

**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**

**VEÍCULOS DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADOS NA MARINHA DO BRASIL**



**PRIMEIRO-TENENTE RODRIGO SOUZA DA SILVA**

**CIAA**

**Rio de Janeiro**

**2023**

PRIMEIRO-TENENTE RODRIGO SOUZA DA SILVA

VEÍCULOS DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADOS NA MARINHA DO BRASIL

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

Orientadores:

D.Sc Luiz Antônio Vaz Pinto

CT (EN) Luiz Renato Tomelin

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE RODRIGO SOUZA DA SILVA

VEÍCULOS DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADOS NA MARINHA DO BRASIL

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:

Carlos Martins, CC (RM1-EN) – CIAA

\_\_\_\_\_

Luiz Antônio Vaz Pinto, D.Sc – UFRJ

\_\_\_\_\_

Luiz Renato Tomelin, CT (EN) – DEN

\_\_\_\_\_

# RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso visa explorar o papel em evolução dos Veículos de Superfície Não Tripulados (VSNTs) na Marinha do Brasil, uma instituição que tem buscado a modernização de suas capacidades operacionais e estratégicas em resposta aos desafios crescentes no ambiente marítimo. Os VSNTs representam uma tecnologia disruptiva que está sendo incorporada em várias áreas da defesa marítima, desde a vigilância costeira até operações de resposta a derramamentos de óleo, pesquisa científica e muito mais. Este estudo analisa o uso atual de VSNTs pela Marinha do Brasil, destacando suas aplicações, vantagens e desafios.

**Palavras-Chave** – Marinha do Brasil, Navios Autônomos, Guerra de Superfície.

# ABSTRACT

This final course work aims to explore the evolving role of Unmanned Surface Vehicles (USVs) in the Brazilian Navy, an institution that has sought to modernize its operational and strategic capabilities in response to growing challenges in the maritime environment. USVs represent a disruptive technology that is being incorporated in various areas of maritime defense, from coastal surveillance to oil spill response operations, scientific research, and much more. This study analyzes the current use of USVs by the Brazilian Navy, highlighting their applications, advantages, and challenges.

**Keywords** – Brazilian Navy, Autonomous Ships, Surface Warfare.

# LISTA DE FIGURAS

1	Amazônia Azul (1) . . . . .	10
2	USNS Apalachicola (2) . . . . .	11
3	VSNT-LAB (Veículo de Superfície Não Tripulado Laboratorial) . . . . .	12
4	Arquitetura de um USV (3) . . . . .	15
5	<i>The Soleil</i> (4) . . . . .	16
6	Estrutura comum de um sistema GNC (5) . . . . .	17
7	6 graus de liberdade de um navio (6) . . . . .	18
8	Variáveis de um navio seguindo uma linha reta (6) . . . . .	20
9	Diagrama de blocos de um controlador PID (7) . . . . .	21
10	Sistema de Posicionamento Dinâmico de um Navio (8) . . . . .	22
11	Sistema Global de Navegação por Satélite (9) . . . . .	23
12	Navio autônomo varredor de minas da Marinha Real Britânica (10) . . . . .	24
13	VSNT-LAB utilizando sonar de varredura lateral . . . . .	24
14	Embarcação de pesquisa hidrográfica autônoma M40 (11) . . . . .	25
15	Um USV armado com ULAQ do Estaleiro ARES e Meteksan(12) . . . . .	26
16	Cama-maca de resgate aquático (13) . . . . .	27
17	VSNT-LAB (Veículo de Superfície Não Tripulado Laboratorial) (14) . . . . .	29
18	VSNT-Lab na Operação Aspirantex (15) . . . . .	29
19	VSNT na LAAD 2023 (16) . . . . .	30
20	USV Tupan (17) . . . . .	31
21	Imagem de um sonar de varredura lateral (18) . . . . .	32
22	Exercício de ameaça assimétrica (19) . . . . .	33
23	Tela do CITRA apresentando dados sobre embarcação(20) . . . . .	34

24	Operação Anfíbia (21)	34
25	Drone utilizado na guerra entre Ucrânia e Rússia (22)	39
26	Controlador PID	46
27	Controlador sem o componente Proporcional	47
28	Controlador PD	48
29	Controlador PI	49

# LISTA DE SIGLAS

**VSNT** Veículos de Superfície Não Tripulados

**DEN** Diretoria de Engenharia Naval

**MB** Marinha do Brasil

**AUV** Veículo Autônomo Subaquático

**USV** *Unmanned Surface Vehicles*

**MIT** *Massachusetts Institute of Technology*

**GPS** *Global Positioning System*

**GNC** *Guidance, Navigation and Control*

**CMM** Contramedidas de Minagem

**MN** Milhas Náuticas

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>10</b>
1.1	Apresentação do Problema . . . . .	11
1.2	Justificativa e Relevância . . . . .	12
1.2.1	Interesse econômico e social . . . . .	12
1.2.2	Mérito técnico e científico . . . . .	13
1.3	Objetivos . . . . .	13
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	13
1.3.2	Objetivo Específicos . . . . .	14
1.4	Organização da Monografia . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>15</b>
2.1	Sistemas GNC . . . . .	16
2.2	Planejamento de Trajetória . . . . .	18
2.3	Sistemas de Governo . . . . .	19
2.3.1	<i>Line-of-sight</i> . . . . .	19
2.4	Controle de Trajetória . . . . .	20
2.5	Controlador PID . . . . .	21
2.6	Posicionamento Dinâmico . . . . .	22
2.7	Sistema de Navegação . . . . .	23
2.8	Utilização dos VSNTs . . . . .	23
2.8.1	Contra-medidas de Minagem (CMM) . . . . .	23
2.8.2	Hidrografia . . . . .	25
2.8.3	Vigilância e Reconhecimento . . . . .	25
2.8.4	Busca e Salvamento . . . . .	26

<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>28</b>
3.1	Classificação da Pesquisa . . . . .	28
3.2	Veículos de Superfície Não Tripulado na Marinha do Brasil . . . . .	28
3.3	Veículos de Superfície Não Tripulado na Sociedade Brasileira . . . . .	30
3.4	Propostas de uso do VSNT-LAB na Marinha do Brasil . . . . .	31
3.4.1	Localização de Objetos no Fundo . . . . .	31
3.4.2	Ameaças Assimétricas . . . . .	33
3.4.3	Levantamento de Praia . . . . .	34
3.4.4	Navegação Autônoma para Transporte . . . . .	35
3.5	Normatização . . . . .	36
3.6	Impacto e Benefícios dos VSNTs na Marinha do Brasil . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>39</b>
4.1	Considerações Finais . . . . .	39
4.2	Sugestões para futuros trabalhos . . . . .	40
	<b>Referências</b>	<b>41</b>
	<b>Apêndice A – Código PID</b>	<b>44</b>
	<b>Apêndice B – Controlador PID</b>	<b>46</b>
	<b>Apêndice C – Controlador sem o componente Proporcional</b>	<b>47</b>
	<b>Apêndice D – Controlador PD</b>	<b>48</b>
	<b>Apêndice E – Controlador PI</b>	<b>49</b>

# 1 INTRODUÇÃO

*“Aquele que comanda o mar, comanda todas as coisas”*

-- Alfred Mahan

Devido às suas características continentais, o Brasil dispõe de uma vasta extensão territorial marítima que contém vastas riquezas naturais e minerais. Esse espaço foi designado como Amazônia Azul (23), em uma alusão à floresta Amazônica.

	área em km <sup>2</sup>
Área total	5.669.512
Zona Econômica Exclusiva	3.574.811
Extensão da Plataforma Continental	2.094.701
• Ilhas e arquipélagos	

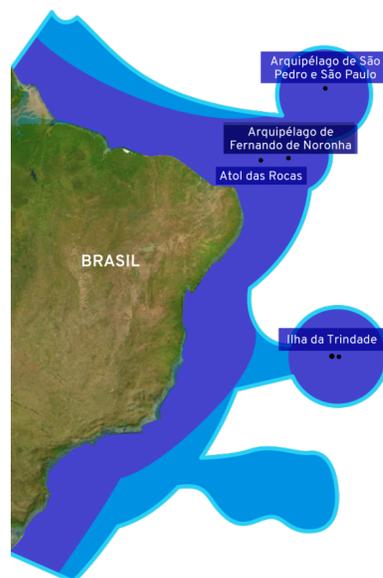


Figura 1: Amazônia Azul (1)

Em vista da importância estratégica da vasta extensão territorial marítima brasileira, investimentos na área da defesa se mostram necessários. A disponibilidade de meios militares adequados é fundamental, a fim de dissuadir potenciais invasões ou reivindicações por parte de atores estrangeiros.

Com o objetivo de aprimorar suas capacidades, as forças navais de várias nações

vêm empreendendo grandes esforços no sentido de desenvolver a tecnologia de navios autônomos. Conforme reportado em (24), em 8 de junho de 2022, a Marinha chinesa concluiu o primeiro teste em ambiente marítimo de seu primeiro navio de superfície autônomo. A Marinha dos Estados Unidos da América, por sua vez, encontra-se em um estágio mais avançado desse processo de desenvolvimento, conforme relatado em (25), com a utilização de protótipos de veículos não tripulados em missões de busca de minas submarinas desde a década de 1990.



Figura 2: USNS Apalachicola (2)

O USNS Apalachicola, atualmente, é considerado um dos veículos autônomos mais sofisticados da Marinha dos Estados Unidos da América. Este equipamento naval possui a capacidade de operar de forma autônoma, sem a intervenção humana, por um período de 30 dias consecutivos (2).

## 1.1 Apresentação do Problema

Veículos de superfície não tripulados militares (*VSNT*) estão se tornando cada vez mais presentes por diversas razões. Eles oferecem várias vantagens em relação a navios tripulados, incluindo menor risco para o pessoal, maior flexibilidade operacional e menores custos operacionais. Uma das principais vantagens dos VSNTs militares é a sua capacidade de operar em ambientes perigosos. Isso permite que tarefas de alto risco para navios tripulados, como varredura de minas ou missões de reconhecimento, sejam executadas sem necessidade de assumir risco de perda de pessoal. Além disso, veículos não tripulados militares podem permanecer em missão por períodos prolongados sem a necessidade

de retornar ao porto, aumentando sua flexibilidade operacional e permitindo que sejam usados para uma ampla gama de missões com pouca previsibilidade de retorno, como vigilância e interdição. Quanto a custos operacionais, embora navios tripulados sejam de grande importância nos tempos atuais, estes têm um alto custo, e abrangem desde custos de treinamento de tripulação a sustento e manutenção do meio. Isso torna os VSNTs uma opção atraente para as organizações militares que buscam maximizar seu poder de vigilância dada a limitação de recursos.



Figura 3: VSNT-LAB (Veículo de Superfície Não Tripulado Laboratorial)

O desenvolvimento de tecnologias autônomas ultimamente está dando seus grandes passos, e a indústria naval deve seguir essa tendência. A lancha autônoma VSNT-LAB da Marinha do Brasil representa um importante passo à frente nesta direção, combinando avanços na robótica e sistemas de controle para criar uma embarcação capaz de realizar tarefas sem a necessidade de tripulação a bordo.

## 1.2 Justificativa e Relevância

### 1.2.1 Interesse econômico e social

Nos últimos anos houve um aumento significativo de orientações acadêmicas para trabalhos nos diferentes níveis (graduação, aperfeiçoamento e capacitação) que envolveram o

tema “veículos autônomos” em cursos de Oficiais e Servidores Civis da Marinha do Brasil. Em especial, destacamos o curso de graduação de Engenheiros Navais na Poli-USP que conta com a orientação técnica da DEN (Diretoria de Engenharia Naval) onde, nos últimos anos, oficiais da MB escolheram temas de projeto relacionados a embarcações autônomas. Veículos autônomos marítimos são verdadeiros Hubs de ciência e tecnologia, embarcando pesquisas e soluções provenientes de múltiplas áreas como: hidrodinâmica, mecatrônica, controle e automação, inteligência artificial, modelagem e simulação, hidrografia e meteorologia.

Dessa forma, o incentivo público ou privado no sentido de proporcionar e conservar uma lancha de pesquisa seria bastante proveitoso na produção de conhecimento na área de veículos autônomos marítimos. Ressalta-se que os veículos autônomos submarinos (AUV) já estão presentes na MB através do AUV REMUS-100 do CHM, também adquirido com recursos de fomento à pesquisa e, não fosse a iniciativa, talvez ainda desconhecêssemos o real potencial e aplicação deste tipo de plataforma submarina em missões de coleta de dados oceanográficos, levantamentos hidrográficos, e localização de objetos no fundo.

### **1.2.2 Mérito técnico e científico**

As tecnologias envolvidas na Indústria 4.0, na Maritime 4.0 e na Defesa 4.0 são altamente complexas e multidisciplinares, o que as torna áreas atraentes para pesquisa acadêmica. O interesse acadêmico não se limita ao desenvolvimento de tecnologias, mas também a investigação das implicações éticas e sociais dessas tecnologias, além de implicações políticas e econômicas. Justificado o interesse acadêmico, o trabalho que estamos desenvolvemos se torna relevante e proveitoso para estudos posteriores. Quanto ao desenvolvimento tecnológico, no entanto, a concretização e implementação de algoritmos de controle, ou realização de experimentos com plataformas em escala real para pesquisadores se torna muito complexa e pouco comum no ambiente universitário pois requerem equipamentos muito caros e de difícil complexidade de operação, principalmente os marítimos que requerem grande estrutura logística.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Discorrer a respeito da fundamentação teórica e normatização a respeito de veículos de superfície não tripulados na Marinha do Brasil, de forma a contribuir para futuros

trabalhos é o objetivo geral deste trabalho.

### 1.3.2 Objetivo Específicos

Entre os pontos que este trabalho deseja destacar temos:

- Avaliar o papel e a importância dos veículos de superfície não tripulados (VSNTs) na Marinha do Brasil em operações marítimas, patrulhamento, vigilância e outras atividades.
- Investigar as tecnologias e sistemas utilizados em VSNTs pela Marinha do Brasil.
- Estudar casos de uso específicos de VSNTs na Marinha do Brasil, como missões de contramedidas de minagem, hidrografia, vigilância e reconhecimento, busca e salvamento, guerra anti-submarina, logística e reabastecimento, guerra eletrônica, operações contra a pirataria e tráfico de drogas além de auxílio de operações especiais.
- Verificar as possibilidades de integração de VSNTs com outros ativos navais, como navios de superfície, submarinos e aeronaves, visando melhorar a interoperabilidade e a capacidade de resposta em operações conjuntas.
- Analisar as regulamentações relacionadas ao uso de VSNTs no âmbito global e da Marinha do Brasil.
- Realizar uma revisão crítica da capacidade atual da Marinha do Brasil em relação aos VSNTs e fornecer sugestões para futuros desenvolvimentos e aquisições.

## 1.4 Organização da Monografia

Inicialmente, delinearemos os objetivos deste estudo. Em seguida, procederemos a uma análise bibliográfica das estratégias empregadas em artigos acadêmicos recentes relativos a embarcações autônomas. Posteriormente, forneceremos um breve resumo teórico sobre a estrutura GNC, algoritmos adotados em seus subsistemas e suas respectivas utilidades. Apresentaremos então a metodologia a ser empregada no decorrer deste trabalho. Por fim, concluiremos a avaliação abordando o estudo em sua totalidade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Veículos de Superfície Não-Tripulados ou USV (*Unmanned surface vehicle*) não necessitam do advento do operador local para o seu funcionamento, sendo assim operadas remotamente ou agindo de forma autônoma segundo algum algoritmo ou missão pré-definida. Conforme introduzido por (26), as primeiras embarcações autônomas foram desenvolvidas pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) em 1993, o primeiro protótipo desenvolvido foi chamado *ARTEMIS* e tinha como objetivo a coleta de dados batimétricos fluviais. O avanço de tecnologias de posicionamento global como o GPS (*Global Positioning System*) e sistemas de banda larga sem fio de longo alcance foram fatores cruciais para o crescimento do uso de embarcações autônomas em diversas aplicações.

De acordo com (27), existem inúmeros tipos de USV, cada um servindo o seu respectivo propósito, sendo que existem elementos fundamentais em comum entre eles que incluem o sistema de abastecimento, GNC (*Guidance, Navigation and Control*), estrutura do casco, sistemas de comunicação e de aquisição de dados.

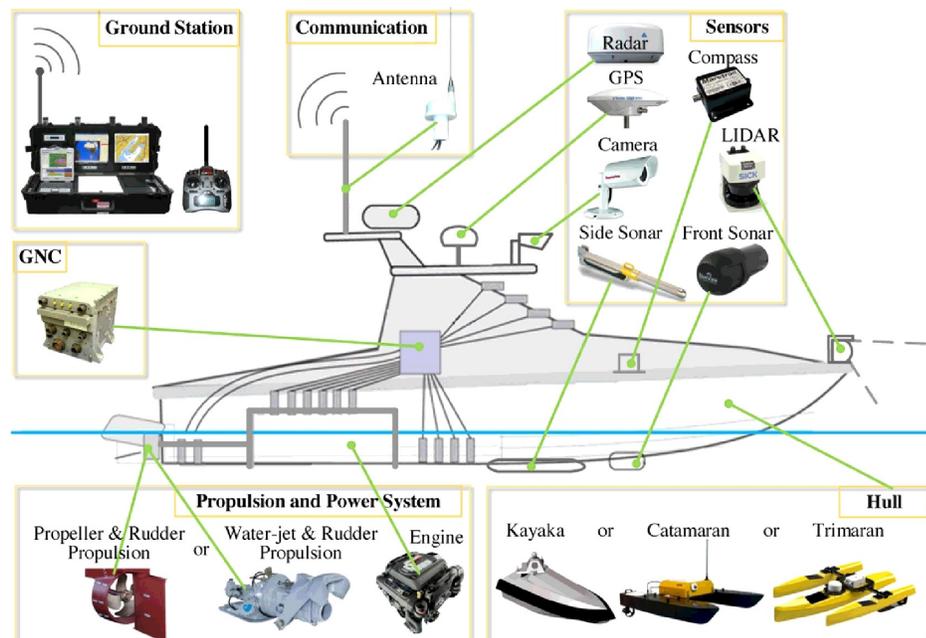


Figura 4: Arquitetura de um USV (3)

As pesquisas em Veículos de Superfície Não-Tripulados (VSNT) estão em ritmo avançado

nos principais atores mundiais em diversos setores. Diariamente, publicam-se novos testes envolvendo esta tecnologia. Em janeiro de 2022, uma balsa de carro japonês chamada *The Soleil* se tornou a primeira grande embarcação a navegar sem intervenção humana.



Figura 5: *The Soleil* (4)

Devido à problemas de redução de trabalhadores para funções em navios causados principalmente pelo envelhecimento da força de trabalho, desde 2020 o Japão vem empreendendo esforços no chamado projeto MEGURI 2040 (28). O projeto tem como objetivo a navegação autônoma completa dos navios, sem a intervenção humana, sendo a balsa *The Soleil* anteriormente citada parte desse projeto.

Visando à evolução de seus meios, forças navais de diversos países vêm investindo grandes esforços no desenvolvimento da tecnologia de navios autônomos semelhantemente ao projeto MEGURI 2040.

## 2.1 Sistemas GNC

Um sistema GNC (Guidance, Navigation and Control) é o responsável pelo controle autônomo ou remoto de um veículo, seja ele aéreo, submarino ou de superfície. Em 1908 o advento da invenção da Bússola Giroscópica foi possível a implementação de sistemas de controle de malha fechada para um aproamento estabilizado do navio. Um grande avanço para esses sistemas foi também a invenção de sistemas satelitais globais como por exemplo o GPS (*Global Positioning System*).

Um sistema GNC é constituído a partir de três sistemas interligados:

- Governo (*Guidance*): Baseado em dados do sistema de navegação, ambiente e tipo

de missão, calcula de forma contínua os valores desejados de rumo e velocidade. O sistema de controle é alimentado a partir desses dados (5).

- Navegação (*Navigation*): É o sistema responsável por determinar a posição, rumo e distância percorrida da embarcação. Geralmente utiliza Sistemas de Navegação por Satélite (GNSS) para efetuar esse cálculo de posição.
- Controle (*Control*): A partir de dados provenientes do sistema de navegação, e valores de referência do sistema de governo ele determina os esforços de controle necessários para o navio atingir seu objetivo determinado (5).

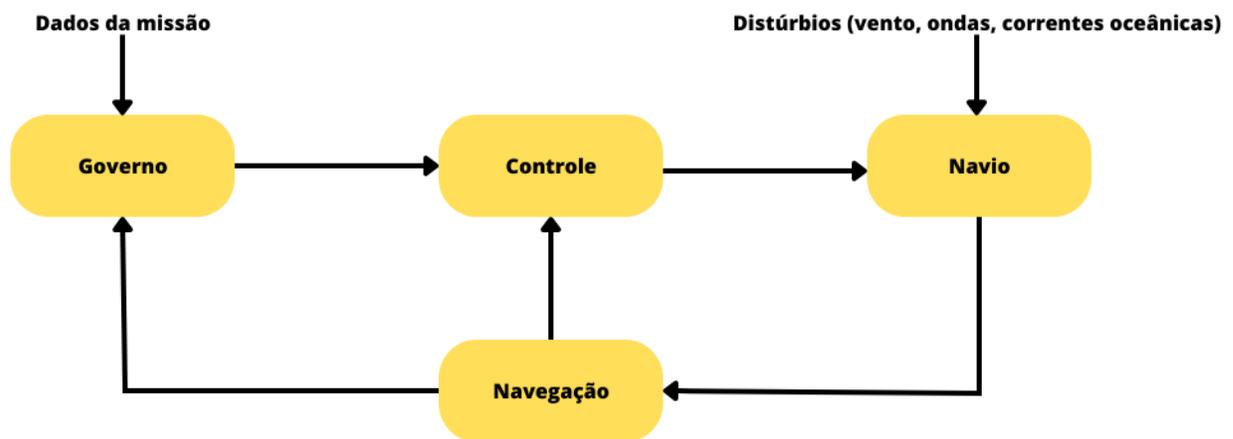


Figura 6: Estrutura comum de um sistema GNC (5)

Um navio se movendo no espaço possui 6 graus de liberdade, sendo 3 lineares que chamamos de *surge*, *sway* e *heave*, e 3 angulares chamados de *roll*, *pitch* e *yaw* (5).

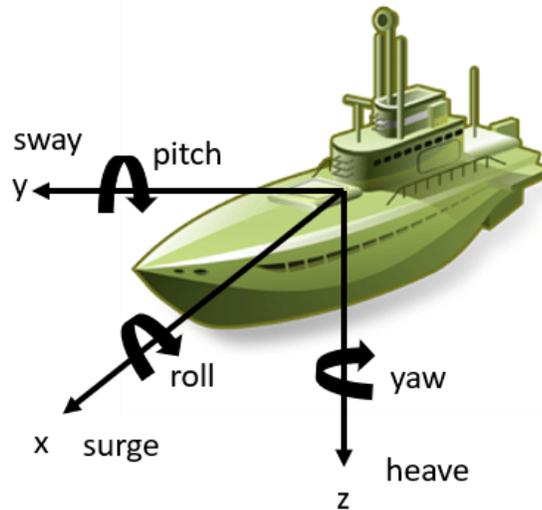


Figura 7: 6 graus de liberdade de um navio (6)

Podemos assumir que um navio apenas possui seu movimento atrelado a um plano horizontal, portanto consideramos somente 3 graus de liberdade (*surge*, *sway* e *yaw*) que definem quais movimentos podemos controlar. Um piloto automático de rumo atua apenas no movimento de *yaw*, sendo assim necessário apenas 1 atuador para a realização desse movimento (leme). Se desejarmos realizar um controle do navio com o objetivo de seguir uma trajetória apenas precisamos controlar os movimentos de *surge* e *yaw* do mesmo, o que solicita o uso mínimo de 2 atuadores (leme e propulsor).

## 2.2 Planejamento de Trajetória

Existem duas categorias principais de abordagens no planejamento de trajetória: aquelas que se concentram na escala global e as que operam em nível local. As estratégias de planejamento global têm como principal objetivo a definição de pontos de referência, chamados de waypoints, para direcionar a rota do veículo e assegurar a execução de sua missão. Por outro lado, as abordagens de planejamento local se concentram na determinação da orientação e das velocidades necessárias para que o veículo alcance os alvos estabelecidos pela estratégia global.

No contexto do planejamento global, destacam-se técnicas consagradas, tais como Campos Potenciais Artificiais, Redes Neurais e Algoritmo Genético, que são amplamente empregadas na geração de trajetórias. Quando se trata do planejamento em nível local, a

técnica mais prevalente é a abordagem conhecida como Linha-de-Visão (Line-of-Sight).(3)

## 2.3 Sistemas de Governo

As abordagens de planejamento no âmbito do sistema de governo podem ser classificadas como de natureza global ou local. No contexto global, a ênfase recai na criação de um percurso definido, que pode ser representado por meio de pontos de referência, como waypoints, que a embarcação deverá seguir. Já as abordagens locais concentram-se na elaboração de trajetórias específicas, compreendendo não apenas a orientação a ser seguida, mas também as velocidades necessárias, de modo a guiar a embarcação ao longo de um trajeto específico. Esse trajeto pode ser inserido manualmente pelo operador ou ser gerado automaticamente por meio de uma técnica global. A adoção de um planejamento híbrido, que combina abordagens globais e locais, representa uma estratégia eficaz para reforçar tanto a segurança quanto a eficiência do sistema de governo.(3)

### 2.3.1 *Line-of-sight*

A técnica *Line-of-Sight*(LOS) é amplamente empregada com êxito em sistemas de governo.(3)

Considere  $\psi$  como a orientação atual da embarcação e  $\psi_s$  como a direção do curso desejado, que é determinada como a linha reta entre o *waypoint* anterior e o próximo. O erro transversal  $e$  é a menor distância entre o centro de gravidade da embarcação e a trajetória desejada, enquanto o erro de aproamento pode ser definido como a diferença entre o rumo atual do navio e o rumo desejado.(29)

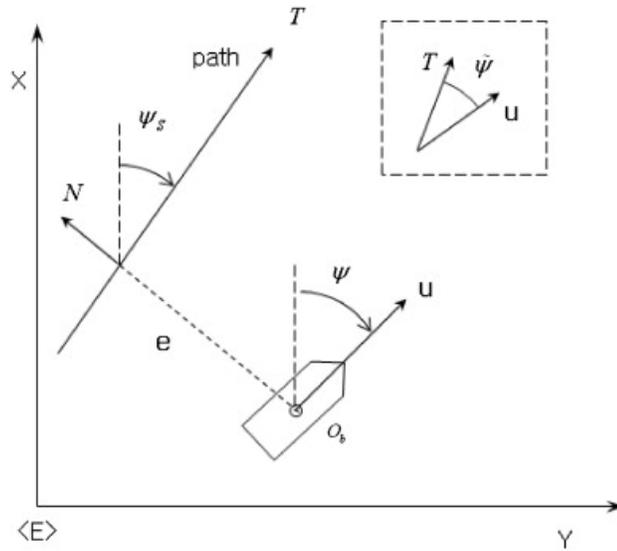


Figura 8: Variáveis de um navio seguindo uma linha reta (6)

## 2.4 Controle de Trajetória

Dentro da literatura, é possível encontrar uma variedade de técnicas avançadas de controle, tais como Controle Adaptativo (AC), Linearização de Feedback (FLC) e Controle de Lógica Difusa (FLC), que são empregadas no controle de trajetória. Raramente, o controle de um Veículo Subaquático Autônomo (USV) é baseado exclusivamente em um único método, pois, frequentemente, a combinação de diferentes abordagens se mostra mais adequada para otimizar o desempenho do sistema. No entanto, apesar dos esforços contínuos para o desenvolvimento de técnicas de controle cada vez mais sofisticadas, o controle proporcional-integral-derivativo (PID) ainda permanece como o método mais amplamente utilizado.(3)

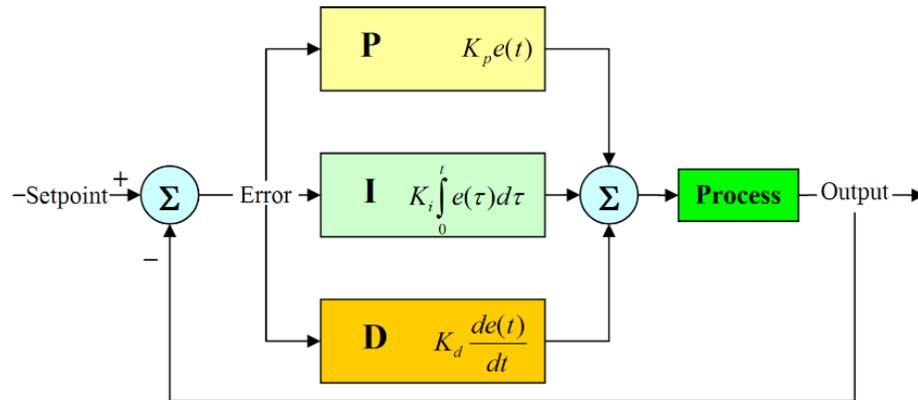


Figura 9: Diagrama de blocos de um controlador PID (7)

No entanto, o PID é uma abordagem de controle linear e, como tal, só é eficaz em sistemas não lineares quando operam em uma estreita faixa de condições próximas ao ponto de linearização do sistema. Para superar essa limitação, uma estratégia amplamente adotada é o conceito de Escalonamento de Ganhos (gain-scheduling), que envolve a adaptação dos ganhos dos controladores de acordo com a região na qual o ponto de operação desejado se encontra.(30)

## 2.5 Controlador PID

Em navios autônomos contemporâneos, o controlador PID é amplamente empregado para minimizar as discrepâncias entre as instruções do controlador e as ações efetivamente realizadas. Portanto, a compreensão aprofundada deste tipo de controle é de suma importância para o estudo do controle de um navio autônomo. Para uma análise didática do controlador PID, um código foi implementado no programa MATLAB, conforme detalhado no Apêndice A. No código em questão, o navio idealizado tem como meta atingir uma velocidade de 5 nós. Para tal, foram introduzidos dados em um controlador PID (Apêndice B), bem como em um controlador desprovido do componente Proporcional (Apêndice C), um controlador sem o componente Integrativo (Apêndice D) e um controlador sem o componente Derivativo (Apêndice E). O objetivo desta abordagem é analisar a influência de cada componente no desempenho do sistema.

Observa-se que cada termo do controlador PID tem-se uma atuação diferente para minimizar o erro. Tem-se então:

1. **Proporcional:** Ajuste proporcional ao valor de entrada.
2. **Integral:** Age para amenizar os erros residuais ao longo do tempo.
3. **Derivativo:** Age para prevenir as oscilações do sistema e suavizar as respostas do sistema.

## 2.6 Posicionamento Dinâmico

Um Sistema de Posicionamento Dinâmico (DP) representa uma plataforma de controle com a capacidade de gerenciar as variáveis de posição de uma embarcação, levando em consideração sua movimentação em um plano horizontal a velocidades relativamente baixas.(5)

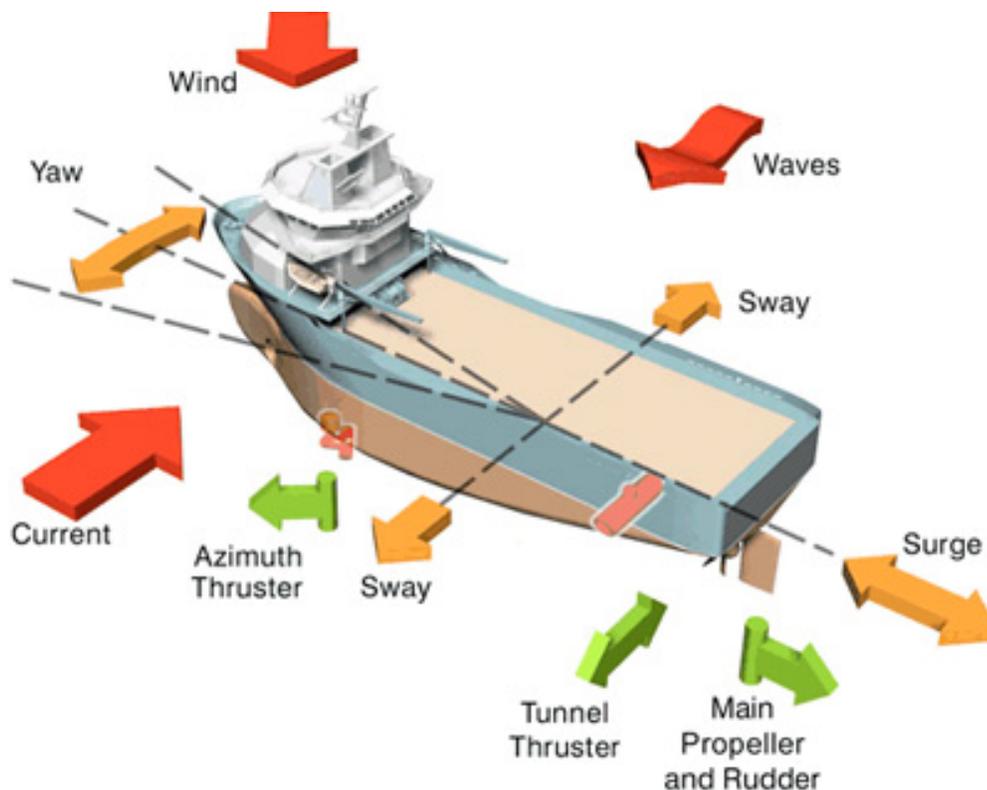


Figura 10: Sistema de Posicionamento Dinâmico de um Navio (8)

Dentro da literatura especializada, é possível observar uma ampla gama de estratégias de controle empregadas no contexto do DP. Essas abordagens variam desde métodos mais básicos, como o PID (31), até técnicas mais sofisticadas, como o Controle por Modo Deslizante Difuso Adaptativo, no qual a lei de controle incorpora o princípio do Controle por Modos Deslizantes e a adaptação das incertezas do modelo dinâmico por meio da

Lógica Difusa Adaptativa (32). Além disso, também é registrado na literatura o uso de Redes Neurais no âmbito do DP.(33)

## 2.7 Sistema de Navegação

Para controlar efetivamente VSNTs, é fundamental contar com um sistema de sensores bem ajustado, que combina várias fontes de informações para obter o melhor de cada uma delas. Normalmente, os sensores usados fornecem dados sobre a posição e orientação do VSNT. No entanto, para ter uma visão completa do estado da embarcação, incluindo informações sobre velocidade e aceleração, é necessário utilizar um estimador de estados que complemente e aprimore os dados disponíveis. (3)



Figura 11: Sistema Global de Navegação por Satélite (9)

Os sensores mais utilizados em VSNTs para obtenção de sua posição e estados são o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS, em inglês) e a Unidade de Medição Inercial (IMU, em inglês), onde GNSS é utilizado para obter a posição do navio e a IMU é utilizada para obter sua orientação.(3)

## 2.8 Utilização dos VSNTs

### 2.8.1 Contramedidas de Minagem (CMM)

Uma mina marítima é um dispositivo explosivo concebido com o intuito de danificar embarcações navais, tanto superficiais como submarinas. Essas armas são caracterizadas por sua acessibilidade financeira e sua capacidade considerável de causar destruição, além de exercer um impacto psicológico significativo sobre o inimigo. Elas impedem o uso

de determinadas áreas do mar por parte de navios militares e comerciais, onde existe a possibilidade de presença de um campo minado.(34)

Como forma de minimizar os impactos e riscos dessa ameaça em operações navais, marinhas de todo o mundo aumentaram consideravelmente seus investimentos na autonomia de operações envolvendo Contramedidas de Minagem nas últimas décadas.



Figura 12: Navio autônomo varredor de minas da Marinha Real Britânica (10)

O VSNT-LAB está a frente do desenvolvimento dessa tecnologia na Marinha Brasileira onde através do seu sonar de varredura lateral e sistema de controle autônomo é capaz de varrer uma área determinada e ter uma visão bem completa sobre o solo submarino de uma determinada área.



Figura 13: VSNT-LAB utilizando sonar de varredura lateral

## 2.8.2 Hidrografia

Por se tratar de uma atividade que desempenha um papel fundamental na segurança da navegação, requer a coleta precisa e constante de informações sobre diversas características do mar em uma região seja para atualização de cartas náuticas ou um levantamento hidrográfico de uma determinada região.



Figura 14: Embarcação de pesquisa hidrográfica autônoma M40 (11)

O uso de VSNTs para a hidrografia apresentam uma série de vantagens notáveis, entre elas sua capacidade de operar de forma autônoma seguindo uma derrota previamente determinada sem a necessidade de envolvimento de tripulações humanas, minimizando assim os riscos associados a operações em alto-mar.

## 2.8.3 Vigilância e Reconhecimento

Devido à sua riqueza em recursos naturais e biodiversidade marinha, a Amazônia Azul representa um cenário complexo de vigilância e reconhecimento para a Marinha do Brasil. Nesse contexto, o uso de VSNTs surgem como uma excelente alternativa para aprimorar a capacidade de monitoramento e controle dessa área.



Figura 15: Um USV armado com ULAQ do Estaleiro ARES e Meteksan(12)

Esses veículos podem ser equipados com uma variedade de sensores que permitem a coleta em tempo real de informações precisas sobre atividade suspeitas como a presença de embarcações não autorizadas, tráfico de contrabando, ou atividades ilegais de pesca.

Por não possuir operadores humanos a bordo, a operação de um VSNT pode ser bem silenciosa e discreta, fazendo deles armas adequadas para missões de reconhecimento, onde a furtividade é essencial.

#### **2.8.4 Busca e Salvamento**

As operações de busca e salvamento no mar apresentam grandes desafios, entre eles muitas vezes o extenso tempo de operação, o que leva à fadiga de operadores humanos. Os VSNTs se apresentam como um recurso que pode ser utilizado juntamente com outros meios de superfície para otimizar e agilizar o processo de resgate. Entre os meios utilizados para tal podemos ver na figura 12 uma cama-maca para resgate aquático.



Figura 16: Cama-maca de resgate aquático (13)

Além da capacidade de salvamento individual da vítima, os VSNTs também podem ser utilizados como um abrigo de mantimentos no caso de buscas prolongadas por sobreviventes de alguma tragédia, seus sensores detectariam a presença de pessoas e prontamente poderia fornecer o necessário para a sobrevivência humana.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Classificação da Pesquisa**

Para elaboração deste trabalho de pesquisa será utilizada uma pesquisa mista, incorporando tanto elementos qualitativos quanto quantitativos. Esta classificação se deve à abordagem abrangente adotada para explorar o uso, a eficácia e a integração de VSNTs nas operações marítimas da MB. A pesquisa qualitativa é empregada para aprofundar a compreensão das perspectivas dos operadores, engenheiros e estrategistas em relação aos VSNTs, bem como para analisar os desafios e oportunidades associados. Por outro lado, a pesquisa quantitativa se concentra na coleta de dados numéricos para avaliar o desempenho operacional e os impactos estratégicos desses veículos não tripulados. Essa abordagem mista visa fornecer uma visão holística e baseada em evidências do papel dos VSNTs na Marinha do Brasil e suas implicações para a segurança e eficiência marítimas.

### **3.2 Veículos de Superfície Não Tripulado na Marinha do Brasil**

A Marinha do Brasil, por meio de seu Setor de Ciência e Tecnologia (SCTMB), dispõe de uma embarcação moderna, denominada URCA-III, originalmente adquirida para integrar o Sistema Distribuído de Fusão de Dados para Aplicações Navais (SDFDAN), um projeto de pesquisa colaborativa entre o Instituto de Pesquisas da Marinha (IPQM) e a Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER). A partir da constatação da presença de sensores de última geração, incluindo computadores de alto desempenho, giro satelital, ecobatímetro, entre outros, surgiu o interesse em explorar o potencial de conversão dessa plataforma em um veículo autônomo de superfície.



Figura 17: VSNT-LAB (Veículo de Superfície Não Tripulado Laboratorial) (14)

A partir de intensos esforços empreendidos pelo Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV), emergiu o Veículo de Superfície Não Tripulado Laboratorial (VSNT-Lab), uma plataforma flutuante que possibilita a realização de experimentos e testes para validação de produções científicas de Oficiais-Alunos da Marinha do Brasil. O emprego desta infraestrutura permite a superação dos limites impostos pelo uso exclusivo de simulação computacional para fins de prova de conceito, conferindo maior realismo e precisão aos resultados obtidos.

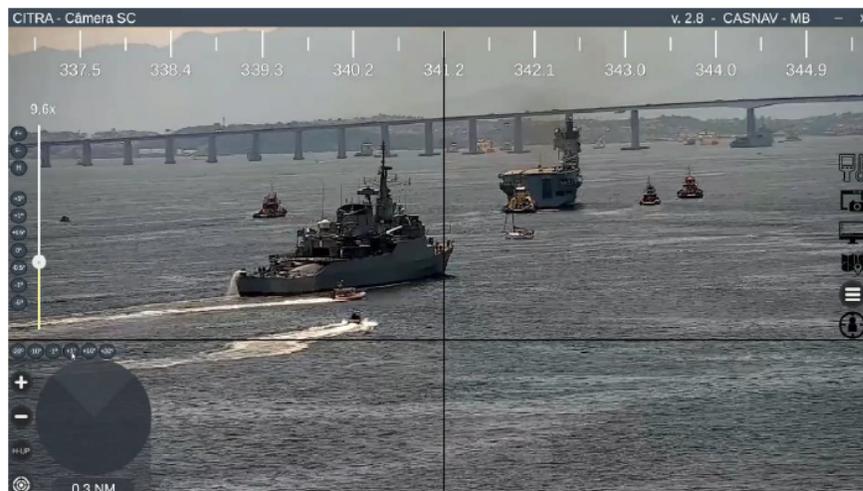


Figura 18: VSNT-Lab na Operação Aspirantex (15)

Ademais, destaca-se que o VSNT-Lab tem sido empregado não somente como um la-

boratório para realização de testes, mas também como uma ferramenta de apoio a missões de treinamento militar. Nesse sentido, é possível citar, como exemplo, a participação da referida plataforma na Operação Aspirantex, em que atuou como Figurativo Inimigo, contribuindo para o aperfeiçoamento da capacidade de resposta das forças navais em cenários simulados de conflito.



Figura 19: VSNT na LAAD 2023 (16)

Cumprir destacar que a Marinha do Brasil, em colaboração com a empresa DGS Defense, está empenhada em aprimorar a tecnologia embarcada no VSNT-LAB, tendo como resultado um novo veículo de superfície especialmente concebido para desempenhar múltiplas tarefas, inclusive operações de contramedidas de minagem em ambiente marítimo. Tal iniciativa foi apresentada na feira militar Latin America Aero and Defense (LAAD) - 2023, oportunidade em que se poderá constatar os avanços obtidos no desenvolvimento desta inovadora plataforma naval.

### 3.3 Veículos de Superfície Não Tripulado na Sociedade Brasileira

A Embarcação Autônoma Tupan, construído pela empresa brasileira *TideWise*, representa um marco significativo. O processo de criação desta embarcação ocorreu inteiramente na cidade do Rio de Janeiro, com a construção sendo executada por habilidosos

trabalhadores nacionais. O Tupan, um versátil navio autônomo, foi concebido e construído no Brasil e validado para operações em ambientes offshore.



Figura 20: USV Tupan (17)

Sua estrutura foi forjada em alumínio naval, obedecendo às diretrizes do MASS Guideline Rev.3, que foram adotadas como base para a elaboração do Regulamento Provisório para Embarcações Autônomas, lançado pela Diretoria de Portos e Costas (DPC) da Marinha do Brasil em fevereiro de 2020. Os testes iniciais no mar foram conduzidos com sucesso em agosto de 2020, e desde outubro do mesmo ano, o Tupan se encontra disponível para atividades comerciais.(17)

## 3.4 Propostas de uso do VSNT-LAB na Marinha do Brasil

### 3.4.1 Localização de Objetos no Fundo

A Marinha do Brasil possui capacitação e equipamentos no setor da Hidrografia que permitem a realização da tarefa de localização de objetos subaquáticos, entre eles o So-

nar de Varredura Lateral EdgeTech 4125, que sendo rebocado por navios/embarcações convencionais permite a obtenção de uma clara imagem do solo marítimo.

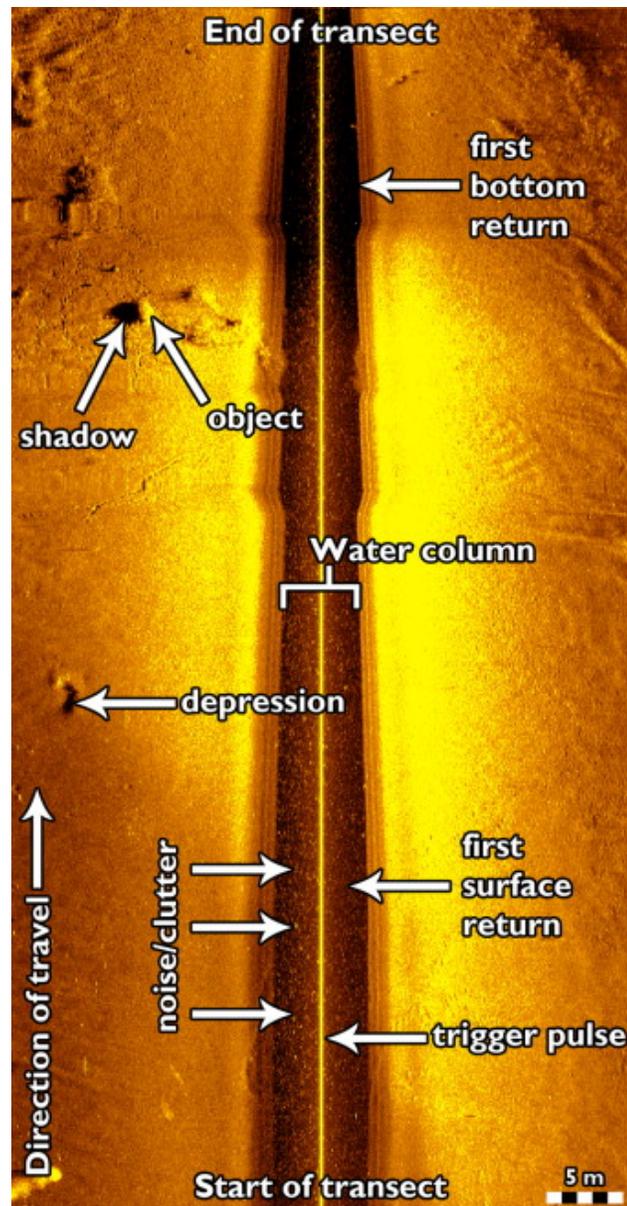


Figura 21: Imagem de um sonar de varredura lateral (18)

O uso de plataformas não tripuladas conjugada com o sonar de varredura lateral tem sido frequente e de certa forma eficiente em diversas forças armadas para localização de minas, entretanto uma série de incertezas ainda existem em relação às capacidades, limitações e melhores táticas de seu emprego.

A Marinha do Brasil atualmente, com o VSNT-LAB, conta com um Sonar de Varredura Lateral EdgeTech 4125, que juntamente com o pessoal do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e as capacidades de mergulho de diversos meios operativos tem as condições necessárias para a exploração dessa atividade.

### 3.4.2 Ameaças Assimétricas



Figura 22: Exercício de ameaça assimétrica (19)

Em cenários de defesa contra ameaças assimétricas de superfície, a utilização do VSNT-LAB pela Marinha do Brasil representa uma solução inovadora e eficaz para avaliar e implementar novos conceitos de operação. O emprego desse veículo pode simular a ação de lanchas rápidas de superfície atacando uma Força Naval durante a entrada e saída de porto, proporcionando uma plataforma segura e controlada para a avaliação de estratégias defensivas.

Um dos principais benefícios do uso do VSNT-LAB nesse contexto é a capacidade de operação remota, permitindo que a embarcação seja controlada a partir de uma estação de comando e controle localizada no "Tijupá" da Escola Naval. Essa abordagem garante a segurança da equipe de controle, que pode supervisionar e tomar decisões em tempo real a partir de uma localização segura e estrategicamente posicionada.

Para essas operações a presença do patrão a bordo da embarcação, mesmo que oculto, é mandatória por razões de segurança e permite uma intervenção humana imediata em situações críticas. Em seus testes o VSNT-LAB tem mostrado resultados satisfatórios na área geográfica da Baía de Guanabara, entre a Ponte Rio-Niterói e a Boca da Barra. Isso torna possível a simulação de cenários realistas de entrada e saída de porto, replicando as condições desafiadoras que as forças navais podem enfrentar em missões reais.

Para a condução bem-sucedida de tais operações, o desenvolvimento de algoritmos de visão computacional robustos é essencial para alimentar sistemas como o CITRA (Centro

de Imagens e Informações da Marinha) em ações coordenadas de defesa de uma Força Naval contra ameaças assimétricas. Esses algoritmos podem ser projetados para detectar, rastrear e identificar ameaças em tempo real, fornecendo informações críticas para as operações de defesa.

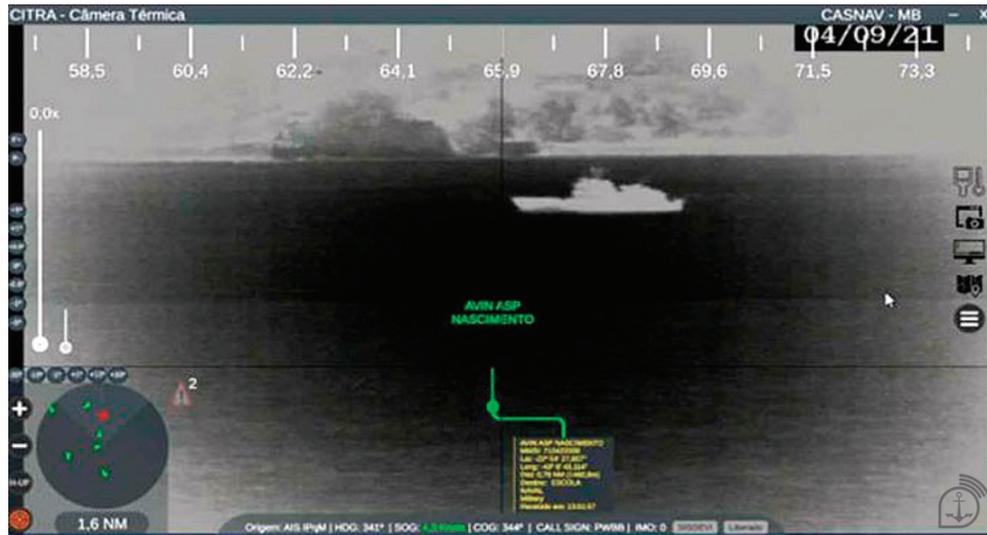


Figura 23: Tela do CITRA apresentando dados sobre embarcação(20)

### 3.4.3 Levantamento de Praia



Figura 24: Operação Anfíbia (21)

O levantamento de praia desempenha um papel crítico em operações anfíbias conduzidas pela da Marinha do Brasil. Se trata de uma atividade realizada para coletar informações detalhadas e precisas sobre a área costeira, incluindo a praia, o leito marinho adjacente, o perfil da praia, a profundidade da água, obstáculos submersos, correntes, características geográficas, entre outros elementos relevantes. Essa atividade é conduzida para diversos fins, incluindo planejamento de operações marítimas, estudos oceanográficos, segurança da navegação, desenvolvimento costeiro e monitoramento ambiental.

A busca por meios mais eficazes de realizar essa tarefa levou à exploração do potencial do VSNT-LAB para esse fim. Para realizar o levantamento de praia com o mesmo, alguns sensores e equipamentos específicos seriam essenciais. Isso incluiria sistemas de sonar multifeixe para mapear a topografia do leito marinho e identificar potenciais obstáculos, além de câmeras de alta resolução para capturar imagens visuais da praia. Além disso, sistemas de posicionamento e georreferenciamento, como GPS, seriam cruciais para garantir a precisão dos dados coletados.

A realização da tarefa de forma autônoma induz uma maior precisão nos dados gerados, uma vez que o VSNT-LAB pode seguir trajetórias predefinidas e usar algoritmos avançados para evitar obstáculos e manter a consistência nos resultados. Isso é particularmente relevante para a Força de Desembarque, que depende de informações precisas para planejar e executar operações bem-sucedidas.

#### **3.4.4 Navegação Autônoma para Transporte**

A utilização do VSNT-LAB na navegação autônoma para transporte, especialmente em cenários de logística, é uma área promissora que a Marinha do Brasil pode explorar para otimizar suas operações. A condução de uma prova de conceito de operação não tripulada de uma embarcação de superfície capaz de transportar suprimentos de valor entre uma base no continente e um ponto afastado até 15 milhas náuticas (MN) em águas abrigadas e com pouco tráfego marítimo pode ser um passo importante na validação dessa tecnologia.

Para realizar tal operação, é fundamental garantir uma infraestrutura de comunicação por dados que permita o comando e controle efetivo do VSNT-LAB, telemetria do status da plataforma, recebimento de streaming de vídeo e inserção de comandos em tempo real. As comunicações são cruciais para garantir a segurança da operação e permitir intervenções quando necessário. A Marinha do Brasil possui experiência em comunicações militares que pode ser aproveitada para atender a essas necessidades.

### 3.5 Normatização

Os navios autônomos estão desempenhando um papel crucial no desenvolvimento do setor marítimo, mas os obstáculos legais são apontados como as principais barreiras para sua rápida introdução. A Organização Marítima Internacional (IMO) tem se dedicado ao tema dos navios autônomos, porém a discussão regulatória ainda está em seus estágios iniciais, com poucas respostas concretas até o momento.

À medida que a automação aumenta nas tarefas anteriormente realizadas por tripulações, surgem questões legais fascinantes que abrangem diversas áreas do direito marítimo.

A IMO (International Maritime Organization), em sua 99<sup>a</sup> sessão do Comitê de Segurança Marítima (MSC 99), deu início aos grupos de estudos para regulamentação de embarcações de superfície autônomas (MASS - Maritime Autonomous Surface Ship) (35).

Segundo (36), este comitê na sua 103<sup>a</sup> sessão aprovou o Resultado de Escopo Regulatório para o Uso de Navios Autônomos de Superfície (MASS) com a publicação da circular MSC.1 – Circ.1638/2021 que fornece orientações às partes interessadas para identificar, selecionar e decidir sobre o trabalho futuro em navios autônomos e classificou essas embarcações em 4 graus, a depender do nível de autonomia de cada navio:

1. **Nível um:** Embarcação com processos automatizados e suporte à decisão: A tripulação está a bordo para operar e controlar os sistemas e funções do navio. Algumas operações podem ser automatizadas e às vezes não supervisionadas, mas com tripulantes a bordo prontos para assumir o controle quando necessário.
2. **Nível dois:** Embarcação controlada remotamente com tripulação a bordo: A embarcação é controlada e operada a partir de outro local. Os tripulantes estão disponíveis a bordo para assumir o controle e operar os sistemas e funções a bordo.
3. **Nível três:** Embarcação controlada remotamente sem tripulantes a bordo: A embarcação é controlada e operada a partir de outro local e não há tripulação a bordo.
4. **Nível quatro:** Embarcação totalmente autônoma: O sistema operacional da embarcação é capaz de tomar decisões e determinar ações por si só.

Existe também a classificação quanto ao nível de controle de uma embarcação, dividida em 5 níveis a saber:

1. **Nível zero:** Humano a bordo: A tripulação está a bordo para operar e controlar os sistemas e funções do navio.

2. **Nível um:** Controlada: Toda a funcionalidade está a cargo do controlador humano. O controlador tem contato direto com a embarcação e toma todas as decisões, direciona e controla todas as funções da missão, remotamente.
3. **Nível dois:** Direcionada: Sob controle direcionado, algum grau de avaliação e capacidade de resposta é implementado na embarcação. Pode avaliar o ambiente, relatar sua situação e sugerir uma ou várias ações. No entanto, a autoridade para tomar decisões é do controlador.
4. **Nível três:** Delegada: A embarcação é autorizada a executar algumas funções. Avalia o ambiente, relata a situação, define ações e relata sua intenção. O controlador tem a opção de modificar as intenções informadas pela embarcação durante um certo tempo, após o qual a embarcação agirá. A iniciativa da ação vem da embarcação, e a tomada de decisão é compartilhada entre o controlador e a embarcação.
5. **Nível quatro:** Monitorada: A embarcação não tripulada avalia o ambiente e reporta sua situação. Define as ações, decide e age, relatando sua ação. O controlador pode monitorar os eventos.
6. **Nível cinco:** Autônoma: A embarcação é dotada de grau máximo de independência e autodeterminação. Avalia o ambiente e sua situação, define as ações, decide e age.

Em abril de 2022, durante a 105<sup>a</sup> sessão do Comitê de Segurança Marítima (MSC 105), a IMO designou um *roadmap* com o objetivo de desenvolver um código para Sistemas de Navegação Autônoma Marítima, prevendo sua adoção na segunda metade de 2024.

Em 17 de abril de 2023, a IMO realizou um seminário dedicado a discutir problemas jurídicos relacionados aos MASS.

Em relação à IMO, o Reino Unido demonstra estar bem avançado nessa questão e já possui legislação específica sobre navios autônomos.

### 3.6 Impacto e Benefícios dos VSNTs na Marinha do Brasil

Entre os impactos diretos do uso e estudo de VSNTs na Marinha do Brasil podemos citar:

- Estimular a pesquisa e desenvolvimento em veículos autônomos e criação da área de conhecimento no CTMRJ (IPQM e CASNAV).
- Estimular trabalhos acadêmicos no setor envolvendo meios como o VNST-LAB como laboratório flutuante (UFRJ, UFF, USP, PUC, CIAW, EN, CIAGA).
- Gerar conhecimento sobre veículos autônomos a baixo custo e despertar ideias de aplicação dentro do setor operativo para estimular o uso e acompanhar a tendência tecnológica de defesa a nível mundial (contramedidas de minagem, hidrografia, esclarecimento de superfície, localização de alvos submersos, *e-Navigation*, regulamentação entre outros).

## 4 CONCLUSÃO

### 4.1 Considerações Finais

Ao longo da história houveram diversas mudanças nas guerras no mar, sendo que em cada era novas armas eram introduzidas e algumas delas traziam mudanças grandiosas para o cenário naval, como foi o caso do submarino.

É um fato que a evolução dos VSNT causará um impacto maior ou semelhante aos do submarinos na guerra naval. Devido a sua versatilidade, autonomia e intervenção mínima humana, se torna uma potente arma de guerra como podemos ver em conflitos modernos no cenário atual (Rússia x Ucrânia).



Figura 25: Drone utilizado na guerra entre Ucrânia e Rússia (22)

Marinhas modernas e imponentes no cenário global se mantêm atualizadas em relação as novas tecnologias e armamentos que são exibidos dia após dia.

Ao mesmo tempo que alavanca esse desenvolvimento interno, também é de grande importância o estímulo do mercado interno de veículos não tripulados, de forma a obter

mão de obra qualificada e suporte político necessário para justificar investimentos na área.

Nesse meio, a Marinha do Brasil para se manter atualizada, precisa manter um ciclo de desenvolvimento a respeito dessa tecnologia, seja fazendo parcerias com universidades que já estudam sobre o tema ou criando seus próprios laboratórios sobre.

Nesse contexto, o VSNT-LAB representa o estado da arte do campo de veículos não tripulados, possuindo um sistema de controle que possibilita atualmente missões autônomas e remotamente controladas para diversos propósitos, sendo os objetivos principais a guerra de minas e a hidrografia.

Por se tratar de uma tecnologia moderna e bastante chamativa, diversas empresas se propuseram a construir VSNT e oferecem os mesmos para venda, entretanto para uma força armada é extremamente importante ter conhecimento profundo do funcionamento dos seus meios pois uma empresa com más intenções pode facilmente injetar alguma falha programada ou algum programa de espionagem no VSNT.

Apesar do projeto estar em fases iniciais já vem apresentando bons resultados em sua integração com o setor operativo, como a participação em exercícios de entrada e saída de Porto como figurativo inimigo, exercícios de varredura de minas, entre outros.

## 4.2 Sugestões para futuros trabalhos

Para futuros trabalhos sobre o tema é necessário que discorram sobre os seguintes pontos:

- A necessidade da Marinha do Brasil e da indústria nacional se aprimorem de forma geral na área de veículos autônomos.
- Atualização Geral na normatização que trata a respeito de veículos autônomos de superfície pela Marinha do Brasil.
- Uma análise sobre como a Marinha do Brasil pode cooperar com outras marinhas mais desenvolvidas no assunto sobre trocas de tecnologias a respeito.
- Estudar o papel dos VSNTs em situações que beneficiem a sociedade como um todo, como por exemplo resposta no auxílio de emergências.

## REFERÊNCIAS

- 1 PEREIRA, R. *O que é Amazônia e por que se tornar potência militar do Atlântico*. Gazeta do Povo. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/republica/amazonia-azul-brasil-potencia-militar-atlantico/>. Acesso em: 13 abr. 2023.
- 2 BRODSKY, S. *The Navy's ship can run without humans for 30 straight days*. Disponível em: <https://www.popularmechanics.com/military/navy-ships/a43033206/navy-ship-can-operate-autonomously-for-30-days/>. Acesso em: 7 mai. 2023.
- 3 LIU, Z. et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, v. 41, p. 71–93, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578816300219>.
- 4 FIRST autonomous vessels already sailing in Japan. Disponível em: <https://www.sym-naval.com/blog/autonomous-vessels-japan/#None>. Acesso em: 05 jul. 2023.
- 5 FOSSEN, T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 1a edição. [S.l.]: Chichester, 2011.
- 6 CHANG, Z. et al. *OMAE2020-18454 Autonomous Surface Vessel Obstacle Avoidance based on Hierarchical Reinforcement Learning*. 2020.
- 7 PID Control. Disponível em: <https://medium.com/autonomous-robotics/pid-control-85596db59f35>. Acesso em: 21 out. 2023.
- 8 HOW Does Dynamic Positioning Work? Disponível em: [https://www.rigzone.com/training/insight?insight\\_id=342](https://www.rigzone.com/training/insight?insight_id=342). Acesso em: 21 out. 2023.
- 9 O que é GNSS? Disponível em: <https://www.embratop.com.br/noticias/o-que-e-gnss/>. Acesso em: 21 out. 2023.
- 10 ROYAL Navy to receive world-class autonomous minesweepers. Disponível em: <https://www.royalnavy.mod.uk/news-and-latest-activity/news/2021/january/29/210129-autonomous-minesweeper>. Acesso em: 24 set. 2023.
- 11 EMBARCAÇÃO de pesquisa hidrográfica autônoma M40. Disponível em: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/oceanalpha/m40-autonomous-hydrographic-survey-vessel/>. Acesso em: 24 set. 2023.
- 12 ARE unmanned surface vehicles a paradigm shift in naval warfare? Disponível em: <https://www.defenceprocurementinternational.com/features/sea/are-unmanned-surface-vehicles-a-paradigm-shift-in-naval-warfare>. Acesso em: 20 out. 2023.

13 WATER Rescue Stretcher Bed. Disponível em: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/oceanalpha/water-rescue-stretcher-bed/>. Acesso em: 24 set. 2023.

14 PROJETO Embarcação Autônoma. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/casnav/casnav/?q=node/187>. Acesso em: 13 abr. 2023.

15 CASNAV participa da Operação Aspirantex utilizando o Veículo de Superfície Não Tripulado Experimental (VSNT-E). Disponível em: <https://www.defesaareanaval.com.br/naval/casnav-participa-da-operacao-aspirantex-utilizando-o-veiculo-de-superficie-nao-tripulado-experimen>. Acesso em: 7 mai. 2023.

16 DGS Defense apresenta embarcação autônoma. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/dgs-defense-apresenta-embarcacao-autonoma/>. Acesso em: 8 mai. 2023.

17 USV Tupan. Disponível em: <https://www.tidewise.io/pt/tecnologia-usv-tupan>. Acesso em: 23 out. 2023.

18 SCHULTZ, J. J. et al. Detecting submerged objects: The application of side scan sonar to forensic contexts. *Forensic Science International*, v. 231, n. 1, p. 306–316, 2013. ISSN 0379-0738. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073813003022>.

19 OPERAÇÃO ‘BraColPer 2023’: Unindo Forças Marítimas no Coração da América do Sul. Disponível em: <https://www.defesaemfoco.com.br/operacao-bracolper-2023-unindo-forcas-maritimas-no-coracao-da-america-do-sul/>. Acesso em: 23 out. 2023.

20 REALIDADE aumentada incrementa o monitoramento e fiscalização das águas brasileiras. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/aviacao/noticia/44594/realidade-aumentada-incrementa-o-monitoramento-e-fiscalizacao-das-aguas-brasileiras/>. Acesso em: 20 out. 2023.

21 DESEMBARQUE Anfíbio movimentava o “Dia D” das Operações “ADEREX-Anfíbia/Superfície”. Disponível em: <https://folhadolitoral.com.br/editorias/marinha-do-brasil/desembarque-anfibio-movimenta-o-dia-d-das-operacoes-aderex-anfibia-superficie-2021/>. Acesso em: 20 out. 2023.

22 UCRÂNIA ataca com drones a frota russa do mar negro. Disponível em: <https://forcaarea.com.br/ucrania-ataca-com-drones-a-frota-russa-do-mar-negro/>. Acesso em: 23 out. 2023.

23 AMAZÔNIA Azul. Disponível em: [https://www.mar.mil.br/hotsites/amazonia\\_azul/](https://www.mar.mil.br/hotsites/amazonia_azul/). Acesso em: 7 mai. 2023.

24 NAVIO autônomo para missões furtivas da Marinha chinesa conclui 1º teste no mar. Disponível em: <https://sputniknewsbrasil.com.br/20220610/navio-autonomo-para-missoes-furtivas-da-marinha-chinesa-conclui-1-teste-no-mar-video-23013651.html>. Acesso em: 7 mai. 2023.

- 25 YAN, R.-j. et al. Development and missions of unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, v. 9, n. 4, p. 451–457, Dec 2010. ISSN 1993-5048. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11804-010-1033-2>.
- 26 MANLEY, J. E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In: *OCEANS 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–4.
- 27 ASGHARIAN, P.; AZIZUL, Z. H. *Proposed Efficient Design for Unmanned Surface Vehicles*. 2020.
- 28 THE Nippon Foundation MEGURI2040 Fully Autonomous Ship Program. Disponível em: <https://www.nippon-foundation.or.jp/en/news/articles/2022/20220118-66716.html>. Acesso em: 05 jul. 2023.
- 29 OH, S.-R.; SUN, J. Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control. *Ocean Engineering*, v. 37, n. 2, p. 289–295, 2010. ISSN 0029-8018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801809002431>.
- 30 TANAKITKORN, K. A review of unmanned surface vehicle development. *Maritime Technology and Research*, v. 1, n. 1, p. 2–8, Jan. 2019. Disponível em: <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/MTR/article/view/140730>.
- 31 ALFHEIM, H. L. et al. Development of a dynamic positioning system for the revolt model ship. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 29, p. 116–121, 2018. ISSN 2405-8963. 11th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318321682>.
- 32 WANG, Y. et al. Adaptive fuzzy sliding mode controller for dynamic positioning of fpso vessels. In: *OCEANS 2019 - Marseille*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.
- 33 ZHANG, D. et al. Dynamic modeling and adaptive controlling in gps-intelligent buoy (gib) systems based on neural-fuzzy networks. *Ad Hoc Networks*, v. 103, p. 102149, 2020. ISSN 1570-8705. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870520300421>.
- 34 GIRON-SIERRA, J. M. et al. Developing an autonomous surface ship for sea demining: First steps. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 43, n. 20, p. 91–96, 2010. ISSN 1474-6670. 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016334437>.
- 35 MARITIME Safety Committee (MSC), 99th session 16-25 May 2018. Disponível em: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-99th-session.aspx>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- 36 BOIKIVSKI, D. C.; PEREIRA, J. A. M. G.; AGUIAR, L. d. L. Os navios autônomos e a qualificação profissional. *Portos e Navios*, v. 54, n. 2, p. 286–295, 2022.

## APÊNDICE A – CÓDIGO PID

```
% Parâmetros do sistema
K = 0.5; % Ganho do sistema
T = 120; % Constante de tempo do sistema
s = tf('s'); % Variável de Laplace

% Modelo do sistema
G = K/(T*s+1); % Função de transferência do sistema

% Parâmetros do controlador PID
Kp = 0.9; % Ganho proporcional
Ki = 0.3; % Ganho integral
Kd = 100; % Ganho derivativo

% Controlador PID
C = pid(Kp,Ki,Kd);

% Sistema em malha fechada
sys = feedback(C*G,1);
% Simulação
t = 0:0.1:1000;
% Tempo de simulação de 100 segundos
r = 5*ones(size(t)); % Sinal de referência (velocidade desejada de 5 nós)
y = lsim(sys,r,t); % Resposta do sistema

% Plot
figure;
plot(t,r,'--',t,y,'-');
xlabel('Tempo (s)');
```

```
ylabel('Velocidade (nós)');  
legend('Referência','Saída');  
grid on;
```

## APÊNDICE B – CONTROLADOR PID

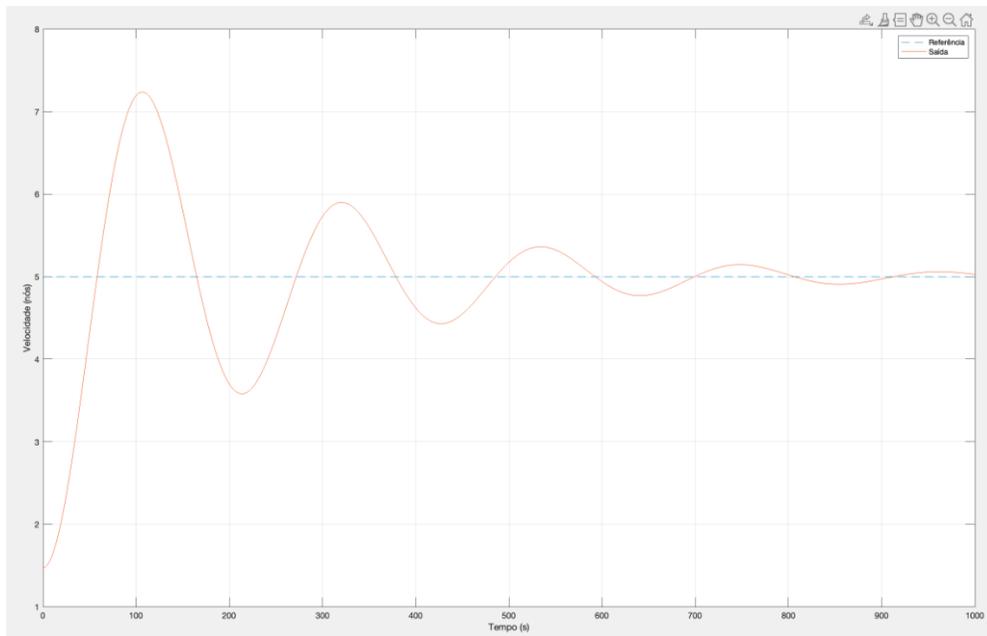


Figura 26: Controlador PID

# APÊNDICE C – CONTROLADOR SEM O COMPONENTE PROPORCIONAL

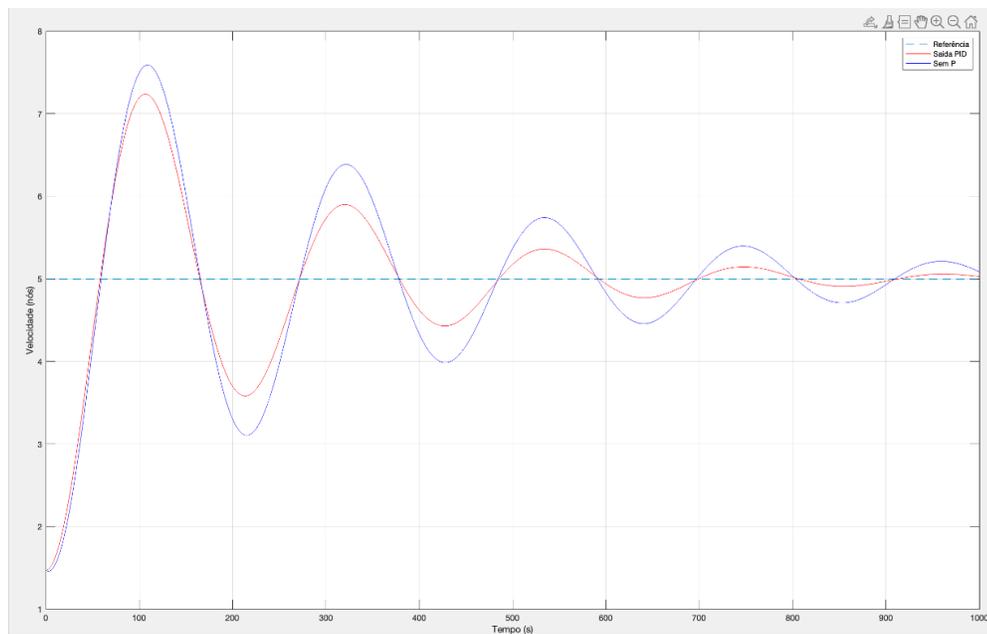


Figura 27: Controlador sem o componente Proporcional

## APÊNDICE D – CONTROLADOR PD

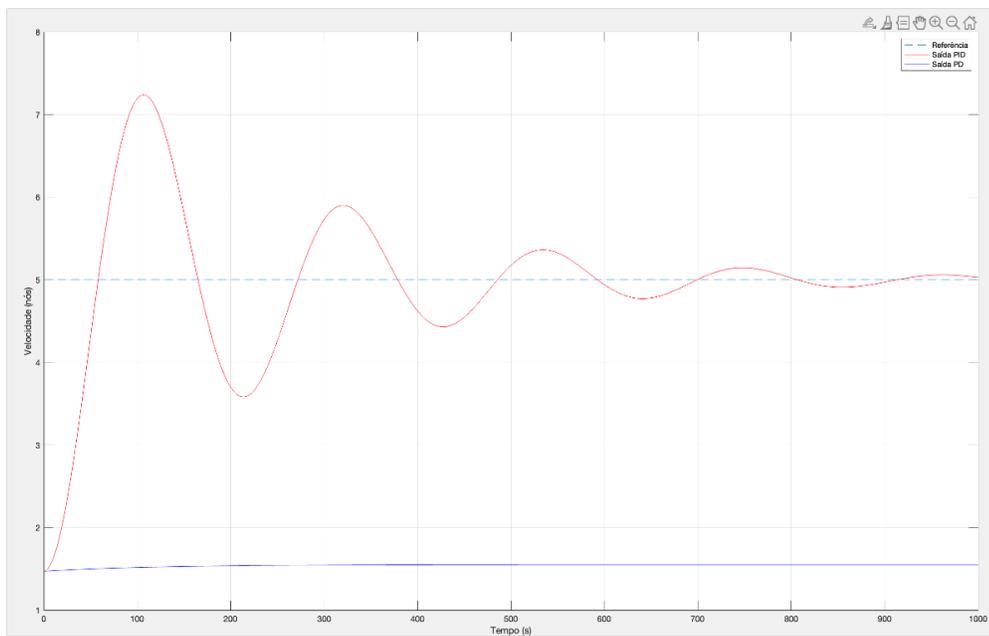


Figura 28: Controlador PD

# APÊNDICE E – CONTROLADOR PI

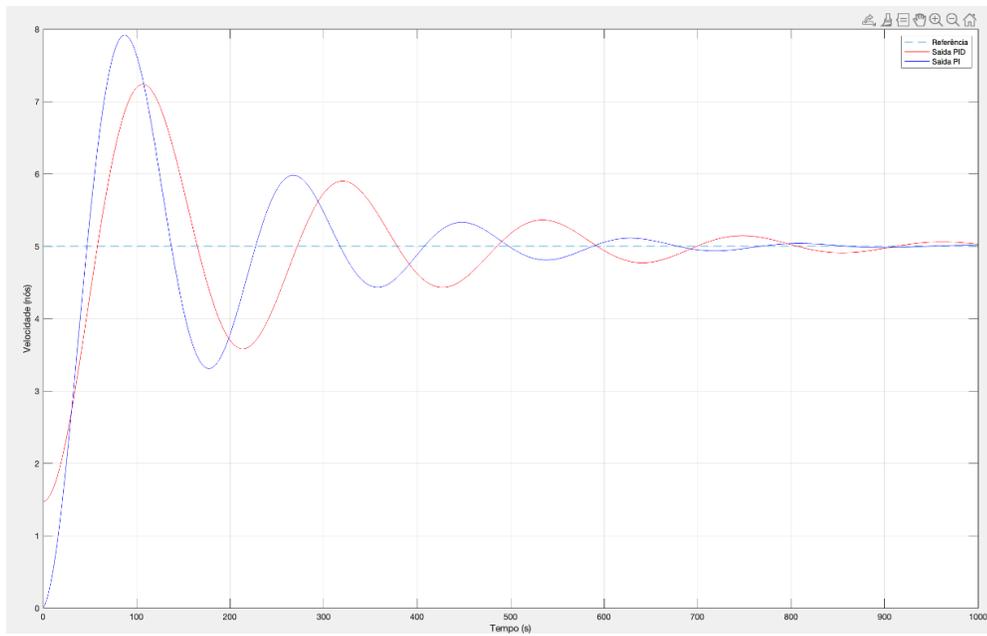


Figura 29: Controlador PI