

Análise de Desempenho de Rede 5G para Aplicações Críticas de Veículo de Superfície Não Tripulado

Renato A. Antunes¹, Antônio J. Silvério², Pedro V. Castellanos¹, Natalia C. Fernandes¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações
Universidade Federal Fluminense (UFF) – Niterói, RJ – Brazil

²PEE/COPPE/GTA
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Rio de Janeiro, RJ – Brazil

{renatoantunes, pcastellanos, nataliacf}@id.uff.br, silverio@gta.ufrj.br

Abstract. *The advancement of 5G networks makes it possible to support new applications and services not covered by previous generations. Despite this, supporting critical applications requires the network to meet strict requirements. To investigate the feasibility of using the 5G network to serve Unmanned Surface Vehicle (USV) applications, this work conducts a performance analysis based on application requirements, carrying out experiments in real 5G network scenarios. The results obtained in these scenarios, in the network capacity tests and of the applications in operation demonstrate that, except for applications that require 25 Mbps or more, for which there is a need to plan coverage, the 5G network can meet the USV requirements.*

Resumo. *O avanço das redes 5G torna possível o atendimento de novas aplicações e serviços não atendidos pelas gerações anteriores. Apesar disso, suportar aplicações críticas exigem da rede o cumprimento de rigorosos requisitos. Com o objetivo de investigar a viabilidade do uso da rede 5G para atender aplicações de Veículo de Superfície Não Tripulado (VSNT), este trabalho conduz uma análise de desempenho com base nos requisitos das aplicações, realizando experimentos em cenários reais de rede 5G. Os resultados obtidos nesses cenários, nos testes de capacidade da rede e das aplicações funcionando, indicam que, excetuando aplicações que exijam 25 Mbps, ou mais, para as quais há necessidade de planejar a cobertura, a rede 5G está habilitada a atender aos requisitos do VSNT.*

1. Introdução

A implementação de novas tecnologias de acesso sem fio, como o 5G, tem permitido que cada vez mais novos serviços possam ser ofertados aos usuários em diversas áreas, tanto comerciais como segurança e saúde. A demanda por novos serviços e aplicações nas redes 5G é impulsionada por vários setores da sociedade e incidem em distintas exigências como elevada largura de banda, alta confiabilidade, baixa latência e alta densidade de dispositivos [Fendt et al. 2018]. Embora as operadoras de redes móveis anunciem as suas implementações de redes 5G, ainda é um desafio atender aos requisitos de aplicações críticas. Dentro desse contexto, experimentos de análise são fundamentais para avaliar se, de fato, determinada rede atende aos indicadores chave de desempenho, ou *Key Performance Indicators* (KPI), necessários para a implementação de aplicações

e serviços críticos. Além disso, os resultados das medições fornecem informações valiosas que permitem projetar, desenvolver e implementar os serviços de acordo com os requisitos.

Na última década, os sistemas de transporte inteligente vem ganhando força graças aos avanços tecnológicos, entre eles na área das telecomunicações. O interesse global crescente em questões comerciais, científicas e militares em ambientes marítimos tem impulsionado a busca pelo desenvolvimento de VSNTs ou *Unmanned Surface Vehicles* (USVs) com avançadas capacidades de orientação, navegação e controle.

Este trabalho pretende avaliar a viabilidade da utilização da rede de comunicação móvel 5G na faixa de 3,5 GHz, no que se refere aos requisitos de vazão e latência para aplicações de VSNT. São realizados experimentos com embarcação em cenário marítimo, utilizando ferramentas de geração e monitoramento de tráfego. Os resultados sugerem que a rede supre as exigências das aplicações, apresentando percentuais de atendimento acima de 95%.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados ao tema. As características do VSNT e seus requisitos são apresentados na Seção 3. A Seção 4 apresenta os experimentos reais e detalhes de implementação. A Seção 5 discorre sobre os resultados. Por fim, a Seção 6 apresenta a conclusão e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O trabalho de Lin et al. concentra-se em testes usando a arquitetura de rede 5G *Stand Alone* (5G-SA) para a verificação do desempenho da latência e a verificação da cobertura através de *drive-tests*. Destacam (i) a relação entre as taxas de vazão e o *Synchronization Signal – Reference Signal Received Power* (SS-RSRP); (ii) a latência em relação à distância da antena; e (iii) que os resultados dos testes podem se tornar referência para implantação e otimização de desempenho de rede [Lin et al. 2022].

Khosravi et al. avaliam o uso das tecnologias *Long-Term Evolution* (LTE) e *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) como alternativas de comunicação entre a estação base e o VSNT. Observam que o Wi-Fi apresenta maiores níveis de sinal, porém com perdas, e que o LTE, apesar de níveis mais baixos, os mantém contantes, concluindo que há necessidade de aprimoramento para assegurar a conexão sem fio [Khosravi et al. 2019].

Lazar et al. investigam o impacto da distância na comunicação 5G, utilizando pontos fixos, entre um equipamento de usuário e uma estação base. Concluíram que o aumento da distância em relação à antena afeta a performance do 5G [Lazar et al. 2022].

Este trabalho propõe o estudo dos VSNTs suportados por rede móvel, através de uma análise empírica em ambiente de rede real. Tem como principal contribuição o foco no VSNT e o desempenho da rede em face à propagação sobre a água, colaborando para diminuir a carência de uma aplicação ainda pouco estudada. Além disso, ao apresentar experimentos em ambiente de rede real e com equipamentos reais, diferencia-se de boa parte dos estudos encontrados que utiliza ambientes simulados para conduzir seus experimentos que podem não refletir adequadamente o ambiente real. Destaque-se ainda que, ao contrário de Lazar et al. [Lazar et al. 2022], que não abordam testes em movimento, e Khosravi et al. [Khosravi et al. 2019], que utilizam em seu estudo a tecnologia 4G-LTE,

este trabalho produz medições em movimento e em ponto fixo, visando aferir, *in loco*, o desempenho da rede para as aplicações de VSNTs, focando na mais recente tecnologia de rede móvel celular, o 5G. Fornece, também, uma contribuição complementar ao realizar experimento de aplicações em operação no VSNT através da rede 5G, cujo resultado pode servir de base para o uso dessas aplicações no mar.

3. Veículos de Superfície Não Tripulados e seus Requisitos

Os VSNTs são embarcações que operam na superfície da água e podem ser controlados remotamente ou operar de maneira autônoma. Sua utilização pode variar consideravelmente, adaptando-se conforme a aplicação específica [Balestrieri et al. 2021]. O VSNT, referência deste estudo, é um projeto em desenvolvimento pela equipe de Modelagem e Simulação do Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV) da Marinha do Brasil. Sua estrutura pode ser ilustrada pela Figura 1a e sua missão principal é o auxílio na varredura de minas e busca de objetos submersos. Possui 2 tipos de câmera, fixa (câmera 1), para visualização do ambiente; e giratória (câmera 2) com *zoom* óptico para exploração de alvos e objetos; 1 sonar para varredura de objetos submersos; 1 par de máquinas (uma na base e outra no VSNT) para Comando e Controle (C2) de navegação e coleta de informações de telemetria.

Conforme relatado na seção anterior, os autores pretendem analisar o desempenho da rede para aplicações oferecidas para VSNT, exigindo a definição de parâmetros e indicadores para verificação de desempenho de tais serviços. Numa pesquisa bibliográfica, na literatura não se observa sobre VSNT iniciativas de pesquisa semelhante à dos VANTs, o que representa uma lacuna em medições de *Key Performance Indicator* (KPI) dos VSNTs no uso das redes 5G. Entretanto, VSNT e VANT possuem alguns elementos semelhantes que são fundamentais em suas operações, tais como, enlace de comando e controle, câmeras, sensores para telemetria, detecção de alvos e obstáculos, permitindo inferir a possibilidade de usar, para o VSNT, requisitos existentes na literatura sobre VANT.

Desta forma, uma maneira de definir requisitos, particularmente o de vazão, é fazer, de modo empírico, medições, *in loco*, no VSNT, através do monitoramento do tráfego, utilizando um computador, com sistema operacional Windows e software de monitoramento Wireshark, conectado via cabo ao *switch* da rede local para ter acesso aos equipamentos, monitorar o tráfego e poder verificar a vazão de cada aplicação.

A Tabela 1 apresenta os requisitos de vazão e latência para VSNT, utilizando, as medições apresentadas no estudo sobre VANTs de Geraci et al [Geraci et al. 2022], exceto para os valores de vazão de C2 e telemetria e sonar, para os quais são usadas as medições *in loco*. Com relação ao requisito de latência, em função da intervenção humana para marcação dos alvos, não há uma exigência tão rigorosa para este modo de operação, adotando-se, então, o mesmo valor do requisito da câmera.

4. Experimentos de Aplicações de VSNT em Ambiente de Rede Real 5G

Para a definição da área de abrangência, buscou-se realizar testes dentro da cobertura de uma única antena, evitando (*handoff*), de modo a avaliar a capacidade da rede em relação ao enfraquecimento do sinal à medida que a embarcação vai se distanciando da antena. Além disso, evitou-se obstáculos e águas muito rasas para preservar a embarcação, sendo escolhidos 2 cenários para os testes.

Tabela 1. Requisitos de vazão e latência para VSNT.

Aplicação	Vazão	Latência
C2 e telemetria	65 Kbps	40 ms
Câmera 1	5 Mbps	100 ms
Câmera 2	25 Mbps	100 ms
Sonar	3 Mbps	100 ms

4.1. Cenário 1 - Veículo em Movimento em Ambiente Marítimo

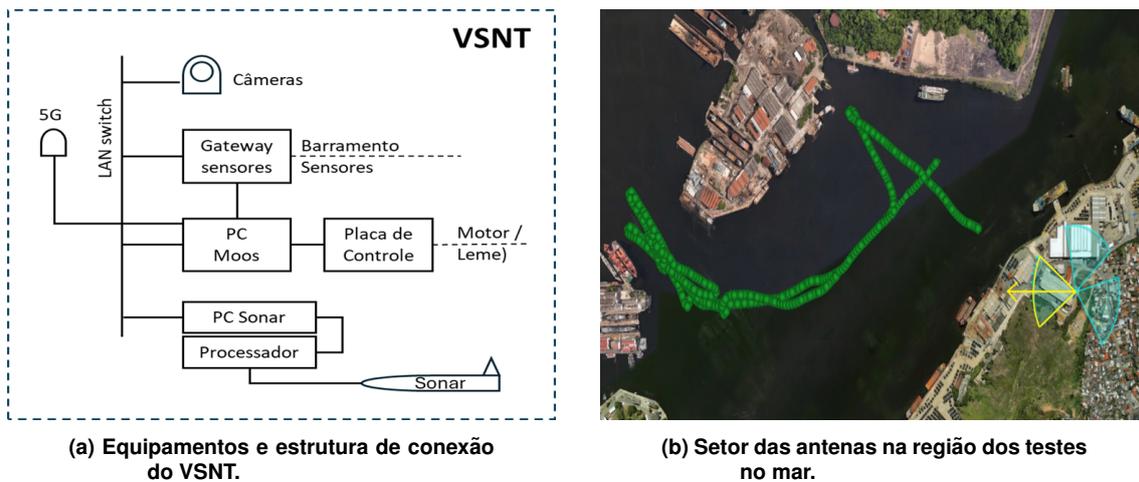


Figura 1. Estrutura do VSNT e região dos testes.

As medições foram realizadas na baía da Guanabara, em águas abrigadas, com cobertura de rede móvel celular comercial com tecnologia 5G. A antena está localizada na Ilha da Conceição, Niterói-RJ, a uma altura de 31,5 m, cujas coordenadas são: latitude -22.868074 e longitude -43.117513. Possui banda de 3500 MHz, potência 200 W (*Massive Multiple Input Multiple Output* – MIMO), azimute 285°, Ganho 70 dBi, abertura horizontal 65°, abertura vertical 8,5°, inclinação 0°. Pode-se ter uma visão da antena em relação à região na Figura 1b e o destaque em amarelo representa o setor ao qual o aparelho se conecta, enquanto que o percurso está demonstrado em verde.

Para a realização das medições são empregados os equipamentos: smartphone Motorola EDGE 20 modelo XT2143-1 para testes 5G-SA; notebook DELL Latitude 5420, Intel Core i5, 8GB RAM, Windows 11; software XCAL5 05.0.2.194N – para execução de *drive test* (DT) e coleta de dados.

Como método de realização do DT utiliza-se o aparelho celular conectado ao notebook, com software de DT instalado, a bordo da embarcação. Os tipos de teste consistem em *uploads* de dados e envio de mensagens *Internet Control Message Protocol* (ICMP) para um servidor. No que se refere à vazão, para geração de tráfego contínuo, são estabelecidas cinco sessões *File Transfer Protocol* (FTP) simultâneas de 10GB cada, com uma programação para reiniciar a transmissão, imediatamente, caso chegue ao término do arquivo antes do comando de finalizar o teste. Em função dos recursos disponíveis, usou-se o envio de mensagens ICMP para a apuração do *Round-Trip Time* (RTT), que é o tempo de ida e volta entre origem e destino. A latência é calculada pela fórmula $RTT/2$, assu-

mindando como premissa que o caminho de ida é igual ao de volta. O XCAL inicia os testes, através do dispositivo móvel, configurado para utilizar somente a tecnologia 5G-SA, e armazena os dados para processamento e análise de resultados.

4.2. Cenário 2 - VSNT com as Aplicações Funcionando

Neste cenário realiza-se experimentos com o VSNT parado em seu local de atracação, com as aplicações funcionando. O VSNT utilizado possui os seguintes equipamentos e características:

- Câmera fixa: Intelbras modelo VIP 1220 B, configurada com compressão H.265, resolução 1920x1080, 30 quadros por segundo e taxa de bits 2048 Kbps *Constant Bit Rate* (CBR).
- Câmera giratória: Intelbras modelo VIP 9445 SD LASER IA FT, configurada com compressão H.264H, resolução 2560x1440, 30 quadros por segundo e taxa de bits 6144 Kbps *Constant Bit Rate* (CBR).
- Sonar: EdgeTech modelo 4125 SIDE SCAN.
- Máquina para C2 e telemetria: DELL modelo OptiPlex Micro, Core i7, 8GB RAM, sistema operacional Ubuntu 20.04 e instalação de software baseado em *Mission Oriented Operating Suite* (MOOS).

Para realização dos testes de C2 e telemetria, utiliza-se um par de máquinas (uma na Base e a outra no VSNT) que se comunicam através do envio de programação de trajetórias e velocidade, traduzidas em comandos aos atuadores de motor e leme do VSNT. Também são coletadas e repassadas informações de telemetria, tais como posição e velocidade, posição do leme e rotação do motor. Para varredura de objetos submersos, utilizam-se os 3 componentes do sonar: (i) o *Towfish*, chamado de peixe, que é o elemento sonar que faz a emissão e recebimento dos pulsos de frequência; (ii) *Topside processor* que é um equipamento que conecta e alimenta o peixe, além de processar os sinais captados pelo peixe e encaminhar para o notebook; e (iii) um notebook com o software Discover instalado para visualização e marcação de objetos. As câmeras estão conectadas à rede local do VSNT através de cabeamento estruturado e cada uma possui um endereço IP. Os dados das câmeras, C2 e telemetria são roteados pela máquina do VSNT que possui uma interface conectada ao celular que dá acesso à rede 5G. Os dados do sonar que vêm do *Topside processor*, passam pelo notebook que também possui uma interface conectada a um celular dando acesso à rede 5G. Uma rede virtual privada é utilizada para conectar a base ao VSNT. O tipo de teste consiste em a máquina da base acessar os equipamentos diretamente pelos endereços de rede, para acesso aos fluxos de dados das câmeras e do sonar, além de iniciar o envio de mensagens ICMP e da programação de trajetória para a máquina VSNT e receber os dados de telemetria. O Wireshark monitora a comunicação entre as partes, armazena os dados e fornece relatórios.

5. Resultados

5.1. Cenário 1 - Testes em Movimento

Os resultados dos testes em movimento mostram que, dentre as 6 faixas definidas em função dos requisitos, conforme Tabela 1, a concentração dos dados de vazão se dá entre 25 e 100 Mbps, faixa que representa 84% do total de medições. A segunda faixa mais representativa se situa entre 5 e 25 Mbps, representando 14% do total. Com relação

à latência, das 3 faixas definidas, a concentração se dá em valores menores que 40 ms, que representa 96% do total das medições.

Para auxílio na análise dos resultados do desempenho da rede 5G, incluiu-se as medições do parâmetro *Synchronization Signal – Reference Signal Received Power* (SS-RSRP) a fim de atestar a relação direta entre potência do sinal com os resultados de vazão obtidos e avaliar a condição de recepção do sinal. Usa-se, neste trabalho, a sigla RSRP para referenciar esse parâmetro. A condição de radiofrequência (RF) em relação aos valores de RSRP (dBm) pode ser classificada por: Excelente > -90 > Boa > -105 > Razoável > -120 > Fraca [Cucor et al. 2023].

A Figura 2a, que ilustra as medições obtidas em todo o percurso, demonstra a relação direta entre os valores de RSRP e os de vazão em função da distância. À medida que o RSRP aumenta ou diminui, a vazão acompanha a tendência. A variação ocorre em função da condição de recepção do sinal de radiofrequência no ponto de medição. Em alguns pontos o nível de sinal recebido pode ser atenuado devido a obstruções ou pela distância entre transmissor e receptor, como na borda da célula. Nessa situação, os dispositivos acabam alterando o esquema de código de modulação, reduzindo a quantidade de bits transferidos por vez, a fim de robustecer a transmissão e buscar garantir a entrega ou recepção da informação. Isto contribui, para a redução da vazão.

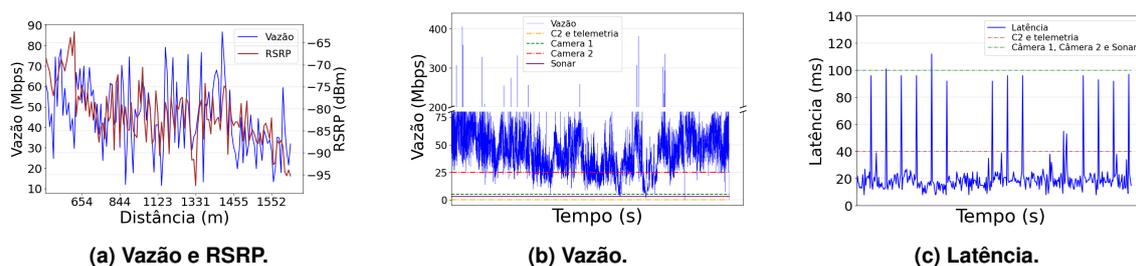


Figura 2. Relação entre vazão e RSRP em função da distância e desempenho da rede 5G, no tempo, referente aos requisitos de vazão e latência.

As Figuras 2b e 2c demonstram o nível de capacidade da rede em atender os requisitos de vazão e latência nos testes em movimento. Buscando enriquecer a avaliação do desempenho da rede, apresenta-se na Tabela 2 os percentuais de atendimento a esses requisitos. Analisando os percentuais apresentados nessa tabela, observa-se que os resultados de atendimento estão acima de 95%, excetuando a aplicação câmera 2 quanto à vazão, que apresentou uma pequena queda para 85,54%. Recorrendo às medições realizadas em determinados trechos do percurso, com taxas de vazão mais baixas, constata-se que a queda de desempenho ocorre em locais mais distantes da antena ou próximos à borda da célula, onde há tendência de enfraquecimento do sinal recebido.

5.2. Cenário 2 - Teste das Aplicações em Funcionamento

Considerando os dados extraídos do software Wireshark, a Figura 3 mostra os valores de vazão com as aplicações funcionando nos testes realizados com o VSNT parado no local de atracação. O relatório do Wireshark apresenta as médias de vazão de cada aplicação, sendo de 140 Kbps para C2 e telemetria, 2,1 Mbps para sonar, 2,2 Mbps para câmera fixa e 6,5 Mbps para câmera giratória. Os resultados demonstram que não se observam interrupções nos fluxos transmitidos pela rede no atendimento às aplicações.

Tabela 2. Percentual de atendimento aos requisitos de vazão e latência nos testes em movimento.

Cenário 1	Vazão		Latência	
	Requisito	Atendimento (%)	Requisito	Atendimento (%)
C2 e Telem	65 Kbps	99,85	40 ms	95,88
Câmera 1	5 Mbps	99,55	100 ms	99,45
Câmera 2	25 Mbps	85,54	100 ms	99,45
Sonar	3 Mbps	99,74	100 ms	99,45

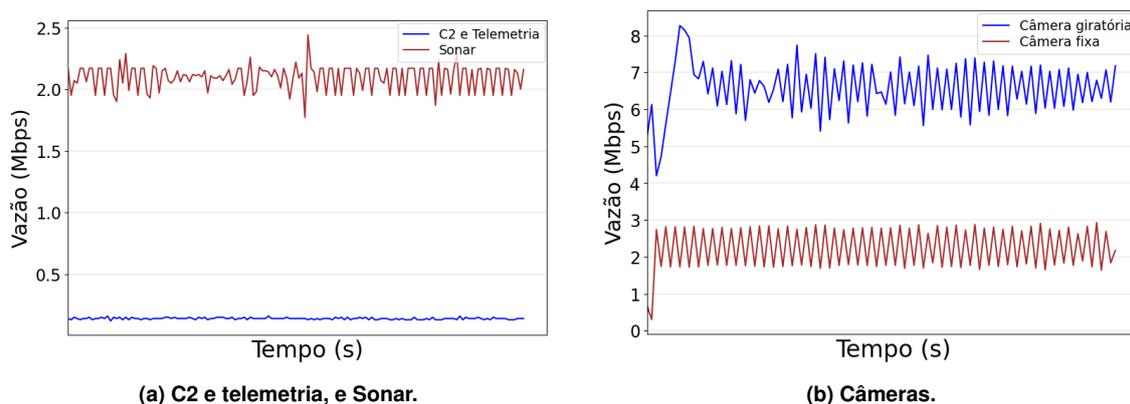


Figura 3. Medições de vazão das aplicações.

6. Conclusão

Este trabalho se propõe a verificar a viabilidade do uso das redes 5G no que diz respeito aos requisitos de aplicações de VSNT. Produziu-se experimentos em ambiente de rede real, com 2 cenários de teste, em movimento e parado, extraindo resultados para análise de comportamento da rede frente aos requisitos de vazão e latência para as aplicações de C2 e telemetria, câmera 1, câmera 2 e sonar. No cenário 1 usa-se a metodologia de geração de tráfego contínuo, característica similar à das aplicações, a fim de verificar a capacidade da rede. No cenário 2, coleta-se, no uso do VSNT, o tráfego dos dados das aplicações em funcionamento através da rede 5G.

Nos testes em movimento, no cenário 1, os percentuais de atendimento aos requisitos de vazão e latência se situam acima de 95%, exceto para a aplicação câmera 2 quanto ao requisito de vazão, que apresentou uma pequena queda para 85,54% de atendimento. Nas medições realizadas, percebe-se que os pontos mais afastados da antena ou próximos à borda da célula apresentam resultados insatisfatórios, sugerindo que essa queda esteja relacionada a esses locais, onde ocorre atenuação significativa do sinal. Foi realizada, ainda, uma comparação entre o nível de sinal recebido, representado pelo RSRP, e os resultados de vazão obtidos. Percebe-se a relação direta entre os valores de RSRP e os de vazão em função da distância, conforme esperado. Desta análise preliminar, não foi observada uma influência significativa das componentes construtivas e destrutivas provenientes da reflexão na água, porém novos ensaios devem ser realizados para aprofundar nesta análise, dado que pode vir a prejudicar a disponibilidade na comunicação.

Nos testes do cenário 2, com as aplicações em funcionamento, não se observa

valores que possam indicar desempenho insuficiente ou interrupções da rede 5G para atender aos requisitos exigidos pelas aplicações do VSNT.

Novas campanhas de medição são necessárias para uma conclusão mais precisa e abrangente deste estudo, contudo, os resultados globais obtidos, atinentes ao experimento deste trabalho, sugerem que a rede 5G atende as exigências dos requisitos de vazão e latência das aplicações de VSNT, indicando, porém, que para a aplicação de câmeras que exijam vazão a partir de 25 Mbps há o risco do não atendimento nos locais mais distantes da antena e nas bordas da célula, em função da degradação do sinal.

O VSNT utilizado neste trabalho faz parte de um projeto em desenvolvimento. Com o avanço deste projeto, principalmente no que diz respeito ao aprimoramento de ajustes de C2, pretende-se, como trabalhos futuros, ampliar os experimentos, realizando campanhas de medição com o VSNT em movimento autônomo e suas aplicações funcionando, em cenários, dias e horários diferentes. Pretende-se, também, coletar mais dados para avaliar a qualidade de sinal recebido em relação aos efeitos das ondas refletidas na água, além de realizar medições para aferir a latência fim a fim ao invés do RTT.

7. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV) da Marinha do Brasil e do Centro de Referência Tecnológica da Claro.

Referências

- Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., and Lamonaca, F. (2021). Sensors and measurements for unmanned systems: An overview. *Sensors*, 21(4):1518.
- Cucor, B., Kamencay, P., Dado, M., and Petrov, T. (2023). Experimental comparison of 4g and 5g technologies for connected and automated vehicles. In *2023 33rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, pages 1–5. IEEE.
- Fendt, A., Lohmuller, S., Schmelz, L. C., and Bauer, B. (2018). A network slice resource allocation and optimization model for end-to-end mobile networks. In *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*, pages 262–267. IEEE.
- Geraci, G., Garcia-Rodriguez, A., Azari, M. M., Lozano, A., Mezzavilla, M., Chatzinotas, S., Chen, Y., Rangan, S., and Di Renzo, M. (2022). What will the future of uav cellular communications be? a flight from 5g to 6g. *IEEE communications surveys & tutorials*, 24(3):1304–1335.
- Khosravi, Z., Gerasimenko, M., Urama, J., Pyattaev, A., Escusol, J. V., Hosek, J., Andreev, S., and Koucheryavy, Y. (2019). Designing high-speed directional communication capabilities for unmanned surface vehicles. In *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pages 651–655. IEEE.
- Lazar, R. G., Militaru, A. V., Caruntu, C. F., and Patachia-Sultanoiu, C. (2022). Performance analysis of 5g communication based on distance evaluation using the sim8200ea-m2 module. In *2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pages 37–42. IEEE.
- Lin, P., Yu, J., and Zhang, Z. (2022). Research and trials of 5g sa network performance. In *2022 5th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP)*, pages 1–5. IEEE.