

# Protocolo de Comunicação para Frota de Embarcações de Superfície não Tripuladas<sup>\*</sup>

Wellington Rodrigo de Freitas Costa<sup>\*</sup>,  
Alexandre Sztajnberg<sup>\*</sup>, José Paulo Vilela Soares da Cunha<sup>\*</sup>,  
Lisandro Lovisolo<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, (e-mail: wellington@ime.uerj.br, alexszt@ime.uerj.br, jpaulo@ieee.org, lisandro@uerj.br)

**Abstract:** This work addresses wireless communication for a fleet of unmanned surface vehicles (USVs) in aquatic environment. In order to carry out the communication in this complex scenario, an application protocol operating over a Wi-Fi network in the *ad hoc* mode combined with the AODV routing protocol (*Ad-hoc* On-demand Distance Vector) is proposed. The proposed protocol is based on IP broadcast messages limited to one hop and bounded length (bytes). The performance and limitations of the protocol are evaluated by means of simulations. The results indicate that the proposed protocol extends the range of the communication network and may be used for the cooperative control and monitoring of USVs.

**Resumo:** Este trabalho aborda a comunicação sem fio para uma frota de veículos de superfície não tripulados (*Unmanned Surface Vehicles*, USVs) em ambiente aquático. Para realizar a comunicação neste cenário desafiador, propõe-se um protocolo de aplicação que opera sobre uma rede *Wi-Fi* em modo *ad hoc* combinado com o protocolo de roteamento AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*). O protocolo proposto utiliza mensagens *broadcast* IP limitadas a um salto e com comprimentos (*bytes*) limitados. Foram realizadas simulações para verificar o desempenho do protocolo e identificar suas limitações. Os resultados indicam que o protocolo proposto amplia o alcance da rede de comunicação e pode ser utilizado para o controle cooperativo e monitoramento de USVs.

**Keywords:** Naval communication; Wireless network; IEEE 802.11; Unmanned surface vehicle; NS-3 Network Simulator; MATLAB.

**Palavras-chaves:** Comunicação naval; Redes sem fio; IEEE 802.11; Veículo de superfície não tripulado; Simulador de rede NS-3; MATLAB.

## 1. INTRODUÇÃO

Veículos de superfície não tripulados (*Unmanned Surface Vehicles*, USVs) têm sido utilizados em missões estratégicas em mares, rios e lagos (Liu et al., 2016), para sensoriamento, defesa, monitoramento e mitigação de desastres ambientais. O uso de USVs permite o desenvolvimento de ações mais precisas, com menor custo e em cenários perigosos. Por outro lado, ambientes marítimos geralmente não oferecem infraestrutura de redes de comunicação como é possível dispor em superfícies terrestres, o que faz com que as soluções predominantes dependam do uso de sistemas de satélites ou conexões de longo alcance, mas com baixas taxas de transmissão (Zolich et al., 2018). Além disso, falhas de comunicação, recorrentes nesses cenários, podem levar a situações indesejadas de perda de controle da missão e de dificuldades para estabelecer a cooperação (Tardioli et al., 2010) entre os USVs em uma frota.

Este trabalho aborda a comunicação sem fio para uma frota de USVs, considerando cenários onde há uma estação

base e uma ou mais embarcações que executam missões simples, tais como se deslocar para uma posição desejada, sensorar e cercar uma determinada área. Para realizar as missões, as embarcações precisam se comunicar com a estação base e entre si. Assim, foram desenvolvidos: (i) um modelo da comunicação da frota com dois tipos de elementos: uma estação base e embarcações que podem agir como nós remetentes de informação de telemetria (obtida de sensores locais, por exemplo), nós destinatários de informação de controle, recebida da estação base ou de estações vizinhas, ou ainda como nós intermediários que reencaminham mensagens para a base, aumentando o raio de operação; (ii) um protocolo de comunicação no nível de aplicação para a comunicação entre os elementos; (iii) a implementação do protocolo no simulador de redes (*Network Simulator 3*, NS-3) (NSNAM, 2020); (iv) um controle simples do movimento de embarcações simulado no MATLAB (MathWorks, 1994); (v) a integração entre o NS-3 e o MATLAB para combinar as melhores características de cada um desses simuladores.

O protocolo de aplicação proposto baseia-se na pilha de protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) para a comunicação entre a estação

<sup>\*</sup> Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, FAPERJ e CAPES — Código de Financiamento 001.

base, de posição fixa, e as embarcações não tripuladas. O protocolo explora ainda as características do canal de comunicação da rede sem fio Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) IEEE 802.11g e o protocolo de transporte UDP evitando o *overhead* que o TCP poderia impor. A rede e o protocolo desenvolvido são simulados no NS-3 e a frota de embarcações no MATLAB. A integração entre os dois usa a interface de programação do MATLAB, permitindo a troca de informações entre os dois. A simulação de missões usando os dois ambientes integrados permite avaliar conjuntamente o comportamento do protocolo proposto e a frota de embarcações em movimento.

Para transpor alguns dos desafios mencionados em (Zolich et al., 2018), a rede IEEE 802.11g em modo *ad-hoc* foi combinada com o protocolo de roteamento AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) e com mensagens *broadcast* IP limitadas a um salto tendo em vista: (i) estabelecer um mecanismo de comunicação de 1-N (um para muitos) entre embarcações vizinhas, dado que cada mensagem enviada é interceptada pelos nós dentro do alcance do enlace (vizinhança); (ii) prover um mecanismo para detecção da vizinhança de cada embarcação; (iii) permitir o controle das mensagens transmitidas e, com isso, a possibilidade da agregação de informações.

Foram realizadas simulações para verificar o desempenho do protocolo e identificar os limites impostos pelo posicionamento e velocidade das embarcações, a potência dos sinais *Wi-Fi* recebidos, as taxas de entrega e os tempos de resposta nos diferentes cenários.

A Seção 2 apresenta as principais características de USVs e a Seção 3 introduz as redes IEEE 802.11. A Seção 4 apresenta o protocolo de aplicação proposto e discute suas características e decisões de projeto. Detalhes de implementação são apresentados na Seção 5. A Seção 6 apresenta os resultados de simulações obtidos e, por último, a Seção 7 traz as considerações finais.

## 2. EMBARCAÇÕES DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADAS

Embarcações de superfície não tripuladas (USVs) dispensam equipe de guarnição. Um USV apresenta uma estrutura física (casco), um sistema de propulsão, um sistema de coleta de dados de sensores, um sistema de comunicação, um sistema de supervisão (na maioria das vezes, denominado estação base) e um sistema de guiagem, navegação e controle (*Guidance, Navigation and Control, GNC*) que integra os demais sistemas (Naeem et al., 2009; Liu et al., 2016; Villa et al., 2016).

A coordenação e a cooperação entre veículos (por exemplo, mecanismos para manter uma determinada formação e evitar colisões) dependem da capacidade de comunicação entre os USVs e, geralmente, uma base fixa (Colito, 2007). As características dos ambientes em que os USVs operam (mares, rios e lagos) geram inúmeros desafios nas áreas de controle de sistemas, comunicação e sistemas distribuídos. As propriedades aquáticas (refração e reflexão), as correntes e ondas marítimas e os ventos (movendo os USVs e estações) causam grandes problemas na comunicação e nos sistemas GNC dos USVs (Choi, 2006; Ang and Wen, 2008; Balkees P A et al., 2015; Liu et al., 2016).

## 3. REDE LOCAL SEM FIO

As redes Wi-Fi (IEEE 802.11) destacaram como a principal tecnologia para redes locais sem fio (*wireless local area network, WLAN*) (Kurose and Ross, 2010; Tanenbaum et al., 2011). Redes Wi-Fi apresentam dois modos de operação: *Infraestruturado* com a presença de um Ponto de Acesso (*Access Point, AP*) que concentra toda a comunicação; *Ad-Hoc* sem a presença do AP, no qual os nós se comunicam diretamente uns com os outros (Kurose and Ross, 2010; Tanenbaum et al., 2011).

O protocolo desenvolvido neste trabalho emprega o padrão IEEE 802.11g, o mais recente sem dependência de multi-antenas, que atinge maiores taxas e alcance, em 2,4 GHz, se comparado aos padrões predecessores. O modo *ad-hoc* é empregado com o intuito de facilitar a entrada e a saída de nós, ampliar o alcance utilizando nós intermediários e acrescentar capacidade de adaptar-se à mobilidade de embarcações.

## 4. PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO PROPOSTO

O protocolo desenvolvido opera na camada de Aplicação da pilha TCP/IP. Os nós da rede foram divididos em duas categorias, os nós móveis, denominados de embarcação, e um nó com posição fixa, denominado estação base. A estação base é responsável por coordenar as ações da frota, enquanto cada embarcação apresenta autonomia para decidir quando e como se mover.

Os nós podem ser remetentes, destinatários e intermediários. Um nó é remetente se gera uma mensagem e a envia pela rede, enquanto um nó é destinatário há mensagem para ele. Um nó é intermediário se deve encaminhar uma mensagem recebida.

A topologia da rede muda de acordo com a mobilidade das embarcações. Um exemplo de topologia é apresentado na Figura 1. A estação base (no centro, apenas de forma ilustrativa) se comunica diretamente com as embarcações que estão em alcance e a comunicação com as demais embarcações é dependente de embarcações intermediárias.

Para que cada embarcação possa detectar as embarcações vizinhas, utiliza-se pacotes de difusão (*broadcast*) com tempo de vida (TTL) igual a um, restringindo o roteamento a um salto (*hop*); assim, esses pacotes são recebidos somente pelos nós que se encontram dentro do alcance do nó difusor do pacote.

Em função do uso de difusão limitada a um salto com o protocolo de roteamento AODV (Perkins et al., 2003), o protocolo desenvolvido agrega pacotes de telemetria de embarcações. Um pacote de telemetria apresenta as informações de uma embarcação que são trocadas entre a mesma e a estação base. Um pacote de mensagem enviado pela rede pode conter até cinco pacotes de telemetria.

Parâmetros de enlace e o tamanho máximo das mensagens foram definidos com o objetivo de evitar fragmentação e remontagem nas várias camadas TCP/IP. Os quadros enviados em difusão não devem ser fragmentados pela camada de enlace/física utilizada. Para isso, foi necessário verificar qual eram o tamanho máximo suportado e os tamanhos dos cabeçalhos das camadas superiores por

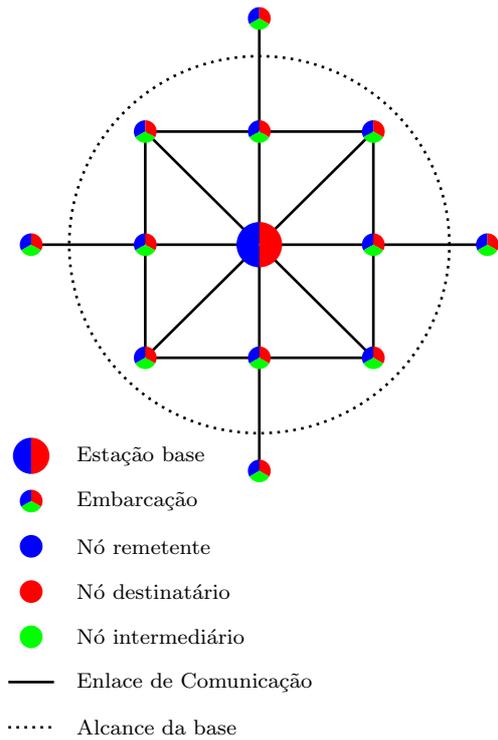


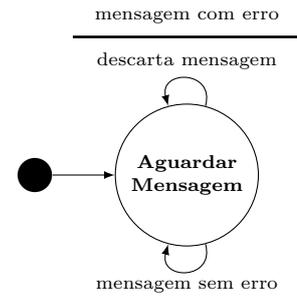
Figura 1. Retrato da topologia de uma frota de embarcações de superfície não tripuladas.

pacote. Como resultado, os pacotes de mensagens do protocolo desenvolvido contêm no máximo 2200 bytes. Para que a camada de rede não fragmente as mensagens, a unidade máxima de transmissão (*Maximum Transmission Unit*, MTU) foi estipulada como 2300 bytes.

Na proposta, tanto as embarcações quanto a estação base sempre enviam mensagens por difusão IP. Assim, as mensagens são enviadas pelo remetente sem a necessidade de bloqueio para aguardar uma resposta. Porém, os nós enviam seus pacotes de telemetria e aguardam a confirmação/comando da estação base por um tempo determinado como mostra a Figura 3. Esgotado o temporizador, o nó então prepara e envia uma nova mensagem com o pacote de telemetria atualizado.

A Figura 2 mostra a máquina de estados finitos correspondente ao protocolo proposto para a estação base. Ela aguarda mensagens das embarcações. Ao término da rotina de verificação e atualização, a estação base envia uma mensagem com confirmações e/ou comandos para as embarcações e volta a aguardar uma nova mensagem. Mensagens com erros são descartadas, como também fazem as embarcações (Figura 3). Para detectar pequenos erros foi utilizada uma soma de verificação de 32 bits (Kurose and Ross, 2010).

O protocolo proposto para as embarcações apresenta dois estados, Figura 3. Ao iniciar, cada embarcação prepara um pacote de mensagem contendo sua telemetria, o envia e dispara um temporizador passando para o estado “aguardar mensagem” e passa a esperar a confirmação da estação base. Quando essa mensagem é recebida, o nó volta ao estado “preparar mensagem”. Caso contrário, i.e., o temporizador se esgote, o nó envia uma mensagem atua-



verifica e atualiza cada pacote de telemetria recebido e envia uma mensagem de confirmação para todas as embarcações identificadas

Figura 2. Máquina de estados correspondente do protocolo proposto para a estação base.

lizada e o temporizador é reiniciado. Em ambos os estados, pacotes de telemetria recebidos de outras embarcações são encaminhados com o seu próprio pacote de telemetria, com exceção dos já retransmitidos.

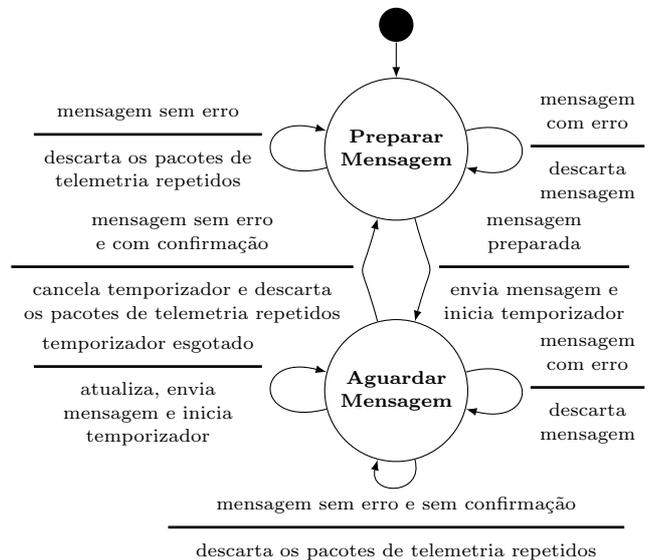


Figura 3. Máquina de estados correspondente ao protocolo proposto para as embarcações.

## 5. IMPLEMENTAÇÃO DO PROTOCOLO NO NS-3 INTEGRADO COM O MATLAB

O protocolo foi implementado em C++ (ISO, 2011) como um módulo de extensão do NS-3. As estruturas de pacotes de mensagens e de pacotes de telemetria foram desenvolvidas nas rotinas que implementam o protocolo proposto para as embarcações e para a estação base.

A modelagem do canal de comunicação em ambiente aquático foi realizada com a implementação do modelo de propagação de dois raios com desvanecimento, o qual apresenta características específicas para tal ambiente (Wen et al., 2007; Ang and Wen, 2008; Lopes, 2013; Oliveira, 2015; Komolkiti et al., 2016). Os atrasos de propagação são dados pelas razões entre as distâncias dos nós e a velocidade de propagação da onda.

Uma vez que o NS-3 dispõe apenas de modelos de mobilidade cinemáticos muito simples (e.g., movimento retilíneo

uniformemente acelerado) e inadequados para representar a dinâmica de embarcações, utilizou-se o MATLAB para simular o movimento das embarcações e o seu controle. Outro simulador mais específico para embarcações poderia ter sido usado, mas optou-se pelo MATLAB por ser mais versátil.

O diagrama de blocos na Figura 4 apresenta o modelo dinâmico de um dos graus de liberdade para uma das embarcações, no qual  $p(t)$  é a posição,  $\dot{p}(t)$  é a velocidade,  $\ddot{p}(t)$  é a aceleração,  $u(t)$  é o sinal de controle e  $b$  é o coeficiente de arraste. Para manter a simplicidade deste trabalho e o foco na comunicação, assume-se que cada embarcação movimenta-se apenas no plano horizontal ao longo de dois eixos ( $x$ ,  $y$ ) independentemente e sem rotações. Para realizar o rastreamento de trajetórias, usou-se um controlador com ações proporcional e derivativa em cada grau de liberdade. Mais detalhes sobre a implementação são apresentados em (Costa, 2020).

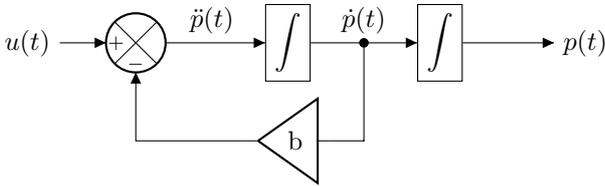


Figura 4. Diagrama de blocos do modelo dinâmico de um grau de liberdade de cada embarcação.

A integração entre os dois ambientes de simulação foi realizada utilizando-se a interface de programação do MATLAB. Assim, o NS-3 interrompe periodicamente a execução e aciona a rotina de sincronização com o MATLAB. Durante a execução da rotina de simulação das embarcações e seu controle no MATLAB, o NS-3 aguarda e a sua evolução temporal é estacionada. Essa é continuada após a rotina de sincronização terminar e retornar as posições, velocidades e acelerações atualizadas das embarcações simuladas pelo MATLAB. Durante a sincronização entre os ambientes, as informações de todas as embarcações são trocadas, porém, o cálculo de posição, velocidade e aceleração para cada embarcação é realizado individualmente, como um agente.

Sumarizando, o NS-3 simula a comunicação incluindo o protocolo desenvolvido e o MATLAB simula a dinâmica de movimento das embarcações e o seu controle.

Por simplicidade ainda não foram consideradas na modelagem da dinâmica das embarcações os efeitos das ondas, correntes marítimas, ventos, dentre outros efeitos hidrodinâmicos presentes em ambientes aquáticos e embarcações (Fossen, 2011). Apesar de ter sido utilizado um modelo simples para representar a dinâmica das embarcações, a integração desenvolvida permite que modelos mais complexos possam ser utilizados. Futuramente, pretende-se incorporar modelos dinâmicos mais realistas para as embarcações e estratégias de controle mais elaboradas para a frota, que permitam considerar outros aspectos de comunicação e controle.

## 6. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Avaliou-se o comportamento do canal, da rede e do protocolo proposto em alguns cenários por meio de simulações.

As avaliações do enlace de comunicação foram realizadas com dois nós comunicantes com combinações distintas de nós remetente e destinatário, tamanhos das mensagens e velocidades do nó remetente. Tais avaliações iniciais serviram de base para parametrizar os cenários de simulação para avaliação do protocolo proposto. A Tabela 1 apresenta a configuração das simulações.

Tabela 1. Parâmetros de simulação.

Padrão Wi-Fi	IEEE 802.11g
Largura de banda do Canal	20 MHz
Frequência de operação	2,412 GHz
Taxa de transferência	6 Mbps
Altura da antena da estação base	20 m
Altura da antena das embarcações	3 m
Potência de transmissão	20 dBm
Sensibilidade de recepção	-95 dBm
Ganho da antena da estação base	16 dBi
Ganho da antena das embarcações	10 dBi
Parâmetro de Ruído do canal - NF	10 dB
Perda total do canal	5 dB
Velocidade de propagação da onda	299.792.458 m/s
Modelo de propagação dois raios com desvanecimento	
Posição do nó com a aplicação da estação base (0 m, 0 m)	
Velocidade máxima de 5 m/s em cada eixo (x,y)	

Foram realizadas 30 rodadas de simulação, apresentamos os valores médios e os erros para um intervalo de confiança de 95%. Em todas as simulações, a estação base é iniciada no instante zero do simulador e as embarcações são iniciadas sequencialmente da mais próxima até a mais distante da estação base, com intervalos iguais a 10 ms. Selecionamos alguns resultados em cada cenário para discussão.

Para avaliar o protocolo proposto, foram realizadas simulações em três cenários diferentes:

- **Cenário 1:** estação base e uma embarcação. Depois de receber o comando da estação base para deslocar-se, a embarcação se move linearmente até a posição definida como destino.
- **Cenário 2:** estação base e cinco embarcações posicionadas em um ponto fixo. As embarcações se comunicam com a estação base durante um tempo determinado.
- **Cenário 3:** estação base e cinco embarcações que realizam uma missão com mobilidade. A estação base envia o comando para as embarcações deslocarem-se para uma posição de destino, permanecerem por um tempo e então retornarem. Esses comandos são enviados conforme as embarcações progridem.

No Cenário 1, avaliamos o comportamento geral do protocolo proposto no cenário ideal com apenas uma embarcação conectada à estação base. A embarcação é iniciada na posição (1 m, 0 m) e ao receber o comando da estação base desloca-se até atingir a posição (30 km, 0 m).

O Cenário 2 é esquematicamente representado na Figura 5. O alcance da estação base é o do arco pontilhado e há cinco embarcações previamente posicionadas ao longo de uma reta entre a estação base e o destino desejado, indicado pelo ponto  $P$ . A primeira embarcação está dentro do alcance da estação base. Este cenário avalia o protocolo em casos extremos de atuação dos nós intermediários e se é factível aumentar o alcance de comunicação. As

embarcações foram posicionadas nas coordenadas (12 km, 0 m), (15 km, 0 m), (18 km, 0 m), (21 km, 0 m), (24 km, 0 m), de forma a estarem ao alcance das vizinhas mais próximas. Decorridos cinco minutos, a estação base envia os comandos de retorno, iniciando pela embarcação mais distante e terminando na mais próxima a essa.

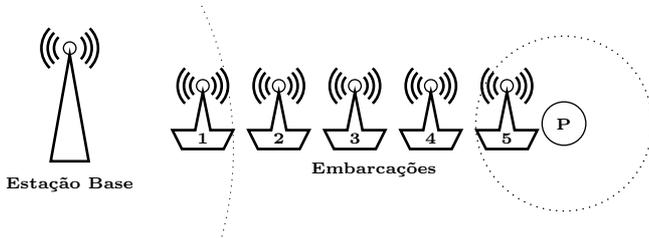


Figura 5. Cenário 2.

O Cenário 3 permite avaliar como o protocolo se comporta com mobilidade e mudança na topologia da rede *ad hoc*. As embarcações foram posicionadas nas coordenadas (12 km, 0 m), (12 km, 2 km), (12 km, 4 km), (12 km, -2 km) e (12 km, -4 km). Decorridos poucos segundos a estação base envia o comando para as embarcações deslocarem-se e posicionarem-se num raio de 3 km do ponto de coordenadas (15 km, 0 m). Para finalizar, as embarcações recebem o comando de retorno da estação base e, então, seguem para uma posição distando no máximo 10 km da estação base.

**Cenário 1.** A Figura 6 e a Figura 7 apresentam o tempo de resposta e a taxa de entrega no nó em movimento em função da distância, respectivamente. O gráfico na Figura 6 mostra que o tempo de resposta (tempo decorrido entre o envio da mensagem de telemetria pela embarcação e a chegada da mensagem de confirmação vinda da estação base) permanece entre 0,9 ms e 1,6 ms e que, em aproximadamente 13 km, o tempo de resposta aumenta rapidamente. Complementarmente, o gráfico na Figura 7 mostra a taxa de entrega de pacotes no nó móvel, onde vê-se a perda de comunicação em distâncias superiores a 13 km.

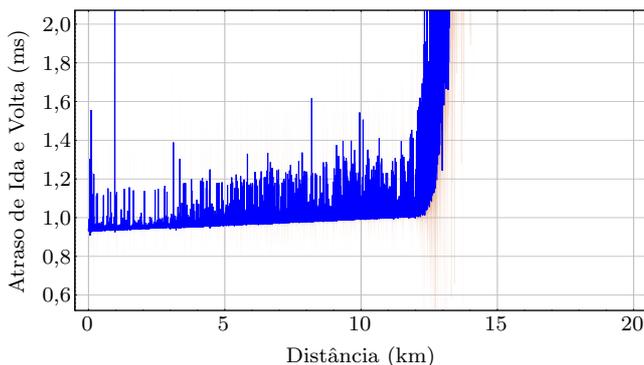


Figura 6. Cenário 1: Atraso de ida e volta (RTT) entre um nó fixo e um nó móvel.

**Cenário 2.** O gráfico na Figura 8 mostra as mudanças de estado das embarcações, onde cada cor representa a evolução de uma embarcação. Mesmo com algumas curvas sobrepostas, é possível notar que as embarcações passam por cada estágio determinado: 0) estágio inicial antes de receber a primeira mensagem da estação base; 1) primeira

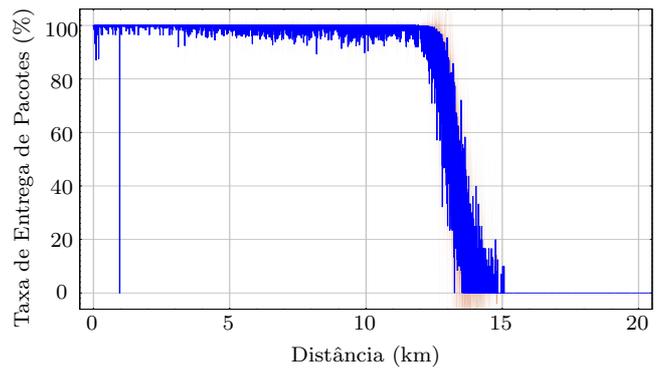


Figura 7. Cenário 1: Taxa de entrega de pacotes (PDR) entre um nó fixo e um nó móvel.

mensagem recebida da estação base; 2) embarcação se deslocando em direção ao destino; 3) destino alcançado, permanência até receber comando de retorno; 4) embarcação se deslocando em direção a estação base; 5) embarcação dentro do alcance determinado pela estação base; 6) finalização do protocolo 7) finalização confirmada pela estação base; 8) embarcação finalizada.

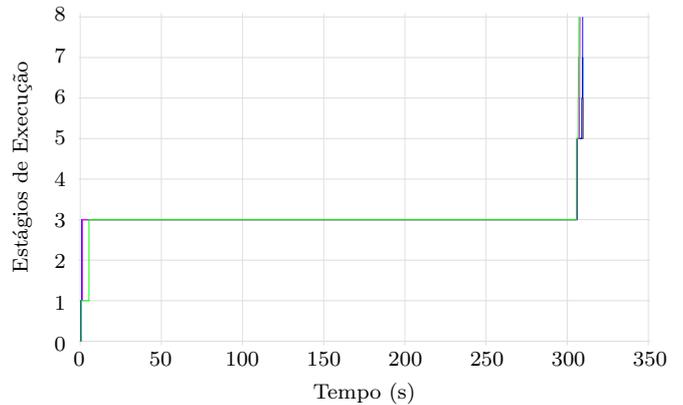


Figura 8. Cenário 2: Evolução das embarcações.

As Figuras 9 e 10 apresentam o tempo de resposta percebido pelas embarcações 5 e 2, respectivamente, indicadas na Figura 5. Observa-se que mesmo com o dobro da distância da embarcação mais próxima da estação base, o tempo de resposta da embarcação 5 é menor que 500 ms e a embarcação 2 de aproximadamente 50 ms.

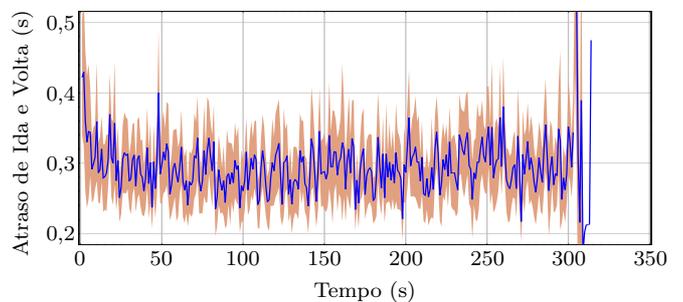


Figura 9. Cenário 2: Atraso de ida e volta (RTT) da embarcação 5.

Cada embarcação pode identificar as embarcações vizinhas inspecionando o campo de origem das mensagens recebidas. Ocorrem oscilações nas quantidades de embarcações

vizinhas a uma embarcação dada ao longo do tempo, principalmente quando há outros nós no limite do raio de alcance. Nesse caso, os temporizadores podem expirar com alguma frequência e as mensagens recebidas, de onde são obtidas as informações de vizinhança, são descartadas. Assim, para avaliar a quantidade de nós vizinhos, filtra-se essa variação aplicando a média móvel nos últimos 120 s.

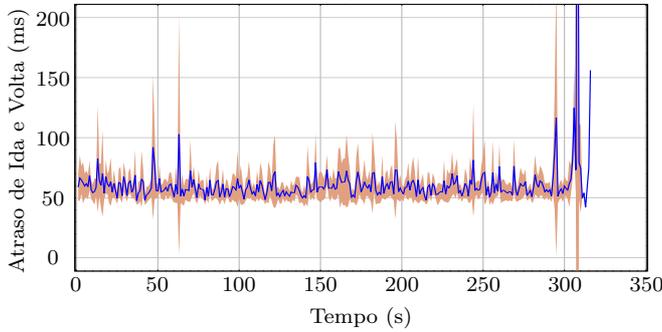


Figura 10. Cenário 2: Atraso de ida e volta (RTT) da embarcação 2.

Os gráficos nas Figuras 11 e 12 mostram a quantidade de vizinhos percebidos pelas embarcações 5 e 2, respectivamente, ao longo do tempo. Como mostrado na Figura 5, confirma-se que o máximo de nós vizinhos detectados pela embarcação 5 é um, por apresentar apenas a embarcação 4 dentro do raio de alcance. Por outro lado, a embarcação 2 detectou duas, as embarcações 1 e 3.

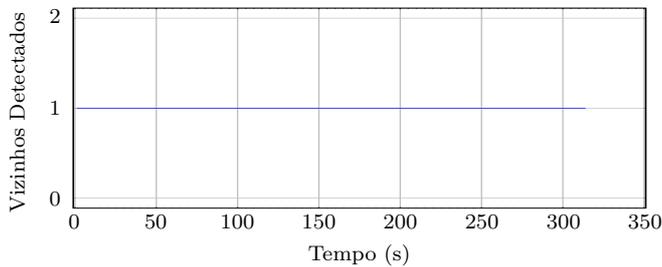


Figura 11. Cenário 2: Vizinhança da embarcação 5 com média móvel.

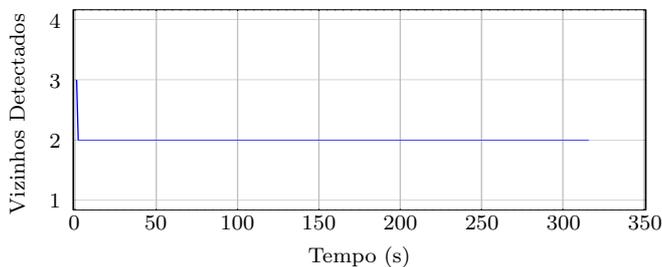


Figura 12. Cenário 2: Vizinhança da embarcação 2 com média móvel.

**Cenário 3.** A Figura 13 mostra as trajetórias realizadas pelas embarcações. Todas as embarcações partiram de sua posição inicial “●”, seguiram para próximo do destino “■” e retornaram para próximo da estação base na posição final “★”. Assim como mostrado para o cenário 2, a Figura 14 mostra as mudanças de estado das embarcações, cada cor representa a evolução de uma embarcação, usando as

mesmas cores da Figura 13. Como algumas embarcações apresentam trajetórias semelhantes e posições iniciais e finais parecidas, suas curvas se sobrepõem, por isso somente é possível distinguir três das cinco embarcações identificadas.

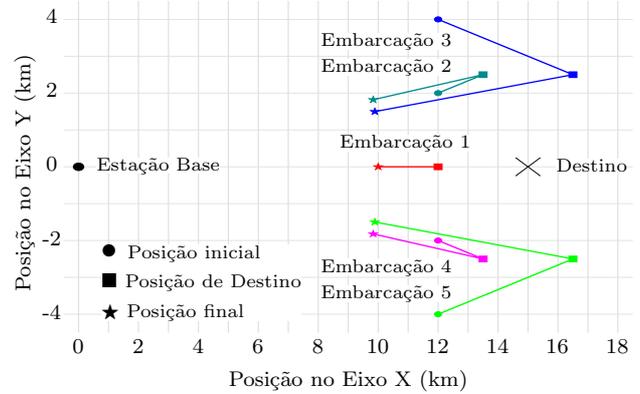


Figura 13. Cenário 3: Trajetórias executadas.

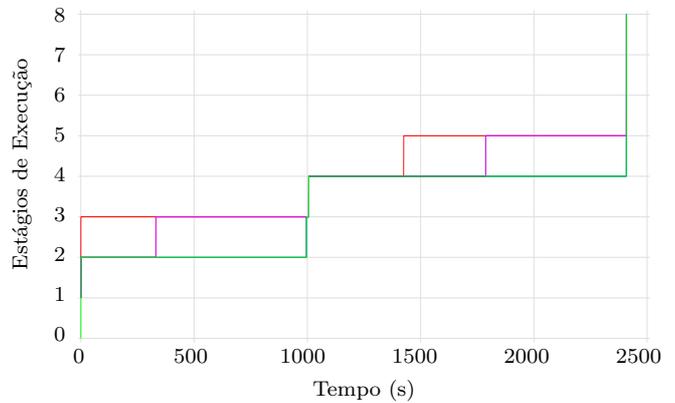


Figura 14. Cenário 3: Estágios de execução das embarcações.

O gráfico na Figura 15 mostra o tempo de resposta e o gráfico na Figura 16 mostra a taxa de entrega da embarcação 1. O tempo de resposta é mantido abaixo de 15 ms, este diminui com o afastamento das embarcações e aumenta com a aproximação dessas, pois a maior proximidade causa o aumento das colisões entre os pacotes transmitidos. A taxa de entrega fica acima de 97% e também sofreu variação com o afastamento e aproximação das demais embarcações.

Os gráficos na Figura 17 mostram a quantidade de embarcações vizinhas percebidas pela embarcação 1. Vê-se a variação na quantidade de vizinhos causada pela movimentação das embarcações e os decorrentes efeitos na rede. Como ilustração apresentamos a informação original, sem média móvel, para se observar a oscilação e o efeito de filtro da média móvel.

As embarcações iniciam em posições próximas umas das outras, se afastam e voltam a se aproximar. Após pouco mais de 500 s, dois nós continuam se afastando e os outros dois se aproximando, causando a oscilação observada até os 650 s. De 650 s em diante, o nó consegue identificar as duas embarcações mais próximas e a estação base. A partir de aproximadamente 1500 s, as últimas embarcações passam

a estar dentro de alcance, até que, aos 1700s, todas as embarcações estão dentro do alcance umas das outras.

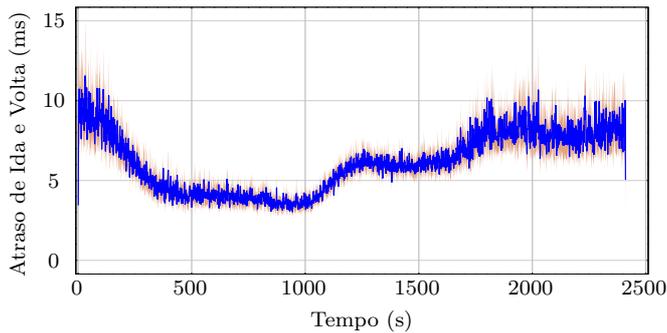


Figura 15. Cenário 3: Atraso de ida e volta (RTT) da embarcação 1.

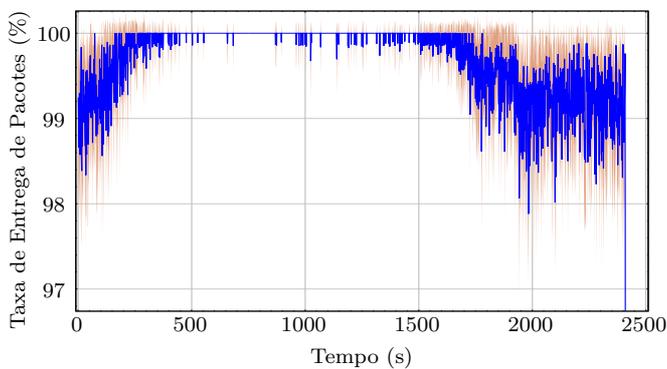


Figura 16. Cenário 3: Taxa de entrega de pacotes (PDR) da embarcação 1.

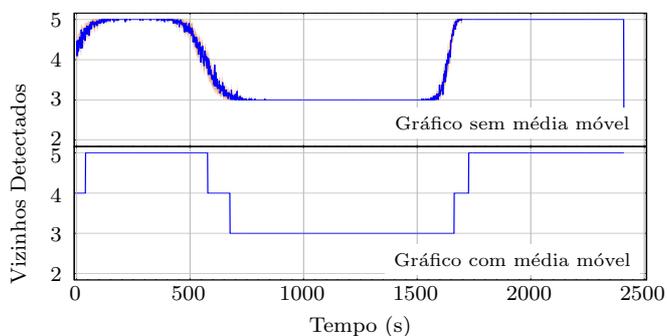


Figura 17. Cenário 3: Vizinhaça da embarcação 1.

Desses resultados, destacamos que:

- O **Cenário 1**, o mais simples, é similar àqueles discutidos em (Lopes, 2013; Oliveira, 2015) e permitiu estabelecer as distâncias máximas entre os nós para os demais cenários.
- No **Cenário 2** O alcance da comunicação foi dobrado em relação aos resultados do **Cenário 1** e o tempo de resposta foi menor que 500ms. Como agravante este cenário acaba apresentando mais colisões na rede devido aos problemas do terminal escondido e do terminal exposto, típicos em redes sem fio (Kurose and Ross, 2010; Tanenbaum et al., 2011). O protocolo permitiu o estabelecimento da comunicação entre os elementos da rede, mesmo diante de tais problemas.

- O **Cenário 3** apresentou resultados razoáveis mantendo a qualidade da comunicação mesmo em um cenário com mobilidade. Além disso, foi possível para as embarcações detectarem sua vizinhança apenas com as trocas de mensagens previstas pelo protocolo.
- Em geral, o protocolo permitiu a comunicação entre os nós da rede nos **Cenários 2** e **3** observados os limites de comunicação identificados no **Cenário 1**.

## 7. CONCLUSÃO

Nas simulações realizadas, o protocolo proposto foi capaz de manter a comunicação entre as embarcações e a base em todos os cenários testados, desde que a distância entre os nós não ultrapasse o alcance máximo, o que ocorreu apenas no **Cenário 1**. Isto indica que a abordagem e o protocolo propostos são promissores para aplicações de controle cooperativo de frotas de USVs e monitoração de dados ambientais nos cenários operacionais vislumbrados. Os atrasos de comunicação observados nas simulações foram inferiores a 500 ms.

Algumas possibilidades de aprimoramento são vislumbradas a partir dos resultados obtidos. A primeira delas é a implementação de um mecanismo de escalonamento para transmissão que se adapte melhor à topologia da rede. Por exemplo, poderia ser considerado o número de saltos de um pacote de telemetria, bem como a posição e a velocidade das embarcações, atrasos e taxa de entrega percebidos, quantidade de nós vizinhos ou a indicação da direção das mensagens (estação base para embarcação ou embarcação para estação base), informações já incluídas no protocolo.

Futuramente, pretende-se ampliar os cenários de avaliação das simulações para verificar a sua escalabilidade quanto ao número de USVs. Também, pretende-se incluir algoritmos de controle dos USVs mais sofisticados para explorar a sua autonomia, por exemplo, para que evitem colisões, atuem de forma cooperativa em missões complexas e tomem medidas para que não saiam do alcance da comunicação, tendo em vista mantê-la entre todos os USVs e a base.

## REFERÊNCIAS

- Ang, C. and Wen, S. (2008). Signal strength sensitivity and its effects on routing in maritime wireless networks. In *2008 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 192–199.
- Balkees P A, S., Sasidhar, K., and Rao, S. (2015). A survey based analysis of propagation models over the sea. In *2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 69–75.
- Choi, D.Y. (2006). Measurement of radio propagation path loss over the sea for wireless multimedia. In F. Boavida, T. Plagemann, B. Stiller, C. Westphal, and E. Monteiro (eds.), *NETWORKING 2006. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems: 5th International IFIP-TC6 Networking Conference, Coimbra, Portugal, May 15-19, 2006. Proceedings*, 525–532. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- Colito, J. (2007). *Autonomous Mission Planning and Execution for Unmanned Surface Vehicles in Compliance with the Marine Rules of the Road*. Master's thesis, University of Washington.
- Costa, W.R.F. (2020). *Protocolo de Comunicação para Frota de Embarcações Não Tripuladas*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fossen, T.I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley, Chichester, UK.
- ISO (2011). *ISO/IEC 14882:2011 Information technology - Programming languages - C++*. pub-ISO, third edition.
- Komolkiti, P., Boonkird, T., and Aswakul, C. (2016). Performance measurement of maritime ad hoc network testbed in realistic offshore scenario. In *2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC)*, 1–4. doi:10.1109/ELINFOCOM.2016.7563011.
- Kurose, J.F. and Ross, K.W. (2010). *Redes de Computadores and a Internet: Uma abordagem Top-down*. Addison Wesley BRA.
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., and Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41(Supplement C), 71–93.
- Lopes, M.J. (2013). *Comunicações marítimas wi-fi usando a banda 5.8 ghz*. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP.
- MathWorks (1994). Matlab. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- Naeem, W., Xu, T., and Sutton, R. (2009). An intelligent integrated navigation and control solution for an unmanned surface craft. In *Signals and Systems Conference (ISSC 2009), IET Irish*, 1–6. Dublin. doi:10.1049/cp.2009.1686.
- NSNAM (2020). ns-3 network simulator. <https://www.nsnam.org>.
- Oliveira, T.T.P. (2015). *Development of an ns-3 based Simulation Tool for TCP/IP Maritime Wireless Networks*. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP.
- Perkins, C., Belding-Royer, E., and Das, S. (2003). Rfc3561 - ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. *The Internet Engineering Task Force*.
- Tanenbaum, A., Wetherall, D.J., and Translations, O. (2011). *Redes de Computadores*. Prentice Hall Brasil.
- Tardioli, D., Mosteo, A., Riazuelo, L., Villarroel, J., and Montano, L. (2010). Enforcing network connectivity in robot team missions. *The International Journal of Robotics Research*, 29(4), 460–480.
- Villa, J.L., Paez, J., Quintero, C., Yime, E., and Cabrera, J. (2016). Design and control of an unmanned surface vehicle for environmental monitoring applications. In *2016 IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, 1–5. doi:10.1109/CCRA.2016.7811411.
- Wen, S., Kong, P., Shankar, J., Wang, H., Ge, Y., and Ang, C. (2007). A novel framework to simulate maritime wireless communication networks. In *OCEANS 2007*, 1–6.
- Zolich, A., Palma, D., Kansanen, K., Fjortoft, K., Sousa, J., Johansson, K.H., Jiang, Y., Dong, H., and Johansen,
- T.A. (2018). Survey on communication and networks for autonomous marine systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*.