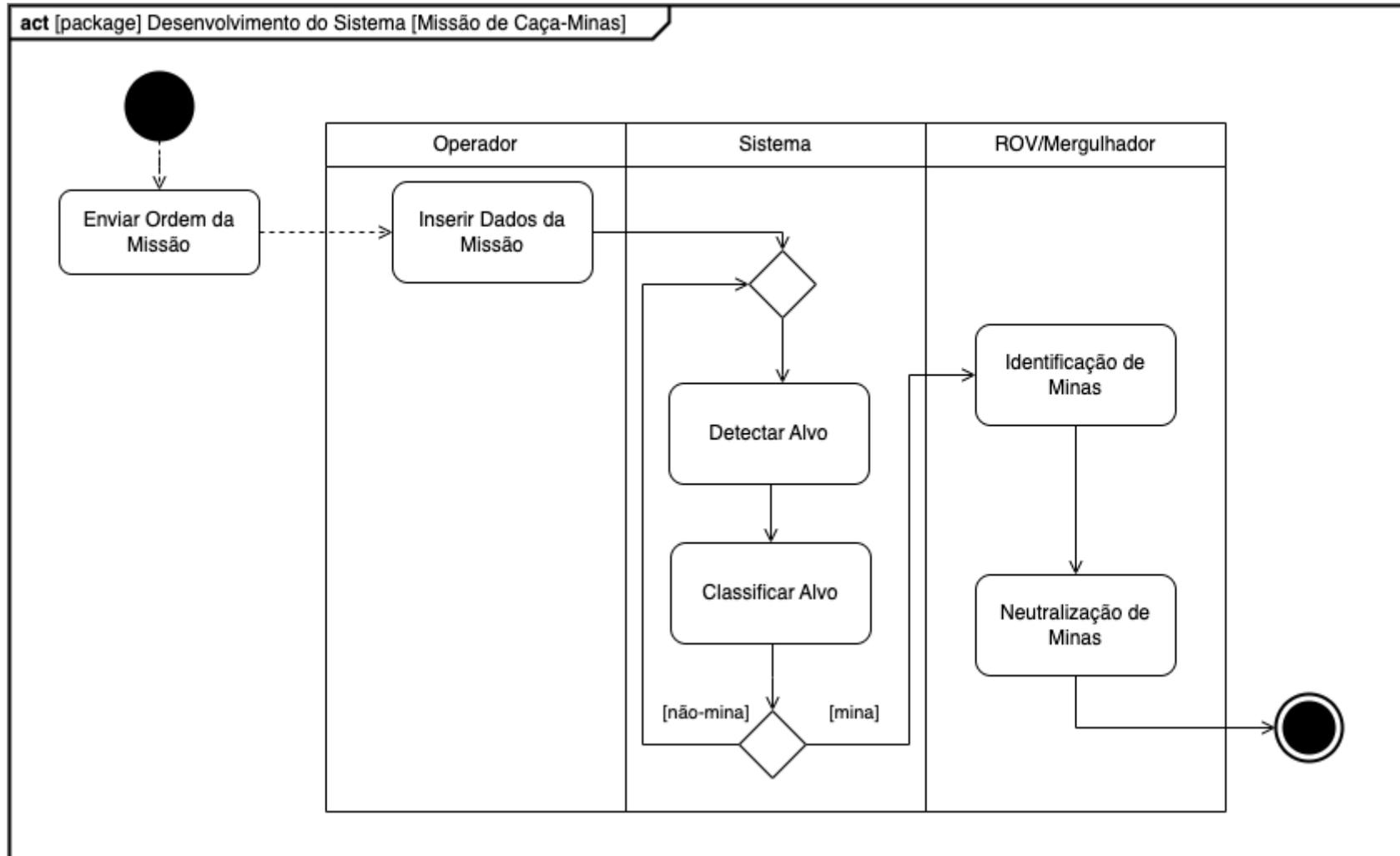
YOSHIMATSU, E. S.; MOREIRA, L. G. L. **Piloto automático para embarcações.** 2013. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

APÊNDICE A – Diagrama de Casos de Uso



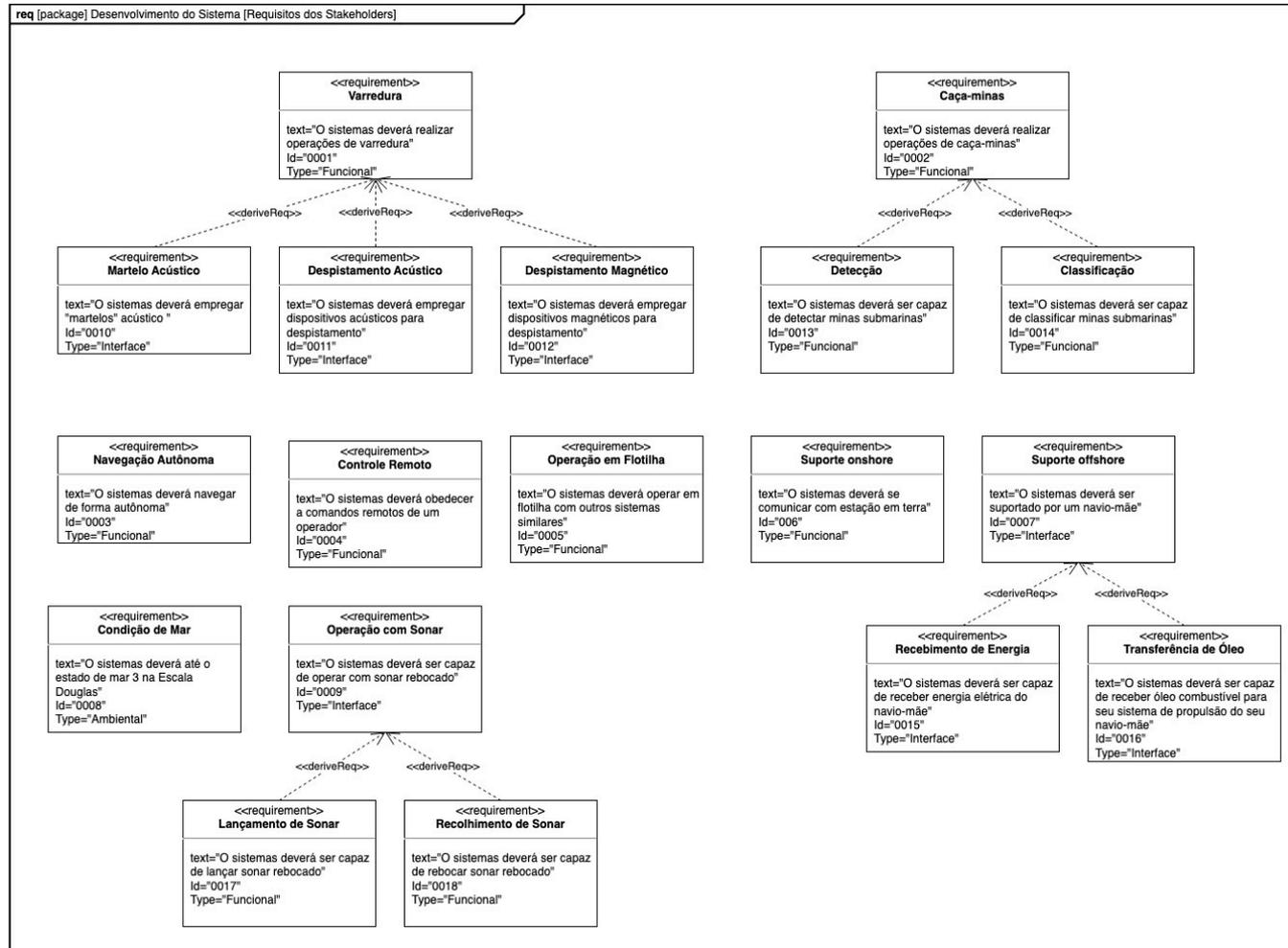
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE B – Diagrama de Atividades



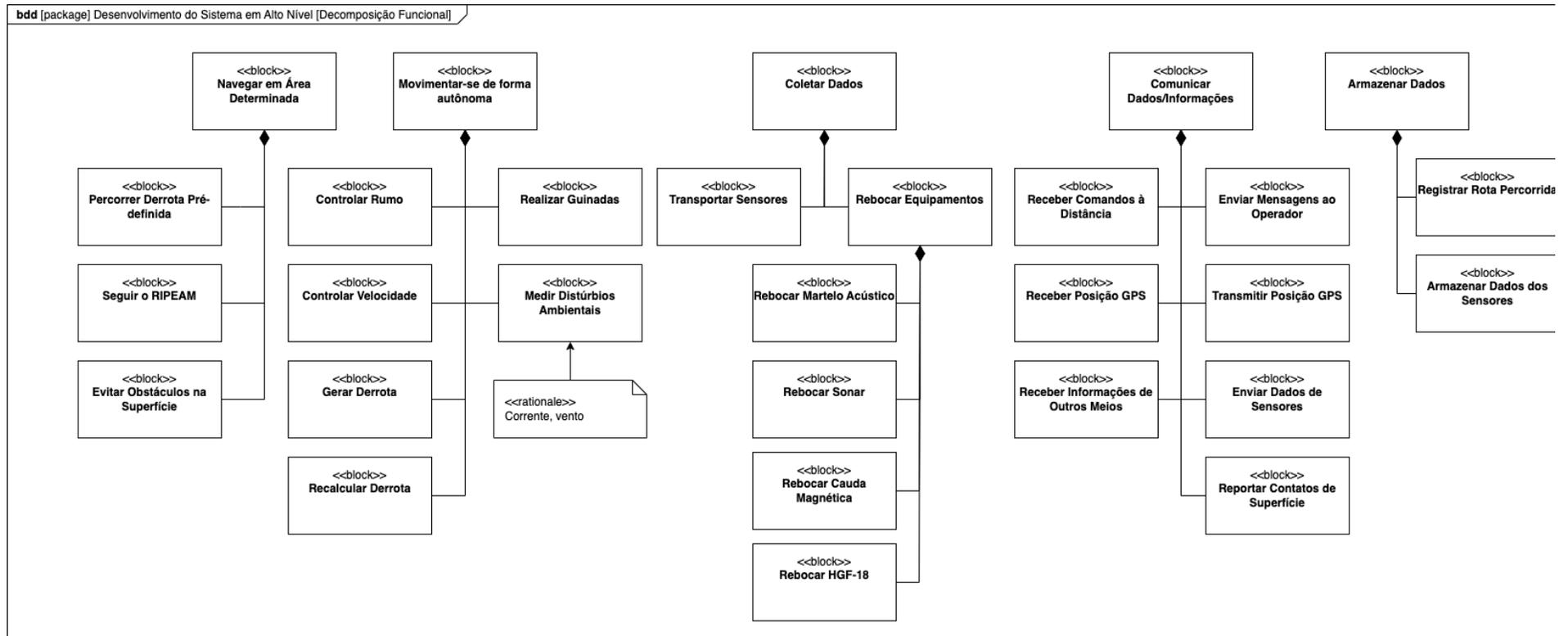
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE C – Diagrama de Requisitos dos Stakeholders



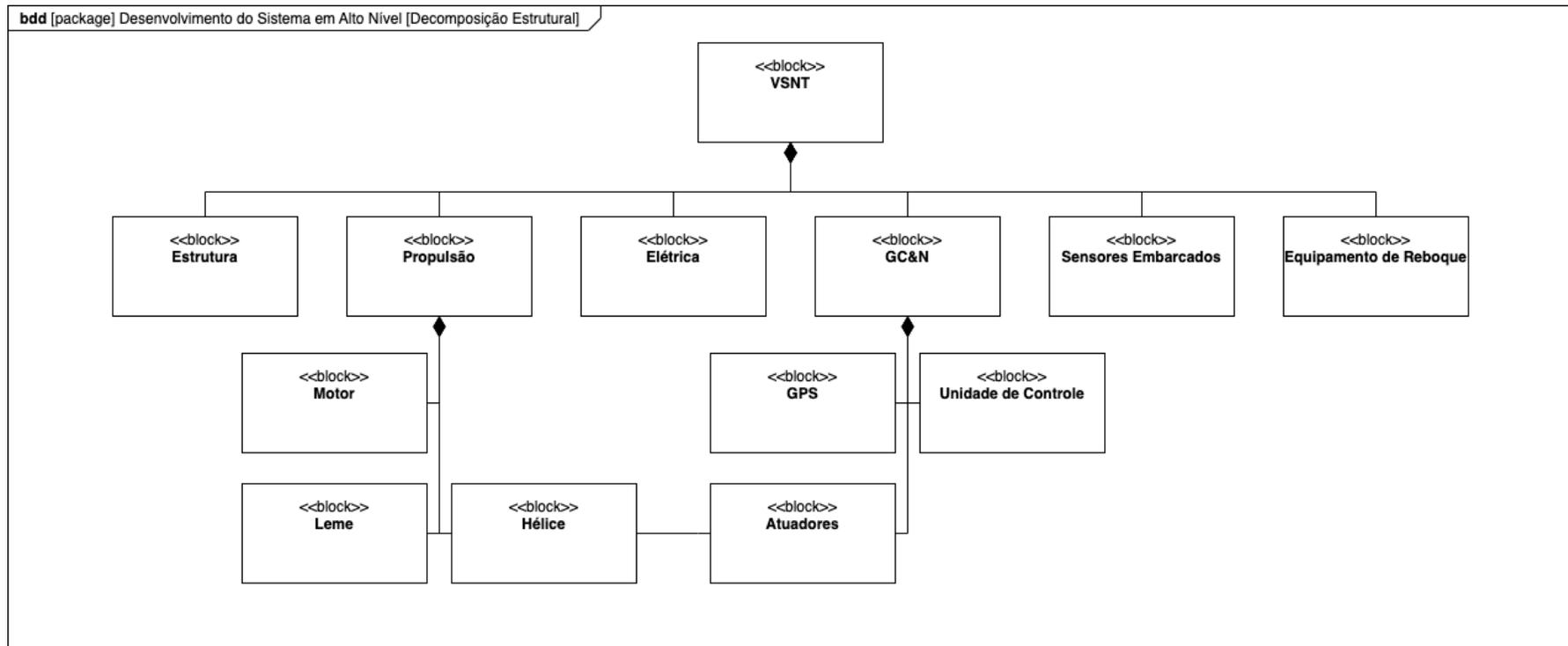
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE D – Diagrama de Decomposição Funcional



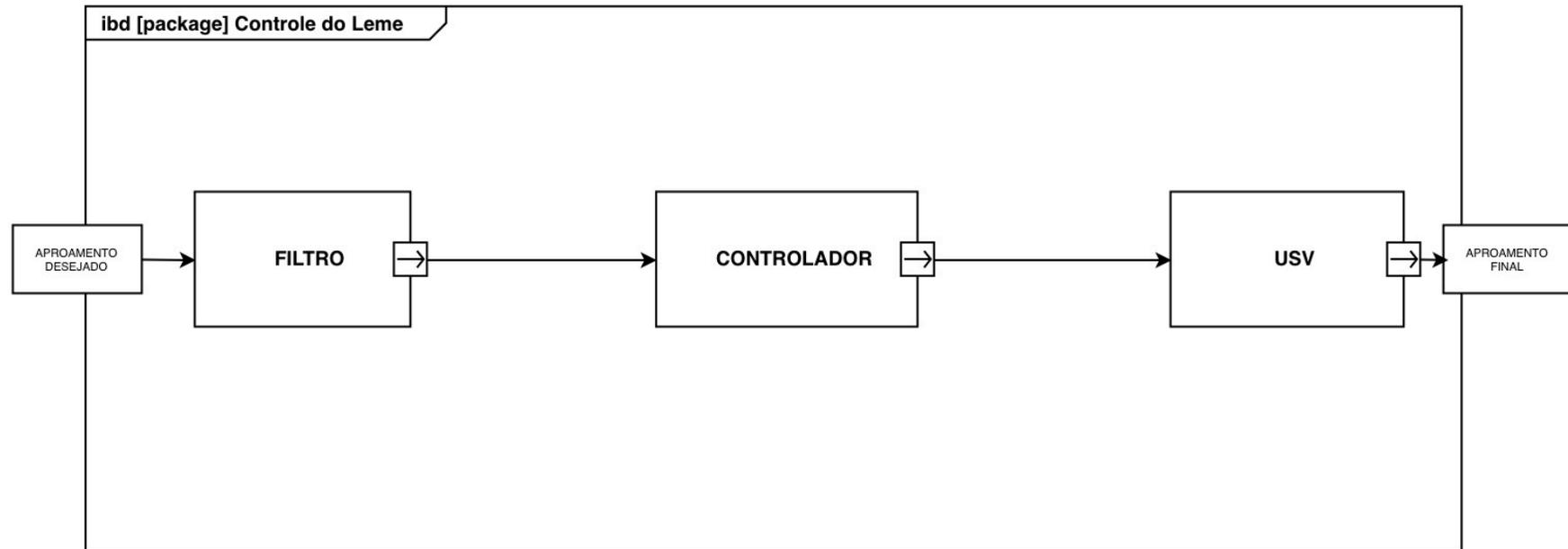
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE E – Diagrama de Decomposição Estrutural



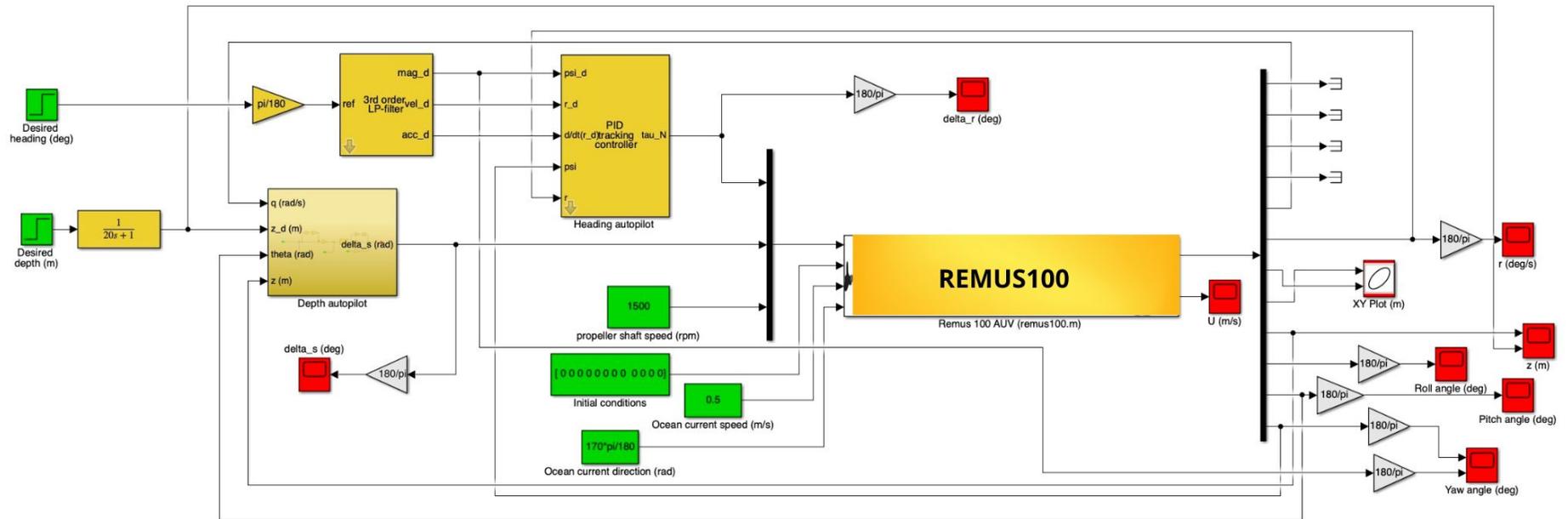
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE F – Diagrama Interno de Blocos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE G – SIMULINK REMUS100



Depth and heading control systems for the Remus 100 AUV.
 Simulink interface to the MSS m-file remus100.m.
 Author: Thor I. Fossen
 Sun Apr 23 08:18:43 2023

ANEXO A–REQUISITOS DE ALTO NÍVEL DE PROJETO

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 CONTRA MEDIDAS 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 RAIO 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, conforme 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 abordo, 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 caçar 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 Amazonas, 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**
- h. **Assinaturas** – Deverão ser ressaltadas as características do projeto destinadas ao cumprimento das tarefas primárias e secundárias.
- i. **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.
- j. **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 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.
- k. **Auxiliares** – O navio deve estar em conformidade com o necessário para uma embarcação autônoma.
- l. **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. Devem-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.

- m. **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.
- n. **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.
- o. **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.
- p. **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.
- q. **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.
- r. **Interoperabilidade** – é provável que a embarcação opere como parte de uma força-tarefa multinacional e, portanto, devem ser consideradas as características

queiram maximizar sua interoperabilidade ao longo da vida.

- s. **Modularidade** – É incentivada a construção modular, a fim de prover flexibilidade de configuração e de transporte.

- t. **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.

- u. **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.