

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Instituto Alberto Luiz Coimbra de  
Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia



Programa de Engenharia de Sistemas e  
Computação

*Projeto de Pesquisa: Implementação de um  
método baseado em aprendizado por reforço  
para otimizar a comunicação peer-to-peer entre  
uma embarcação autônoma da Marinha do  
Brasil (VSNT-LAB) e um navio-mãe.*

**Aluno:** Luiz Henrique Souza Caldas

**Orientadora:** Profa. Dra. Rosa M. Leão (PESC/COPPE/UFRJ)

17 de janeiro de 2025

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>5</b>
2.1	Objetivo Geral . . . . .	5
2.2	Objetivos Específicos . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>6</b>
3.1	Descrição do Sistema . . . . .	6
3.2	Coleta de Dados . . . . .	7
3.3	Modelagem com HMM . . . . .	7
3.4	Implementação de RL . . . . .	7
3.5	Validação . . . . .	8

# 1 Introdução

A navegação marítima autônoma representa avanços significativos na segurança e eficiência das atividades marítimas. Embora o conceito de navios autônomos não seja recente sua aplicação atual é ampla, com benefícios como a redução de erros humanos e a otimização de recursos. No campo militar, a navegação não tripulada tem ganhado destaque, ampliando capacidades operacionais e mitigando riscos humanos. Nesse contexto, a Marinha do Brasil, com um papel estratégico na defesa da Amazônia Azul, busca desenvolver capacidades de navegação autônoma, especialmente para missões de reconhecimento, por meio do Veículo de Superfície Não Tripulado Laboratorial (VSNT-Lab), exibido na figura 1. Essa iniciativa reflete a estratégia da Marinha em explorar o potencial da navegação autônoma para operações táticas avançadas[1].

**Figura 1:** Veículo de Superfície Não Tripulado Laboratorial (VSNT-Lab)



Fonte: Lima et al. [1].

A comunicação híbrida do VSNT-Lab com o navio-mãe combina uma rede mesh baseada em rádio NetNode com uma conexão VPN sobre 4G, oferecendo redundância e resiliência em cenários operacionais desafiadores. Embora os autores de [1] relatem na conclusão de seu artigo que a comunicação durante o exercício MINEX-23 da Marinha do Brasil foi eficiente, as tecnologias empregadas apresentam limitações inerentes, conforme destacado em [2]. A rede mesh baseada em rádio sofre com interferências ambientais, como chuva e reflexões na superfície da água, além de seu alcance limitado, que pode comprometer a eficácia em cenários de maior extensão. Por sua vez, a conexão VPN sobre 4G depende de infraestrutura terrestre, restringindo sua aplicabilidade a áreas costeiras e tornando operações em alto-mar mais desafiadoras. Essas limitações enfatizam a necessidade de soluções híbridas mais robustas para superar os desafios de comunicação em ambientes marítimos remotos.

Os desafios de comunicação em VSNTs incluem latência, que pode impactar o controle em tempo real e a coordenação entre veículos, além de ruídos e falhas de transmissão que comprometem a confiabilidade dos dados. A largura de banda limitada é outro obstáculo, dificultando a troca simultânea de grandes volumes de informações, especialmente em comunicação de longo alcance. Esses fatores afetam diretamente a eficiência das missões, destacando a necessidade de tecnologias mais robustas e adequadas para cenários cooperativos e de alta demanda de dados[3].

Este trabalho se inspira na metodologia apresentada por Silva[4], que utiliza Cadeias de Markov Ocultas (HMM) e Aprendizado por Reforço para inferir a Qualidade de Serviço (QoS) em redes de ISPs e otimizar ações de manutenção preditiva. A presente pesquisa busca adaptar e validar essa metodologia ao contexto do VSNT-Lab, considerando os desafios específicos da comunicação em veículos marítimos autônomos. Ao aplicar essas técnicas ao VSNT-Lab, espera-se aprimorar a robustez e a resiliência das comunicações em cenários críticos.

A pesquisa em tecnologias de comunicação para o VSNT-Lab não apenas contribui para a eficiência das operações autônomas, mas também reforça a robustez e a segurança em missões militares e civis, essenciais para os interesses estratégicos da Marinha do Brasil na defesa da Amazônia Azul. Ao enfrentar desafios como latência, perda de pacotes e falhas de comunicação, os avanços no desenvolvimento de soluções híbridas e sistemas de comunicação resilientes garantem maior confiabilidade e capacidade de resposta em cenários críticos. Além disso, essas inovações fortalecem a capacidade de monitoramento e proteção da extensa Zona Econômica Exclusiva brasileira, promovendo uma integração eficiente entre tecnologias autônomas e estratégias táticas avançadas para a soberania e a sustentabilidade no domínio marítimo.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver e implementar um método baseado em aprendizado por reforço para otimizar a comunicação peer-to-peer entre o navio-mãe e o VSNT-Lab, utilizando múltiplos canais de comunicação (rede mesh baseada em rádio NetNode e conexão VPN sobre 4G).

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Caracterizar os desafios de comunicação específicos do VSNT-Lab.
2. Coletar dados de desempenho dos canais mesh e VPN durante missões simuladas e reais.
3. Modelar as condições de rede com HMM, considerando diferentes cenários operacionais.
4. Implementar um algoritmo de RL para gerenciar e otimizar a troca entre canais.
5. Validar o método em operações no ambiente marítimo, incluindo exercícios supervisionados pela Marinha.

## 3 Metodologia

### 3.1 Descrição do Sistema

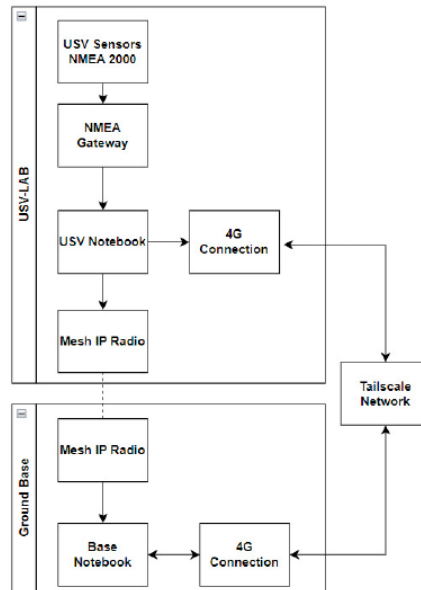
O **VSNT-Lab** é um laboratório móvel da Marinha do Brasil integrado em uma embarcação de 7,7 metros (Flexboat SR 760), projetado para pesquisa e desenvolvimento de sistemas autônomos marítimos. Ele combina sensores avançados, atuadores e sistemas de controle baseados no framework MOOS-IvP para navegação e operações autônomas. O sistema inclui sensores como bússola GNSS, radar, sonar e câmeras PTZ, além de atuadores hidráulicos e motores potentes para controle de direção e velocidade.

### Sistema de Comunicação

O sistema de comunicação do VSNT-Lab, esquematizado na figura 2, foi projetado para garantir conectividade confiável entre a embarcação e o navio-mãe. Ele utiliza uma configuração híbrida que combina:

- **Rede Mesh:** Baseada no rádio NetNode para comunicação local de baixa latência.
- **Conexão 4G com VPN:** Para comunicação de longa distância, utilizando o aplicativo TailScale para estabelecer uma VPN segura.

**Figura 2:** Sistema de Comunicação do VSNT-Lab



Fonte: Lima et al. [1].

Essa infraestrutura é crucial para a operação remota e autônoma do sistema, permitindo controle, troca de dados e ajustes em tempo real.

## 3.2 Coleta de Dados

A coleta de dados para análise de comunicação entre o navio-mãe e o VSNT-Lab deve focar em métricas como latência, taxa de perda de pacotes, throughput e jitter. As medições devem ser realizadas em intervalos regulares, como a cada minuto, para gerar séries temporais detalhadas. Esses dados podem ser coletados tanto no canal mesh quanto na VPN e armazenados centralmente em um servidor, idealmente localizado no navio-mãe ou em uma base de apoio terrestre.

Para garantir a qualidade dos dados, é necessário filtrar medições afetadas por condições atípicas, como tráfego interno elevado, e descartar séries com número insuficiente de amostras. Um volume significativo de séries temporais, abrangendo diferentes condições operacionais, deve ser coletado para suportar análises robustas. Esse processo assegura que as medições reflitam fielmente o desempenho da rede em cenários operacionais reais.

## 3.3 Modelagem com HMM

Para modelar as condições da comunicação entre o navio-mãe e o VSNT-Lab, utilizaremos Cadeias de Markov Ocultas (HMM). O HMM é uma ferramenta poderosa para identificar padrões ocultos em séries temporais, como os estados subjacentes de uma rede de comunicação, a partir de observações visíveis, como métricas de desempenho. Neste contexto, definimos três estados ocultos principais: *rede boa*, *rede degradada* e *rede indisponível*, cada um associado a probabilidades distintas de emissão das observações, como latência, taxa de perda de pacotes e jitter.

Cada estado oculto representa uma condição específica da rede. Por exemplo, o estado *rede boa* está associado a baixas taxas de perda de pacotes e latências reduzidas, enquanto o estado *rede degradada* reflete uma qualidade intermediária da comunicação, e o estado *rede indisponível* caracteriza momentos de falha severa ou completa desconexão. A parametrização do modelo será realizada utilizando o algoritmo Baum-Welch, que ajusta as probabilidades de transição entre os estados ocultos e as probabilidades de emissão, com base nos dados coletados. Por meio do algoritmo de Viterbi, será possível inferir a sequência de estados ocultos mais provável a partir das métricas observadas, permitindo uma análise detalhada do desempenho da comunicação ao longo do tempo.

## 3.4 Implementação de RL

A implementação de Aprendizado por Reforço (RL) será fundamentada no formalismo de Processos de Decisão de Markov (MDP), que modelam a dinâmica do sistema de comunicação do VSNT-Lab. O MDP será definido por um conjunto de estados ( $S$ ), representando as condições de rede detectadas pelo modelo HMM, um conjunto de ações ( $A$ ), que incluem a seleção do canal de comunicação (mesh ou VPN) ou ajustes nos parâmetros de transmissão, e uma função de recompensa ( $R$ ), projetada para incentivar decisões que maximizem a qualidade e estabilidade da comunicação.

Os estados ( $S$ ) incluirão informações sobre métricas observadas (como latência e perda de pacotes) e o canal atualmente ativo. As ações ( $A$ ) permitirão trocar dinamicamente entre os canais mesh e VPN ou manter a configuração atual. A função de recompensa ( $R$ ) será definida para penalizar mudanças desnecessárias de canal, latências elevadas e perdas de pacotes, enquanto valoriza ações que mantêm uma comunicação estável e eficiente. O algoritmo de Value Iteration

será utilizado para encontrar a política ótima ( $\pi^*$ ) que determina a melhor ação para cada estado, considerando um horizonte de planejamento e as restrições operacionais do sistema. Esta abordagem permitirá uma gestão inteligente e adaptativa da comunicação, reduzindo interrupções e otimizando o desempenho em cenários desafiadores.

### 3.5 Validação

A validação do método proposto será realizada em cenários reais, explorando as operações de comunicação entre o navio-mãe e o VSNT-Lab. Os testes serão conduzidos em ambientes representativos, como a Baía de Guanabara e a Baía de Sepetiba, locais que oferecem desafios característicos de comunicação marítima, incluindo interferências ambientais, variações de distância e condições meteorológicas adversas.

Os experimentos incluirão a coleta de métricas de desempenho dos canais mesh e VPN em diferentes condições operacionais. Durante os testes, o modelo implementado será avaliado quanto à sua capacidade de identificar estados ocultos de rede, prever mudanças nas condições de comunicação e tomar decisões ótimas por meio do RL. As métricas de avaliação incluirão latência, taxa de perda de pacotes e a quantidade de mudanças de canal realizadas.



## Referências

- [1] LIMA, D. S. de et al. Towards autonomous control system in brazilian navy's usv-lab using moos-ivp framework. *IFAC PapersOnLine*, Elsevier, v. 58, n. 20, p. 35–40, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896324010029>>.
- [2] ALQURASHI, F. S. et al. Maritime communications: A survey on enabling technologies, opportunities, and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 10, n. 4, p. 3525–3547, 2023.
- [3] GE, J.; LI, T.; GENG, T. The wireless communications for unmanned surface vehicle: An overview. In: CHEN, Z. et al. (Ed.). *Intelligent Robotics and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 113–119. ISBN 978-3-319-97586-3.
- [4] SILVA, N. A. A. da. *Inferindo a qualidade de serviço em redes via aprendizado por reforço*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Março 2021.