



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

RENATO DE ALMEIDA ANTUNES

**Análise de desempenho da rede móvel 5G no
atendimento de aplicações para um veículo de
superfície não tripulado**

NITERÓI

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

RENATO DE ALMEIDA ANTUNES

Análise de desempenho da rede móvel 5G no atendimento de aplicações para um veículo de superfície não tripulado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientadora:

Natalia Castro Fernandes

Coorientador:

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

NITERÓI

2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

A627a Antunes, Renato de Almeida
Análise de desempenho da rede móvel 5G no atendimento de
aplicações para um veículo de superfície não tripulado /
Renato de Almeida Antunes. - 2024.
82 f.: il.

Orientador: Natalia Castro Fernandes.
Coorientador: Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2024.

1. Análise de desempenho. 2. Veículo de Superfície Não
Tripulado. 3. Veículo autônomo. 4. Unmanned Surface Vehicle.
5. Produção intelectual. I. Fernandes, Natalia Castro,
orientadora. II. Castellanos, Pedro Vladimir Gonzalez,
coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. IV. Título.

CDD - XXX

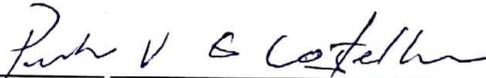
RENATO DE ALMEIDA ANTUNES

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE MÓVEL 5G, NO ATENDIMENTO DE
APLICAÇÕES PARA UM VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense como requisito parcial para a
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de
Telecomunicações

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Natália Castro Fernandes - Orientadora
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos - Coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri Souza
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Documento assinado digitalmente

gov.br

NATALIA CASTRO FERNANDES
Data: 26/09/2024 19:57:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente

gov.br

LEONARDO HENRIQUE GONSIOROSKI FURTADO
Data: 26/09/2024 18:12:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Niterói
(Setembro/2024)

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me capacitar e guiar em todos os momentos.

À minha família por todo carinho, compreensão e apoio para superar as dificuldades.

Aos orientadores que me direcionaram e apoiaram durante todo o tempo para que obtivesse êxito nesta jornada.

Aos amigos e a todos que almejavam meu sucesso e, de alguma maneira, contribuíram para essa conquista.

Resumo

O avanço das redes 5G torna possível o atendimento de novas aplicações e serviços não atendidos pelas gerações anteriores. O setor marítimo não é indiferente a essa evolução, impulsionando o desenvolvimento de Veículos de Superfície Não Tripulados (VSNTs) com técnicas avançadas de orientação, navegação e controle. A operação de aplicações do VSNT demanda o cumprimento de requisitos próprios pela rede de comunicação. Neste contexto, ainda é um desafio para as operadoras de rede móvel atender adequadamente a essas aplicações. Com o objetivo de analisar o desempenho da rede no atendimento das aplicações de VSNT, incluindo sua operação de forma remota, este trabalho conduz campanhas de medição em cenário real com cobertura de rede móvel celular comercial com tecnologia 5G. A metodologia empregada consiste em gerar tráfego através das aplicações do VSNT e de tráfego simulado contínuo, com a embarcação em movimento, em velocidades diferentes, e em pontos fixos dentro de uma rota pré-definida no local dos testes. A avaliação do sistema foi realizada relacionando a taxa de dados e a latência com as condições de propagação. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que a degradação significativa dessas condições para o ambiente marítimo de teste ocorre a partir de -90 dBm para a potência do sinal recebido e 10 dB para a relação sinal-ruído, com consequente queda na taxa de dados e aumento da latência. Isto está associado ao trecho do percurso com início em 1600 metros de distância da antena. Na comparação com um ambiente urbano terrestre, pode ser observado que a área de cobertura foi menor dado que as próprias edificações e vegetação obstruem o sinal.

Palavras-chaves: desempenho, VSNT, 5G, autônomo, campanhas de medição.

Abstract

The advancement of 5G networks makes it possible to support new applications and services not covered by previous generations. The maritime sector is not indifferent to this evolution, driving the development of Unmanned Surface Vehicles (USVs) with advanced guidance, navigation, and control techniques. The operation of USV applications requires compliance with specific requirements by the communication network. In this context, it is still challenging for mobile network operators to adequately serve these applications. To analyze the network's performance in serving USV applications, including its remote operation, this work conducts measurement campaigns in a real scenario with commercial cellular mobile network coverage with 5G technology. The methodology used consists of generating traffic through USV applications and continuous simulated traffic, with the vessel moving at different speeds, and fixed points within a pre-defined route at the test site. The system evaluation was carried out by relating data rate and latency to propagation conditions. The results obtained in this work indicate that the significant degradation of these conditions for the maritime test environment occurs from -90 dBm for the received signal power and 10 dB for the signal-to-noise ratio, with a consequent drop in the data rate and increase of latency. This is associated with the section of the route starting 1600 meters away from the antenna. In comparison with an urban terrestrial environment, it can be observed that the coverage area was smaller as the buildings and vegetation themselves obstruct the signal.

Keywords: performance, VSNT, 5G, autonomous, measurement campaigns.

Lista de Figuras

FIGURA 1 – PONTOS CRÍTICOS DOS PARÂMETROS DE RF (SNR E RSRP) PARA A QUEDA DE DESEMPENHO DA TAXA DE DADOS SEGUNDO AFROZ ET AL. ADAPTADO DE [11].....	5
FIGURA 2 – MAPA COM A DISPOSIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE LAZAR ET AL [14].	8
FIGURA 3 – APRIMORAMENTO DOS PRINCIPAIS RECURSOS DO IMT-ADVANCED PARA O 5G. ADAPTADO DE [18].....	11
FIGURA 4 - TOPOLOGIA DE CONEXÃO NO MODO MEC [22].....	13
FIGURA 5 – RECURSOS PARA ANÁLISE DE REDE 5G: XCAL INSTALADO NO NOTEBOOK (ESQUERDA) E G-NETTRACK PRO INSTALADO NO <i>SMARTPHONE</i> (DIREITA).....	18
FIGURA 6 – AMBIENTE DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO NA BAÍA DA GUANABARA.	20
FIGURA 7 – DIAGRAMA DE CONEXÃO ENTRE O VSNT E A BASE, ATRAVÉS DA REDE 5G, PARA O TRÁFEGO DOS DADOS DAS APLICAÇÕES E PARA O TRÁFEGO SIMULADO UTILIZANDO IPERF3.....	21
FIGURA 8 – EXEMPLO DE TRANSMISSÃO DE DADOS, ONDE O CLIENTE IPERF3 (ACIMA) ENVIA DADOS A 10 MBPS PARA O SERVIDOR IPERF3 (ABAIXO).	22
FIGURA 9 – IMAGEM OBTIDA PELA CÂMERA DO VSNT, SENDO ACESSADA PELO COMPUTADOR DA BASE.....	23
FIGURA 10 – IMAGEM OBTIDA PELO SONAR DO VSNT, SENDO ACESSADO PELO COMPUTADOR DA BASE.....	23
FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DA TELA DO PROGRAMA <i>WIRESHARK</i> MONITORANDO O TRÁFEGO DA REDE.	24
FIGURA 12 - EQUIPAMENTOS E ESTRUTURA DE CONEXÃO DO VSNT.	26
FIGURA 13 – SONAR <i>SIDE SCAN</i> (ESQUERDA) E CÂMERAS (DIREITA) DO VSNT.	26
FIGURA 14 – TELA DO SISTEMA DE COMANDO E CONTROLE.....	27
FIGURA 15 - AMBIENTE DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO COM VEÍCULO EM TERRA.	29
FIGURA 16 – AMBIENTE DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO NA BAÍA DA GUANABARA, DO PONTO 1 AO PONTO 4.....	31
FIGURA 17 – COMPUTADOR COM XCAL INSTALADO (ESQUERDA) E TELA DO SOFTWARE XCAL MONITORANDO PARÂMETROS DA INTERFACE AÉREA DO 5G (DIREITA). ADAPTADO DE [46].	31
FIGURA 18 – RELAÇÃO RSRP VS TAXA DE DADOS COM TRÁFEGOS DAS APLICAÇÕES E SIMULADO.	33
FIGURA 19 – RELAÇÃO SNR VS TAXA DE DADOS COM TRÁFEGOS DAS APLICAÇÕES E SIMULADO.	33
FIGURA 20 - CDF REFERENTE À MÉTRICA DE RSRP NOS TESTES T1 E T4.....	34
FIGURA 21 - CDF REFERENTE À MÉTRICA DE TAXA DE DADOS NOS TESTES T1 E T4.....	34
FIGURA 22 - RELAÇÃO DO RSRP E SNR COM A LATÊNCIA NO TESTE T1.....	35
FIGURA 23 - CDF REFERENTE À MÉTRICA DE LATÊNCIA NO TESTE T1.....	36
FIGURA 24 – RELAÇÃO RSRP VS TAXA DE DADOS COM TRÁFEGOS DAS APLICAÇÕES E SIMULADO.	37
FIGURA 25 – RELAÇÃO SNR VS TAXA DE DADOS COM TRÁFEGOS DAS APLICAÇÕES E SIMULADO.	37
FIGURA 26 - CDF REFERENTE À MÉTRICA DE RSRP NOS TESTES T7 E T12.....	38
FIGURA 27 - CDF REFERENTE À MÉTRICA DE TAXA DE DADOS NOS TESTES T7 E T12.....	39
FIGURA 28 - RELAÇÃO RSRP E SNR COM LATÊNCIA NO TESTE T7.	39
FIGURA 29 - CDF REFERENTE À MÉTRICA DE LATÊNCIA NO TESTE T7.....	40

FIGURA 30 – CDF DE RSRP E SNR REFERENTE AO TRÁFEGO DAS APLICAÇÕES.	41
FIGURA 31 – CDF DE TAXA DE DADOS E LATÊNCIA REFERENTE AO TRÁFEGO DAS APLICAÇÕES.	41
FIGURA 32 – CDF DE RSRP E SNR REFERENTE AO TRÁFEGO SIMULADO.	42
FIGURA 33 – CDF DE TAXA DE DADOS REFERENTE AO TRÁFEGO SIMULADO.	43
FIGURA 34 - RELAÇÃO RSRP E SNR COM TAXA DE DADOS NO TESTE T3.	44
FIGURA 35 - RELAÇÃO RSRP E SNR COM TAXA DE DADOS NO TRECHO COM <i>HANDOVER</i> NO TESTE T3.	45
FIGURA 36 – CDF DE RSRP NO TESTE T3.	45
FIGURA 37 - RELAÇÃO RSRP E SNR COM LATÊNCIA NO PERCURSO TODO.	46
FIGURA 38 - RELAÇÃO RSRP E SNR COM LATÊNCIA NO TRECHO COM <i>HANDOVER</i>	46
FIGURA 39 - RELAÇÃO RSRP E SNR COM TAXA DE DADOS NO TESTE T10.	47
FIGURA 40 - RELAÇÃO RSRP E SNR COM TAXA DE DADOS NO TRECHO COM <i>HANDOVER</i> NO TESTE T10.	48
FIGURA 41 – CDF DE RSRP NO TESTE T10.	48
FIGURA 42 – RELAÇÃO RSRP VS TAXA DE DADOS NOS 3 PONTOS FIXOS.	50
FIGURA 43 – RELAÇÃO SNR VS TAXA DE DADOS NOS 3 PONTOS FIXOS.	50
FIGURA 44 – CDF DE RSRP NOS 3 PONTOS DOS TESTES T2 E T17.	51
FIGURA 45 – CDF DE TAXA DE DADOS NOS 3 PONTOS DOS TESTES T2 E T17.	52
FIGURA 46 – RELAÇÃO DE RSRP E SNR COM A LATÊNCIA NOS 3 PONTOS FIXOS.	53
FIGURA 47 – CDF DE LATÊNCIA NOS 3 PONTOS DO TESTE T2.	54
FIGURA 48 – RELAÇÃO ENTRE RSRP E TAXA DE DADOS NOS DOIS CENÁRIOS.	55
FIGURA 49 – CDF REFERENTE À MÉTRICA DE RSRP NOS DOIS CENÁRIOS.	56
FIGURA 50 – CDF REFERENTE À MÉTRICA DE TAXA DE DADOS NOS DOIS CENÁRIOS.	56
FIGURA 51 – CDF REFERENTE À MÉTRICA DE LATÊNCIA NOS DOIS CENÁRIOS.	57

Lista de Tabelas

TABELA 1 – CONDIÇÕES DE RF UTILIZADAS POR MILDE E PILINSKY [12].	6
TABELA 2 – CONDIÇÕES DE RF UTILIZADAS POR CUCOR ET AL [13].	7
TABELA 1 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS FIXOS DEFINIDOS.	24
TABELA 2 - REQUISITOS DE LATÊNCIA PARA C2.	28
TABELA 3 - REQUISITOS DE TAXA DE DADOS E LATÊNCIA PARA APLICAÇÃO.	28
TABELA 5 - PERCENTUAIS DE ATENDIMENTO PELA REDE AOS REQUISITOS DE LATÊNCIA NO TESTE T1.	35
TABELA 6 - PERCENTUAIS DE ATENDIMENTO PELA REDE AOS REQUISITOS DE LATÊNCIA NO TESTE T7.	40
TABELA 7 - PERCENTUAIS DE ATENDIMENTO PELA REDE AOS REQUISITOS DE LATÊNCIA NO TESTE T3.	47
TABELA 8 - MÉDIA E MEDIANA DOS DADOS COLETADOS NOS 3 PONTOS FIXOS.	49
TABELA 9 - PERCENTUAIS DE ATENDIMENTO PELA REDE AOS REQUISITOS DE LATÊNCIA NO TESTE T2.	53

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	4ª Geração de Comunicação Móvel Celular
5G	5ª Geração de Comunicação Móvel Celular
5GC	<i>5G Core Network</i>
BS	Estação Base
BVLoS	<i>Beyond Vision Line of Sight</i>
C2	Comando e Controle
CASNAV	Centro de Análises de Sistemas Navais
CAV	Veículo Conectado e Automatizado
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CN	<i>Core Network</i>
COTS	<i>Commercial off-the-shelf</i>
CP	<i>Control Plane</i>
C-RAN	<i>Cloud Radio Access Network</i>
CUPS	<i>Control and User Plane Separation</i>

DARPA	Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa
DL	<i>Downlink</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
DT	<i>Drive Test</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
ESnet	<i>Energy Sciences Network</i>
EU	Equipamento de Usuário
EUA	Estados Unidos da América
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GHz	Gigahertz
gNB	<i>Next Generation NodeB</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IoT	Internet das Coisas
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>

LOS	Linha de Visão
LTE	Evolução de Longo Prazo
Máq	Máquina
MEC	<i>Computação de Borda Multi-Acesso</i>
mMIMO	<i>Massive Multiple Input Multiple Output</i>
mMTC	<i>Massive Machine-Type Communications</i>
MOOS	<i>Mission Oriented Operating Suite</i>
NFV	Virtualização de Funções de Rede
NLOS	Sem linha de Visão
NSA	<i>Non-Standalone</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
QoS	Qualidade de Serviço
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RF	Radiofrequência
RSRP	Potência do Sinal de Referência Recebido
RSRQ	Qualidade do Sinal de Referência Recebido
RSSI	Indicador de Intensidade de Sinal Recebido
RTT	<i>Round-Trip Time</i>

SA	<i>Standalone</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>
SINR	Relação Sinal-Interferência mais Ruído
SNR	Relação Sinal-Ruído
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TTT	<i>Time-to-Trigger</i>
UACAMS	Sistema de Controle e Gestão Autônomo Universal
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UL	<i>Uplink</i>
UP	<i>User plane</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable and Low Latency Communications</i>
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLoS	<i>Vision Line of Sight</i>
VNF	Funções de Rede Virtualizadas
VNT	Veículo Não Tripulado
V-RAN	<i>Virtualized Radio Access Network</i>

VPN Virtual Private Network

VSNT Veículo de Superfície Não Tripulado

VTNT Veículo Terrestre Não Tripulado

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Trabalhos Relacionados	3
1.4 Estrutura do Trabalho	9
Capítulo 2 - IMT-2020: o 5G	10
2.1 Tecnologias Habilitadoras do 5G	11
Capítulo 3 - Veículos Não Tripulados	15
Capítulo 4 - Arquitetura da Proposta de Análise de Desempenho	18
4.1 Cenário Marítimo	19
4.1.1 Ambiente de Medição e Sistema Irradiante	19
4.1.2 Metodologia e Sistema de Recepção	20
4.2 Cenários Terra vs Mar	29
4.2.1 Ambiente de Medição e Sistema Irradiante nos Testes em Terra	29
4.2.2 Metodologia e Sistema de Recepção nos Testes em Terra	30
4.2.3 Ambiente de Medição e Sistema Irradiante nos testes no Mar	30
4.2.4 Metodologia e Sistema de Recepção nos Testes no Mar	31
Capítulo 5 - Resultados	32
5.1 Cenário Marítimo	32
5.1.1 Avaliação dos Dados Coletados com a Embarcação a 3,5 Nós	32
5.1.1.1 Taxa de dados vs RSRP e SNR a 3,5 Nós	32
5.1.1.2 Latência vs RSRP e SNR a 3,5 Nós	35
5.1.2 Avaliação dos Dados Coletados com a Embarcação a 10 Nós	36
5.1.2.1 Taxa de dados vs RSRP e SNR a 10 Nós	37
5.1.2.2 Latência vs RSRP e SNR a 10 Nós	39
5.1.3 Análise Comparativa de Dados nas Velocidades 3,5 vs 10 vs 15 Nós	40
5.1.3.1 Tráfego das Aplicações	41
5.1.3.2 Tráfego Simulado	42
5.1.4 Avaliação de Testes que Apresentam Trecho com <i>Handover</i>	43
5.1.4.1 Tráfego das Aplicações	44
5.1.4.2 Tráfego Simulado	47
5.1.5 Avaliação dos Dados com a Embarcação Parada	49

5.1.5.1	Taxa de dados vs RSRP e SNR.....	50
5.1.5.2	Latência vs RSRP e SNR	52
5.2	Avaliação de Desempenho da Rede 5G – Cenários Terra vs mar.....	54
Capítulo 6 - Conclusão		58
6.1	Trabalhos Futuros	60
Bibliografia		61
Anexo A – Tabela de classificação dos testes		64

Capítulo 1 - Introdução

As comunicações móveis têm se desenvolvido rapidamente e essa evolução tecnológica viabiliza, não somente uma comunicação mais eficiente entre pessoas, mas também a integração de novas aplicações e serviços que impactam significativamente diversos setores. A implementação de novas tecnologias de acesso sem fio, tem permitido que cada vez mais novos serviços possam ser ofertados aos usuários em diversas áreas, tanto comerciais como de saúde e transporte. Em relação aos serviços comerciais, o uso de smartphones aliados a um serviço confiável de comunicação, se tornaram essenciais para as pessoas ao redor do mundo [1]. Na telemedicina observam-se consultas médicas remotas e monitoramento de saúde à distância em tempo real [2]. Na última década, os sistemas de transporte inteligente vêm ganhando força graças aos avanços tecnológicos, entre eles na área das telecomunicações [3].

O setor marítimo não é alheio a esse avanço tecnológico. O interesse global crescente em questões comerciais, científicas e militares em ambientes marítimos tem impulsionado a busca pelo desenvolvimento de Veículos de Superfície Não Tripulados (VSNTs) ou, em inglês, *Unmanned Surface Vehicles* (USVs) com avançadas capacidades de orientação, navegação e controle. Esses veículos são equipados com diversos sensores e atuadores, como sonar, câmera, atuadores de leme e motor, além de sistemas de navegação e controle. O funcionamento das aplicações embarcadas nos VSNTs requer que a rede de comunicação atenda a requisitos específicos, como baixa latência e alta confiabilidade, principalmente para Comando e Controle (C2) [4], além de altas taxas de transmissão para as aplicações como vídeo de alta definição. Tais embarcações podem ser autônomas ou controladas remotamente e são extremamente dependentes de comunicações confiáveis e de baixa latência para operar com segurança [5]. O VSNT referência deste trabalho e utilizado nas campanhas de medição é um projeto da Marinha do Brasil e seu detalhamento está na seção 4.1.2.

Em função do avanço tecnológico e de suas características de alta velocidade, confiabilidade e baixa latência, o 5G surge como uma solução promissora para suportar a comunicação de VSNT. A rede 5G foi concebida para ser multisserviço, utilizando-se de métodos e tecnologias, tanto na parte de rádio quanto no núcleo da rede, que possibilitem atender às variadas demandas de serviço com diferentes requisitos de desempenho [6].

1.1 Motivação

A evolução tecnológica das redes móveis, particularmente com o advento da rede 5G, impulsiona a implementação de novos serviços até então considerados inviáveis de atendimento pelas redes anteriores. Porém, suprir demandas oriundas de diversas áreas da sociedade, incluindo comunicação para veículos de superfície não tripulados, cujos serviços exijam requisitos mais rigorosos, ainda é um desafio para as operadoras. Dentro desse contexto, experimentos de análise em campo são fundamentais para avaliar se, de fato, determinada rede atende aos indicadores chave de desempenho, ou *Key Performance Indicators* (KPIs), 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.

1.2 Objetivos

Por essas razões, considerando o foco no desempenho da rede 5G no atendimento das aplicações de veículos marítimos não tripulados, os objetivos deste trabalho são:

- Levantamento de requisitos e definição de cenários e equipamentos para a realização de campanhas de medição em rede 5G comercial;
- Realização de coleta de informações como: potência do sinal recebido, relação sinal-ruído, taxa de dados e latência, para avaliação do desempenho do sistema de comunicação;
- Avaliação da relação entre sinal recebido e taxa de dados, no que diz respeito ao desempenho da rede no atendimento ao tráfego gerado pelas aplicações do VSNT e ao tráfego simulado de 10 Mbps, tanto com a embarcação parada quanto em movimento;
- Avaliação da relação entre sinal recebido e latência, no que diz respeito ao desempenho da rede no atendimento ao tráfego gerado pelas aplicações, tanto com a embarcação parada quanto em movimento.
- Avaliação do atendimento pela rede ao tráfego gerado à medida que a embarcação vai se afastando da antena.

- Avaliação comparativa dos resultados obtidos em função da condição de operação (tráfego gerado pelas aplicações do VSNT e tráfego simulado de 10 Mbps)
- Avaliação comparativa dos resultados obtidos em função do uso da embarcação com diferentes velocidades;

Complementarmente, produziu-se um experimento empírico de veículos em ambiente terrestre e marítimo, visando verificar se as adversidades do ambiente no mar, comparado ao terrestre afeta o resultado de desempenho da rede 5G.

1.3 Trabalhos Relacionados

Esta seção expõe estudos e projetos relevantes ao escopo deste trabalho, com foco em veículos não tripulados, comunicação marítima e análise de desempenho de rede. São apresentadas tecnologias e metodologias empregadas em sistemas de comunicação sem fio, bem como a integração e operação de veículos autônomos. Além disso, são mostradas abordagens utilizadas para avaliar o desempenho de redes.

Stateczny Burdziakowski apresentam o desenvolvimento de um Sistema de Controle e Gestão Autônomo Universal (UACAMS) para embarcações de superfície não tripuladas. A implementação foi feita em uma plataforma multipropósito chamada HydroDron. Os autores abordam a diferenciação entre as expressões “modo autônomo” e “modo automático”. O sistema suporta quatro níveis de autonomia, desde controle remoto até missões totalmente autônomas, permitindo a adaptação conforme as necessidades específicas do usuário. O projeto inclui o desenvolvimento de uma estação de controle terrestre e um sistema de comunicação por rádio utilizando frequências de 433 e 868 Mhz para controle e telemetria, respectivamente, além de 2,4 / 5,8 GHz para vídeo (câmera). O alcance do link foi comprovado em até 6 km. Finalizam destacando a característica importante do HydroDron que é a capacidade de usá-lo em variadas tarefas em função da possibilidade de substituição de sensores em kits modulares e aplicação de um software de controle universal projetado para uso com diferentes dispositivos [7].

Visando a navegação autônoma, Yang et al. realizam testes em conjunto com um fornecedor norueguês de serviços de Internet. Utilizam uma estação base LTE mMIMO (Pré-5G), com banda de 3,7 GHz, em Horten, perto do fiorde de Oslo. Os primeiros testes foram realizados em 2018 com um terminal de usuário montado em um veleiro. Para o

cenário com linha de visão (LOS) ao longo da rota obtiveram média de Potência do Sinal de Referência Recebido (RSRP) entre -55 e -85 dBm e para o cenário sem linha de visão (NLOS) obtiveram resultados inferiores a -80 dBm e em determinados trechos o link de rádio foi perdido. Como o equipamento utilizado a bordo não era projetado para aplicações marítimas, um novo protótipo otimizado para condições de propagação marítima foi projetado para o novo teste. O resultado do novo teste, em 2019, com o novo equipamento mostra maior estabilidade do RSRP durante o percurso e maior taxa de dados comparado ao teste anterior [8].

O canal de comunicação e o ambiente marítimos são seriamente afetados pelas condições climáticas. A maioria dos VANTs produzidos não resistem a ventos fortes ou condições climáticas ruins, além disso, a duração do voo é limitada à energia a bordo. Wang et al. defendem a utilização de VSNTs, ao invés de VANTs, como solução potencial para melhorar a cobertura e o desempenho das comunicações marítimas. Citam três exemplos de aplicação promissoras: retransmissão assistida por VSNT, coleta de dados assistida por VSNT e busca e resgate de emergência assistida por VSNT. Mencionam as características dos canais de comunicação terra para VSNT, VSNT para VSNT e satélite para VSNT e exemplificam a utilização de retransmissão assistida por VSNT, para que seu trabalho possa ajudar novos pesquisadores a explorar os sistemas assistidos por VSNT [9].

LTE-Maritime é um outro projeto de pesquisa na Coreia do Sul, cujo objetivo é fornecer conectividade de banda larga no mar. Segundo os autores, ao contrário das redes marítimas de comunicação com transmissão de múltiplos saltos para estender a cobertura, o LTE-Maritime permite que os navios se comuniquem diretamente com as estações base terrestres (BS), o que afirmam melhorar a confiabilidade. O projeto consiste em várias estações base terrestres, com tecnologia LTE, localizadas em montanhas de grande altitude ao longo da costa para garantir a linha de visão (LoS), conectadas ao centro de operações e fornecendo comunicação sem fio aos navios. Para o navio, foi desenvolvido um roteador específico adequado para ambiente marítimo, com antenas de alto ganho e comprimento de 1,2 m. Relatórios da implementação de teste do LTE-Maritime mostraram que a taxa de transferência média é superior a 11 Mbps com cobertura máxima de cerca de 100 km [10].

Medições de qualidade do canal de comunicação são importantes e dependem de alguns parâmetros e seus indicadores de qualidade. Medições práticas foram realizadas em uma rede LTE na Austrália para avaliar: (i) a possível relação entre parâmetros de gerenciamento de recursos de rádio; (ii) os efeitos do SNR na taxa de dados; e (iii) o

evento de *handover*. A análise dos resultados mostrou que se o SNR for bom para um slot de medição, será alcançada uma taxa de dados mais alta; RSRP e SNR, em média, são proporcionais entre si; e quanto menor for a diferença entre RSSI e RSRP, melhor será o RSRQ [11]. Além disso, os autores encontraram o ponto crítico das condições de radiofrequência (RF) que acarretam a queda considerável da taxa de dados, sendo SNR 5,6 dB e RSRP -120 dBm (vide Figura 1).

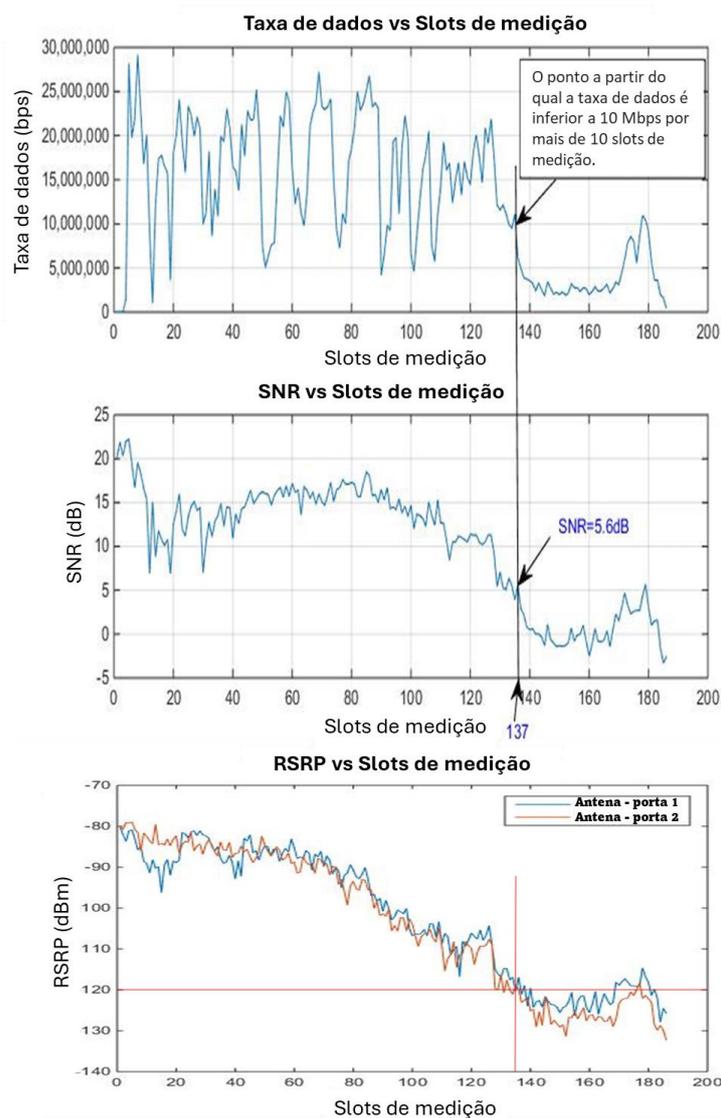


Figura 1 – Pontos críticos dos parâmetros de RF (SNR e RSRP) para a queda de desempenho da taxa de dados segundo Afroz et al. Adaptado de [11].

Na China, com a rápida implantação das redes NSA e SA, o 5G começou a estar disponível comercialmente em 2019. O trabalho de Lin et al. concentra-se em testes de campo usando a arquitetura de rede 5G para a verificação de desempenho quanto à

latência, verificação da cobertura através de *drive test* em múltiplas células e cobertura em célula única. Para o teste de latência do plano de usuário foram definidos 3 pontos (próximo, médio e distante da antena) e através de um equipamento de usuário (UE) foram enviadas mensagens ICMP, registrando o RTT. Os melhores resultados foram 8,4 ms para o ponto próximo e 8,7 ms para o ponto distante. No *drive test* em múltiplas células, a célula de teste e as células vizinhas estavam vazias e os resultados apresentaram médias de *uplink* (UL) de 180 Mbps e *downlink* (DL) de 869 Mbps. Observou-se a relação que quanto maior o RSRP e SINR, maior a taxa de dados. Nos testes em célula única, UEs foram distribuídos uniformemente pela célula em locais próximos, médios e distantes da antena. O resultado dos testes mostrou que os melhores valores dos parâmetros RSRP, SINR, UL e DL para os 3 locais foram respectivamente: próximo -65 dBm, 29 dB, 94 Mbps e 415 Mbps; médio -90 dBm, 14 dB, 49 Mbps e 237 Mbps; distante -100 dBm, 8 dB, 26 Mbps e 168 Mbps. Através do trabalho, os autores consideram que podem fornecer referência de dados para implantação de rede e otimização de desempenho de rede [12].

As primeiras redes 5G implantadas na Croácia são do modo não autônomo (NSA) e focadas no caso de uso de banda larga móvel aprimorada (eMBB). Milde e Pilinsky realizam, uma análise de desempenho da rede, medindo parâmetros como potência do sinal recebido (RSRP), relação sinal-ruído, taxa de dados e *Round-Trip Time* (RTT) das mensagens, e utilizam os valores definidos na Tabela 1 como métricas de qualidade para as condições de RF. Comparam os resultados com valores referentes à tecnologia 4G, a fim de aferir a diferença na qualidade de experiência do usuário com a introdução da rede 5G. Os resultados dos testes mostram que nesse primeiro momento os terminais que usam 5G não têm nenhum aumento significativo de taxa de dados ao usar apenas 5G em comparação com o uso apenas de 4G (em torno de 100 a 120 Mbps). Além disso, os valores médios de RTT variam de 35 a 50 ms para quase todas as medições realizadas e não há diferença significativa para medições 5G e 4G, sendo assim os autores consideram os valores de RTT razoáveis para 4G, mas insuficientes para o que é desejado da tecnologia 5G [13].

Tabela 1 – Condições de RF utilizadas por Milde e Pilinsky [13].

Condições de RF	RSRP (dBm)	SINR (dB)
Excelente	≥ -80	≥ 20
Boa	-80 a -90	13 a 20
Razoável	-90 a -100	0 a 13
Fraca	≤ -100	≤ 0

A implantação de Veículos Conectados e Automatizados (CAVs) promete trazer inúmeros benefícios, como maior segurança nas rodovias, eficiência no transporte e menor consumo de combustível. Este serviço utiliza informações de sensores, informações provenientes de outros veículos, de sinais de trânsito e, além disso, requer comunicação em banda larga e com baixa latência. Cucor et al. realizaram medições experimentais em redes 5G não autônoma (NSA) e 4G para avaliar, principalmente, as condições de latência. Utilizam um carro e um dispositivo móvel celular para emular uma situação de veículo conectado à infraestrutura, na cidade de Zilina, na Eslováquia. Durante a medição, coletam três dados: RSRP, Qualidade do Sinal de Referência Recebido (RSRQ) e latência ponta a ponta. Os valores do parâmetro RSRP influenciam na qualidade da transmissão e a Tabela 2 foi usada pelos autores para estabelecer as condições de RF durante o experimento. Os resultados demonstram que os valores de RSRP durante o percurso foram mais baixos na rede 5G (de -93 a -73 dB) do que na 4G (de -90 a -35 dB). Quanto à latência, houve trechos com até 120 ms na rede 4G e trechos menores com até 800 ms na rede 5G. Os autores concluem que a rede sob teste ainda necessita de melhorias para suportar as aplicações de veículos autônomos e conectados [14].

Tabela 2 – Condições de RF utilizadas por Cucor et al [14].

Condições de RF	RSRP (dBm)
Excelente	≥ -90
Boa	-90 a -105
Razoável	-106 a -120
Fraca	≤ -120

Lazar et al. realizam testes práticos em uma zona central da cidade de Iasi, na Romênia, utilizando a tecnologia celular 5G oferecida pelo fornecedor Orange. Apresentam uma abordagem prática para analisar o efeito da distância da comunicação entre o equipamento do usuário (UE) e a estação base (gNB) no desempenho da rede de comunicações 5G. Os testes envolveram comunicação entre o UE e a gNB para distâncias de 100, 200, 300 e 400 m, ilustrado na Figura 2. Para avaliar como a distância afeta o desempenho da rede 5G, indicadores de desempenho relevantes para a comunicação 5G são analisados, tais como, Potência Recebida do Sinal de Referência (RSRP), Relação

Sinal-Interferência mais Ruído (SINR) e jitter. O módulo UE foi conectado a uma única célula para todas as distâncias e na ferramenta iPerf3, foi utilizado o protocolo UDP para envio de dados para medir os atrasos que ocorrem entre os pacotes. O resultado das medições práticas mostra que, em média, os valores obtidos para os indicadores de desempenho, nas distâncias de 100 e 400 m foram, respectivamente, em torno de: RSRP -78 e -88 dBm; SINR 31 e 15 dB; Jitter 0,06 e 0,09 ms. Como esperado, os resultados apontam uma diminuição do desempenho do 5G com o aumento da distância entre o UE e o gNB, entretanto, os valores dos indicadores permaneceram em uma faixa aceitável, mostrando uma boa qualidade da rede [15].



Figura 2 – Mapa com a disposição dos pontos de medição de Lazar et al [15].

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 a produção de medições em movimento e em ponto fixo, focado na mais recente tecnologia de rede móvel celular, o 5G, pode servir de base para o uso de aplicações de VSNT.

1.4 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento dessa dissertação está estabelecido como descrito a seguir.

O Capítulo 2 discorre sobre o desenvolvimento da rede 5G e suas tecnologias habilitadoras.

O Capítulo 3 comenta sobre veículos não tripulados, seus tipos, características e usos específicos, com foco no VSNT.

O Capítulo 4 descreve os cenários e equipamentos utilizados para as campanhas de medição e a metodologia empregada para a coleta de dados.

O Capítulo 5 avalia os resultados obtidos nas campanhas de medição em função dos objetivos propostos. Apresenta, ainda, complementarmente, uma análise comparativa de desempenho de rede através de um experimento empírico de veículos em ambiente terrestre e marítimo.

O Capítulo 6 conclui o trabalho refletindo o resultado dos testes realizados e, como trabalhos futuros, pretende-se ampliar os experimentos à medida que o projeto do VSNT utilizado seja aprimorado.

Capítulo 2 - IMT-2020: o 5G

A crescente demanda por dados móveis norteou a evolução das redes celulares de quarta geração. Com a introdução do LTE (4G), em 2008, houve a aceitação do tráfego de vídeo e dados na rede IP e o desenvolvimento de aplicativos em smartphones [16]. A sociedade passou por uma transformação digital, dispositivos móveis e aplicações de dados passaram a fazer parte do cotidiano de pessoas e empresas nos diversos setores. Surgiram novas demandas de serviços, exigindo requisitos distintos ainda não suportados pela tecnologia implantada. Os principais requisitos estão relacionados à latência, à quantidade de dispositivos atendidos por km² e à taxa de dados da rede. Seria necessária uma evolução tanto na parte de *Radio Access Network* (RAN) quanto no *Core Network* (CN) para que a arquitetura fosse flexível e capaz de gerenciar os recursos de maneira eficiente, garantindo os serviços.

Em 2012, a União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union* - ITU), sediado em Genebra, na Suíça, e vinculada à Organização das Nações Unidas (ONU), onde Governos e o Setor Privado coordenam o setor de redes e serviços de telecomunicações, iniciaram um programa para definir o sucessor do sistema de quarta geração *International Mobile Telecommunications – Advanced* (IMT-Advanced) ou *Long-term Evolution-Advanced* (LTE-Advanced) que impulsionou uma série de projetos de pesquisa dedicados à concepção do 5G. O *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) também iniciou suas pesquisas em 2015. Ao programa deram o nome de IMT-2020, que ficou popularmente conhecido como 5G [17].

Atributos não suportados pelas redes móveis anteriores, eram esperados do novo padrão. Foram definidos alguns requisitos essenciais para o 5G como indicadores de desempenho que ultrapassam muito os definidos para o IMT-Advanced, vide Figura 3. Esses requisitos estão associados a diferentes tipos de serviços e aplicações com exigências próprias, tais como: aplicações do tipo cidade inteligente, Internet móvel com transmissão de gigabytes por segundo, realidade aumentada, automação industrial, Internet das Coisas, aplicações de missão crítica, veículos autônomos [18]. Essa série de casos de uso individuais foram agrupados em função de características e requisitos comuns, dando origem a três categorias de casos de uso principais do 5G, descritas a seguir [18] [19]:

Enhanced Mobile Broadband (eMBB) é a evolução lógica dos serviços de dados convencionais em 4G, mas com melhoria das taxas de dados e da capacidade da rede e

aborda os casos de uso focados no ser humano para acesso a conteúdo, serviços e dados multimídia. Com o aumento da demanda, novas aplicações e requisitos surgem, melhorando o desempenho e a experiência do usuário. Há dois principais cenários: *hotspots*, que exigem alta capacidade de tráfego para áreas densamente povoadas, e cobertura de amplas áreas, que prioriza conectividade contínua e mobilidade moderada a alta, com taxas de dados melhoradas em relação aos padrões atuais [18].

Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC), possui requisitos rigorosos de baixa latência combinada com alta disponibilidade e confiabilidade. Alguns exemplos de aplicações incluem controle sem fio de processos industriais ou de produção, cirurgia médica remota e segurança no transporte [18].

Massive Machine-Type Communications (mMTC), para cenários com um grande número de dispositivos conectados, normalmente transmitindo um volume relativamente baixo de dados não sensíveis ao atraso. Os dispositivos devem ser de baixo custo e ter bateria de longa duração [18].

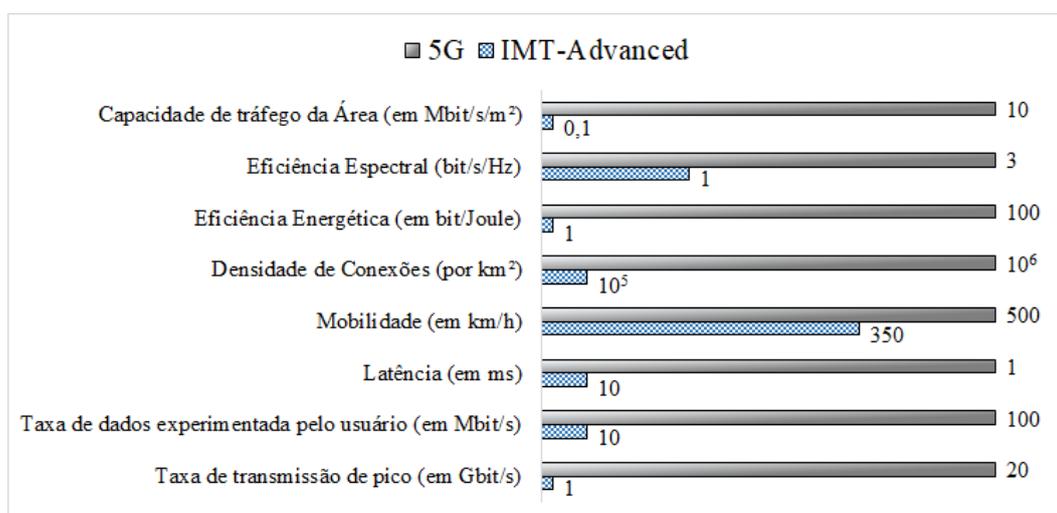


Figura 3 – Aprimoramento dos principais recursos do IMT-Advanced para o 5G. Adaptado de [18].

2.1 Tecnologias Habilitadoras do 5G

A rede 5G foi projetada para ser multisserviço, empregando métodos e tecnologias que permitem atender a uma ampla gama de demandas, cada uma com seus próprios requisitos de desempenho [6], como é o caso das redes de comunicação crítica, cujas necessidades de baixa latência e confiabilidade na comunicação são essenciais.

Esquemáticamente o 5G utiliza os mesmos elementos que as gerações anteriores: *User Equipment* (EU), a *Radio Access Network* (RAN) e o *Core Network* (5GC) [20], porém novas funcionalidades são adicionadas com o objetivo de atender novos serviços. Conseqüentemente, a implementação do 5G é sustentada por uma série de tecnologias habilitadoras, ou seja, que contribuem para a criação de uma rede mais flexível, escalável e eficiente, e habilitam (ou capacitam) o 5G para suportar a diversidade e a complexidade dos serviços modernos. A seguir, são apresentadas algumas dessas tecnologias, tanto para o CN quanto para a RAN.

Tradicionalmente, as redes móveis predecessoras, dependiam de hardware específico dedicado a tarefas concretas, geralmente fornecido por um único fornecedor tanto para hardware quanto para software. Essa abordagem não apenas aumentava o custo de aquisição, mas também tornava a expansão da rede um desafio complexo. No entanto, a **virtualização de funções de rede (NFV)** surge como uma solução mais flexível e econômica que pode ser entendida como um conjunto de técnicas de virtualização que suportam a substituição de uma função de rede, antes executada em um hardware proprietário, por instâncias virtualizadas executadas em hardware comercial genérico, conhecido como *Commercial off-the-shelf* (COTS) [20]. A **virtualização de funções de rede (NFV)** é uma tecnologia fundamental no 5G que permite que os elementos da rede 5G sejam implementados na forma de **funções de rede virtualizadas (VNFs)** [21] que podem ser dimensionadas e ajustadas dinamicamente de acordo com a demanda, sem depender de hardware específico. O 5G foi projetado para aproveitar ao máximo a NFV, através de uma gestão mais eficiente e flexível das funções de rede. Portanto, esse conceito também se aplica às redes de acesso via rádio, que podem ser virtualizadas através de RAN virtualizada (V-RAN) ou RAN na nuvem (C-RAN), facilitando a gestão e a adaptação da rede e trazendo benefícios adicionais, como balanceamento de carga, onde estações base sobrecarregadas podem acessar mais recursos do que aquelas com carga menor [17].

Adicionalmente, nas redes tradicionais, funções do plano de usuário (UP) e do plano de controle (CP) estão integradas, resultando em complexidade e limitações na distribuição das funções. A **rede definida por software (SDN)** separa claramente os planos de controle e de usuário, desassociando a camada de controle e camada de encaminhamento de dados, e permitindo um controle centralizado e simplificado (controlador SDN), e uma distribuição mais flexível das funções do plano de usuário para qualquer local físico desejado, sem as restrições que o hardware impunha anteriormente

[17] [20]. O núcleo 5G evoluiu do 4G através da separação de plano de controle e plano de usuário (CUPS) e da reorganização das funções, onde os componentes foram reestruturados em funções orientadas a serviços [21]. Ademais, SDN e NFV são projetadas para trabalhar juntas, inclusive na rede de acesso por rádio, e a **Computação de Borda Multi-Acesso (MEC)** é uma tecnologia que posiciona a conexão do plano de usuário próximo ao local da célula, o que reduz a latência e suporta aplicativos de alta demanda ao encurtar o caminho até os servidores de aplicação. A Figura 4, mostra a diferença de caminho para os dados entre o equipamento do usuário e um servidor de aplicação em um centro de dados distante e entre o equipamento do usuário e um servidor de aplicação conectado à função do plano do usuário (UPF) hospedado em um centro de dados de borda se utilizando da tecnologia MEC [22]. Isso melhora a experiência do usuário ao minimizar os atrasos na comunicação que é crucial, por exemplo, para a aplicações de veículos não tripulados [23] [24].

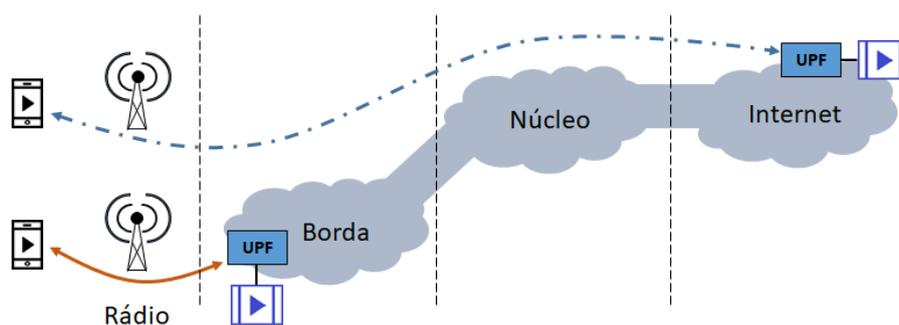


Figura 4 - Topologia de conexão no modo MEC [22].

A virtualização e a computação em nuvem geram flexibilidade para prover recursos computacionais, já a virtualização de funções de rede e a rede definida por software são complementares e facilitadoras para o 5G, uma vez que viabilizam uma arquitetura modular e flexível que pode ser facilmente reconfigurada para lidar com alterações no tráfego de rede, propiciando, além da otimização de recursos, o **fatiamento de rede** [25] [26]. As fatias de rede são sub-redes lógicas virtuais que operam sobre a mesma infraestrutura física compartilhada, utilizando NFV e SDN para sua implementação [27] [28]. Cada fatia de rede é otimizada para atender às necessidades específicas do tipo de tráfego que transporta, como mMTC para a comunicação com dispositivos IoT, eMBB para aplicações com requisitos de altas taxas de transmissão, ou URLLC para casos de requisitos estritos de confiabilidade e baixa latência [29]. Essa técnica permite que um

veículo não tripulado opere com segurança, à medida que tenha uma fatia específica para atender aos requisitos de controle, bem como uma segunda fatia para as aplicações de sensores que exijam altas taxas de transmissão.

O fatiamento de rede deve ser fim-a-fim, envolvendo, portanto, a interface aérea 5G que utiliza duas tecnologias principais que tornam a rede capaz de atender às especificações dos órgãos de padronização e aos requisitos das novas aplicações. Primeiro, o 5G opera em frequências de rádio muito mais altas, usando ondas milimétricas que permitem uma largura de banda maior e, conseqüentemente, maior capacidade, mas com desafios de cobertura. Ideais para células pequenas de alta capacidade que podem ser distribuídas em portos inteligentes, facilitando a autonomia de máquinas e veículos nas imediações. Em segundo lugar, o 5G emprega um número significativamente maior de antenas do que os sistemas anteriores, utilizando técnicas de mMIMO e *beamforming*, para direcionar sinais de rádio de maneira mais precisa para áreas específicas, visando melhorar a eficiência, a cobertura e a estabilidade da comunicação, inclusive em ambientes marítimos [17] [30].

Capítulo 3 - Veículos Não Tripulados

No ano de 1930, iniciaram-se as primeiras pesquisas relacionadas ao controle de robôs na área militar incluindo os veículos não tripulados, baseadas principalmente em controle remoto de veículos terrestres. Com o avanço das pesquisas, o controle das máquinas e do movimento dos veículos passou a ser semiautônomo ou autônomo. Nos anos 80 a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA), investiu no desenvolvimento de veículos terrestres não tripulados sobre rodas e na década dos 90, junto com o departamento de defesa e o programa de robótica, criou o departamento de pesquisa tecnológica para controle de veículos. Desde o início do século 21, DARPA, tem sucessivamente lançado o desafio de desenvolvimento de veículos não tripulados, o que desencadeou uma corrida pelas pesquisas e desenvolvimento deste tipo de veículo de uma forma mais ampla, não somente para veículos terrestres e aéreos como os marítimos tanto de superfície como de profundidade [31].

Um Veículo Não Tripulado (VNT) é um sistema eletromecânico que opera sem a presença de um operador humano a bordo, sendo capaz de realizar missões planejadas de forma autônoma. Esses veículos podem integrar uma variedade de sensores e funcionar como plataformas móveis de medição. Podem ser controlados remotamente por um piloto ou navegar autonomamente através de planos pré-programados ou sistemas de automação avançados. Operam em diversos ambientes e condições, variando em níveis de autonomia e podendo interagir com outros sistemas não tripulados, tanto do mesmo tipo quanto de tipos diferentes. Existem várias categorias de veículos não tripulados, cada uma projetada para finalidades específicas, conforme o ambiente em que operam. Incluem, dentre outros, Veículos Terrestres Não Tripulados (VTNTs) para a terra, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para o ar e Veículos de Superfície Não Tripulados (VSNTs) para o mar [5].

Veículo Terrestre Não Tripulado (VTNT) é um tipo de veículo que opera diretamente sobre o solo sem a presença de tripulação humana a bordo, reduzindo o risco para os operadores. São utilizados em operações militares, vigilância e combate, operações de busca e salvamento, missões de reconhecimento, escavações, inspeções de áreas de difícil acesso e até mesmo em aplicações civis, como agricultura e monitoramento ambiental [5]. Na atualidade existem várias pesquisas em relação à comunicação de veículo para tudo que se baseia na interação entre veículos, entre o veículo e a

infraestrutura da via, entre veículo e a rede, com o objetivo de fornecer informações confiáveis sobre localização, velocidade, direção dos veículos e condições das estradas, melhorando a segurança e a eficiência no trânsito [32].

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), comumente chamados de drones, são sistemas automatizados que operam no ar, permitindo a inspeção de grandes áreas. Os VANTs foram utilizados em aplicações militares para vigilância remota e ataque armado, para reduzir as perdas de pilotos. O entusiasmo pelo uso de VANTs em aplicações civis e comerciais disparou devido ao avanço das tecnologias de fabricação de VANTs e à redução de seus custos [33]. Os VANTs de asa rotativa, frequentemente modelados como quadricópteros, têm despertado crescente interesse recentemente. Com capacidade de decolagem e pouso vertical, além de tamanho compacto, são de fácil controle e alta manobrabilidade. Quanto à interação do VANT com a rede de comunicação sem fio, ele pode ser visto de dois modos: (i) como um dispositivo suportado pela rede durante a sua utilização pelo controlador remoto e (ii) pode atuar como um ponto aéreo, aumentando a cobertura da rede [34], estendendo o sinal, inclusive, da terra para o mar [35] [36].

Dadas as suas características de operação estes tipos de veículos utilizam o ar como meio de transmissão para o envio das informações de controle como também para o envio de dados coletados. Desta forma, a introdução do 5G traz um novo paradigma para as comunicações não somente as terrestres e aéreas como as marítimas, oferecendo maior largura de banda, menor latência e capacidade de suportar uma nova gama de aplicações, incluindo navios autônomos e Internet das Coisas (IoT) marítimo [37].

As atividades marítimas são um setor crucial para o crescimento econômico, com vários exemplos emergentes de aplicação da Internet das Coisas (IoT) no ambiente marítimo, como portos inteligentes, navegação autônoma e sistemas de monitoramento oceânico [38]. A utilização de veículos não tripulados é especialmente útil em ambientes desafiadores ou perigosos, evitando colocar em risco vidas humanas. Uma outra aplicação destes tipos de veículos é na coleta de dados em tempo real, na qual a integração com sensores pode otimizar o processo de coleta de informações e melhorar o desempenho geral das missões. Sensores embarcados, como radar, *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e câmeras, podem ser utilizados para monitorar o entorno da embarcação, detectar alvos, objetos e obstáculos e garantir a prevenção automática de colisões e a consciência situacional [39]. Um dos grandes problemas em relação ao funcionamento destes veículos é a infraestrutura de comunicação utilizada. Ao redor do mundo vários

autores têm iniciado estudos e projetos para explorar a dificuldade de implantar infraestrutura de comunicações no oceano e do problema de desempenho das redes de comunicação marítimas. Xiangling et al. preveem a utilização de estações base terrestres, que devem ser implantadas em montanhas ou torres elevadas ao longo de uma costa. Entretanto, é fixa e limitada, e para aumentar a mobilidade, poderiam ser implantadas estações base embarcadas. Outro método é a utilização de satélites, o que limita ao uso de satélites comerciais, além do atraso peculiar nessa comunicação. Segundo os autores, a solução do problema se dá através da utilização de VANTs como plataformas aéreas ágeis para realizar uma cobertura marítima sob demanda, como um complemento aos satélites e estações terrestres [35]. Desta forma, a viabilidade deste tipo de sistema depende da qualidade da sua rede provedora como também das características de propagação do meio.

Os Veículos de Superfície Não Tripulados (VSNTs) tiveram sua origem em aplicações militares navais, como vigilância e reconhecimento. Entretanto, esses veículos possuem exemplos de aplicações civis como monitoramento e avaliação ambiental, navegação autônoma, operações de busca e salvamento, além de levantamentos offshore para indústrias de petróleo e gás, e mapeamento do fundo do mar [5]. Esse tipo de veículo opera em contato com o ar e a água, que possuem características físicas diferentes. Portanto, é necessário que os VSNTs tenham percepção ambiental para detectar e evitar obstáculos acima ou abaixo da água e para perceber a fronteira entre a água e a terra, no caso de zonas costeiras. Neste caso, métodos de percepção passiva (sensores visual e infravermelho) e ativa (LiDAR, radar e sonar) podem ser utilizados [40]. Além disso, o tipo de missão pode influenciar na escolha dos sensores embarcados no VSNT. O VSNT referência deste estudo é um projeto em desenvolvimento pela Marinha do Brasil. Sua missão principal é o auxílio na varredura de minas e busca de objetos submersos e seus principais sensores incluem: câmeras para auxílio na navegação, visualização do ambiente e para exploração de alvos e objetos, e sonar para varredura de objetos submersos.

Capítulo 4 - Arquitetura da Proposta de Análise de Desempenho

Com o objetivo de analisar o desempenho de aplicações de comunicação crítica, parâmetros como RSRP, SNR, taxa de dados, latência, são coletados para poder avaliar o comportamento do sistema em relação ao canal de propagação através de aplicações como Comando e Controle (C2), câmera e sonar.

Pelo fato de o sistema de comunicação utilizado ser sem fio, e uma parte das coletas serem realizadas em mobilidade, existe uma alta variabilidade do sinal recebido devido aos mecanismos de propagação encontrados no caminho entre o transmissor e o receptor e ao deslocamento deste último. Neste trabalho, a análise de desempenho do sistema se dá em função da condição de propagação, que depende, entre outros fatores, da distância do transmissor. Nesse sentido, busca-se ambientes que privilegiem a utilização de uma única antena para a cobertura da área de testes, pois a presença de outros transmissores tornaria a análise mais complexa.

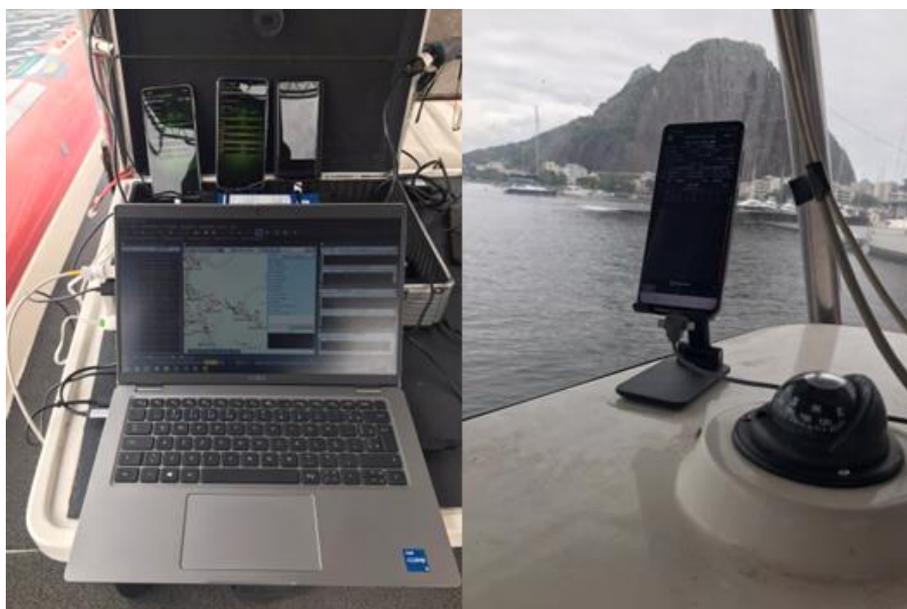


Figura 5 – Recursos para análise de rede 5G: XCAL instalado no notebook (esquerda) e G-NetTrack Pro instalado no *smatphone* (direita).

No total, três campanhas de medições foram realizadas. Em uma campanha, chamada de **cenário marítimo**, o objetivo é avaliar o desempenho da rede 5G comercial

em relação às aplicações do VSNT, sendo utilizados um dispositivo celular comercial com aplicativo analisador de rede 5G, chamado G-NetTrack Pro e um computador para a coleta dos dados (vide Figura 5). O G-NetTrack Pro é um aplicativo para dispositivos móveis Android que permite medir a interface aérea de redes móveis, ou seja, parâmetros de rádio essenciais para otimizar a transmissão de sinal entre assinantes e estações base, como a potência do sinal, a relação sinal-ruído e outros indicadores importantes.

Em outras duas campanhas, chamadas de **cenários terra vs mar**, o propósito é comparar os resultados obtidos de testes em terra e no mar, sendo utilizado o analisador de rede 5G chamado XCAL e um computador para a coleta dos dados (vide Figura 5). O XCAL é um analisador de rede 5G profissional do fornecedor Accuver, utilizado por operadoras de rede móvel, que permite medir a interface aérea, ou seja, parâmetros de rádio essenciais para otimizar a transmissão de sinal entre assinantes e estações base, como a potência do sinal, a relação sinal-ruído e outros indicadores importantes. A seguir são descritos o ambiente, a metodologia, o sistema irradiante e os parâmetros utilizados para análise em cada uma das campanhas.

4.1 Cenário Marítimo

4.1.1 Ambiente de Medição e Sistema Irradiante

As medições são realizadas na baía da Guanabara, em águas calmas e 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 (mMIMO), 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 6 e o destaque em amarelo representa o setor ao qual o aparelho se conecta, enquanto o percurso está destacado em vermelho contendo os pontos para testes com a embarcação parada.



Figura 6 – Ambiente das campanhas de medição na baía da Guanabara.

4.1.2 Metodologia e Sistema de Recepção

Neste cenário realiza-se campanhas de medição em dois tipos de configuração: a primeira utiliza o tráfego real das aplicações do VSNT (dados de Comando e Controle, imagens da câmera e do sonar), enquanto a segunda faz uso da ferramenta iperf3 para gerar tráfego do computador do VSNT para o computador da base. Para cada tipo de configuração coleta-se dados em duas situações distintas: com o VSNT em movimento e parado em pontos pré-determinados. A média do tráfego das aplicações é de 10Mbps, portanto, para o tráfego simulado (gerado via iperf3), é definida a taxa de dados de 10 Mbps. O VSNT está conectado à rede 5G comercial da Claro através do smartphone, que funciona como terminal 5G e permite que haja a comunicação com a base e a transferência dos dados. A Figura 7 apresenta o diagrama de conexão entre o VSNT e a base utilizando a rede 5G comercial.

O iperf3 é um software livre, do tipo cliente/servidor desenvolvido, principalmente, pela Rede Científica dedicada do Departamento de Energia (DOE) dos EUA (ESnet) e pelo Laboratório Nacional Lawrence Berkeley. Com ele pode-se medir a taxa de dados da rede, além de outros parâmetros como jitter. Para usar o iperf3 basta iniciá-lo no modo servidor em um computador, e como cliente em outro. Após a definição do tipo de tráfego no cliente (protocolo de transporte TCP ou UDP, taxa de dados em Kbps ou Mbps), este passa

a enviar tráfego para o servidor e, ao término do teste, mostra a quantidade de dados enviada, a taxa de dados atingida [41]. A Figura 8 exibe um exemplo de transmissão de dados utilizando o iperf3, onde o cliente é programado para transferir dados a uma taxa de 10 Mbps com o protocolo de transporte UDP, enquanto o cliente apenas aguarda e recebe os dados transmitidos.

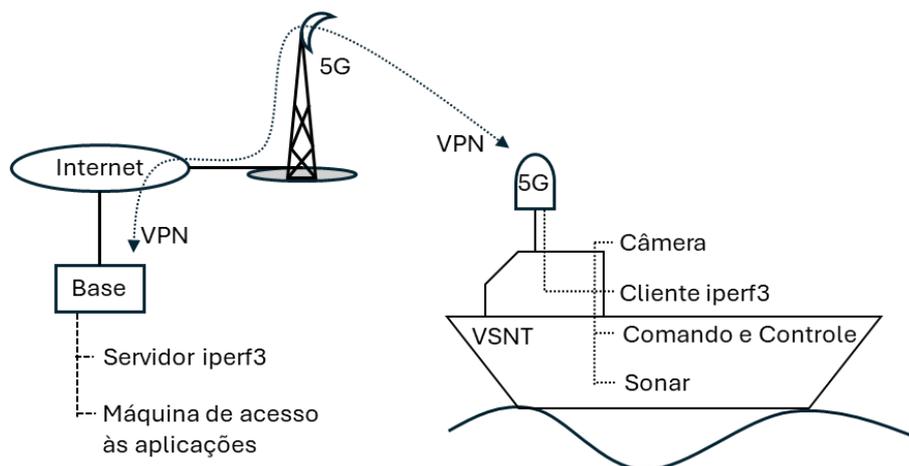


Figura 7 – Diagrama de conexão entre o VSNT e a base, através da rede 5G, para o tráfego dos dados das aplicações e para o tráfego simulado utilizando iperf3.

A diferença entre o tráfego simulado (via iperf3) e o das aplicações (dados de Comando e Controle, imagens da câmera e do sonar) é que o tráfego simulado utiliza o protocolo UDP e é gerado com uma taxa de dados constante de 10 Mbps, não possuindo mecanismos de controle de fluxo ou congestionamento, portanto, não ajusta a taxa de transmissão com base nas condições da rede e, neste caso, os dados são enviados a uma taxa fixa [42].

Para a transferência de informações das aplicações, um computador da base acessa os equipamentos do VSNT através de uma rede virtual privada (VPN) e recebe os dados de imagens da câmera e do sonar, além de enviar os dados de Comando e Controle. O protocolo utilizado é o TCP, que possui mecanismos de controle de congestionamento e controle de fluxo, que ajustam a taxa de transmissão em função das condições da rede. O ajuste do tamanho da janela de recepção serve para controlar a quantidade de dados que podem ser enviados antes de receber uma confirmação do receptor. Esse mecanismo ajuda a adaptar a transmissão às condições do canal de comunicação. O TCP tem por objetivo manter a conexão estabelecida e garantir a entrega confiável dos dados, mas pode resultar em variações na taxa de dados dependendo do estado da rede [42].

The image shows two screenshots of Windows Command Prompts. The top window, titled 'Cliente iperf3', shows the execution of the iperf3 client command: `iperf3 -c 127.0.0.1 -u -b 10M`. It displays a connection to the server at 127.0.0.1 port 5201. The output shows 10 intervals of 1-second transfers, each with a transfer of approximately 1.19 MBytes and a bitrate of about 9.95-9.96 Mbits/sec. A summary row shows a total transfer of 11.9 MBytes at 10.0 Mbits/sec with 0.033 ms jitter and 0% loss. The bottom window, titled 'Servidor iperf3', shows the server command: `iperf3 -s`. It displays 'Server listening on 5201 (test #1)' and 'Accepted connection from 127.0.0.1, port 58142'. The output shows 10 intervals of 1-second transfers, each with a transfer of approximately 1.19 MBytes and a bitrate of about 9.95-9.96 Mbits/sec. A summary row shows a total transfer of 11.9 MBytes at 10.0 Mbits/sec with 0.033 ms jitter and 0% loss.

```

Administrador: Prompt de Comando                               Cliente iperf3
C:\Users\iperf3>iperf3 -c 127.0.0.1 -u -b 10M
Connecting to host 127.0.0.1, port 5201
[ 5] local 127.0.0.1 port 51711 connected to 127.0.0.1 port 5201
[ ID] Interval          Transfer       Bitrate       Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec    1.25 MBytes   10.5 Mbits/sec 20
[ 5] 1.00-2.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 19
[ 5] 2.00-3.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 19
[ 5] 3.00-4.00 sec    1.19 MBytes   9.96 Mbits/sec 19
[ 5] 4.00-5.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 19
[ 5] 5.00-6.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 19
[ 5] 6.00-7.00 sec    1.19 MBytes   9.96 Mbits/sec 19
[ 5] 7.00-8.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 19
[ 5] 8.00-9.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 19
[ 5] 9.00-10.00 sec   1.19 MBytes   9.96 Mbits/sec 19
-----
[ ID] Interval          Transfer       Bitrate       Jitter       Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-10.00 sec   11.9 MBytes   10.0 Mbits/sec 0.000 ms    0/191 (0%) sender
[ 5] 0.00-10.00 sec   11.9 MBytes   10.0 Mbits/sec 0.033 ms    0/191 (0%) receiver
iperf Done.

Administrador: Prompt de Comando                               Servidor iperf3
C:\Users\iperf3>iperf3 -s
-----
Server listening on 5201 (test #1)
-----
Accepted connection from 127.0.0.1, port 58142
[ 5] local 127.0.0.1 port 5201 connected to 127.0.0.1 port 51711
[ ID] Interval          Transfer       Bitrate       Jitter       Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec    1.25 MBytes   10.5 Mbits/sec 0.021 ms    0/20 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 0.023 ms    0/19 (0%)
[ 5] 2.00-3.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 0.025 ms    0/19 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec    1.19 MBytes   9.96 Mbits/sec 0.023 ms    0/19 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 0.029 ms    0/19 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 0.019 ms    0/19 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec    1.19 MBytes   9.96 Mbits/sec 0.023 ms    0/19 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 0.018 ms    0/19 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec    1.19 MBytes   9.95 Mbits/sec 0.033 ms    0/19 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec   1.19 MBytes   9.96 Mbits/sec 0.033 ms    0/19 (0%)
-----
[ ID] Interval          Transfer       Bitrate       Jitter       Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-10.00 sec   11.9 MBytes   10.0 Mbits/sec 0.033 ms    0/191 (0%) receiver
-----

```

Figura 8 – Exemplo de transmissão de dados, onde o cliente iperf3 (acima) envia dados a 10 Mbps para o servidor iperf3 (abaixo).

A Figura 9 mostra a obtenção de imagem através da câmera e a Figura 10 mostra a obtenção de imagem pelo sonar.

Durante as campanhas de medição, para monitorar a comunicação entre as partes e armazenar os dados para análise, é utilizado o software *wireshark*. O *wireshark* é um programa que permite monitorar o tráfego da rede e realizar análise de protocolos [43]. A Figura 11 ilustra o monitoramento do tráfego de uma rede utilizando o *wireshark*.



Figura 9 – Imagem obtida pela câmera do VSNT, sendo acessada pelo computador da base.

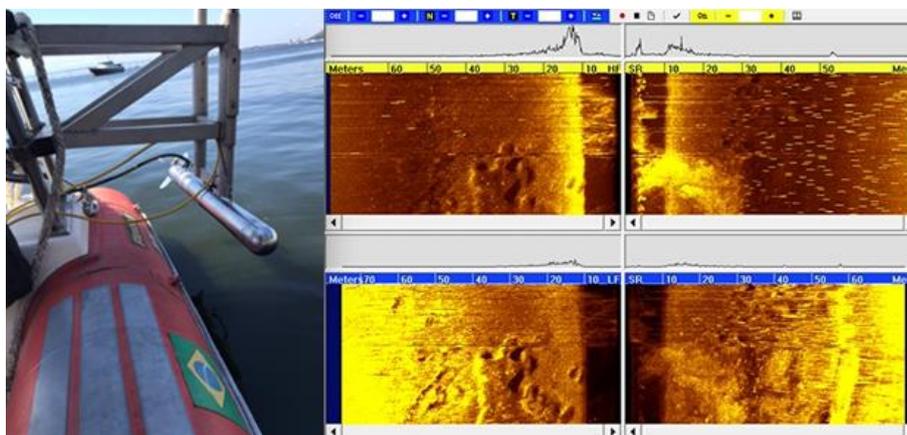


Figura 10 – Imagem obtida pelo sonar do VSNT, sendo acessada pelo computador da base.

Já a realização das campanhas de medição com tráfego real das aplicações consiste em a máquina da base acessar os equipamentos do VSNT diretamente pelos endereços de rede, para acesso aos fluxos de dados da câmera e do sonar. Para verificação de perda de pacotes, é utilizado o envio de mensagens *Internet Control Message Protocol (ICMP)*, dado que é uma maneira simples e eficaz de testar a qualidade da conexão de rede, partindo da premissa que a rede não possui regras para descartar ou preterir pacotes ICMP. Para realizar esta tarefa, utiliza-se o comando *ping*, que envia pacotes ICMP para um determinado destino e mede o tempo que leva para receber uma resposta (RTT), e se não receber a resposta o pacote é considerado perdido. Ao final, a perda de pacotes é calculada e exibida como uma porcentagem do total de pacotes enviados. Os valores de latência são apurados através do RTT, pela fórmula $RTT/2$, assumindo como premissa para este trabalho que o caminho de ida é igual ao de volta.

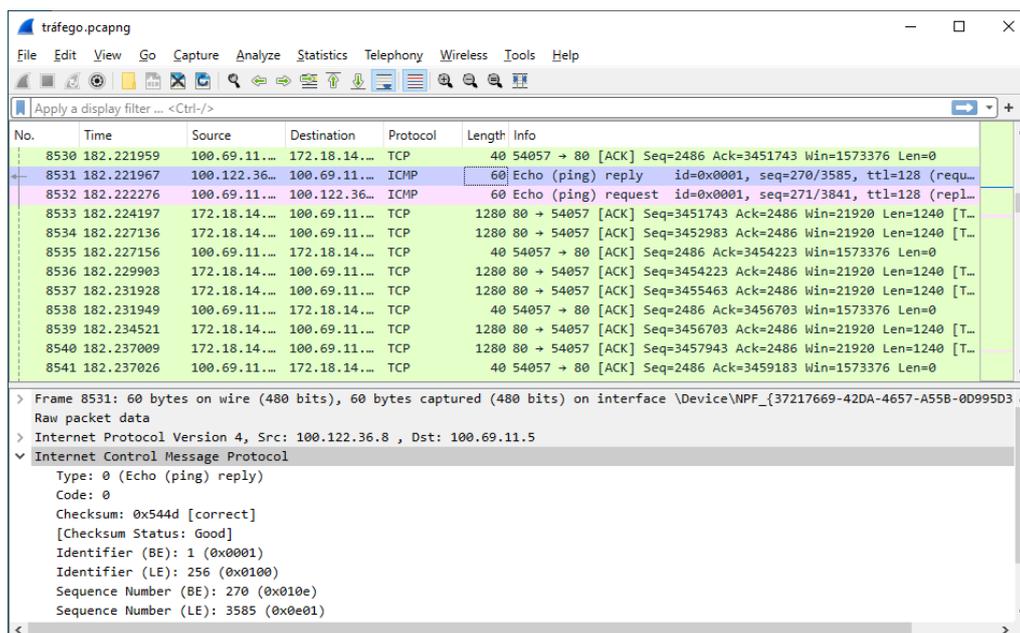


Figura 11 – Ilustração da tela do programa *wireshark* monitorando o tráfego da rede.

Tabela 3 – Localização dos pontos fixos definidos.

Latitude	Longitude	Ponto	Distância da antena
-22.866660	-43.124030	Ponto 01 (P1)	696 m
-22.868010	-43.126920	Ponto 02 (P2)	964 m
-22.868350	-43.130830	Ponto 03 (P3)	1370 m
-22.866150	-43.133120	Ponto 04 (P4)	1614 m
-22.861806	-43.133480	Ponto 05 (P5)	1800 m

Visando analisar a variabilidade do sinal não somente em função da distância, mas também em relação à velocidade de deslocamento, uma rota de coleta é definida a qual é percorrida 6 vezes, em horários e velocidades (3,5, 10 e 15 nós) diferentes para cada tipo de teste no cenário marítimo. Neste caso para facilitar o entendimento do leitor, nó é uma unidade de medida de velocidade que equivale a uma milha náutica por hora ou 1,852 km/h. Para se ter uma confiabilidade estatística, buscando caracterizar da melhor maneira as variações do nível de sinal recebido, o percurso é realizado 2 vezes com cada

velocidade. Além da medição em mobilidade, pontos fixos são utilizados, com a embarcação parada em 3 pontos (P1, P3 e P5) dentro do percurso (vide Tabela 3), onde são executados os mesmos tipos de teste.

Este trabalho contempla teste na modalidade de operação remota do VSNT, com as aplicações funcionando, navegando somente à 3,5 nós, considerada velocidade de segurança na atual etapa do projeto da Marinha do Brasil, citado, adiante, com mais detalhes. A execução da operação remota consiste na definição de coordenadas que são enviadas para o VSNT em forma de programação de pontos de passagem formando uma trajetória a ser seguida. O operador monitora o percurso do VSNT em uma base remota através de imagens fornecidas pela câmera durante seu deslocamento, intervindo sempre que necessário.

Para a realização das medições utiliza-se, na base, uma máquina Intel Core i7, 32GB RAM, sistema operacional Ubuntu 20.04 e instalação de software baseado em *Mission Oriented Operating Suite* (MOOS). 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 12 e sua missão principal é o auxílio na varredura de minas e busca de objetos submersos. As suas principais aplicações contemplam câmera, sonar e Comando e Controle (C2):

- Câmera giratória (vide Figura 13): Intelbras modelo VIP 9445 SD LASER IA FT, configurada com compressão H.264H, resolução 2560x1440, 30 quadros por segundo e taxa de bits 2048 Kbps *Constant Bit Rate* (CBR).
- Sonar (vide Figura 13): Edge Tech 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), vide Figura 14.

Um smartphone Motorola EDGE 30 Pro é utilizado como terminal de comunicação do VSNT com a rede 5G e uma rede virtual privada é usada para conectar a base ao VSNT. O smartphone está localizado a bordo do VSNT, acima do console de instrumentos, vide Figura 5.

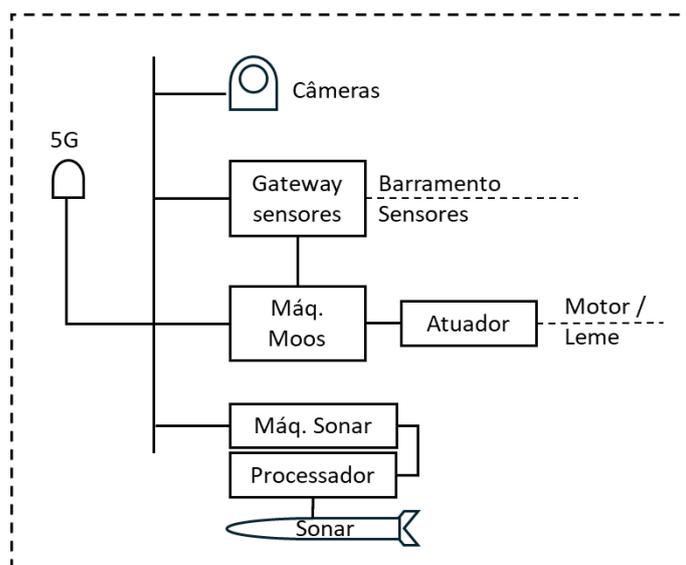


Figura 12 - Equipamentos e estrutura de conexão do VSNT.



Figura 13 – Sonar *side scan* (esquerda) e câmeras (direita) do VSNT.

Para C2 e telemetria, utiliza-se um par de máquinas (uma na Base e a outra no VSNT) que se comunicam através de software para envio de programação de coordenadas e velocidade (vide Figura 14), traduzidas em comandos aos atuadores de motor e leme do VSNT. Também são coletadas e repassadas informações básicas 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 computador acoplado; e (iii) um notebook com o software *Discover* instalado para visualização e marcação de objetos. A câmera está conectada à rede local do VSNT por meio de cabeamento estruturado e possui um endereço IP fixo, através do qual é acessada.

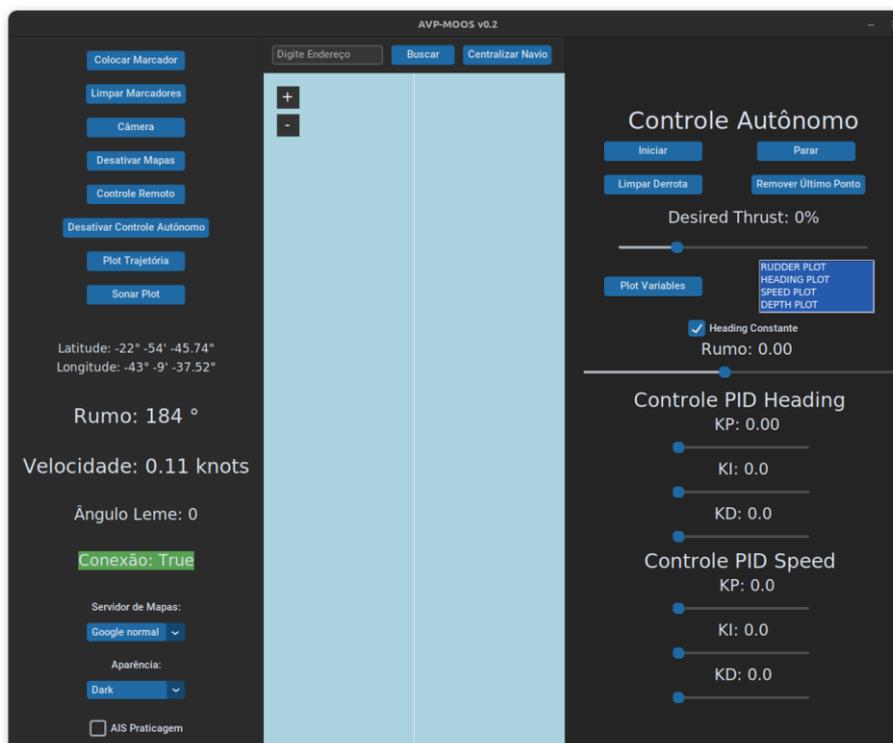


Figura 14 – Tela do sistema de Comando e Controle.

Com a finalidade de subsidiar a avaliação dos resultados obtidos através das medições efetuadas, recorre-se à parâmetros encontrados na literatura. Numa pesquisa bibliográfica, não se observa, sobre VSNTs, iniciativas de pesquisa semelhante à dos VANTs, o que representa uma lacuna em medições de indicadores chave de desempenho (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. A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os requisitos de taxa de dados e latência, utilizando os valores do trabalho sobre VANTs de Geraci et al. [44] exceto para o sonar, que não é escopo de seu estudo.

Tabela 4 - Requisitos de latência para C2.

C2	Latência fim a fim
Controle por pontos de passagem	1 s
Controle direto da direção	40 ms

No modo de controle por pontos de passagem, o VNT recebe coordenadas de determinados pontos por onde ele deve passar. A navegação funciona através da programação de rotas pré-definidas, que são enviadas antes de iniciar o percurso. O VNT utiliza seu sistema de posicionamento global para determinar sua localização e segue a rota definida pelos pontos de passagem, ajustando sua trajetória conforme necessário [45]. No modo de controle direto, o operador exerce o controle e executa as manobras diretamente, visualizando o ambiente pelas imagens fornecidas pelo VNT, caso ele esteja além de sua linha de visão [44].

Tabela 5 - Requisitos de taxa de dados e latência para aplicação.

Dados da aplicação	Taxa de dados	Latência fim a fim
Câmera (VLoS)	2 Mbps	1 s
Câmera (BVLoS)	4 Mbps	140 ms

Onde *Vision Line of Sight* (VLoS) significa que o VNT está na linha de visão do operador/controlador e *Beyond Vision Line of Sight* (BVLoS) significa que está além da linha de visão do operador/controlador.

Faixas com valores de RSRP e SNR são normalmente utilizadas por operadoras de telefonia celular, fornecedores de equipamentos de *drive tests* e, também, encontradas na literatura [12] [13], para estabelecer condições de radiofrequência (vide Tabela 1 e Tabela 2). Neste trabalho utiliza-se a Tabela 1 para classificar a condição de recepção no transcorrer das medições efetuadas, em virtude de ter mais aderência aos resultados obtidos, conforme apresentado no Capítulo 5.

4.2 Cenários Terra vs Mar

4.2.1 Ambiente de Medição e Sistema Irradiante nos Testes em Terra

As medições são realizadas em uma região suburbana, onde predominam baixas edificações e com vegetação. Excetuando as vias principais, as demais são estreitas, com árvores e boa parte sem saída. A região possui cobertura de rede móvel celular comercial com tecnologias 5G. A antena transmissora, está situada em Camboinhas, Niterói-RJ, a uma altura de 37,1 m, localizada em um ponto elevado da região, cujas coordenadas são: latitude -22,95231 e longitude -43,062338. Possui banda de 3500 MHz, potência 200 W *massive Multiple Input Multiple Output* (mMIMO), azimute 140°, Ganho 70 dBi, abertura horizontal 65°, abertura vertical 8,5°, inclinação 2°. Pode-se ter uma visão da antena em relação à região na Figura 15 e o destaque em amarelo representa o setor ao qual o aparelho se conecta.



Figura 15 - Ambiente das campanhas de medição com veículo em terra.

Neste ambiente, o percurso dos testes dá-se nas vias principais da localidade, entre 373 e 874 metros de distância da antena.

4.2.2 Metodologia e Sistema de Recepção nos Testes em Terra

Os testes consistem em *upload* de dados e envio de mensagens *Internet Control Message Protocol* (ICMP) para um servidor. No que se refere à taxa de dados, para geração de tráfego contínuo, são estabelecidas 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. O envio de mensagens ICMP serve para a apuração do *Round-Trip Time* (RTT), que é o tempo de ida e volta de uma mensagem entre origem e destino. A latência é calculada pela fórmula $RTT/2$, assumindo como premissa para este trabalho que o caminho de ida é igual ao de volta. Os testes são iniciados pelo software XCAL, através do dispositivo móvel, configurado para utilizar somente a tecnologia 5G. O XCAL armazena os dados para posterior processamento e análise de resultados.

Para a execução das medições, é utilizado um aparelho celular conectado a um notebook com software de *drive test* (DT) instalado. São empregados os equipamentos: smartphone Motorola EDGE 20 modelo XT2143-1 para teste 5G; notebook DELL Latitude 5420, Intel Core i5, 8GB RAM, Windows 11; software XCAL5 05.0.2.194N – para realização de DT e coleta de dados. As medições foram realizadas com o auxílio de um veículo, com o aparelho celular localizado no seu interior, próximo ao vidro dianteiro e conectado ao notebook. O cenário é configurado para que não haja transição do dispositivo móvel de uma antena para outra (*handover*), sendo atendido por uma única antena 5G.

4.2.3 Ambiente de Medição e Sistema Irradiante nos testes no Mar

Neste cenário, as medições são realizadas no mesmo ambiente citado no item 4.1.1, sendo que o percurso se limita do ponto 1 ao ponto 4, entre 654 e 1552 metros de distância da antena, conforme Figura 16.



Figura 16 – Campanhas de medição na baía da Guanabara, do ponto 1 ao ponto 4.

4.2.4 Metodologia e Sistema de Recepção nos Testes no Mar

Para a realização das medições no mar utiliza-se o aparelho celular conectado ao computador a bordo da embarcação. Os equipamentos e softwares são os mesmos usados no veículo em terra, assim como os procedimentos para *upload* de dados e envio de mensagens ICMP:

- Computador com software XCAL (Figura 17); e
- *Upload* de dados via FTP e envio de mensagens ICMP.

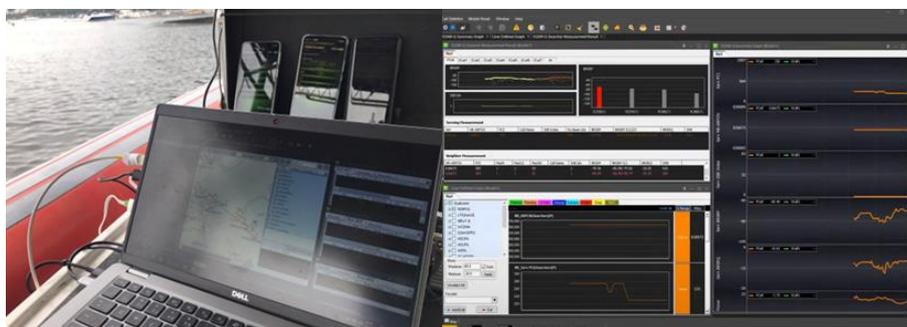


Figura 17 – Computador com XCAL instalado (esquerda) e tela do software XCAL monitorando parâmetros da interface aérea do 5G (direita). Adaptado de [46].

Capítulo 5 - Resultados

Este capítulo é dividido em duas partes: (i) análise dos dados no cenário marítimo, onde são apresentados os resultados referentes aos dados coletados nos testes realizados com o tráfego real das aplicações e com tráfego simulado, ambos com a embarcação em movimento e parada em pontos pré-determinados, e (ii) comparação de resultados obtidos nos cenários terra vs mar.

5.1 Cenário Marítimo

A fim de facilitar a descrição da análise de resultados, foram atribuídas siglas aos testes realizados, classificados conforme o Anexo A.

Algumas figuras exibidas na análise de resultados, referente ao tráfego de aplicações com a embarcação em movimento, apresentam espaços em branco, sem dados, em trechos do percurso. Isto ocorreu em função da parada repentina do sonar, tendo sido necessário reiniciá-lo. Por se tratar de trechos pequenos, considerou-se que esse fato não interferiu na avaliação dos resultados.

5.1.1 Avaliação dos Dados Coletados com a Embarcação a 3,5 Nós

São analisados aqui 2 tipos de teste com a embarcação navegando à 3.5 nós: tráfego gerado através das aplicações em funcionamento, teste T1, e através de simulação de tráfego de 10 Mbps, via iperf3, teste T4, ambos sendo gerados durante todo o percurso. São coletados dados de RSRP, SNR, taxa de dados e latência, com a intenção de avaliar a relação entre essas métricas.

5.1.1.1 Taxa de dados vs RSRP e SNR a 3,5 Nós

Em qualquer uma das condições de operação de geração de tráfego, seja através das aplicações (teste T1) ou através de tráfego simulado (teste T4), observa-se, na Figura 18,

que o RSRP tem comportamento similar, isto é, o efeito do canal de propagação foi o mesmo em ambos dos casos. A partir do terço final do percurso, em torno de 1600 metros de distância da antena, o sinal vai enfraquecendo mais fortemente, atingindo valores entre -90 e -110 dBm, considerados na faixa razoável e fraca de sinal, conforme Tabela 1. A partir desta distância, a taxa de dados do tráfego gerado cai de forma significativa prejudicando o seu bom funcionamento. Cabe salientar, entretanto, que a taxa de dados do tráfego simulado de 10 Mbps com geração constante, utiliza para sua transmissão o protocolo de transporte UDP, apresentando, majoritariamente, uma uniformidade durante todo o percurso. O SNR segue o mesmo padrão de comportamento do RSRP nas duas medições, registrando, nesse trecho final, valores entre 10 e -10 dB, (vide Figura 19), considerados na faixa razoável e fraca, conforme Tabela 1, sendo que valores negativos indicam que o sinal recebido é mais fraco.

Uma observação é que no tráfego das aplicações ocorreu a parada repentina do sonar. E no tráfego simulado, o iperf3 parou de funcionar tendo que ser reiniciado. Por isso os espaços em branco, sem dados, presentes na Figura 18 e na Figura 19.

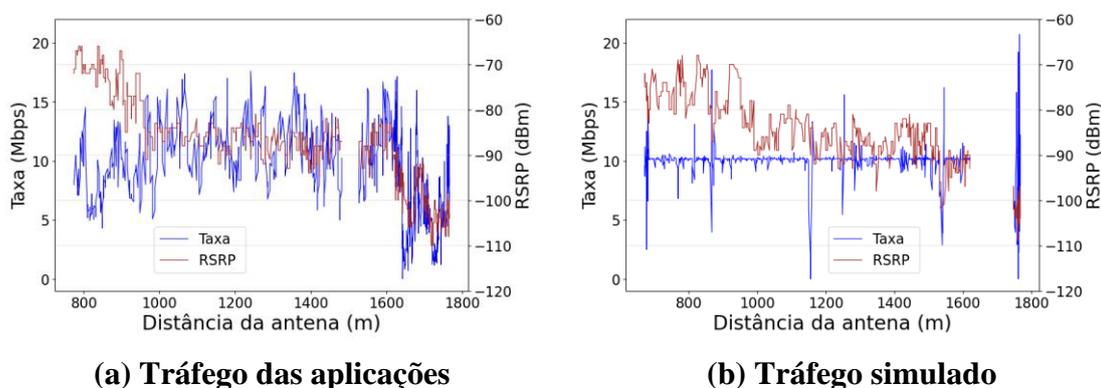


Figura 18 – Relação RSRP vs taxa de dados com tráfegos das aplicações e simulado.

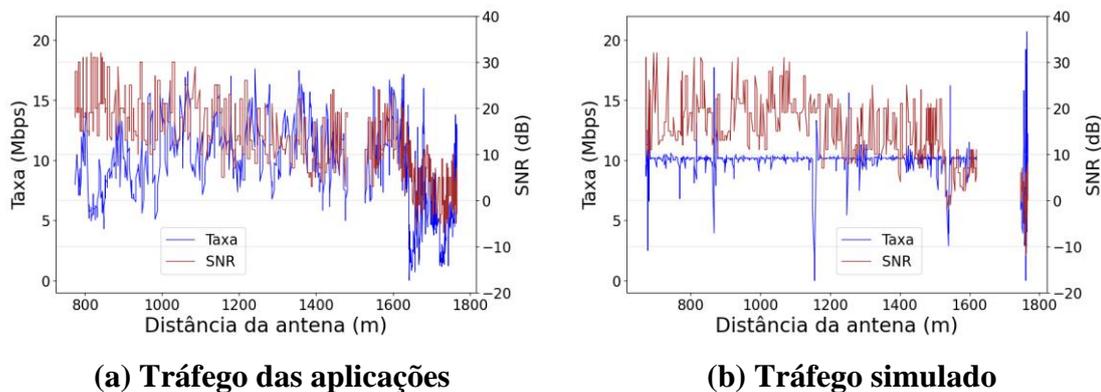


Figura 19 – Relação SNR vs taxa de dados com tráfegos das aplicações e simulado.

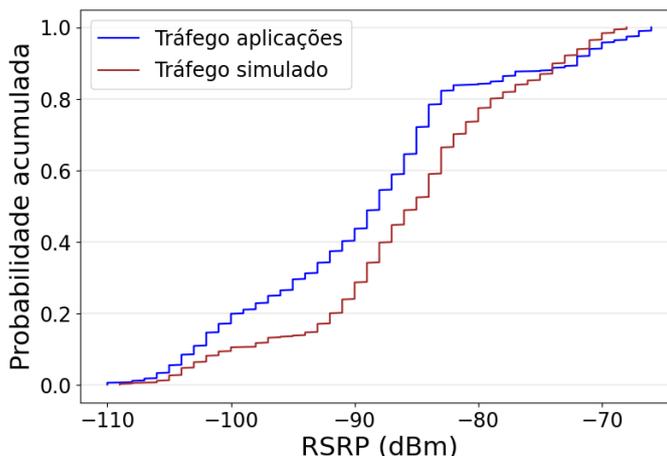


Figura 20 - CDF referente à métrica de RSRP nos testes T1 e T4.

Ao comparar as *Cumulative Distribution Functions* (CDFs) da Figura 20 com a Figura 18, pode-se observar que a partir de -90 dBm, há uma queda na taxa de dados. Verifica-se, ainda, pela Figura 20, que, com relação à geração de tráfego através das aplicações (teste T1), aproximadamente 40% dos dados coletados estão abaixo deste valor, indicando que 60% desses dados apresentam uma maior estabilidade, considerados na faixa de bom e excelente, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Já para o tráfego simulado (teste T4), aproximadamente 20% dos dados se encontram abaixo de -90 dBm, por conseguinte, 80% apresentam uma maior estabilidade.

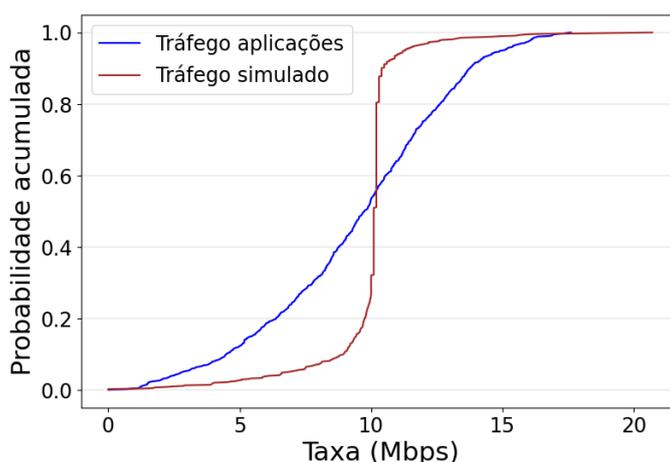


Figura 21 - CDF referente à métrica de taxa de dados nos testes T1 e T4.

A variação de taxa de dados apresentada pelas duas CDFs na Figura 21, se justifica em função das características dos protocolos de transporte e de geração de tráfego, aquele

gerado pelas aplicações (teste T1) e aquele de tráfego gerado de 10 Mbps (teste T4). Neste último, percebe-se a concentração de dados em 10 Mbps, representando, aproximadamente, 90% do total de dados coletados. Já no teste T1, os valores estão mais distribuídos, onde a curva CDF indica que, aproximadamente, 50% dos dados estão acima de 10 Mbps e 50% abaixo.

5.1.1.2 Latência vs RSRP e SNR a 3,5 Nós

Aqui são analisados os valores de latência em função do comportamento do RSRP e SNR no teste T1, enquanto as aplicações reais estão em funcionamento.

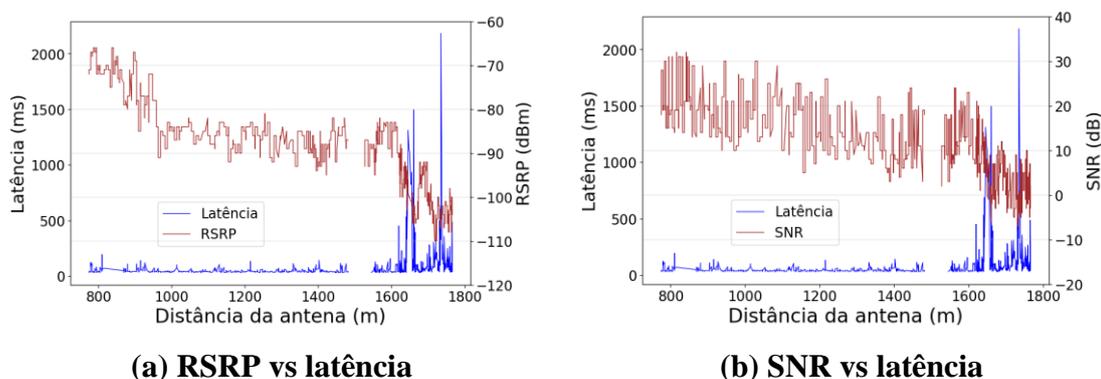


Figura 22 - Relação do RSRP e SNR com a latência no teste T1.

Tabela 6 - Percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência no teste T1.

Requisitos de latência (ms)	Atendimento no percurso (%)	Atendimento até 1600m (%)	Atendimento após 1600m (%)
40	50,1	62,8	28,8
140	92,1	99,3	80
1000	99,2	100	97,9

A latência é outra métrica em que se analisa sua relação com o sinal recebido, tanto no que diz respeito ao RSRP, quanto ao SNR, conforme mostra a Figura 22. Nota-se pela Tabela 6, que, no trecho final do percurso, que se situa acima de 1600 metros de distância da antena, os percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência, identificados na Tabela 4 e na Tabela 5, se apresentam piores que os do trecho até 1600 metros,

mostrando que o empobrecimento de sinal no trecho final reflete no aumento de atraso na comunicação. Uma observação é que no tráfego das aplicações ocorreu a parada repentina do sonar. Por isso o espaço em branco, sem dados, presente nesse trecho da Figura 22.

Outro resultado importante para definir a qualidade da rede de comunicação é o percentual de perda de pacotes. A perda de pacotes apurada neste teste representa 0,7% do total de pacotes coletados.

A Figura 23 ilustra a curva CDF para a métrica de latência no teste T1. Os valores de latência neste teste se concentram até 140 ms, representando, em torno de, 95% dos dados coletados.

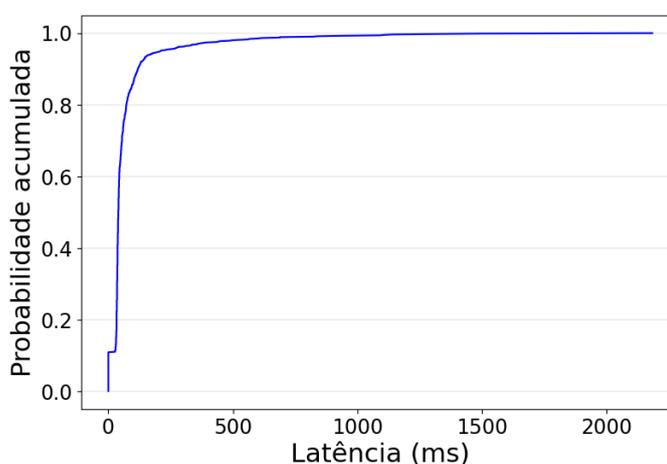


Figura 23 - CDF referente à métrica de latência no Teste T1.

5.1.2 Avaliação dos Dados Coletados com a Embarcação a 10 Nós

Para verificar o desempenho do sistema em diversas velocidades, são analisados aqui os mesmos tipos de teste do item 5.1.1, porém com a embarcação navegando à 10 nós, nos testes T7 e T12. Uma observação é que no tráfego das aplicações ocorreu a parada repentina do sonar. Por isso o espaço em branco, sem dados, presente nas figuras referentes às aplicações.

5.1.2.1 Taxa de dados vs RSRP e SNR a 10 Nós

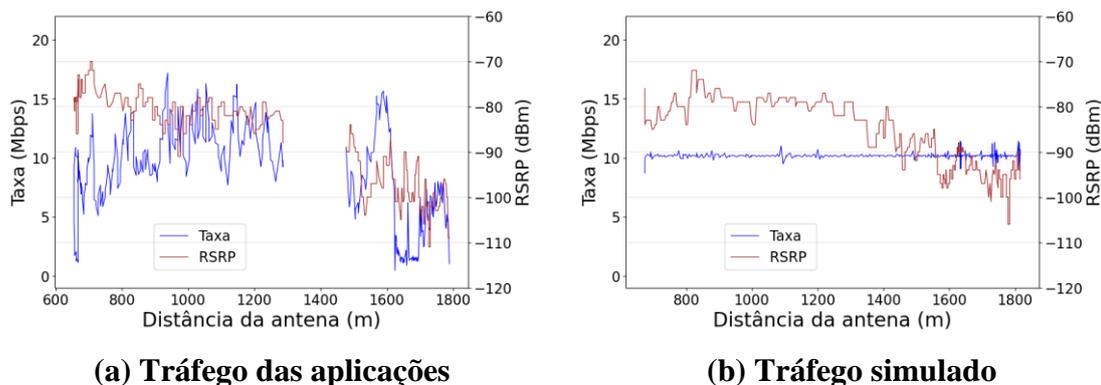


Figura 24 – Relação RSRP vs taxa de dados com tráfegos das aplicações e simulado.

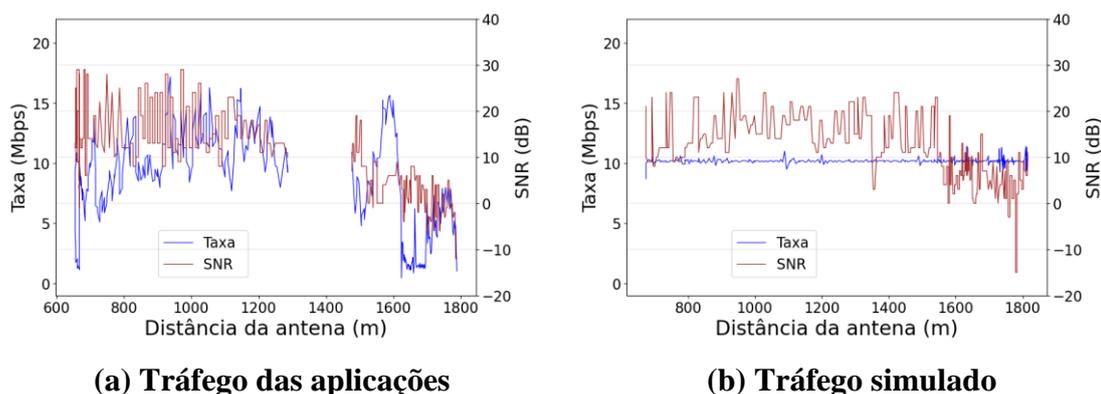


Figura 25 – Relação SNR vs taxa de dados com tráfegos das aplicações e simulado.

Assim como nos testes a 3,5 nós, em qualquer uma das condições de operação de geração de tráfego, seja através das aplicações (teste T7) ou através de tráfego simulado (teste T12), observa-se, na Figura 24 (a e b), que o RSRP tem comportamento similar, isto é, o efeito do canal de propagação foi o mesmo em ambos dos casos. A partir do terço final do percurso, em torno de 1600 metros de distância da antena, o sinal vai enfraquecendo mais fortemente, atingindo valores entre -90 e -110 dBm, considerados na faixa razoável e fraca de sinal, conforme Tabela 1. A partir desta distância, a taxa de dados do tráfego das aplicações cai de forma significativa prejudicando o seu bom funcionamento. Cabe salientar, entretanto, que a taxa de dados do tráfego simulado de 10 Mbps com geração constante, utiliza para sua transmissão o protocolo de transporte UDP, apresentando, majoritariamente, uma uniformidade durante todo o percurso (vide Figura 24b). O SNR

segue o mesmo padrão de comportamento do RSRP, registrando, nesse trecho final do teste T7, 100% dos valores entre 10 e -10 dB, Figura 25a, considerados na faixa razoável e fraca, conforme Tabela 1. E no teste T12, 99,4% dos valores entre 15 e -15 dB, Figura 25b, considerados na faixa razoável e fraca, sendo que valores negativos indicam que o sinal recebido é mais fraco.

Ao se comparar a CDF da Figura 26 com o RSRP apresentado na Figura 24a, pode-se observar que a partir de -90 dBm, há uma queda na taxa de dados. Verifica-se, ainda, que, tanto o tráfego gerado através das aplicações (teste T7), quanto o tráfego simulado (teste T12), aproximadamente 40% dos dados coletados estão abaixo deste valor, indicando que 60% desses dados apresentam uma maior estabilidade, vide Figura 26, considerados na faixa de bom e excelente, conforme Tabela 1.

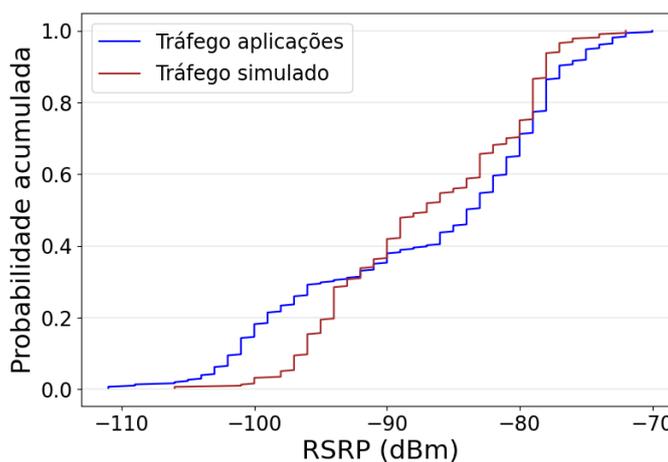


Figura 26 - CDF referente à métrica de RSRP nos testes T7 e T12.

A variação de taxa de dados apresentada na Figura 27 se justifica em função dos protocolos de transporte e da característica de geração de tráfego, aquele gerado pelas aplicações (teste T7) e aquele tráfego gerado de 10 Mbps (teste T12). Neste último, percebe-se a concentração de dados em torno de 10 Mbps, representando, aproximadamente, 90% do total de dados coletados. Já no teste T7, os valores estão, desproporcionalmente, mais distribuídos, pois a curva CDF indica que, aproximadamente, 35% dos dados estão acima de 10 Mbps e 65% abaixo.

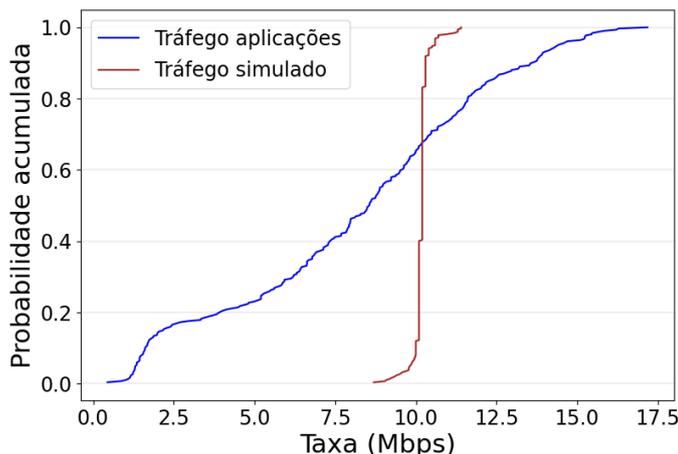


Figura 27 - CDF referente à métrica de taxa de dados nos testes T7 e T12.

5.1.2.2 Latência vs RSRP e SNR a 10 Nós

Aqui é analisado o comportamento da latência em relação ao RSRP e SNR no teste T7, enquanto as aplicações reais estão em funcionamento.

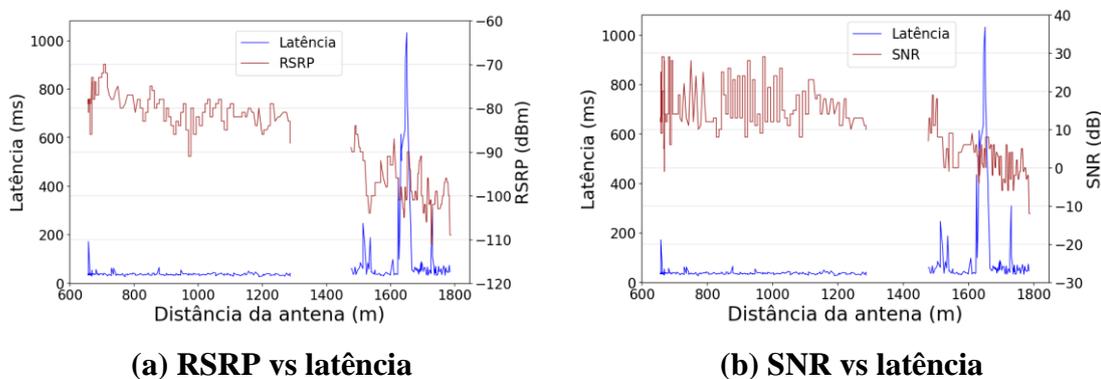


Figura 28 - Relação RSRP e SNR com latência no teste T7.

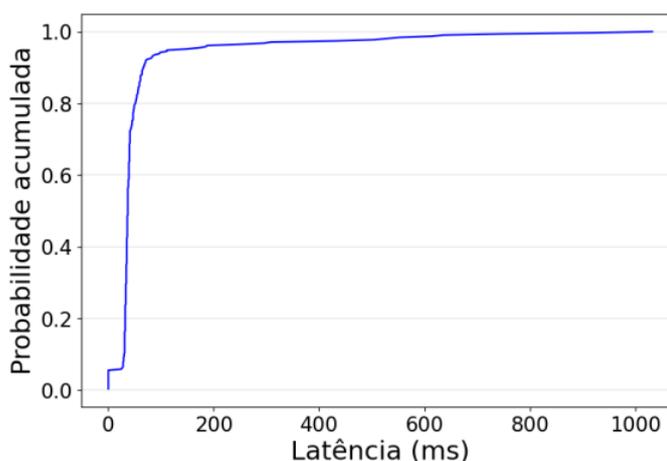
A latência é outra métrica em que se analisa sua relação com o sinal, tanto no que diz respeito ao RSRP, quanto ao SNR, conforme mostra a Figura 28. Nota-se pela Tabela 7, que, no trecho final do percurso, que se situa acima de 1600 metros de distância da antena, os percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência, identificados na Tabela 4 e na Tabela 5, se apresentam piores que os do trecho até 1600 metros, mostrando que o empobrecimento de sinal neste trecho reflete no aumento de atraso na comunicação.

Tabela 7 - Percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência no teste T7.

Requisitos de latência (ms)	Atendimento no percurso (%)	Atendimento até 1600m (%)	Atendimento após 1600m (%)
40	68,6	81,9	35,8
140	94,8	98,1	86,3
1000	99,6	100	98,8

Outro resultado importante para definir a qualidade da rede de comunicação é o percentual de perda de pacotes. A perda de pacotes apurada neste teste representa 1,2% do total de pacotes coletados.

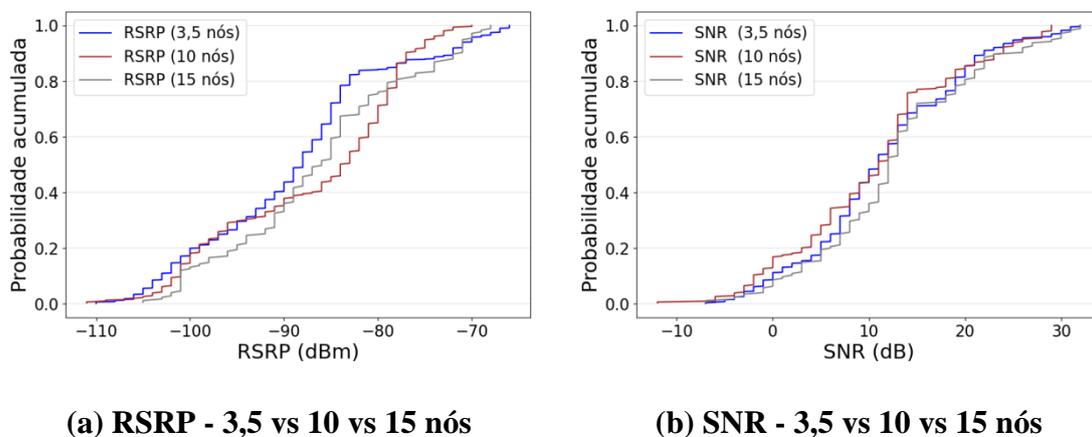
Os valores de latência neste teste se concentram até 140 ms, representando em torno de 95% dos dados coletados, conforme ilustra a curva CDF da Figura 29.

**Figura 29 - CDF referente à métrica de latência no Teste T7.**

5.1.3 Análise Comparativa de Dados nas Velocidades 3,5 vs 10 vs 15 Nós

São analisados os resultados em função da diferença de velocidade utilizada nos testes T1, T7 e T13 para o tráfego das aplicações (Comando e Controle, câmera e sonar) e T4, T12 e T16 para o tráfego simulado (gerado via iperf3). Ambos os tráfegos são entre o VSNT e a base, conforme o diagrama da Figura 7.

5.1.3.1 Tráfego das Aplicações

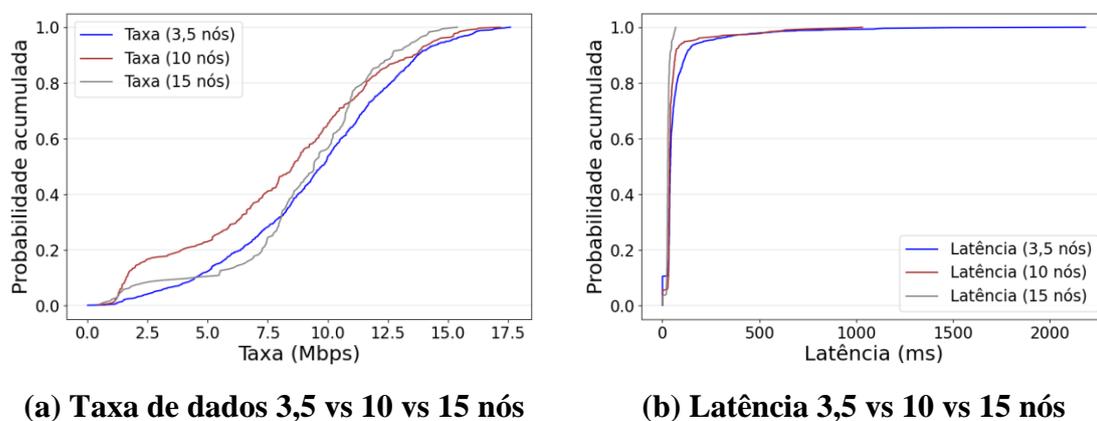


(a) RSRP - 3,5 vs 10 vs 15 nós

(b) SNR - 3,5 vs 10 vs 15 nós

Figura 30 – CDF de RSRP e SNR referente ao tráfego das aplicações.

A CDF mostra o comportamento do RSRP nos testes com velocidades de 3,5, 10 e 15 nós referente ao tráfego das aplicações com o VSNT em movimento. Considerando que -90 dBm é o limiar da passagem de condição do sinal de boa para razoável e fraca, observa-se, pela Figura 30a, que, em todas as velocidades, aproximadamente, 60% dos dados estão acima desse limiar, indicando situação de estabilidade nesses níveis de sinal e que os 40% restantes se situam numa condição razoável e fraca de sinal, conforme Tabela 1. Com relação ao SNR, nota-se, pela Figura 30b, que as CDFs são praticamente iguais, sendo que, aproximadamente, 40% dos dados se encontram acima de 13dB, situação considerada entre boa e excelente, e 60% abaixo desse valor, situação, considerada entre razoável e fraca, conforme Tabela 1.



(a) Taxa de dados 3,5 vs 10 vs 15 nós

(b) Latência 3,5 vs 10 vs 15 nós

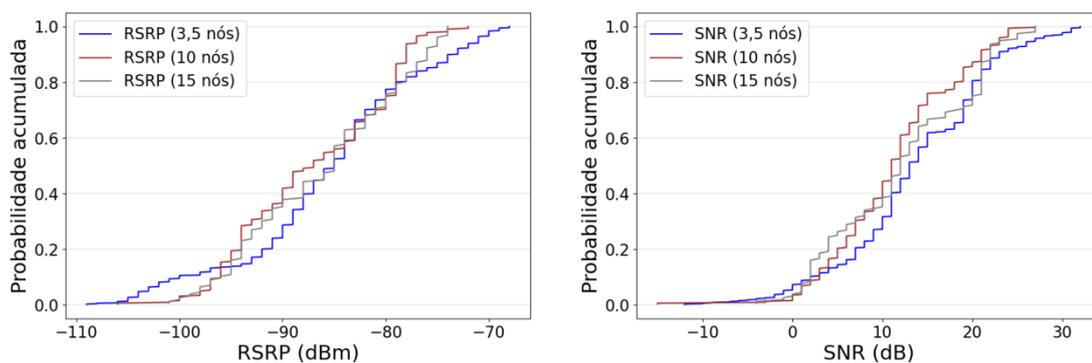
Figura 31 – CDF de taxa de dados e latência referente ao tráfego das aplicações.

Percebe-se, na Figura 31a, que as curvas CDF das três velocidades são similares. Usando 10 Mbps como um ponto de referência de taxa de dados, a velocidade de 3,5 nós aponta 55% acima desse valor, a de 10 nós apresenta 65%, enquanto a de 15 nós indica 58%, aproximadamente.

Conforme pode-se observar na Figura 31b, as CDF apresentam resultados similares de atendimento aos requisitos de latência abaixo de 140 ms, com, praticamente, 100% dos dados abaixo desse valor. Quando se considera o requisito de latência para valores abaixo de 40 ms, os resultados à 3,5, 10 e 15 nós apontam 50%, 68% e 90% dos dados abaixo desse valor, respectivamente.

De maneira geral, pode-se concluir que o aumento da velocidade não influencia nos parâmetros analisados e, por conseguinte, no desempenho do sistema.

5.1.3.2 Tráfego Simulado



(a) RSRP - 3,5 vs 10 vs 15 nós.

(b) SNR - 3,5 vs 10 vs 15 nós.

Figura 32 – CDF de RSRP e SNR referente ao tráfego simulado.

A CDF mostra o comportamento do RSRP nos testes com velocidades de 3,5, 10 e 15 nós referente ao tráfego simulado de 10 Mbps, com o VSNT em movimento. Considerando que -90 dBm é o limiar da passagem de condição do sinal de boa para razoável e fraca, observa-se, pela Figura 32a, que, na velocidade de 3,5 nós, aproximadamente 70% dos dados estão acima desse limiar, indicando situação de estabilidade nesses níveis de sinal e que os restantes 30% se situam numa condição razoável e fraca de sinal, conforme Tabela 1. Já para as velocidades de 10 e 15 nós, 60% dos dados encontram-se acima desse limiar e 40% se situam abaixo. Com relação ao SNR,

nota-se, pela Figura 32b, que as CDFs são similares, sendo que, na velocidade de 3,5 nós, aproximadamente, 50% dos dados se encontram acima de 13dB, situação considerada entre boa e excelente, conforme Tabela 1, enquanto na velocidade de 10 e 15 nós, 40% dos dados estão acima desse valor e 60% abaixo.

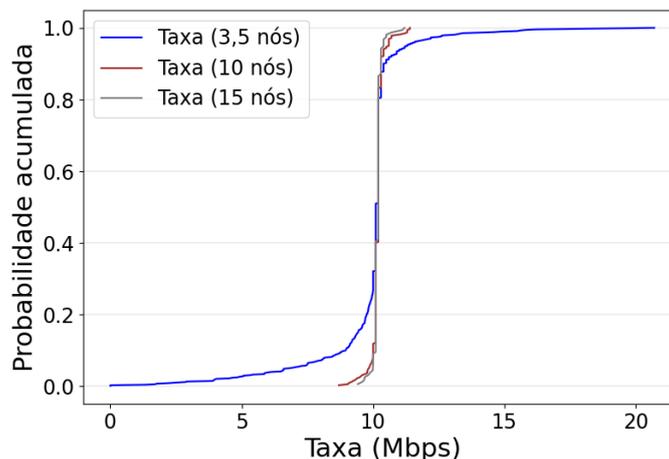


Figura 33 – CDF de taxa de dados referente ao tráfego simulado.

Usando 10 Mbps como um ponto de referência de taxa de dados, percebe-se, na Figura 33, uma concentração na CDF de 3,5 nós de, aproximadamente, 60% dos dados em 10 Mbps, enquanto na CDF de 10 e 15 nós, aproximadamente, 80% dos dados se concentram nesse valor.

5.1.4 Avaliação de Testes que Apresentam Trecho com *Handover*

Verifica-se, em alguns testes em movimento, que quando a embarcação passa pelo ponto P5, que está a cerca de 1800 metros de distância da antena, há mudanças de antena buscando melhorar o nível de sinal, ou seja, trata-se de uma área com potência pobre de sinal.

O processo de *handover* em redes celulares visa manter a continuidade do serviço de comunicação do usuário. Quando a intensidade do sinal da célula atual diminui e o sinal de uma célula vizinha se torna mais forte por um período de tempo predeterminado, conhecido como *Time-to-Trigger* (TTT), o *handover* é acionado. Este processo envolve a troca de mensagens entre o UE e a BS e entre esta com a nova BS para transferir a conexão

para a nova célula. No entanto, *handovers* frequentes podem não apenas comprometer a qualidade de serviço (QoS) percebida pelo usuário, mas também aumentar a carga da rede [46]. *Handovers* desnecessários frequentes entre duas estações vizinhas é chamado de efeito pingue-pongue, que resulta de flutuações rápidas na intensidade do sinal de ambas as estações. O bom dimensionamento do nível de margem para acionamento do *handover* entre o RSRP da célula atual e o RSRP da célula de destino e do intervalo TTT reduzem *handovers* desnecessários, evitando o efeito pingue-pongue [47].

Essa circunstância tem relevância na análise do desempenho da rede, razão pela qual, ilustra-se, com esses testes, a troca de antenas no trecho final do percurso, e o seu reflexo no comportamento do sinal e do tráfego.

5.1.4.1 Tráfego das Aplicações

Primeiramente, apresenta-se a Figura 34, referente a todo o percurso da embarcação à 3,5 nós e com as aplicações funcionando no teste T3, inclusive, com o trecho de *handover*. Uma observação é que no tráfego das aplicações ocorreu a parada repentina do sonar. Por isso o espaço em branco, sem dados, presente nas figuras referentes às aplicações.

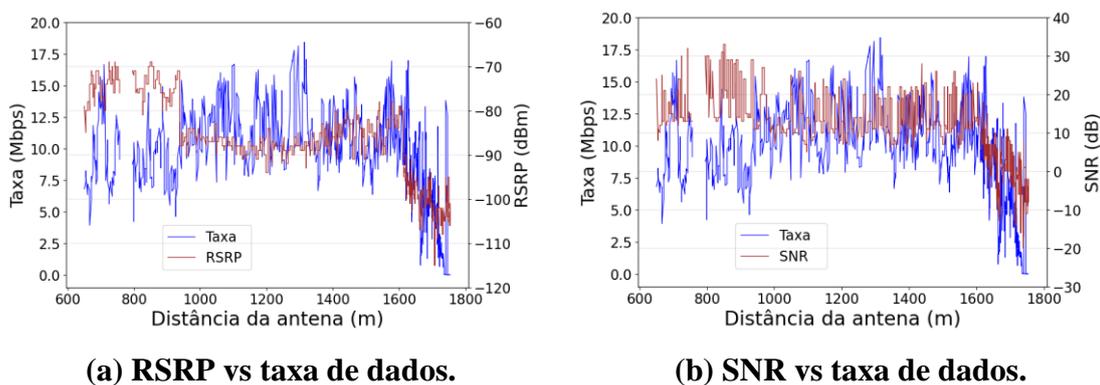


Figura 34 - Relação RSRP e SNR com taxa de dados no teste T3.

Na análise dos resultados obtidos neste teste, a partir de 1660 m ocorre uma degradação significativa do sinal, verificando-se, inclusive, o processo de *handover* na tentativa de garantir a conexão. Demonstra-se, na Figura 35, um recorte a partir desse ponto, onde inicia a troca de antenas.

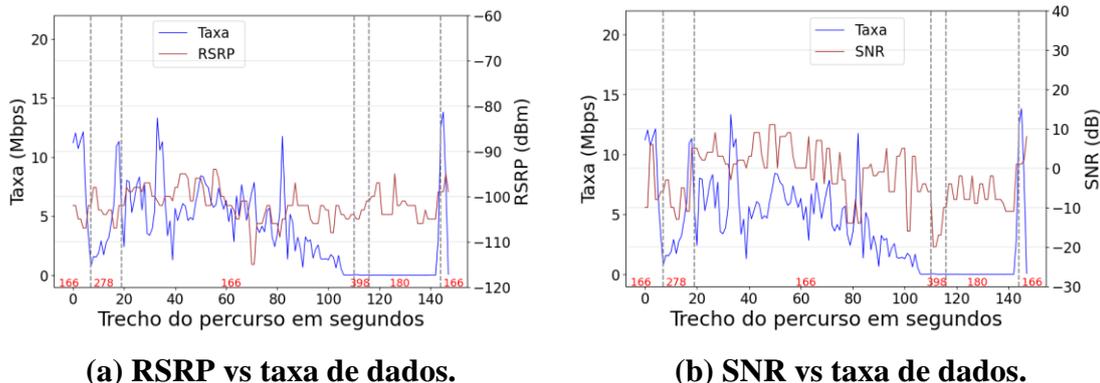


Figura 35 - Relação RSRP e SNR com taxa de dados no trecho com *handover* no teste T3.

A antena de referência de cobertura para a região de testes escolhida é a 166 e percebe-se que nesse recorte houve 5 trocas de antena, voltando ao final para a antena de referência. Abaixo de -90 dBm é quando fica mais evidente a queda da taxa de dados e em torno de -100 dBm (para baixo) é quando ocorre o *handover*. Note-se, que apesar da tentativa de melhoria do sinal através da mudança de antena, o sinal permanece, majoritariamente, abaixo de -100 dBm, considerado fraco, conforme Tabela 1. Além disso, como mostra a Figura 35b, o SNR decresce, atingindo o valor de -20 dB, refletindo, inclusive, na interrupção do funcionamento das aplicações.

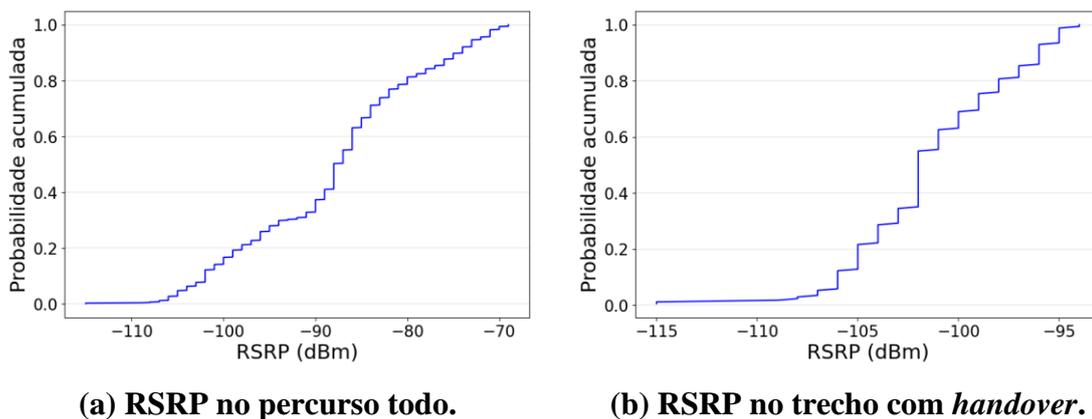


Figura 36 – CDF de RSRP no teste T3.

Ao comparar a CDF do percurso todo com a do trecho mais afastado da antena, vide Figura 36, percebe-se que a segunda apresenta níveis de potência de sinal piores que a primeira. Verifica-se que, com relação ao percurso todo, aproximadamente 30% dos dados

coletados estão abaixo de -90 dBm, indicando que 70% desses dados apresentam uma maior estabilidade (vide Figura 36a), considerados na faixa de bom e excelente, conforme Tabela 1. Já para o trecho com *handover*, vide Figura 36b, 100% dos dados se encontram abaixo de -90 dBm, considerados na faixa de razoável e fraco, conforme Tabela 1, ratificando a piora do sinal no trecho final do percurso e, conseqüentemente, maior queda na taxa de dados.

Verifica-se, ainda, a relação da latência com o sinal, tanto no que diz respeito ao RSRP, quanto ao SNR, conforme mostra a Figura 37. À medida que o sinal cai, a latência aumenta, observando-se esse movimento de forma mais destacada no trecho final do percurso.

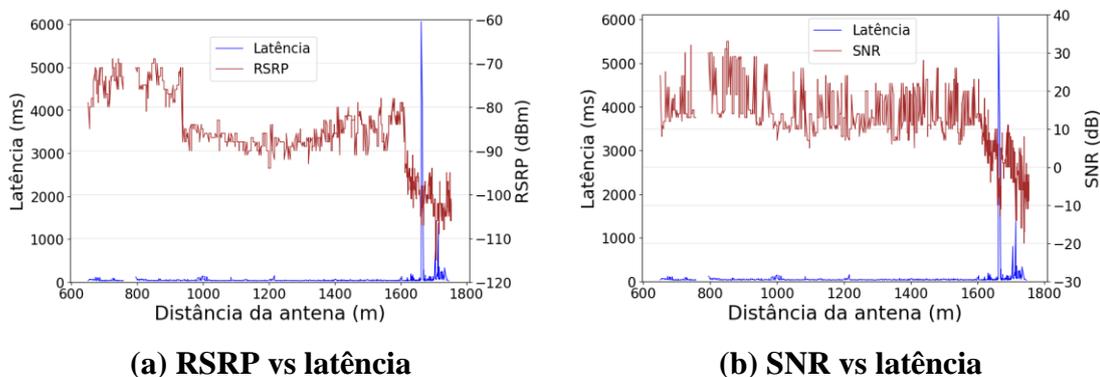


Figura 37 - Relação RSRP e SNR com latência no percurso todo.

De forma a explorar mais o comportamento da mudança de antenas no final do percurso, demonstra-se na Figura 38 um recorte a partir de 1660 metros.

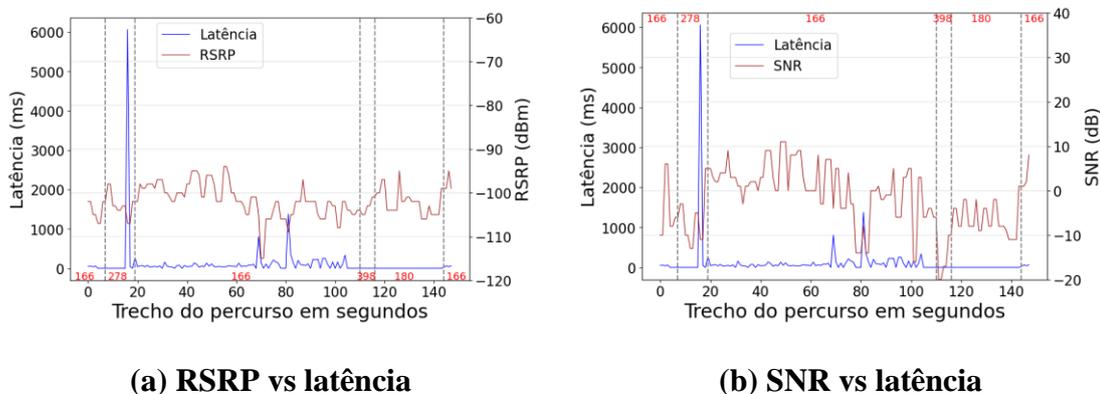


Figura 38 - Relação RSRP e SNR com latência no trecho com *handover*.

Nota-se pela Tabela 8, que, no trecho final do percurso, situado acima de 1600 metros de distância da antena, os percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência, identificados na Tabela 4 e na Tabela 5, se apresentam piores que os do trecho até 1600 metros, mostrando que o empobrecimento de sinal neste trecho reflete no aumento do atraso na comunicação.

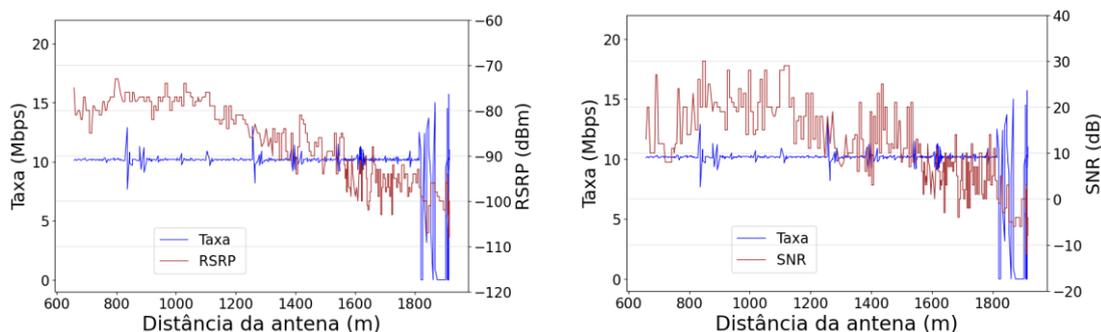
Outro resultado importante para definir a qualidade da rede de comunicação é o percentual de perda de pacotes. A perda de pacotes apurada neste teste representa 1,2% do total de pacotes coletados.

Tabela 8 - Percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência no teste T3.

Requisitos de latência (ms)	Atendimento no percurso (%)	Atendimento até 1600m (%)	Atendimento após 1600m (%)
40	60,1	63,0	53,8
140	96,6	99,2	91
1000	99,7	100	99,1

5.1.4.2 Tráfego Simulado

Primeiramente, apresenta-se a Figura 39, referente a todo o percurso da embarcação à 10 nós e com as aplicações funcionando no teste T10, inclusive, com o trecho de *handover*.



(a) RSRP vs taxa de dados.

(b) SNR vs taxa de dados.

Figura 39 - Relação RSRP e SNR com taxa de dados no teste T10.

Na análise dos resultados obtidos neste teste, a partir de 1840 m ocorre uma degradação significativa do sinal, verificando-se, inclusive, o processo de *handover* na tentativa de garantir a conexão. Demonstra-se, na Figura 40, um recorte a partir desse ponto, onde inicia a troca de antenas. A antena de referência de cobertura para a região de testes escolhida é a 166 e percebe-se que nesse recorte houve 4 trocas de antena, voltando ao final para a antena de referência. Note-se, porém, que apesar da tentativa de melhoria do sinal através da mudança de antena, o sinal permanece, majoritariamente, abaixo de -100 dBm (vide Figura 40a), considerado fraco, conforme Tabela 1. Além disso, como mostra a Figura 40b, o SNR se mantém, na maior parte do trecho, abaixo de 0 dB, refletindo, inclusive, na interrupção momentânea da comunicação.

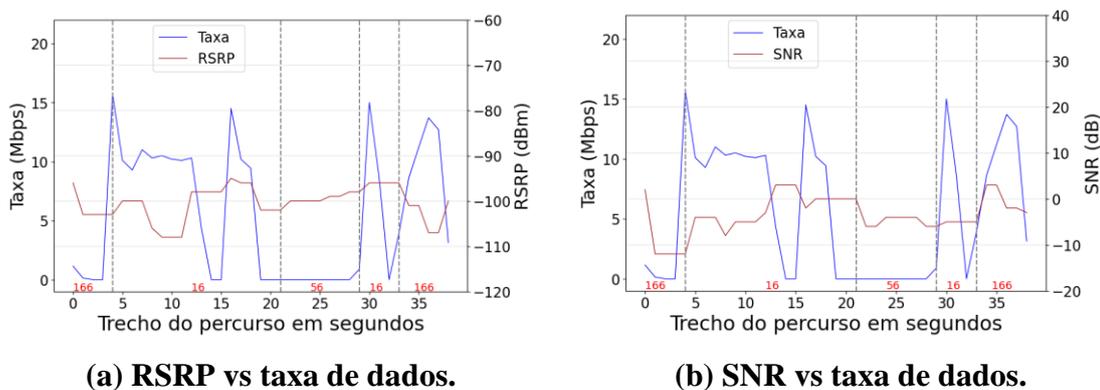


Figura 40 - Relação RSRP e SNR com taxa de dados no trecho com *handover* no teste T10.

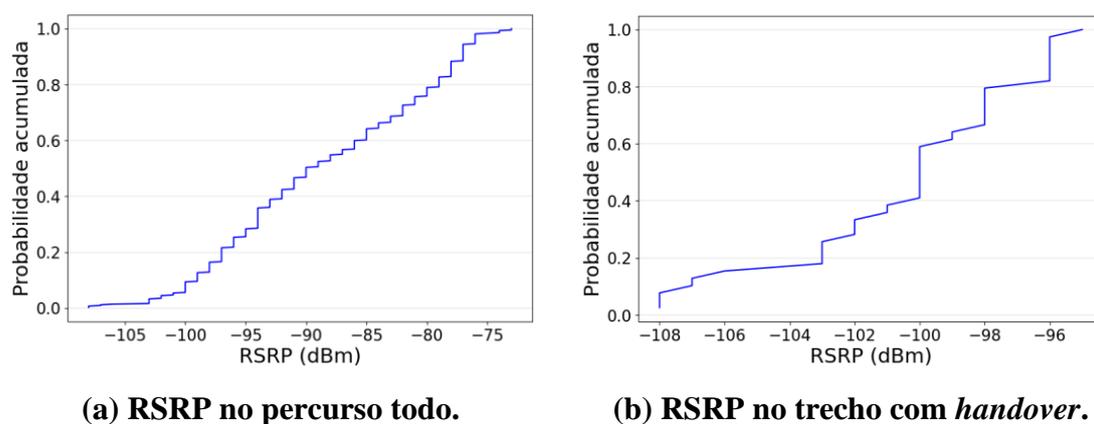


Figura 41 – CDF de RSRP no teste T10.

Ao comparar a CDF do percurso todo com a do trecho mais afastado da antena, vide Figura 41, percebe-se que a segunda apresenta níveis de potência de sinal piores que a

primeira. Verifica-se que, com relação ao percurso todo, aproximadamente 50% dos dados coletados estão abaixo de -90 dBm, indicando que os outros 50% apresentam uma maior estabilidade (vide Figura 41a), considerados na faixa de bom e excelente, conforme Tabela 1. Já para o trecho com *handover*, 100% dos dados se encontram abaixo de -90 dBm, considerados na faixa de razoável e fraco, conforme Tabela 1. (vide Figura 41b), ratificando a piora do sinal no trecho final do percurso e, conseqüentemente, maior queda na taxa de dados.

5.1.5 Avaliação dos Dados com a Embarcação Parada

Nesse tipo de teste a embarcação fica parada em cada ponto pré-determinado, mantendo a operação de geração de tráfego pelas aplicações do VSNT e pelo tráfego simulado de 10 Mbps por cerca de 60 segundos, coletando 61 amostras por ponto. O objetivo deste teste, é analisar o sistema sem a variabilidade do sinal produzida pelo movimento da embarcação. Adicionalmente, de acordo com a escolha dos pontos é possível determinar condições críticas para o funcionamento do sistema.

A Tabela 9 mostra a média e a mediana dos dados coletados nos testes T2 (tráfego gerado pelas aplicações) e T17 (tráfego simulado de 10 Mbps), em cada ponto fixo do percurso.

Tabela 9 - Média e mediana dos dados coletados nos 3 pontos fixos.

Tráfego aplicações	Ponto P1		Ponto P3		Ponto P5	
	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana
RSRP (dBm)	-77,1	-78	-87,4	-87	-95,5	-95
SNR (dB)	15,1	12	14,7	14	4,7	4
Taxa de dados (Mbps)	10,2	9,8	8,8	8,8	0,9	0,8
Tráfego simulado	Ponto P1		Ponto P3		Ponto P5	
	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana
RSRP (dBm)	-76,1	-77	-88,3	-88	-97,5	-98
SNR (dB)	17,4	15	11,3	10	3,1	1
Taxa de dados (Mbps)	10,1	10,2	10,1	10,2	9,6	10,2

5.1.5.1 Taxa de dados vs RSRP e SNR

Em qualquer uma das condições de operação de geração de tráfego, seja através das aplicações (teste T2) ou através de tráfego simulado (teste T17), observa-se, na Figura 42a e na Figura 42b, que o RSRP tem comportamento similar.

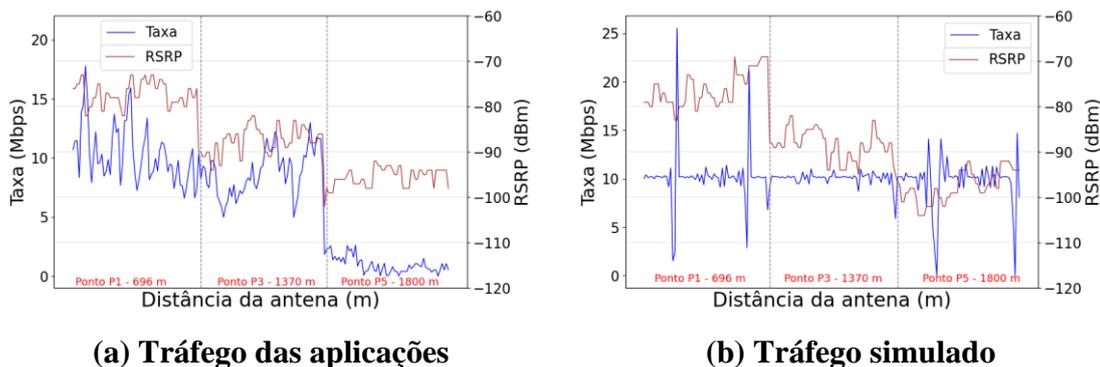


Figura 42 – Relação RSRP vs taxa de dados nos 3 pontos fixos.

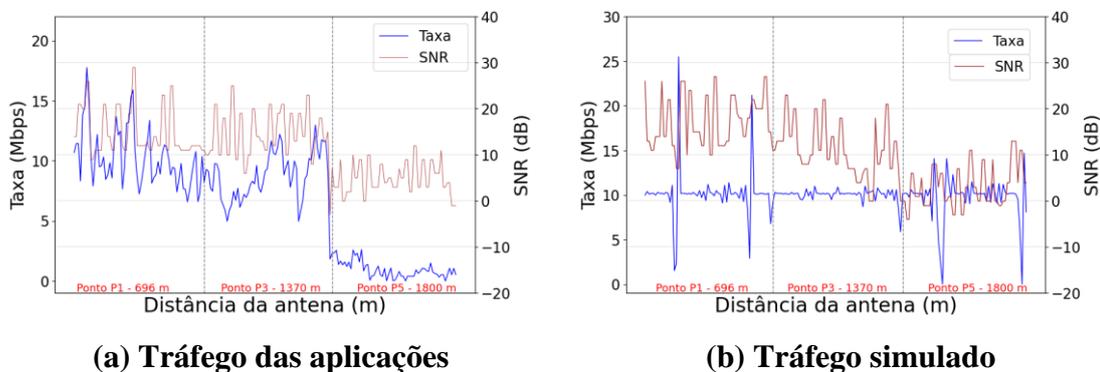


Figura 43 – Relação SNR vs taxa de dados nos 3 pontos fixos.

No ponto P5, em torno de 1800 metros de distância da antena, o sinal vai enfraquecendo mais fortemente, atingindo valores entre -92 e -102 dBm para tráfego gerado pelas aplicações e -92 e -104 dBm para tráfego simulado, considerados na faixa razoável e fraca de sinal, conforme Tabela 1. Cabe assinalar que, em função da queda do RSRP, a taxa de dados do tráfego gerado no teste T2 cai de forma significativa prejudicando o bom funcionamento das aplicações. Adicionalmente, a taxa de dados do tráfego simulado, em função de sua característica de geração constante e do protocolo de transporte UDP, se apresenta, majoritariamente, de forma uniforme nos 3 pontos fixos. O

SNR segue o mesmo padrão de comportamento do RSRP, registrando, no ponto P5, valores entre 12 e -3 dB no tráfego das aplicações (vide Figura 43a) e 13 e -4 dB no tráfego simulado (vide Figura 43b), sendo que valores negativos indicam que o sinal recebido é mais fraco.

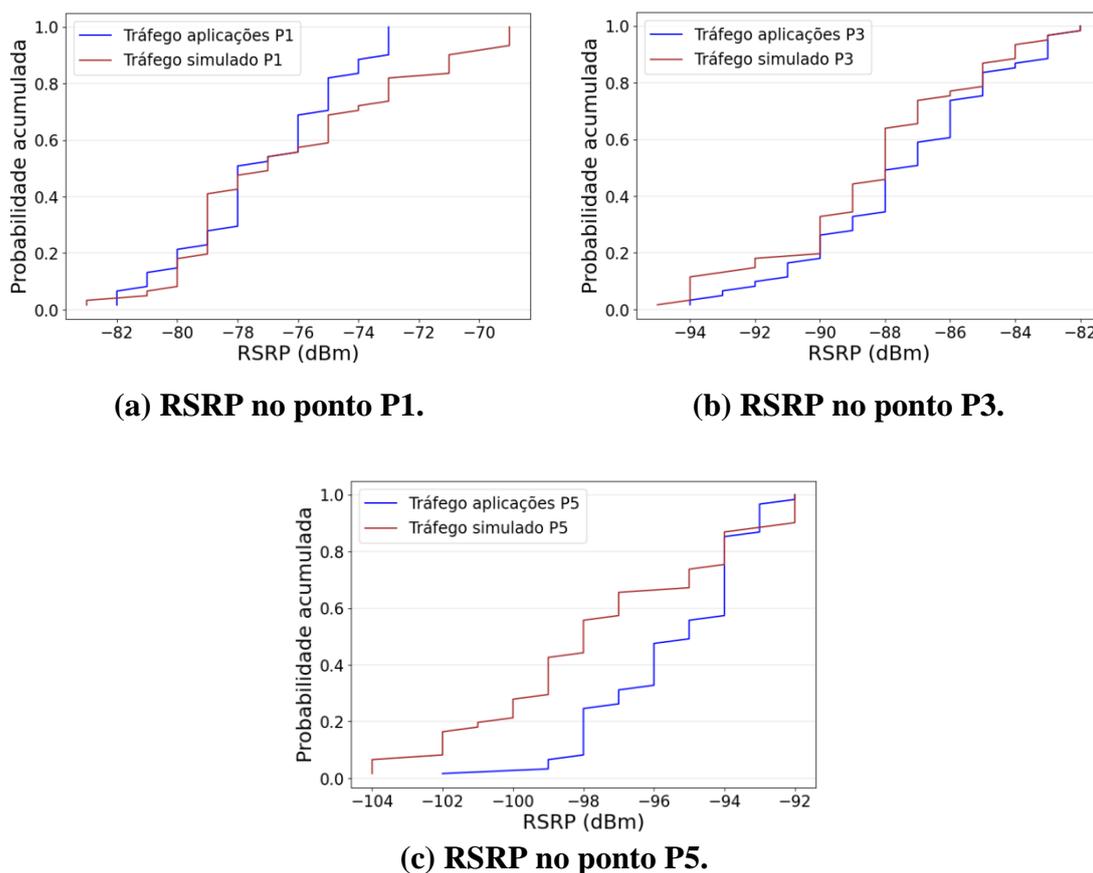
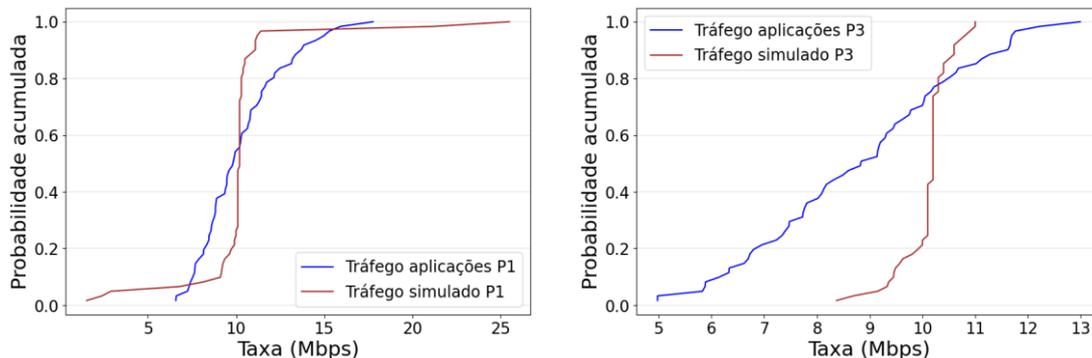


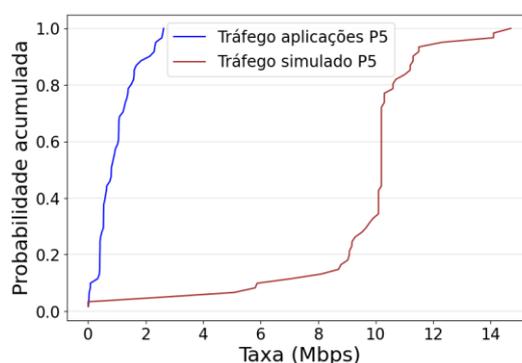
Figura 44 – CDF de RSRP nos 3 pontos dos testes T2 e T17.

As CDFs da Figura 44 mostram comportamentos distintos de RSRP nos 3 pontos fixos. Considerando que -90 dBm é o limiar da passagem de condição do sinal de boa para razoável e fraca, conforme Tabela 1, observa-se no ponto P1 (vide Figura 44a), tanto no teste T2 quanto no teste T17, que 100% dos dados estão na faixa excelente e boa. No ponto P3 (vide Figura 44b), nos 2 tipos de teste, tem-se 80% na faixa boa e 20% na faixa razoável. Já no ponto P5 (vide Figura 44c), nos 2 tipos de teste, 100% dos dados se encontram na faixa entre razoável e fraca, ou seja, a queda do sinal vai acontecendo conforme as medições são feitas em locais mais distantes da antena.



(a) Taxa de dados no ponto P1.

(b) Taxa de dados no ponto P3.



(c) Taxa de dados no ponto P5.

Figura 45 – CDF de taxa de dados nos 3 pontos dos testes T2 e T17.

A variação de taxa de dados apresentada nos 3 pontos da Figura 45, se justifica em função dos protocolos de transporte e da característica de geração de tráfego, aquele gerado pelas aplicações (teste T2) e aquele tráfego gerado de 10 Mbps (teste T17). Neste último, percebe-se a concentração de dados em 10 Mbps, representando, aproximadamente, 70% do total de dados coletados em P1, 60% em P3 e 40% em P5. Já no teste T2, os valores estão mais distribuídos, onde a curva CDF indica que, aproximadamente, 40% dos dados estão acima de 10 Mbps e 60% abaixo em P1, 30% dos dados acima de 10 Mbps e 70% abaixo em P3, enquanto em P5, têm-se apenas valores entre 0 e 3 Mbps.

5.1.5.2 Latência vs RSRP e SNR

Aqui são analisados os valores de latência em função do comportamento do RSRP e SNR no teste T2, enquanto as aplicações reais estão em funcionamento.

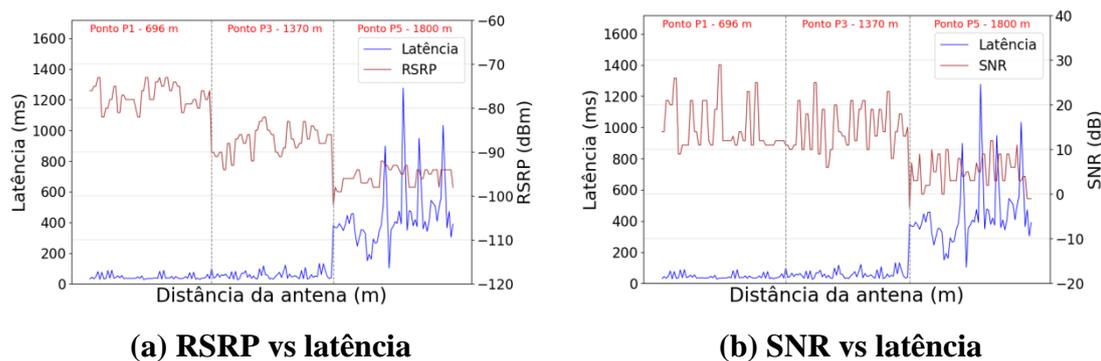


Figura 46 – Relação de RSRP e SNR com a latência nos 3 pontos fixos.

A latência é outra métrica em que se analisa sua relação com o sinal, tanto no que diz respeito ao RSRP, quanto ao SNR, conforme mostra a Figura 46. Nota-se pela Tabela 10, que, no ponto P5, que se situa em torno de 1800 metros de distância da antena, os percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência, identificados na Tabela 4 e na Tabela 5, se apresentam piores que nos pontos anteriores, mostrando que o empobrecimento de sinal em P5 reflete no aumento de atraso na comunicação.

Tabela 10 - Percentuais de atendimento pela rede aos requisitos de latência no teste T2.

Requisitos de latência (ms)	Atendimento no ponto P1 (%)	Atendimento no ponto P3 (%)	Atendimento no ponto P5 (%)
40	65,5	29,5	0
140	100	100	1,7
1000	100	100	96,4

Outro resultado importante para definir a qualidade da rede de comunicação é o percentual de perda de pacotes, sendo que nos 3 pontos fixos deste teste não houve perda de pacotes.

A Figura 47, apresenta as CDFs de latência nos 3 pontos fixos. Pelos dados coletados pode-se verificar que no ponto P1, aproximadamente, 65% dos valores de latência estão abaixo de 40 ms e 100% dos dados abaixo de 140 ms. No ponto P3, 30% abaixo de 40 ms e 100% abaixo de 140 ms. Já no ponto P5, não se tem medição abaixo de

40 ms, têm-se 2% abaixo de 140 ms e 96% abaixo de 1000 ms. Esses parâmetros encontram-se identificados na Tabela 4 e na Tabela 5.

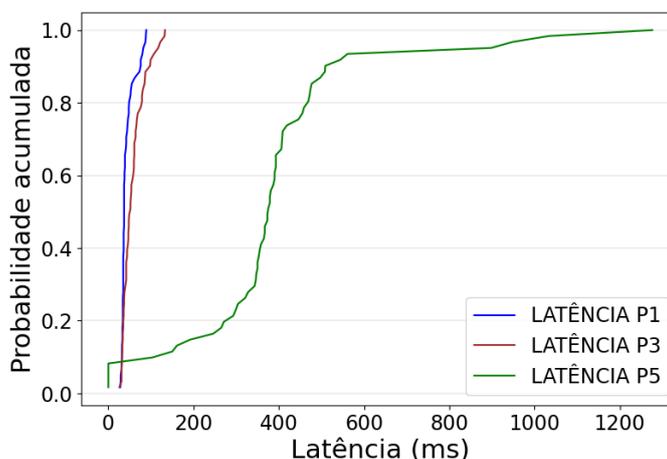


Figura 47 – CDF de latência nos 3 pontos do teste T2.

5.2 Avaliação de Desempenho da Rede 5G – Cenários Terra vs mar

Nestas campanhas de medições, testes são realizados, em ambiente de rede real, em dois cenários, terra e mar, extraindo resultados comparativos de desempenho da rede, no que diz respeito às métricas de RSRP, taxa de dados e latência. A diferença do teste no mar é que na maior parte do tempo o sinal não é obstruído por obstáculos, enquanto no teste em terra temos a condição de não visibilidade, diminuindo a potência recebida. O propósito é de comparar o desempenho da rede 5G em diferentes condições de propagação e analisar como a rede 5G comercial lida com as condições de radiofrequência e relação à taxa de dados e à latência.

Na análise dos resultados de desempenho da rede 5G, utilizam-se as medições do parâmetro RSRP a fim de atestar a relação direta entre potência do sinal com os resultados de taxa de dados obtidos. Esse parâmetro é utilizado pela rede móvel, por exemplo, para seleção de células, controle de potência, procedimentos de mobilidade e de gerenciamento de feixe. A Figura 48, que ilustra as medições obtidas em todo o percurso, em cada um dos cenários, demonstra a relação direta entre os valores de RSRP e os de taxa de dados. À

medida que os valores de RSRP aumentam ou diminuem, os valores de taxa de dados acompanham a tendência. Percebe-se, nos dois cenários, que quando os veículos vão se afastando da antena, o sinal vai enfraquecendo, destacando-se que, no cenário terra, o RSRP chega a atingir valores menores que -90 dBm, considerados na faixa entre razoável e fraca de sinal (vide Tabela 1), com reflexos mais acentuados nos valores de taxa de dados.

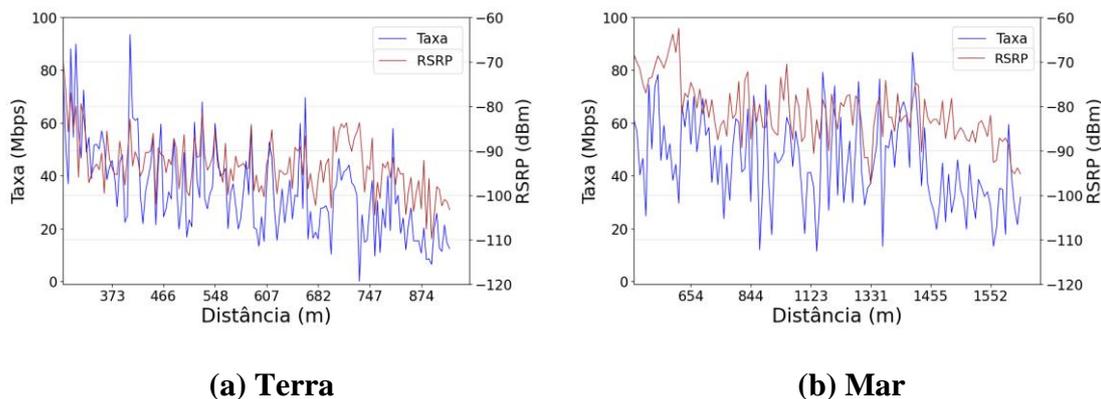


Figura 48 – Relação entre RSRP e taxa de dados nos dois cenários.

A variação do RSRP ocorre em função da condição de recepção do sinal de radiofrequência no ponto de medição. Na situação de atenuação do sinal recebido, 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 queda da taxa de dados. Vale ressaltar que as distâncias de coleta dos dados nos dois testes são diferentes, porém a análise está focada no desempenho do sistema em função das condições de propagação e dos parâmetros de recepção. Obstáculos presentes no ambiente terrestre foram ofensores à propagação do sinal, limitando o avanço em termos de distância, enquanto no ambiente marítimo, tinha-se uma condição de visada mais favorável.

Considerando que -90 dBm é o limiar da passagem de condição do sinal de boa para razoável e fraca, vide Tabela 1, observa-se, conforme Figura 49, que a CDF do ambiente terra indica que, apenas 25% dos dados estão acima desse limiar, em situação de estabilidade, e os 75% restantes se situam abaixo, em condição entre razoável e fraca (vide Tabela 1). Já a CDF do ambiente mar sinaliza que, 90% dos dados se encontram acima desse limiar, em situação de estabilidade, e os 10% restantes ficam abaixo, em condição

entre razoável e fraca, conforme Tabela 1, sugerindo que, neste teste, a situação de estabilidade do sinal se apresenta melhor no ambiente mar.

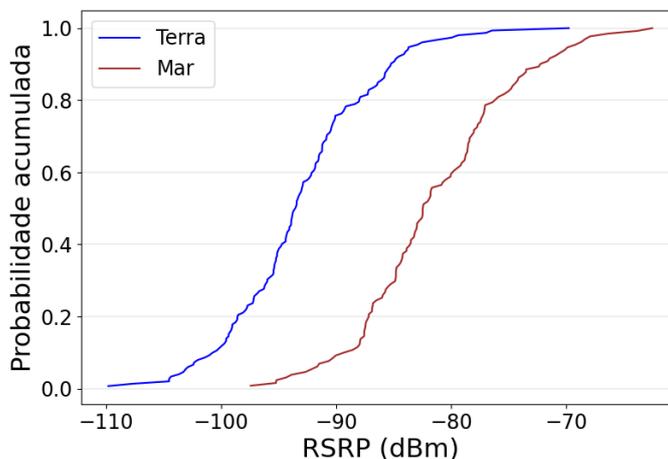


Figura 49 – CDF referente à métrica de RSRP nos dois cenários.

Nota-se, na Figura 50, que a CDF do ambiente terra mostra que 50% dos dados estão acima de, aproximadamente, 30 Mbps, enquanto no ambiente mar, 50% dos dados estão acima de, aproximadamente, 40 Mbps, o que indica que, nestes testes, no ambiente mar a rede apresenta uma capacidade maior de atendimento.

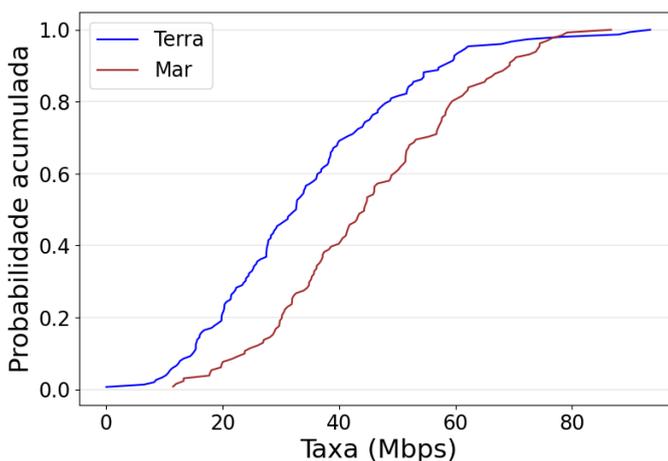


Figura 50 – CDF referente à métrica de taxa de dados nos dois cenários.

Pode-se observar, conforme Figura 51, que a CDF do ambiente terra mostra que, praticamente, 100% dos dados estão abaixo de, aproximadamente, 30 ms, enquanto, no ambiente mar, aproximadamente, 95% dos dados se encontram abaixo de 40 ms. Esses

resultados indicam que, nestes testes, o ambiente terra apresenta menor atraso na comunicação.

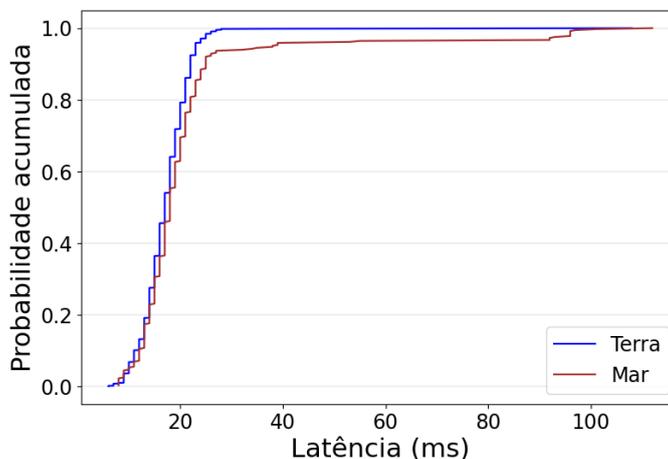


Figura 51 – CDF referente à métrica de latência nos dois cenários.

De maneira geral, considerando os parâmetros analisados, verifica-se uma tendência do comportamento do sistema em ambos os cenários, tendo uma piora no cenário terrestre dado que, como dito anteriormente, obstáculos à visibilidade da antena transmissora durante a coleta dos dados, diminuíram a potência recebida como também a área de cobertura. Os parâmetros de recepção do sinal determinaram a qualidade do sistema com ponto de quebra de RSRP em -90 dBm.

Capítulo 6 - Conclusão

Campanhas de medições foram efetuadas com os objetivos de: (i) avaliar o desempenho da rede 5G no atendimento às aplicações de VSNT, considerando o tráfego gerado sob diversas condições de operação, num cenário marítimo; e (ii) comparar o desempenho da rede 5G no atendimento à geração de tráfego em cenários diferentes (terra vs mar).

Com relação ao cenário marítimo, reunindo um propósito mais extensivo de avaliação do desempenho da rede 5G no atendimento às aplicações de VSNT, a campanha englobou testes executados em uma rota pré-definida dentro da região escolhida e abrangeram tráfego gerado pelas aplicações do VSNT e tráfego simulado de 10 Mbps no sentido de *uplink*, ou seja, da máquina do VSNT para a máquina da base, ambos com a embarcação navegando em 3 velocidades diferentes (3,5, 10 e 15 nós) e também com a embarcação parada em 3 pontos escolhidos dentro do percurso, do mais próximo até o mais distante da antena. Todos os tipos de testes foram repetidos de forma a buscar confiabilidade estatística aos dados coletados. Os testes envolveram aproximadamente, 19.500 metros de percurso total realizado, obtendo um total de 18.334 medições.

Em todos os testes, a área de maior degradação do sinal acontece a partir de, aproximadamente, 1600 metros de distância da antena, chegando a atingir valores críticos de RSRP (abaixo de -90 dBm) e de SNR (abaixo de 10 dB), afetando os valores de taxa de dados e latência. A variação desses parâmetros ocorre em função da condição de recepção do sinal de radiofrequência no ponto de medição. Na situação de atenuação do sinal recebido, os dispositivos acabam alterando o esquema de código de modulação, reduzindo a quantidade de bits transferidos por vez (taxa de dados), a fim de robustecer a transmissão e buscar garantir a entrega ou recepção da informação. O processo de handover, verificado em alguns testes no trecho final do percurso, visa uma melhora do sinal através da troca de antenas. Porém, não se percebeu, por esses testes, que o objetivo foi alcançado, pois o RSRP permaneceu, majoritariamente, abaixo de -90 dBm e o SNR abaixo de 10 dB, que nesses níveis são considerados razoáveis ou fracos, conforme Tabela 1. Considerando os valores dos parâmetros mais críticos utilizados, ou seja, $RSRP \geq -90$ dBm, $SNR \geq 10$ dB, taxa de dados ≥ 10 Mbps e latência ≤ 40 ms, o percentual total de atendimento em relação às medições efetuadas foi de 63,1%. Retirando da análise esse trecho, o percentual total de atendimento em relação às medições efetuadas se eleva para 78,1%. É importante

mencionar, porém, que o atendimento à demanda foi feito através de uma rede comercial, sem o uso de recursos de rede dedicados.

No que se refere à operação remota de VSNT, suportada por rede 5G, tem que se levar em conta elementos técnicos que podem afetar a comunicação, tais como: cobertura da rede, à medida que o receptor se afasta o sinal diminui afetando a qualidade da conexão em função da degradação do sinal; latência, quando muito alta pode gerar comandos atrasados; variabilidade no nível do sinal, que em ambientes marítimos pode ser afetada por reflexões na água, entre outros. Considerando este cenário, pelos resultados dos testes efetuados, pode-se concluir que a operação remota teve êxito, tanto em relação ao funcionamento das aplicações do VSNT, quanto ao desempenho da rede para manter a embarcação navegando durante todo o percurso na rota pré-definida, mesmo em trechos que a latência apresentou valores acima do que a literatura dispõe para comando e controle.

Na avaliação do parâmetro de latência, quatro indicadores foram considerados: com relação à C2, até 1 segundo para pontos de passagem (controle utilizado neste trabalho para operação remota) e até 40 ms para direção direta; com relação a taxa de dados de imagens, 1 segundo para VLoS e 140 ms para BVLoS [44]. Os resultados globais obtidos apontam que 99,5% das medições estão iguais ou abaixo de 1 segundo, 94,4% se encontram igual ou abaixo de 140 ms e 63,3% se situam igual ou abaixo de 40 ms. Fazendo um recorte na análise, retirando os dados obtidos no terço final do percurso, onde a degradação do sinal é mais significativa, têm-se que 100% das medições estão igual ou abaixo de 1 segundo, 99,3% se encontram iguais ou abaixo de 140 ms e 71,7% se situam igual ou abaixo de 40 ms.

Para a taxa de dados referente ao tráfego simulado, gerado a um valor fixo de 10 Mbps, os resultados globais obtidos no percurso desse tipo de teste apontam que há uma concentração de 87% em torno desse valor, conforme indicam as CDFs apresentadas nos resultados. Fazendo um exercício de análise retirando os dados obtidos no trecho final do trajeto, onde o sinal enfraquece, o percentual aumenta para 91,6%. Já em relação ao tráfego das aplicações, por não se tratar de um tráfego constante e sim em função da geração a partir da necessidade das aplicações, as CDFs apontam que a concentração de dados se dá entre 6 e 15 Mbps, representando 78,5% dos dados. Novamente, retirando o trecho final do percurso, o percentual se eleva para 89%.

Com relação à velocidade de navegação a partir dos dados coletados nos testes deste cenário, não foram observadas oscilações importantes nos resultados dos testes no

que se refere às diferentes velocidades executadas (3,5, 10 e 15 nós), concluindo, portanto, que essas velocidades não foram determinantes para interferir no desempenho da rede.

Ressalte-se ainda que, em relação à potência do sinal recebido, os resultados obtidos neste trabalho indicam que o valor de -90 dBm para o parâmetro RSRP representa a fronteira de uma condição de estabilidade para uma condição de degradação da taxa de dados. Esse resultado está aderente à Tabela 1 apresentada no estudo de Milde e Pilinsky [12], enquanto essa fronteira, no trabalho de Cucor et al. [13], se situa em -106 dBm e, no trabalho de Afroz et al. [11], em -120 dBm.

Nas campanhas de medições nos cenários terra vs mar, com o propósito de comparar o desempenho da rede 5G em ambientes distintos, observou-se que a comparação dos resultados de terra vs mar indica que as adversidades inerentes ao ambiente marítimo não foram suficientes para impactar no desempenho da rede 5G no atendimento ao tráfego demandado. Mostra, inclusive, que nas métricas de RSRP e taxa de dados, os resultados se apresentaram superiores no ambiente marítimo no que diz respeito à área de cobertura. Acredita-se que a causa desta melhora seja pela condição de recepção que na maioria dos casos foi em visibilidade. Apenas na métrica de latência, os resultados do teste no ambiente terrestre mostraram-se ligeiramente melhores.

Por fim, é merecido destacar que, este estudo contribui para diminuir a lacuna existente na literatura sobre VSNTs e que pode servir de base para outras pesquisas que venham a ser realizadas sobre o tema.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, pretende-se realizar mais campanhas de medição em outros tipos de ambientes marítimos, para analisar de forma mais detalhada o comportamento do sistema. Através destas campanhas será possível caracterizar o ambiente de propagação e fazer uma análise em função de modelos de propagação consagrados na literatura com o objetivo de auxiliar o planejamento de redes 5G para aplicações em veículos autônomos.

Bibliografia

- [1] FebrabanTech, “5G transforma relação entre bancos e clientes ao alavancar tecnologias,” Febraban Tech, [Online]. Available: <https://febrabantech.febraban.org.br/temas/internet-das-coisas/5g-transforma-relacao-entre-bancos-e-clientes-ao-alavancar-tecnologias>. [Acesso em 2024 08 04].
- [2] FuturecomDigital, “O 5G já está impactando a saúde no Brasil,” Futurecom Digital, [Online]. Available: <https://digital.futurecom.com.br/transformacao-digital/o-5g-ja-esta-impactando-saude-no-brasil>. [Acesso em 2024 08 04].
- [3] Zear, A., Singh, P. K., & Singh, Y. (2016). Intelligent transport system: A progressive review.
- [4] 3GPP TS 22.125 v17, Unmanned Aerial System (UAS) support in 3GPP, 2022.
- [5] BALESTRIERI, Eulalia et al. Sensors and measurements for unmanned systems: An overview. *Sensors*, v. 21, n. 4, p. 1518, 2021.
- [6] FOUKAS, Xenofon et al. Network slicing in 5G: Survey and challenges. *IEEE communications magazine*, v. 55, n. 5, p. 94-100, 2017.
- [7] STATECZNY, Andrzej; BURDZIAKOWSKI, Pawel. Universal autonomous control and management system for multipurpose unmanned surface vessel. *Polish Maritime Research*, v. 26, n. 1, p. 30-39, 2019.
- [8] K. YANG, N. ZHOU e T. RØSTE, “LTE massive MIMO (Pre-5G) test with an updated boat user terminal solution for land-to-boat scenarios in Oslo fjord,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 012010, 2020.
- [9] WANG, Jun-Bo et al. Unmanned surface vessel assisted maritime wireless communication toward 6G: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications*, v. 29, n. 6, p. 72-79, 2022.
- [10] JO, Sung-Woong; SHIM, Woo-Seong. LTE-maritime: High-speed maritime wireless communication based on LTE technology. *IEEE Access*, v. 7, p. 53172-53181, 2019.
- [11] AFROZ, Farhana et al. SINR, RSRP, RSSI and RSRQ measurements in long term evolution networks. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 2015.
- [12] MILDE, Antonio; PILINSKY, Sonja Zentner. Comparison of 4G and 5G NR NSA QoE measurements in Croatian cities. In: 2022 International Symposium ELMAR. IEEE, 2022. p. 13-18.
- [13] CUCOR, Boris et al. Experimental Comparison of 4G and 5G Technologies for Connected and Automated Vehicles. In: 2023 33rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). IEEE, 2023. p. 1-5.
- [14] LAZAR, Razvan G. et al. 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). IEEE, 2022. p. 37-42.
- [15] LIN, Pingping; YU, Jinyang; ZHANG, Zhirong. Research and trials of 5G SA network performance. In: 2022 5th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). IEEE, 2022. p. 1-5..
- [16] ROMMER, Stefan et al. 5G core networks: powering digitalization. Academic Press,

- 2019.
- [17] COX, Christopher. An introduction to 5G: the new radio, 5G network and beyond. John Wiley & Sons, 2020.
- [18] REC, ITU-R M. 2083-0, IMT Vision—Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for, 2020.
- [19] NAVARRO-ORTIZ, Jorge et al. A survey on 5G usage scenarios and traffic models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 22, n. 2, p. 905-929, 2020.
- [20] Oliveira, L. A., Alencar, M. S., & Lopes, W. T. A. (2018). Evolução da arquitetura de redes móveis rumo ao 5g. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, 8(2), 43-50.
- [21] NFV, Network Functions Virtualisation. ETSI GS NFV 002 V1.2.1 (2014-12), 2014.
- [22] Gigabyte, “5G MEC Networking Platform,” Gigabyte, [Online]. Available: <https://www.gigabyte.com/Solutions/5g-imec-networking-platform>. [Acesso em 04 08 2024].
- [23] SABELLA, Dario et al. Mobile-edge computing architecture: The role of MEC in the Internet of Things. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, v. 5, n. 4, p. 84-91, 2016.
- [24] ZHAO, Yongli et al. Edge computing and networking: A survey on infrastructures and applications. *IEEE Access*, v. 7, p. 101213-101230, 2019.
- [25] KALOXYLOS, Alexandros. A survey and an analysis of network slicing in 5G networks. *IEEE Communications Standards Magazine*, v. 2, n. 1, p. 60-65, 2018.
- [26] YOUSAF, Faqir Zarrar et al. NFV and SDN—Key technology enablers for 5G networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 35, n. 11, p. 2468-2478, 2017.
- [27] D. M. GONÇALVES, L. F. BITTENCOURT e E. R. MADEIRA, “Alocação de fatias de rede fim-a-fim para usuários móveis utilizando o simulador MobFogSim,” *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. SBC, pp. 112-125, 2022.
- [28] VASSILARAS, Spyridon et al. The algorithmic aspects of network slicing. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 8, p. 112-119, 2017.
- [29] SI-MOHAMMED, Samir et al. Supporting unmanned aerial vehicle services in 5G networks: New high-level architecture integrating 5G with U-space. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 16, n. 1, p. 57-65, 2020, [Online].
- [30] N. SHAIK e P. K. MALIK, “A comprehensive survey 5G wireless communication systems: open issues, research challenges, channel estimation, multi carrier modulation and 5G applications.,” *Multimedia Tools and Applications*, pp. 28789-28827, v. 80, n. 19, 2021.
- [31] LIU, Wei. Integrated human-machine intelligence: beyond artificial intelligence. Elsevier, 2023.
- [32] ALI, Qazi Ejaz et al. Issues, challenges, and research opportunities in intelligent transport system for security and privacy. *Applied Sciences*, v. 8, n. 10, p. 1964, 2018.
- [33] ZENG, Yongs; WU, Qingqing; ZHANG, Rui. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond. *Proceedings of the IEEE*, v. 107, n. 12, p. 2327-2375, 2019.
- [34] BOR-YALINIZ, Irem et al. Is 5G ready for drones: A look into contemporary and prospective wireless networks from a standardization perspective. *IEEE Wireless Communications*, v. 26, n. 1, p. 18-27, 2019.

- [35] LI, Xiangling et al. Enabling 5G on the ocean: A hybrid satellite-UAV-terrestrial network solution. *IEEE Wireless Communications*, v. 27, n. 6, p. 116-121, 2020.
- [36] ALQURASHI, Fahad S. et al. Maritime communications: A survey on enabling technologies, opportunities, and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 10, n. 4, p. 3525-3547, 2022.
- [37] PETERSEN, Stig; ORTEN, Pål; MYHRE, Bård. Potential benefits of 5G communication for autonomous ships. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. p. 012009.
- [38] NOMIKOS, Nikolaos et al. A survey on UAV-aided maritime communications: Deployment considerations, applications, and future challenges. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, v. 4, p. 56-78, 2022.
- [39] ZOLICH, Artur et al. Survey on communication and networks for autonomous marine systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 95, p. 789-813, 2019.
- [40] LIU, Zhixiang et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, v. 41, p. 71-93, 2016.
- [41] S. E. B. A. M. J. P. K. P. Jon Dugan, “iPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP,” [Online]. Available: <https://iperf.fr/>. [Acesso em 04 08 2024].
- [42] KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. *Computer networking*. 2013.
- [43] “The world's most popular network protocol analyzer,” Wireshark, [Online]. Available: <https://www.wireshark.org/>.
- [44] GERACI, Giovanni et al. What will the future of UAV cellular communications be? A flight from 5G to 6G. *IEEE communications surveys & tutorials*, v. 24, n. 3, p. 1304-1335, 2022.
- [45] aeroengenharia, “O que e navegacao por waypoint em drones,” [Online]. Available: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-navegacao-por-waypoint-em-drones/>. [Acesso em 04 08 2024].
- [46] LEE, Jiseong; YOO, Younghwan. Handovercellselectionusingusermobilityinformation in a 5G SDN-based network. In: *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE, 2017. p. 697-702.
- [47] ABDULRAQEB, A. et al. Self-optimization of handover control parameters for mobility management in 4G/5G heterogeneous networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, v. 53, p. 441-451, 2019.

Anexo A – Tabela de classificação dos testes

Teste	Tipo de configuração	Estado do VSNT	Velocidade
T1	Tráfego das aplicações	Percorrendo o trajeto	3,5 nós
T2	Tráfego das aplicações	Parado nos pontos P1, P3 e P5	-
T3	Tráfego das aplicações	Percorrendo o trajeto	3,5 nós
T4	Tráfego simulado (iperf)	Percorrendo o trajeto	3,5 nós
T5	Tráfego simulado (iperf)	Parado nos pontos P1, P3 e P5	-
T6	Tráfego simulado (iperf)	Percorrendo o trajeto	3,5 nós
T7	Tráfego das aplicações	Percorrendo o trajeto	10 nós
T8	Teste cancelado	-	-
T9	Tráfego das aplicações	Percorrendo o trajeto	10 nós
T10	Tráfego simulado (iperf)	Percorrendo o trajeto	10 nós
T11	Teste cancelado	-	-
T12	Tráfego simulado (iperf)	Percorrendo o trajeto	10 nós
T13	Tráfego das aplicações	Percorrendo o trajeto	15 nós
T14	Tráfego das aplicações	Parado nos pontos P1, P3 e P5	-
T15	Tráfego das aplicações	Percorrendo o trajeto	15 nós
T16	Tráfego simulado (iperf)	Percorrendo o trajeto	15 nós
T17	Tráfego simulado (iperf)	Parado nos pontos P1, P3 e P5	-
T18	Tráfego simulado (iperf)	Percorrendo o trajeto	15 nós