

Universidade Federal do Pará – UFPA
Instituto de Tecnologia – ITEC
Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica – PPGEE

Análise de QoE para Streaming de Vídeo em Redes Aéreas 5G mmWave de Conectividade Dupla

Ronilson Williame da Silva Pereira

DM: 08/22

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2022

Ronilson Williame da Silva Pereira

Análise de QoE para Streaming de Vídeo em Redes Aéreas 5G mmWave de Conectividade Dupla

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil

2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

W716a Willame da Silva Pereira, Ronilson.
Avaliação de QoE para Streaming de Vídeo em Redes Aéreas
5G mmWave de Conectividade Dupla / Ronilson Willame da
SilvaPereira. — 2022.
LVIII, 58 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica, Belém, 2022.

1. 5G. 2. mmWave. 3. UAV. 4. QoE. I. Título.

CDD 004.65



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“ANÁLISE DE QOE PARA STREAMING DE VÍDEO EM REDES
AÉREAS 5G MMWAVE DE CONECTIVIDADE DUPLA”**

AUTOR: RONILSON WILLIAME DA SILVA PEREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO A BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 18/02/2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva
(Orientador – PPGEE / UFPA)

Prof.^a Dr.^a. Jasmine Priscyla Leite de Araújo
(Avaliadora Interna – PPGEE / UFPA)

Prof. Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior
(Avaliador Externo ao Programa – PPGEE/ITEC/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa
(Coordenador do PPGEE / ITEC / UFPA)

*Dedico este trabalho a Deus,
aos meus pais Raimundo Coelho e Maria Ladiney e Familiares
por sempre estarem comigo em todos os momentos.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Santíssima Trindade (Pai, Filho e Espírito Santo) por ter-me emanado saúde e energia necessária para realização deste trabalho.

Aos meus pais, Raimundo Coelho Pereira e Maria Ladiney da Silva Pereira pelo incentivo durante toda a vida para buscar melhor caminho possível e estiveram ao meu lado em todos os momentos que precisei.

Em especial à Dhamily Saraiva, por estar comigo em todos os momentos, principalmente no momento mais difícil de minha vida e pelo incentivo nos momentos finais do trabalho.

Aos meus irmãos Ranilson Pereira, Romário Pereira, Higson Silva, que estiveram comigo nos momentos de angústias vivenciados no trabalho e pela motivação.

Agradecer grandemente ao meu orientador, o Prof. Dr. Marcelino Silva por estar ao meu lado dando suporte, ajuda e pela confiança para elaboração do trabalho.

Ao Prof. Dr. José Jailton Ferreira Junior pela ajuda e paciência externa para a construção deste trabalho.

À todos os meus amigos do Laboratório de Pesquisa Operacional (LPO), que compartilhamos os momentos de discussão acadêmica.

À todos os professores pelo incentivo ao meu ingresso no Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).

*“ Não tentes ser bem-sucedido, tenta
antes ser um homem de valor. ”*

(Albert Einstein)

Resumo

A evolução nas telecomunicações móveis tem permitido o aparecimento de novos formatos de redes visando atender à crescente demanda de dados sem fio, alimentado principalmente por mais visualização de conteúdo de vídeo. O espectro escasso disponível nas atuais redes celulares, não parece ser capaz de atender a essa explosão de dados sem fio, motivando uma mudança para explorar novas bandas de frequências. Atualmente, um dos grandes problemas das redes móveis atuais é o congestionamento em áreas mais densas como exemplo shows, eventos esportivos e festivais (eventos temporários), pois, temos uma maior concentração de usuários, consequentemente aumentando o volume no tráfego de dados. A comunicação de ondas milimétricas (mmWave, do inglês *millimeter wave*), bandas de frequência, entre 30 a 300 GHz surge como parte essencial para a próxima geração de redes celulares de quinta geração (5G), pois adotam frequências portadoras mais altas oferecendo alta largura de banda e menor latência. No entanto, o desempenho do sistema se degrada devido à alta perda de propagação e à sensibilidade dos links para obstáculos. Para mitigar tais fatores, nesta dissertação é proposta uma arquitetura 5G mmWave de conectividade dupla utilizando o LTE (*Long Term Evolution*) e a utilização de UAVs (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicles*) como estações bases aéreas para fornecer garantias de conectividade e qualidade de experiência em streaming de vídeo, um cenário onde a proposta pode ser uma solução adequada, é para fornecer cobertura para eventos temporários. Através de simulações, foi apresentada uma análise da Qualidade de Experiência (QoE), acerca da transmissão de vídeos 4K com o objetivo de avaliar a transmissão e qualidade dos vídeos percebidos pelos usuários. Os resultados simulados apontam a eficiência do sistema para aplicações multimídia utilizando vídeos, melhorando a QoE dos usuários sem fio em 43%.

Palavras-Chaves: 5G; mmWave; UAV; QoE.

Abstract

The evolution in mobile telecommunications has allowed the emergence of new network formats aimed at meeting the growing demand for wireless data, mainly fueled by more viewing of video content. The scarce spectrum available in current cellular networks does not seem to be able to meet this explosion of wireless data, motivating a shift to explore new frequency bands. Currently, one of the major problems of current mobile networks is congestion in denser areas such as concerts, sporting events, and festivals (temporary events), as we have a greater concentration of users, consequently increasing the volume of data traffic. Millimeter-wave (mmWave) communication, frequency bands between 30 and 300 GHz emerges as an essential part for the next generation of fifth-generation cellular networks (5G), as they adopt higher carrier frequencies offering high bandwidth and lower latency. However, system performance degrades due to high propagation loss and the sensitivity of the links to obstacles. To mitigate such factors, this dissertation proposes a dual connectivity 5G mmWave architecture using LTE (Long Term Evolution) and the use of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) as airbase stations to provide connectivity guarantees and quality of experience. In video streaming, one scenario where the proposal might be a suitable solution is to provide coverage for temporary events. Through simulations, an analysis of the Quality of Experience (QoE) was presented about the transmission of 4K videos in order to evaluate the transmission and quality of videos perceived by users. The simulated results show the efficiency of the system for multimedia applications using videos, improving the QoE of wireless users by 43%.

Keywords: 5G; mmWave; UAV; QoE.

Lista de Figuras

Figura 1. Tráfego de Dados da Rede Móvel	14
Figura 2. Evolução das Comunicações Móveis.....	21
Figura 3. Especificações da Tecnologia 5G	23
Figura 4. Diagrama Sobre os Facilitadores das Redes Móveis 5G	24
Figura 5. Espectro mmWave na faixa [0, 100].....	26
Figura 6. Diagrama de Classe do Módulo mmWave.	39
Figura 7. Arquitetura de Conectividade Dupla UAV- BS.....	40
Figura 8 Ilustração do Cenário de Transmissão	42
Figura 9. Uma Cena do Vídeo Original	43
Figura 10. Fluxo de Etapas da Avaliação.....	44
Figura 11. Média SSIM	47
Figura 12. Média VQM	49
Figura 13. Frames do Vídeo Transmitido	49
Figura 14. Resultados da Perda de Pacotes	50
Figura 15. Atraso Médio	50

Lista de Tabelas

Tabela 1. UAV-BS x BS Tradicional.....	19
Tabela 2. Escala de Pontuação Média de Opinião – MOS.....	29
Tabela 3. Síntese dos Principais Trabalhos Correlatos.	36
Tabela 4. Características do Vídeo Utilizado.....	42
Tabela 5. Parâmetros Gerais da Simulação	47
Tabela 6. Valores da Métrica SSIM	48
Tabela 7. Valores da Métrica VQM	48

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMPS	Advanced Mobile Phone System
APs	Access Point
BS	Base Station
CD	Conectividade Dupla
CDMA	Code Division Multiple Access
EHF	Extremely High Frequency
E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>
eNB	evolved Node Base
EPC	Evolved Packet Core
FANET	<i>Flying Ad-Hoc Network</i>
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FCA	<i>Flow Control Agent</i>
FR	Full Reference
FWA	Fixed Wireless Access
GSM	Global System for Mobile communication
HSPA	High Speed Packet Access
IoT	Internet of Things
LoS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
MOS	Mean Opinion Score
NLOS	Non-Line-of-Sight
NMT	Nordic Mobile Telephony
NR	New Radio
Nr	No reference

NS3	Network Simulator 3
PCPs	Processos de Cluster de Poisson
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PHY	Physical
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAN	Regional Area Network
RANs	Radio Access Networks
RR	Reduced Reference
SHF	Super High Frequency
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SSIM	Structural Similarity Index
TACS	Total Access Communication System
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UE	User Equipment
UHD	Ultra High Definition
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
VQM	Video Quality Metric
VQMT	Video Quality Measurement Tool

Sumário

1 Introdução	14
1.1 Visão Geral	14
1.2 Motivação e Desafios	15
1.3 Objetivos.....	16
1.4 Organização da Dissertação.....	17
2 Referencial Teórico	18
2.1 Considerações Iniciais	18
2.2 Veículos Aéreos não Tripulados.....	18
2.3 Rede Ad-Hoc Voadora – FANET	20
2.4 Quinta Geração de Redes Móveis – 5G	21
2.4.1 Facilitadores da Tecnologia 5G.....	23
2.5 Ondas Milimétricas – mmWave	25
2.6 Conectividade Dupla	27
2.7 Qualidade de Experiência – QoE	28
2.7.1 Métricas de Desempenho de QoE.....	28
2.7.1.1 Avaliação Subjetiva.....	28
2.7.1.2 Avaliação Objetiva	29
2.8 Conclusões do Capítulo.....	31
3 Trabalhos Correlatos	32
3.1 Considerações Iniciais	32
3.2 Correlatos.....	32
3.3 Conclusões do Capítulo.....	37
4 Modelo de Sistema	38

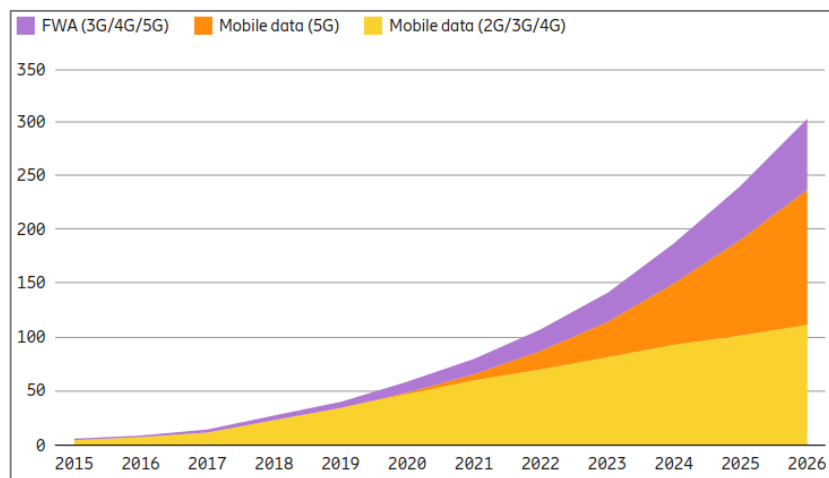
4.1. Considerações Iniciais	38
4.2. Simulador de Rede – NS3.....	38
4.3. Módulo mmWave para o NS3.....	39
4.4 Arquitetura Proposta.....	40
4.5 Descrições do Vídeo	42
4.5.1 Ferramentas	43
4.6 Conclusões do Capítulo	45
5 Avaliação de Desempenho	46
5.1 Considerações Iniciais	46
5.2 Análise dos Resultados	46
5.2.1 Avaliação Objetiva – SSIM.....	47
5.2.2 Avaliação Objetiva – VQM	48
5.2.3 Degradação dos Quadros e QoS.....	49
5.3 Conclusões do Capítulo	51
6 Conclusões	52
6.1 Trabalhos Futuros.....	53
6.2 Produção Acadêmica	53
Referências	55

1 Introdução

1.1 Visão Geral

Devido ao avanço nas comunicações e ao crescimento do número de dispositivos móveis e vários aplicativos, que usam *streaming* de vídeo que necessitam de baixa latência e alta taxas de dados, a demanda por comunicação móvel sem fio está crescendo rapidamente. O crescimento do tráfego está sendo impulsionado pelo crescente número de assinaturas de *smartphones* e pelo aumento no volume médio de dados por assinatura, principalmente, alimentado por mais visualizações de conteúdo de vídeo. *O streaming* de vídeo é responsável pela maioria do tráfego de dados móveis e tem visto um crescimento explosivo nos últimos anos, em 2026, as redes 5G deverão transportar 53 por cento do tráfego total de dados móveis (ERICSSON, 2020).

Figura 1. Tráfego de Dados da Rede Móvel.



Fonte: (ERICSSON, 2020).

Segundo os dados da Figura 1, em 2026, as redes 5G transportarão mais de metade do tráfego mundial de *smartphones*. Prevendo desta forma 3,5 bilhões de assinaturas 5G globalmente. Mais de 70 por cento de todos os provedores de serviço agora estão oferecendo serviços de acesso fixo sem fio (FWA) com suporte para frequências de ondas milimétricas (mmWave, do inglês *millimeter wave*).

A introdução da quinta geração de redes celular (5G) provavelmente aumentarão a demanda por consumo de vídeos com resolução 720p, 1080p e 4K. Devido ao aumento do consumo de vídeo em resoluções mais altas, são necessários algoritmos de compressão

eficientes para fazer a distribuição de conteúdo de vídeo em redes 5G (MINOPOULOS et al., 2020). Na transmissão de vídeo, por exemplo, alta qualidade pode ser mais importante para um usuário do que para outro, ou menos interrupções na transmissão, mesmo que sacrificando a qualidade, pode ser mais importante para um usuário que assiste uma transmissão em tempo real.

Para suportar todo esse crescimento exponencial em dados móveis e o volume de tráfego, o espectro disponível limitado em bandas de micro-ondas (μ Wave) não parece ser capaz de atender a essa demanda. Uma solução promissora seria o uso de frequências mmWave, fornecendo taxa de dados muito maior devido grande largura de banda disponível, tornando desta forma um bom candidato para as redes celulares de quinta geração (RANGAN; RAPPAPORT; ERKIP, 2014). No entanto, os sinais mmWave têm um curto alcance de transmissão e são vulneráveis a bloqueios devido suas características de propagação.

A fim de superar os efeitos de bloqueio, a conectividade dupla foi explorada nesta dissertação, onde, temos uma rede LTE que possui recursos eficientes em termos de cobertura e eficiência espectral que a tornam viável para a cobertura de grandes áreas e uma rede mmWave habilitada para UAVs (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicles*) no qual fornece uma alta largura de banda sem fio, velocidades super-rápidas, latência ultrabaixa e maior conectividade. Nesta dissertação, propomos uma conectividade dupla em que um dispositivo de usuário está conectado com UAV-BS através de *links* mmWave para realizar a transmissão do vídeo e para proporcionar maior estabilidade de conectividade, utilizou-se uma BS – LTE.

Além das redes celulares mmWave existem novas tecnologias para as redes 5G, por exemplo, a implantação de estações bases voadoras utilizando os UAVs, pois, suas posições e altitudes podem ser ajustadas dinamicamente para fornecer links de comunicação ar-solo em tempo real. O uso de estações base (BSs, do inglês *Base Station*) no ar utilizando veículos aéreos não tripulados (UAVs) ou rede ad hoc voadora (FANET), é uma tecnologia promissora para cenários de usuários densos fornecendo um complemento importante para redes ultradensas de pequenas células. Uma das aplicações mais importantes é aumentar a cobertura de redes de comunicações móveis (FOTOUHI; DING; HASSAN, 2021).

1.2 Motivação e Desafios

Um das principais motivações é pela alta demanda relacionada a aplicações de vídeo, juntamente com a futura quinta geração de redes móveis (5G) tendo como parte essencial

frequências de ondas milimétricas provendo grandes benefícios como maior largura de banda, atrasos mais baixos de ponta a ponta. Neste caso, as comunicações mmWave habilitadas para UAVs podem ser um complemento eficaz para os sistemas celulares existentes, aumentando a capacidade sem fio e aumentando a cobertura para atender a requisitos da quinta geração (5G).

Devido às aplicações promissoras de UAVs para ajudar nas redes sem fio junto com a possibilidade de várias transmissões de dados usando comunicações 5G mmWave, claramente, as estações base voadoras podem fornecer um complemento importante para redes. As frequências mmWave são adequadas para o 5G por requisitos como: maior taxa de dados, alta largura de banda sem fio, velocidades super-rápidas, latência ultrabaixa e maior conectividade.

Um dos grandes desafios para as comunicações sem fio é atender a esta grande demanda de tráfego de dados, a Qualidade de Serviço (QoS) disponível na rede é um dos principais fatores para garantir o sucesso em uma transmissão multimídia e para alcançar uma boa qualidade de níveis de Qualidade de Experiência (QoE). Diante disso, a aplicabilidade do sistema 5G mmWave de conectividade dupla deve fornecer maior rendimento do que a utilização apenas do sistema LTE (*Long Term Evolution*) atual.

Os sistemas LTE são capazes de transmitir muitos dados, mas existem estudos comparando a taxa de transferência desejada em micro-ondas e em mmWave mostraram que frequências mais altas podem ser a única maneira de fornecer QoS e QoE adequados para novas aplicações, por exemplo, IoT (*Internet of Things*), vídeo de definição *ultra-high* (4K), realidade aumentada e realidade virtual.

Os UAVs estão sendo usados para fornecer uma solução promissora para comunicações sem fio confiáveis e econômicas no ar e com o advento das redes 5G surge o conceito de montar e desmontar redes. Eles podem ser implantados como BSs voadoras para permitir o acesso aéreo aos equipamentos de usuários (UEs) terrestres em áreas-alvo, como eventos temporários. Além disso, os UAVS também podem servir ainda como retransmissores aéreos para fornecer conectividade para UEs terrestres sem transmissão direta links (LI; FEI; ZHANG, 2019).

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é propor uma arquitetura 5G mmWave de conectividade dupla (CD) utilizando UAV-BS para fornecer garantias de conectividade,

melhorar a cobertura e garantir qualidade de experiência em streaming de vídeo no formato 4K.

De forma mais específica, esta dissertação apresenta os seguintes objetivos:

- Apresentar um estudo sobre a percepção do usuário em relação a qualidade geral do serviço de streaming de vídeo em sistema sem fio mmWave de comunicação dupla UAV-BS;
- Definir os parâmetros da rede para realizar a transmissão de vídeo no formato 4K;
- Aprofundar o estudo de transmissão de vídeos em 4K;
- Discutir os principais problemas relacionados a utilização de sistemas mmWave habilitados para UAVs;
- Validar a proposta a partir de simulações.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos, sendo este primeiro o introdutório, o restante deste trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2: São apresentados os conceitos referentes aos principais pontos que formam a base teórica desta dissertação como os Veículos Aéreos não Tripulados, Redes Móveis de Quinta Geração (5G) e seus facilitadores, frequências de ondas milimétricas, estimadores de QoE no qual mostramos as métricas objetivas de avaliação utilizadas.

Capítulo 3: O capítulo três traz uma revisão sobre os principais trabalhos relacionados com o foco desta dissertação.

Capítulo 4: Apresenta a metodologia, as ferramentas de simulação utilizada, o modelo de arquitetura proposto, e a base de dados do vídeo utilizado nas simulações.

Capítulo 5: É descrito a avaliação dos resultados das métricas objetivas de QoE SSIM e VQM com suas tabelas e gráficos, também apresentamos resultados de QoS.

Capítulo 6: São feitas as considerações finais mostrando as principais contribuições e os resultados obtidos desta dissertação, assim como os trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os principais fundamentos teóricos nos quais esse trabalho foi embasado. São abordados os principais conceitos em torno dos UAVs, suas características e desafios. Também será abordado sobre a quinta geração de redes móveis (5G), mostrando sua importância. Apresentamos os principais pontos sobre as comunicações mmWave. E por fim, abordamos os principais conceitos sobre a Qualidade de Experiência.

2.2 Veículos Aéreos não Tripulados

Nos últimos anos, tem havido um grande aumento no uso de veículos aéreos não tripulados (VANT ou *Unmanned Aerial Vehicles* – UAVs) geralmente chamados de *drones* em aplicações civis, como vigilância aérea, controle de tráfego, fotografia, entrega de pacotes e retransmissão de comunicação (ZENG; LYU; ZHANG, 2018). Historicamente os UAVs eram bastante utilizados para fins militar, mas passaram por uma rápida transição e ganharam espaço em diversas outras aplicações, tais como: prática agrícola, vigilância de segurança, resgate de emergência, entretenimento, no suporte à cobertura de redes sem fio, entre outras (ORTIZ et al., 2019), (ZHOU et al., 2019).

Atualmente, os UAVs servindo como BSs aéreas aumentam a cobertura e a eficiência das redes sem fio, visto que, as estações bases podem ser miniaturizadas para caber na carga útil do *drone*, eles podem ser transportados para qualquer área de difícil acesso para fornecer cobertura, onde é difícil ou caro instalar torres convencionais (FOTOUHI; DING; HASSAN, 2021). A implantação aérea utilizando UAVs como estações base móveis, pode ser uma solução promissora para fornecer garantias de conectividade e qualidade de serviço durante eventos temporários (por exemplo, eventos esportivos e festivais), pois, temos uma rápida implantação de uma infraestrutura de rede sem fio, bem como fornecer acesso aéreo para equipamentos de usuário terrestre.

Infraestrutura de comunicações terrestres e estações base celular podem muitas das vezes ser comprometida durante desastres, em tais cenários, há uma grande necessidade de comunicações, por exemplo, entre vítimas e resgate. A implantação de UAVs como BSs voadoras neste tipo de cenário é mais apropriada, pois suas posições e altitudes podem ser

ajustado dinamicamente para fornecer links de comunicação ar-solo em tempo real. A Tabela 1 apresenta uma comparação feita entre estações base UAV e estações base terrestre.

Tabela 1. UAV-BS x BS Tradicional.

Estação Base UAV	Estação Base Tradicional
A implantação é naturalmente tridimensional.	A implantação normalmente é bidimensional.
Curto prazo, implantações mudando com frequência.	Principalmente implantações permanentes de longo prazo.
Quase em todos os lugares, sem restrições	Poucos locais selecionados.
Dimensão de mobilidade.	Fixa e estática.

Uma das aplicações mais importante usando UAVs como estações bases aéreas é aumentar a cobertura de redes de comunicações móveis, fornecendo desta forma um complemento importante para as redes celulares terrestres. As comunicações UAV exibem atributos importantes, conforme visto em (XIAO et al., 2021).

- Comunicações LoS (*Line-of-sight*): UAVs sem pilotos humanos voando no ar têm maior probabilidade de conectar usuários terrestres via *links* LoS, que facilitam transmissões altamente confiáveis em longas distâncias.
- Capacidade de implantação dinâmica: Em comparação com as infraestruturas terrestres estacionárias conforme visto na Tabela 1, os UAVs podem ser dinamicamente implantados de acordo com os requisitos em tempo real, que é mais robusto contra as mudanças do ambiente. Suas posições e altitudes podem ser ajustadas dinamicamente para fornecer *links* de comunicação ar-solo.
- Redes de enxame baseadas em UAV: Com a aplicação de enxames de UAVs podemos formar redes *multi-UAV* escalonáveis e oferecer conectividade onipresente para usuários terrestres, beneficiando-se de sua alta flexibilidade e fornecimento rápido de recursos.

2.3 Rede Ad-Hoc Voadora – FANET

Devido aos avanços na utilização de UAVs como citado na sessão anterior, principalmente aumentando a capacidade de comunicação de dados sem fio, permitindo a troca de informações entre eles, desta forma, temos um novo tipo especial de redes conhecido na literatura como FANET (*Flying Ad-Hoc Network*) mais conhecida como Rede Ad-Hoc Voadora. As FANETs, assim como as Redes Ad Hoc Veiculares (VANETs) é uma subcategoria da Rede Móvel Ad Hoc (MANET). A MANET é um tipo de rede móvel na qual, basicamente, os nós podem se movimentar e que não dependem de nenhuma infraestrutura para entrar em operação (CRUZ, 2018).

A rede FANET é composta por vários nós de veículos aéreos não tripulados que se comunicam usando comunicação sem fio, a utilização de apenas um único UAV em vez de vários pode limitar o número de aplicações. Embora seja viável e tem menos complexidade na conectividade da rede, não tem uma grande cobertura em comparação com o sistema de múltiplos UAVs. Portanto, as FANETs podem ser muito úteis em situações de tempo crítico onde elas operam mais rápido e levam menos tempo para terminar uma determinada tarefa (SHAKERI et al., 2019).

Uma das aplicações mais comuns em FANETs é aplicações militares e civis, entretanto, devido aos avanços na utilização de UAVs, temos diversas aplicações que utilizam as FANETs que são conhecidas por sua natureza dinâmica, na qual os drones voam com velocidades diferentes e em alguns casos em direções diferentes. Nesses tipos de topologias, é muito desafiador implementar os protocolos de roteamento convencionais (AL-EMADI; AL-MOHANNADI, 2020). Os protocolos de roteamento são necessários em FANETs para estabelecer a comunicação UAV para UAV e encontrar o protocolo de roteamento final que tem a menor sobrecarga de roteamento enquanto fornece uma transmissão confiável de ponta a ponta dos dados permanece uma área ativa de pesquisa (KHAN et al., 2018).

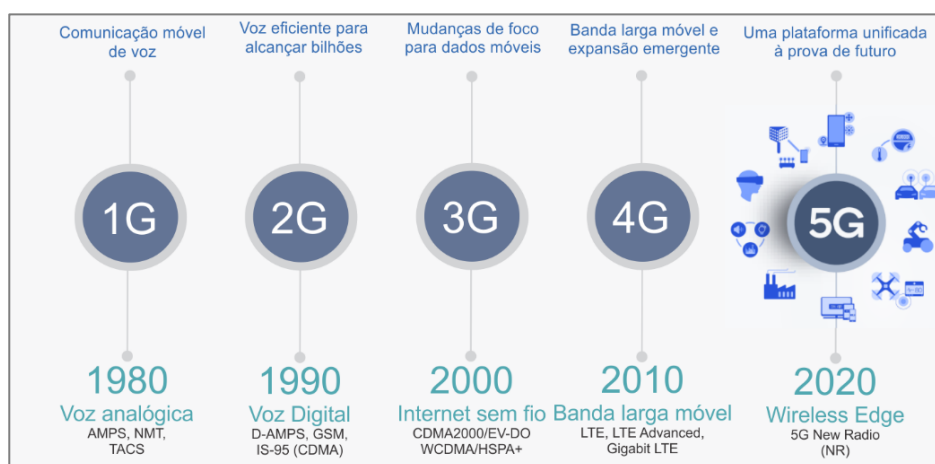
Para realizar a implantação de FANETs, algumas características importantes têm que ser considerada como, largura de banda; Latência; Redundância; Custo. Apesar das vantagens de se utilizar sistemas com UAVs, vários desafios devem ser considerados em sua arquitetura, dos quais destacam-se alguns: alta mobilidade dos nós, mudanças na topologia, transmissões com baixa latência, confiabilidade, modelo de propagação do rádio, consumo de energia (LIN et al., 2019).

2.4 Quinta Geração de Redes Móveis – 5G

A rede de telefonia móvel celular é uma das tecnologias de desenvolvimento com maior avanço nas últimas décadas, é uma rede de telecomunicações projetada com propósito de oferecer serviços de telefonia móvel sem fio aos usuários. Ao longo dos anos a tecnologia de comunicação móvel vem evoluindo cada vez mais, para que haja uma melhor comunicação.

Cada geração de redes móveis é caracterizada por diferentes bandas de frequências, capacidades técnicas e novos recursos que diferenciam de gerações anteriores, a progressão das gerações móveis de 1G - 5G melhora a experiência do usuário com sistemas de comunicação (UD DIN ARSHAD; KASHIF; QUERSHI, 2019). O avanço da tecnologia celular ao longo dos anos é mostrado na Figura 2.

Figura 2. Evolução das Comunicações Móveis.



Fonte: Adaptado de (QUALCOMM, 2020).

De acordo com (UD DIN ARSHAD; KASHIF; QUERSHI, 2019), a evolução da comunicação móvel celular pode ser apresentada da seguinte forma:

- A primeira geração (1G) foi introduzida no início da década de 1980 com base no sistema analógico com rede comutada por circuito. O sistema móvel 1G foi usado apenas para operações de voz, utilizando uma técnica chamada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) e utilizando outros padrões de tecnologia como AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), NMT (*Nordic Mobile Telephony*) e TACS (*Total Access Communication System*).
- A segunda geração de celular (2G) deu um grande salto em direção ao progresso da tecnologia celular sem fio quando lançada na década de 1990 e foi baseada na

tecnologia de sistema digital. O GSM (*Global System for Mobile communication*) foi a primeira rede 2G, fornecendo serviços como voz e dados juntos. O avanço da tecnologia GSM é o GPRS, também conhecido como 2.5G que posteriormente evoluiu até chegar no IS-95, que foi o primeiro a utilizar a tecnologia baseada em CDMA (*Code Division Multiple Access*) para enviar informações de voz, dados e sinalização.

- A terceira geração (3G) foi introduzida em 2000 para melhorar os serviços de voz, processamento de dados, alta Qualidade de Serviço e segurança da informação. Nesta nova geração, uma das principais variantes foi a tecnologia HSPA (*High Speed Packet Access*), que aumenta a velocidade de transmissão de dados variando de 8 Mbps à 10 Mbps de *downlink*.
- O LTE, um padrão desenvolvido pelo 3GPP, é atualmente a principal tecnologia conhecida como 4G. A quarta geração de redes móveis (4G), foi lançada em 2010 com várias mudanças importantes em relação aos seus antecessores. Nesta geração, recursos como alta velocidade variando de 100 Mbps à 1.0 Gbps levaram o 4G ao próximo nível de comunicação móvel.

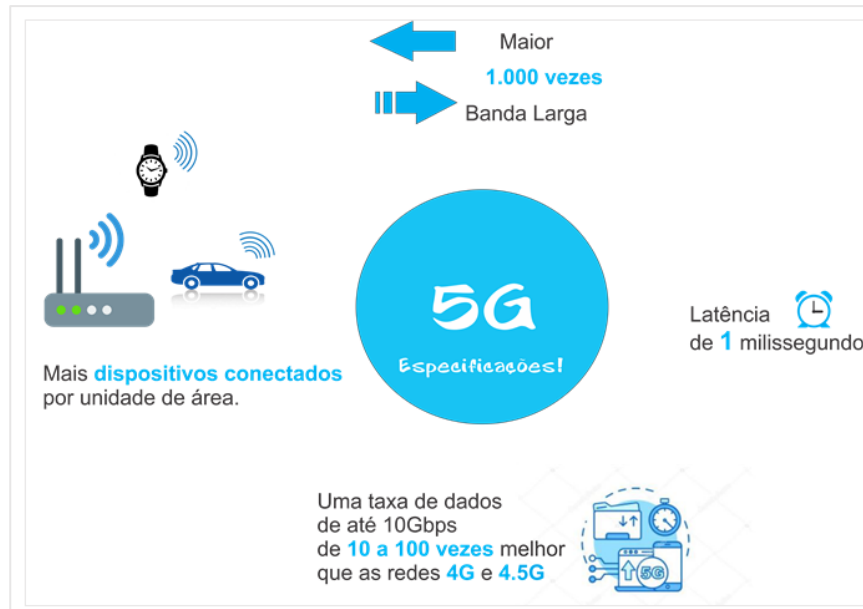
Com os problemas atuais que a tecnologia 4G tem enfrentado em relação aos requisitos de desempenho como alta latência, baixa transferência de dados, espera-se com a quinta geração de redes celulares cenários flexíveis, com baixa latência de aproximadamente 1ms, um grande número de conexões e altas taxas de transferência de dados (MOHANTY et al., 2021).

A quinta geração de redes móveis (5G) visa resolver os requisitos de aumento substancial da taxa de dados, do volume de tráfego e da massa crescente de dispositivos conectados. Para atender a esse enorme aumento na capacidade de tráfego de dados sem fio, existem três métodos: um é melhorar a eficiência espectral, outro é melhorar a reutilização do espectro, e o último consiste em aumentar a largura de banda. Entre os métodos mencionados, o mais direto e promissor é o aumento da largura de banda para transmissão de dados sem fio. Uma das soluções promissoras é usar a frequência das ondas milimétricas para obter um amplo espectro disponível (CHEN, 2020).

Com o desenvolvimento intenso da tecnologia 5G que foi projetada para interconectar não apenas pessoas, espera-se que as cidades no futuro tenham um sistema totalmente interligado, onde teremos um grande número de itens inteligentes e componentes de *softwares* conectados. A Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) em sistemas sem fio 5G será uma virada de jogo na geração futura, isso abrirá uma

porta para uma nova arquitetura sem fio e serviços inteligentes. Esta tecnologia emergente terá um papel vital papel na evolução dos aplicativos de hoje que ainda precisam de melhorias (BHAJANTRI; GANGADHARAI AH, 2020).

Figura 3. Especificações da Tecnologia 5G.



Fonte: Autoria Própria.

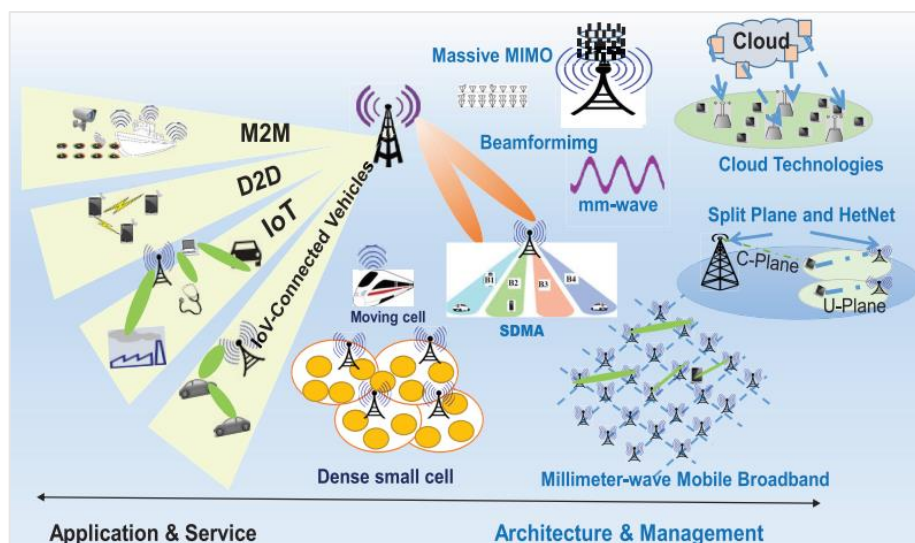
As principais pesquisas relacionadas ao sistema 5G são ilustradas na Figura 3 focando principalmente nos problemas como a taxa de dados, em que a transferência de dados deve ser 10 vezes mais do que as tecnologias existentes; baixa latência, a latência deve ser 10 vezes menor em comparação com as atuais redes LTE; temos também a alta largura de banda e eficiência de espectro, a tecnologia 5G exige alta largura de banda, o que pode ser alcançado através do uso de antena MIMO (do inglês, *Multiple-input and multiple-output*) e ondas milimétricas (SHAYEA et al., 2020). As comunicações 5G mmWave podem trazer vários benefícios para conectividade sem fio e melhorar o desempenho de redes celulares, além disso, ao associar UAV com mmWave, podemos criar um novo tipo de redes celulares.

2.4.1 Facilitadores da Tecnologia 5G

A quinta geração de redes celulares possui objetivos ousados, sobre os quais o *design* da rede 5G requerem uma evolução do atual acesso de rádio 4G LTE, da rede principal e novas tecnologias de capacitação para atingir os requisitos da grande evolução das comunicações sem fio. Dessa forma, a quinta geração de redes móveis precisa atender, rigorosamente, alguns requisitos como:

- Alta velocidade;
- Baixa latência;
- Escalabilidade e flexibilidade;
- Maior cobertura;
- Segurança e eficiência espectral.

Figura 4. Diagrama Sobre os Facilitadores das Redes Móveis 5G.



Fonte: (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016).

A rede 5G terá como objetivo fornecer maior taxa de dados de pico, dez vezes menor latência e três vezes mais eficiência espectral do que a última geração 4G LTE (BARB; OTESTEANU, 2020). Alguns autores como (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016) listam como potenciais habilitadores o uso de frequências mmWave, antenas MIMO (*Multiple-input and multiple-output*), redes heterogêneas, infraestruturas inteligentes.

A Figura 4 mostra uma visão geral das comunicações sem fio 5G e potenciais facilitadores. Nos parágrafos seguintes, iremos descrever e apresentar como algumas dessas tecnologias podem contribuir para o desenvolvimento das redes sem fio 5G:

- **Frequências mmWave** podem oferecer grandes porções de espectro livre não utilizados, a abundância de largura de banda desocupadas disponíveis em frequências mmWave é uma das principais vantagens das comunicações 5G mmWave. Entretanto, este facilitador específico será discutido com mais detalhes na sessão 2.5;
- **Redes heterogêneas** permitem aumentar a capacidade do acesso de rádio com a instalação conjunta de macro células e um grande número de pequenas células densamente implantadas, são consideradas uma solução importante para lidar com as

crescentes demandas de capacidade de rede e fornecer alta cobertura para usuários sem fio na quinta geração de redes sem fio 5G (GURES et al., 2020).

- **Massive MIMO** refere-se ao uso de um sistema em que o número de antenas na estação base (BS) é muito maior do que o número de dispositivos por recurso de sinalização. As atuais estações base celulares são pressionadas a lidar com o aumento dos espectros de radiofrequência saturados, a instalação de antenas MIMO nos fornece capacidade de canal aumentada e melhoria na força do sinal (SHAIKH; KAUR, 2019).
- **Infraestrutura Inteligente** são fundamentais para explorar plenamente as novas oportunidades e o aumento no desempenho de dados pelos outros facilitadores. Infraestrutura inteligente significa o uso de cache no limite da rede, uma rede central que pode ser reconfigurada e é capaz de atender aos usuários com diferentes requisitos. Outra proposta é o fatiamento da rede, ou seja, diferentes funcionalidades da rede são oferecidas por diferentes serviços provedores que fazem interface entre si (MEI; WANG; ZHENG, 2021).

2.5 Ondas Milimétricas – mmWave

Como mencionado na seção anterior, a adoção da porção do espectro eletromagnético com frequência superior a 24 GHz, (algumas referências colocam entre 30 e 300 GHz) conhecido com ondas milimétricas em redes 5G é vista como uma forma de atingir os objetivos de taxa de transferência e aumento de capacidade.

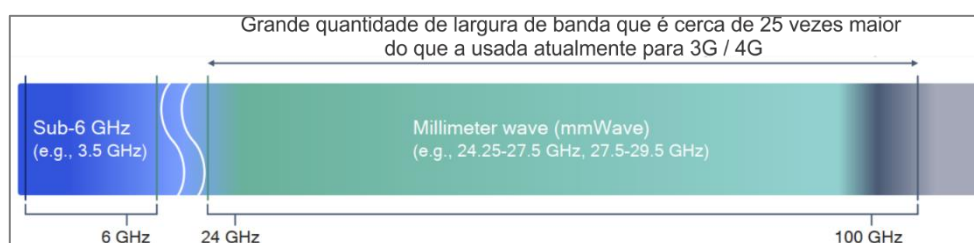
Atualmente, aplicações intensivas de largura de banda estão presentes nas rotinas diárias de usuários móveis, a sobrecarga do espectro LTE na faixa de frequência abaixo de 6 GHz parece não ser capaz de atender a essa demanda em um futuro próximo, motivando uma mudança para explorar novas bandas de frequências. Surge com as redes 5G o interesse de se utilizar bandas de ondas milimétricas que são caracterizadas por seus pequenos comprimentos de ondas, alta frequência e grande largura de banda.

Em relação ao uso de bandas acima de 6 GHz para comunicação, tem havido pesquisas substanciais nos últimos anos em relação ao potencial de comunicação celular em bandas mmWave. Essas frequências estão sujeitas a uma maior perda de percurso em comparação com as bandas sub-6 GHz usadas atualmente (NTONTIN; VERIKOUKIS; MEMBER, 2020). A maior disponibilidade de espectro desocupadas em frequências mmWave é uma das principais vantagens das comunicações 5G mmWave, a largura de banda maior se traduz em

taxas de dados extremamente altas, atingindo rapidamente as taxas de pico de dados de 10 Gbit/s (PARIDA; MAJHI; DAS, 2020).

A transmissão por mmWave oferece vantagens e também problemas, visto que, esses sistemas fazem uso de frequências extremamente altas. Atualmente, muitos problemas do sistema mmWave são considerados: como lidar com alta variabilidade do canal (KANG et al., 2021), como fazer o uso do sistema em áreas com bloqueio humano (AFTABI MOMO; MUNJURE MOWLA, 2019), como realizar a implantação da conectividade dupla (CAI et al., 2021).

Figura 5. Espectro mmWave na faixa [0, 100].



Fonte: Adaptado de (“Millimeter wave”, 2021).

A Figura 5 apresenta o espectro potencial que pode ser alocado para sistemas de comunicação 5G, atingindo desta forma uma nova fronteira da banda larga móvel. O espectro de 3 a 30 GHz é chamado de banda SHF (*Super High Frequency*) e o espectro de 30 GHz a 300 GHz é chamado de banda EHF (*Extremely High Frequency*) (SEYBOLD, 2005). Essas bandas possuem características de propagação semelhantes e por isso são incluídas na banda de ondas milimétricas.

Existem diversos benefícios proporcionados pela utilização do espectro mmWave, também muitas desvantagens (AL-SHAMMARI et al., 2021):

- Grande alocação de frequência: O espectro mmWave está disponível na maioria das regiões do mundo.
- Espectro Limpo: Como é uma faixa de frequência não utilizada pelas operadoras tanto no ambiente *indoor* quanto no *outdoor*, há menos chance de interferência.
- Comprimento de onda menor: Maior frequência implica comprimentos de onda mais curto, o que significa que mais informações podem ser transmitidas por unidade de tempo.

O uso de ondas milimétricas possui suas vantagens técnicas e desafios, seu uso para serviços de celular se tornou uma realidade. Seu desempenho eficiente para comunicações móveis, por exemplo, alta largura de banda, velocidades super-rápidas, latência ultrabaixa e maior conectividade. Entretanto, o efeito de bloqueio é um dos principais desafios técnicos, os sinais mmWave são bloqueados por obstáculos físicos em seus caminhos de propagação, sinais mmWave também são afetados por atenuação atmosférica restringindo sua faixa de transmissão no espaço livre.

2.6 Conectividade Dupla

A crescente popularidade das comunicações 5G está fazendo enormes demandas nas operadoras de rede celular para fornecer serviços 5G aos usuários. O conceito de conectividade dupla apresentou-se como uma característica fundamental para uma boa migração para as redes 5G, de modo que o UE possa se conectar a ambos, a estação base 4G e a estação base 5G, ao mesmo tempo (MONTEIRO et al., 2019).

Uma das principais características do 5G é a utilização do espectro de alta frequência, que é conhecido como espectro mmWave. Em comparação com as bandas tradicionais de sub-6 GHz, as características do mmWave são de grandes larguras de banda, sensibilidade a bloqueios e alta perda de caminho. Para superar todos esses desafios, a conectividade dupla é uma solução ideal para as redes mmWave para fornecer links de rádio mais robustos (KANG et al., 2019).

Atualmente, existe uma série de soluções de multi-conectividade, como conectividade dupla (CD) ou multiponto coordenado (CoMP). Originalmente proposto na versão 12 do LTE, a CD fornece a um equipamento de usuário os recursos de rádio de duas células residentes na mesma banda, mas de tipos diferentes ou em várias bandas com o mesmo tipo de célula (ÖHMANN et al., 2017). A conexão dupla para o 5G é uma generalização do anterior, onde o UE pode alavancar os recursos de duas células, uma das quais fornece acesso E-UTRA (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access*) e outra oferece acesso NR (*New Radio*). Além disso, a CD pode ser estendida para multi-conectividade, onde os recursos de duas ou mais células são disponibilizados para os UEs (ZARAI; BOUDRIGA; OBAIDAT, 2011).

A tecnologia de conectividade dupla oferece uma melhora significativa na taxa de transferência por usuários, especialmente nas bordas das células. Ela também fornece robustez de mobilidade e balanceamento de carga (AGIWAL et al., 2021). O 3GPP define conectividade

dupla multi-rádio (MR-DC), onde, os UEs podem utilizar recursos de dois nós diferentes (eNB ou gNB) que estão conectados via backhaul não ideal usando uma interface – X (ZARAI; BOUDRIGA; OBAIDAT, 2019).

2.7 Qualidade de Experiência – QoE

QoE é um conjunto de métricas de desempenho tipicamente utilizadas para avaliar a qualidade de experiência do usuário em um determinado serviço / aplicação. No passado, as medições baseadas em Qualidade de Serviço que consideram os aspectos de qualidade da rede (por exemplo, perda de pacote, atraso e taxa de transferência) foram utilizadas para definir o nível de satisfação ou desempenho de um serviço. Entretanto, as métricas de QoS não levam em conta a satisfação do usuário em relação a um serviço / aplicação, QoE considera a percepção do usuário à um determinado produto / serviço / conteúdo.

Para avaliar a qualidade de serviços multimídia em especial, transmissão de vídeos, métricas de QoS sozinhas não são o suficiente para avaliar o nível de qualidade da transmissão, porque elas falham em capturar aspectos subjetivos do conteúdo do vídeo relacionados à experiência humana (LIOTOU et al., 2015). Nesse caso, as métricas de QoE superam essas limitações, pois, fazem uma pontuação de uma determinada transmissão e avalia se a qualidade é satisfatória ou não.

2.7.1 Métricas de Desempenho de QoE

Existem diversas maneiras de medir os indicadores de QoE, dependendo do tipo de parâmetros medidos, as abordagens de avaliação de QoE da qualidade do serviço podem ser divididas em três categorias: avaliação subjetiva, avaliação objetiva e avaliação híbrida (YANG et al., 2018). Esta dissertação destaca as métricas de desempenho de QoE objetivas, que são baseadas em modelos matemáticos para estimar a média de opinião dos usuários, avaliando um vídeo transmitido por meio de uma rede 5G mmWave de conectividade dupla.

2.7.1.1 Avaliação Subjetiva

Medir e garantir uma boa QoE em aplicativos de multimídia é de natureza muito subjetiva. Portanto, uma maneira de avaliar QoE é realizar testes subjetivos, que diretamente medem a qualidade percebida perguntando às pessoas sobre sua opinião sobre a qualidade do conteúdo multimídia que está sendo testado (SOUSA; QUELUZ; RODRIGUES, 2020). A

maioria dos resultados do método subjetivo de avaliação é representada pelo MOS (*Mean Opinion Score*), que é a métrica de desempenho de QoE mais comum.

A pontuação média de opinião para um vídeo pode ser executada de várias maneiras. O MOS é definido como um valor numérico que varia de 1 a 5 (1 – Ruim, 2 – Ruim, 3 – Regular, 4 – Bom, 5 – Excelente) e corresponde à média aritmética de cada avaliação em um painel de usuários, onde quanto maior o número melhor a qualidade do vídeo (JULURI; TAMARAPALLI; MEDHI, 2016).

Tabela 2. Escala de Pontuação Média de Opinião – MOS.

MOS	Qualidade	Imparidade
5	Excelente	Imperceptível
4	Bom	Perceptível, mas não irritante
3	Razoável	Um pouco chato
2	Ruim	Irritante
1	Ruim	Muito irritante

Os usuários assistem aos vídeos e fazem uma avaliação em uma escala discreta de cinco pontos, a escala de valores da métrica MOS é mostrada na Tabela 2 que relaciona o valor MOS (resultado quantitativo) com a qualidade associada (percepção qualitativa) e a explicação em termos de imparidade associados aos vídeos. O uso do MOS como uma métrica subjetiva tornou-se o padrão de fato para avaliação subjetiva. No entanto, não é fácil de automatizar a medição MOS desde a influência de os fatores psicológicos humanos (JULURI; TAMARAPALLI; MEDHI, 2016).

2.7.1.2 Avaliação Objetiva

A fim de reduzir os longos e demorados testes de percepção que muitas vezes são caros ao medir a qualidade de aplicativos ou sistemas, a abordagem de avaliação objetiva é comumente considerada como o modelo de computação de QoE (YANG et al., 2018). A medição objetiva é caracterizada pelo uso de equações matemáticas para determinar / estimar o valor de QoE de um serviço com base em alguns parâmetros específicos, como exemplo, a luminância de dois vídeos.

As métricas objetivas podem ser classificadas conforme a disponibilidade do vídeo original. Chamamos de FR (*Full Reference*) quando o vídeo original sem degradação é completamente disponível, o RR (*Reduced Reference*) quando o vídeo original não é

totalmente disponível e o NR (*No Reference*) quando o vídeo original não é disponível (JULURI; TAMARAPALLI; MEDHI, 2016).

A análise dos vídeos nesta dissertação é do tipo referência completa (FR), visto que, utilizamos o vídeo original completo e o vídeo degradado para realizar a comparação. As principais métricas objetivas de QoE são: PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), VQM (*Video Quality Metric*) (SERRAL-GRACIÀ et al., 2010) e SSIM (*Structural Similarity Index*) (DAOUD; TSEHAYAE; FAYEK, 2017).

A métrica PSNR é definida como a máxima energia possível de um sinal e o ruído que afeta a representação do sinal entre os quadros do vídeo original e o degradado. Basicamente, a métrica PSNR avalia a diferença entre o sinal original e o distorcido calculando o erro quadrático médio entre os dois sinais e computando a razão entre a potência máxima possível de um sinal e o poder de corromper o vídeo (LAUDE et al., 2019). No entanto, o PSNR não é uma métrica de desempenho muito boa devido à instabilidade em seus resultados e possui baixa correlação com estimativas subjetivas.

O Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) é uma métrica que compara quadro das sequências de vídeo original e o vídeo degradado para quantificar a degradação sofrida (DAOUD; TSEHAYAE; FAYEK, 2017). A métrica SSIM estima a similaridade entre o vídeo original e o vídeo degradado, comparando a luminosidade, o contraste e a estrutura do vídeo original e do vídeo degradado. A faixa de valores da métrica SSIM varia de 0 a 1, onde 1 é o melhor valor esperado da imagem.

A métrica VQM também utiliza como entradas o vídeo original e o vídeo degradado para fazer a avaliação objetiva da qualidade do vídeo. O VQM fornece abordagens padronizadas e não padronizadas para medir a qualidade de vídeo percebida, levando em consideração aspectos estruturais e temporais. Entretanto, o algoritmo VQM possui diversas etapas: extração de recursos baseada em percepção, cálculo de parâmetros de qualidade de vídeo (sete em total) e a combinação desses parâmetros para terminar o modelo geral, sua escala de resultados varia entre 0 a 5 sendo 0 o melhor valor possível (WICHTLHUBER et al., 2016).

As métricas consideradas nesta dissertação foram SSIM e VQM, visto que, ambas têm uma boa correlação com o *feedback* subjetivo dos usuários e são ótimas para medir os resultados objetivos de QoE.

2.8 Conclusões do Capítulo

Este capítulo teve como objetivo fornecer um bom entendimento do tema desta dissertação. Apresentamos o grande aumento no uso de UAV para serviços de comunicação sem fio. Foi abordado sobre a quinta geração de redes móveis (5G), mostrando um pouco sobre a sua evolução até chegar no atual momento, em seguida, mostramos os principais facilitadores das redes 5G. Mostramos o uso de mmWave e seus avanços na modelagem analítica, que foram realizados são de vital importância no grande impulso nas simulações em nível de sistema com sua implantação na ferramenta de simulação NS3, por fim, definimos o conceito de QoE é as métricas utilizadas nesta dissertação.

3 Trabalhos Correlatos

3.1 Considerações Iniciais

Foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos, sendo discutidos nesta seção trabalhos relacionados à comunicação mmWave habilitadas para UAVs, redes celulares 5G e Qualidade de Experiência em *Streaming* de vídeo presentes na literatura em aplicações multimídia utilizando vídeo. O principal site utilizado para buscar as principais tecnologias e conceitos utilizados no desenvolvimento desse trabalho foi o IEE *Xplore*, entretanto, utilizamos outras fontes como a biblioteca digital ACM.

3.2 Correlatos

A proposta apresentada em (SU; MAW, 2020), realiza uma análise comparativa de streaming de vídeo em rede definida por *software* concentrando principalmente no redirecionamento do tráfego, abordagem para melhorar as taxas de bits de streaming de vídeo e para reduzir a perda de pacotes no vídeo aprimorado proposto.

De acordo com (SALVA-GARCIA et al., 2018), os autores propuseram uma nova estrutura 5G-UHD para alcançar streaming de vídeo adaptável tendo em vista um grande desafio técnico para atender à crescente expectativa dos usuários de ultra alta definição (UHD) de entrega contínua de vídeo de alta qualidade em pontos de acesso 5G, onde é comum ocorrer congestionamento. A arquitetura é dividida em duas sessões, no *design* da arquitetura que é construído sobre uma infraestrutura 5G de referência que consiste em RANs (*Radio Access Networks*), uma rede central e a internet. A segunda sessão consiste no projeto de processamento do vídeo, onde temos a otimização do tráfego do vídeo e testes de sequências de vídeos 4K UHD.

Outros autores como (ALI MUTHANNA et al., 2020), ressaltam o crescente interesse em aplicativos baseados em vídeo em que resultou em um rápido aumento no tráfego de dados sem fio e atendendo às rigorosas demandas de qualidade de experiência. O trabalho apresenta modelos de transmissão de tráfego de vídeo em redes 5G com base em ondas milimétricas em conjunção com unidades de nuvem no limite de rede de acesso de rádio (RAN) para descarregar a rede subjacente atingindo assim maior eficiência em termos de descarga, sobrecarga, cobertura e atraso.

No estudo realizado em (WAHAB; AHMAD; SCHORMANS, 2020), os autores relatam o aumento da popularidade das plataformas de *streaming* de vídeo para jogos, mostrando uma grande dependência dos parâmetros de QoS como latência e perda de pacotes, dessa forma, motivando a avaliar a QoE dos três jogos populares de *streaming* de vídeo para diferentes taxas e perda de pacotes. Neste trabalho, foi demonstrado as limitações de se utilizar o método subjetivo MOS para avaliar a QoE de *streaming* de vídeo em jogos. Os resultados das simulações mostraram que avaliar a QoE usando a métrica MOS perde informações sobre a diversidade do usuário.

A demanda cada vez maior sobre serviços de comunicações com maiores taxas de dados levou à inovação de novas tecnologias e técnicas avançadas sobre sistemas de comunicação para garantir os requisitos da quinta geração de comunicação móvel (5G). A pesquisa de (SHIBAGAKI; KASHIMA; SATO, 2018) propõem um sistema de ponte de fibra sem fio contínua de ponta a ponta e em tempo real, para conectividade de dados padrão *Ethernet* gigabit e *streaming* de vídeo padrão de 8K, os autores realizaram a integração de frequências intermediárias sobre fibra e *links* sem fio de ondas milimétricas de 96 GHz. Os resultados mostram que, o sistema de ponte de fibra com a integração do uso de mmWave tem grande potencial para fornecer dados elevados e transmissão confiável para *streaming* de vídeo 8K.

Para sistemas celulares de quinta geração (5G), uma limitação para a implantação de sistemas mmWave é o canal dinâmico em rápida mudança causado pela mobilidade do usuário, assim (POLESE et al., 2017) implementaram um novo protocolo de conectividade dupla que permite UE manter as conexões da camada física com Células 4G e 5G simultaneamente. A estrutura proposta é capaz de melhorar o desempenho de uma rede ponta a ponta com links mmWave em relação a várias métricas como latência, sinalização de controle e perda de pacotes.

A proposta apresentada em (KANG et al., 2019), a conectividade dupla também foi proposta para resolver o problema de degradação de desempenho em mmWave devido a aumento do serviço, tempo de inatividade e travamentos, visto que, usuários móveis em uma rede celular ultradensa de ondas milimétricas experimentam eventos de transferência com mais frequência do que em redes convencionais.

O uso de bandas de ondas milimétricas para serviços de celular se tornou uma realidade, os autores em (NIKHAT; MEHMET-ALI, 2018), realizaram uma avaliação de desempenho de uma rede celular mmWave com mobilidade de usuário, determinaram o

desempenho visto por um usuário móvel viajando ao longo de um caminho em velocidades constantes e variáveis. Os resultados da pesquisa mostram que a taxa de informação alcançada e a probabilidade de cobertura SINR de um usuário móvel é semelhante ao de um usuário estacionário.

A proposta apresentada em (LI; WANG; LIU, 2019) estuda um sistema de conectividade dupla UAV-BS em redes sem fio que combina com a alta mobilidade de veículos aéreos não tripulados e a conectividade dupla para fornecer aos usuários taxas de dados e serviços de comunicação onipresentes em cenários de usuários densos, os UAVs e as BSs fornecem serviços aos usuários simultaneamente no sistema. Por fim, os autores formulam uma seleção conjunta de ponto de acesso e um problema de alocação de energia para maximizar o rendimento do sistema.

Em relação a trabalho de comunicações mmWave assistida por UAV, em (YI et al., 2019) foi proposta uma estrutura espacial tridimensional (3D) unificada para modelar um caso geral em que usuários descobertos enviam mensagens para estações base via UAVs. Processos de Poisson e Processos de Cluster de Poisson (PCPs) foram utilizados respectivamente para modelar as localizações dos transceptores em *downlink* e *uplink*. Para alcançar a probabilidade máxima de cobertura no sistema proposto, existe uma altitude ideal para os UAVs. As redes mmWave consideradas, supera sub-6 GHz em termos de taxa de dados, devido à direção *beamforming* acentuada e grande largura de banda de transmissão.

Os autores de (KHOSRAVI et al., 2018), apresentaram uma avaliação de desempenho de redes mmWave assistido por UAV em ambientes urbanos usando o simulador NS-3. Mostraram que a abordagem da utilização de UAVs como estações-base voadoras para cenários de redes 5G mmWave é uma solução promissora para lidar com as limitações de propagação, no caso de carga dinâmica, uniforme e desequilibrada do usuário. Para testar a eficácia da combinação de UAVs equipados com APs (*Access Point*) mmWave, utilizaram três cenários com a mesma grade de simulação, bem como diferentes mobilidades de usuários e distribuição.

Em (KHAN et al., 2020), a pesquisa apresentou uma avaliação de desempenho da próxima geração de redes móveis com retransmissão utilizando UAVs, o foco da pesquisa é investigar, analisar e descrever as características distintivas ricas da propagação de mmWave em redes de acesso e *backhaul* simultaneamente usando UAV. Além disso, o trabalho destacou o impacto da localização do UAV para maximizar o desempenho de uma retransmissão baseada no UAV para fornecer cobertura aprimorada para os usuários.

Fornecer garantias de conectividade e qualidade de serviço para redes mmWave habilitadas para UAV, é um dos principais temas de pesquisa na atualidade. Neste sentido, a proposta em (FENG et al., 2019) apresentam uma nova arquitetura de gerenciamento de espectro para redes celulares assistidas por UAV. Os autores relatam o desempenho das redes celulares especificamente sobre cenários catastróficos, onde as estações bases podem estar com mal funcionamento ou congestionadas, além disso, serviços como transmissão ao vivo requerem vídeo de alta definição, que sem dúvida precisam de banda larga para realizar transmissão sem fio. Para atingir este objetivo, a pesquisa utilizou a abordagem do uso de mmWave introduzida no enxame de UAVs, mostrando em seus resultados que a utilização de UAV nas redes celulares sem fio será uma das abordagens mais eficazes para realizar futuras redes 5G.

Em (WANG; GURSOY; MEMBER, 2019), os autores consideraram características distintivas de comunicações mmWave assistidas por UAV, como diferentes modelos de perda de caminho para links LOS (*line-of-sight*), NLOS (*non-line-of-sight*) e transmissões direcionais são levadas em consideração. Foi utilizado o Processos de Cluster de Poisson para fazer modelagem dos locais dos UE (*user equipment*), além do mais, definiram uma probabilidade de transmissão bem-sucedida para apresentar conjuntamente a energia e coberturas de SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*).

Ainda no contexto de redes celulares mmWave assistidas por UAV, os autores em (LIAO et al., 2020) analisam o limite de atraso ponta a ponta da transmissão *uplink* em uma rede sem fio assistida por UAV, onde o UAV atua como o cache de borda para melhorar a qualidade de serviço para provedores de conteúdo. A pesquisa levou em consideração a falha de transmissão causada pela mobilidade dos UAV, os resultados confirmaram o ganho de desempenho do uso de UAV-BS habilitados para cache em redes móveis sem fio mmWave.

Por outro lado, em (TAKAKU et al., 2020) são descritas as aplicações potenciais dos UAV. Em especial, sistema de vigilância por vídeo de alta resolução usando UAV ganharam especialmente a atenção de pesquisas. Sistemas de vigilância utilizando câmeras em locais fixos sempre sofrem os pontos cegos devido ao bloqueio ou implantações inadequadas. A utilização de UAV equipados com câmeras pode melhorar bastante o desempenho sistema de vigilância devido sua alta mobilidade. Outro ponto a ser destacado, é o vídeo descompactado melhorando da precisão de detecção, entretanto, realizar a transmissão do vídeo descompactado em tempo real é uma tarefa muito difícil. Para solucionar o problema os

autores propuseram o uso de comunicação mmWave para realizar a transmissão de vídeo em UAV.

Todos os trabalhos correlatos apresentados possuem contribuições na área desta dissertação e ajudaram para a produção desta pesquisa. A Tabela 3 abaixo mostra de maneira clara e precisa os principais trabalhos correlatos, apresentando na primeira coluna o nome dos autores e na segunda coluna suas contribuições, na terceira coluna temos as diferenças desta pesquisa em relação aos correlatos.

Tabela 3. Síntese dos Principais Trabalhos Correlatos.

Correlatos	Contribuições	Diferenças
Su; Maw, (2020)	O trabalho apresenta uma análise comparativa de streaming de vídeo em rede definida por <i>software</i> e analisaram os resultados com métricas de QoS.	Em nosso trabalho, as métricas consideradas foram de percepção do usuário (QoE) e utilizou-se como solução a conectividade dupla com UAVs.
Wahab; Ahmad; Schormans, (2020)	Neste trabalho, os autores mostraram a grande dependência dos parâmetros de QoS como latência e perda de pacotes para <i>Streaming</i> de vídeo em jogos e avaliaram a QoE dos jogos utilizando apenas métricas subjetivas.	Em nosso trabalho, foram consideradas as principais métricas objetivas de QoE e um comparativo dos <i>frames</i> do vídeo original e transmitido.
Shibagaki; Kashima; Sato, (2018)	Os autores propuseram um sistema de ponte de fibra sem fio contínua com a integração do uso de mmWave para fornecer dados elevados e transmissão confiável para <i>streaming</i> de vídeo 8K e fizeram a avaliação dos resultados utilizando métricas de QoS no sistema.	Em nosso trabalho, utilizamos métricas de QoE e QoS para o serviço de <i>Streaming</i> de vídeo e redes mmWave habilitadas para UAVs.
Li; Wang; Liu, (2019)	Neste trabalho, os autores propuseram um sistema de conectividade dupla UAV-BS em redes sem fio de <i>downlink</i> e realizaram a avaliação de desempenho utilizando a taxa de transferência.	Em nosso trabalho, consideramos à integração do LTE com o mmWave para sistemas sem fio habilitadas para UAVs, com foco em cobertura para garantir QoE em aplicações multimídias utilizando <i>Streaming</i> de vídeos.

Khan et al., (2020)	O trabalho apresenta uma avaliação de desempenho da próxima geração de redes móveis, com retransmissão em comunicações mmWave habilitadas para UAV e analisaram os resultados com base nas características de propagação do mmWave.	Em nosso trabalho, utilizou-se a conectividade dupla entre o LTE e mmWave habilitado para UAVs para melhorar a intensidade do sinal recebido e a eficiência espectral geral da rede.
Takaku et al., (2020)	Neste trabalho, os autores apresentaram um sistema de vigilância por vídeo de alta resolução utilizando UAVs e realizaram uma avaliação de QoS no sistema.	Em nosso trabalho, apresentamos um sistema capaz de realizar transmissões de vídeos no formato 4K com alta qualidade de transmissão conforme mostrado nos resultados.

3.3 Conclusões do Capítulo

Com base em nossa análise do estado da arte, a literatura atual apresenta interessantes estudos sobre a utilização eficiente de recursos da rede com a implementação de UAV-BS. De forma complementar, a contribuição desta dissertação consiste em apresentar um estudo sobre a percepção do usuário em relação a qualidade geral do serviço de streaming de vídeo em sistema sem fio mmWave de comunicação dupla UAV-BS.

4 Modelo de Sistema

4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo apresentamos a metodologia empregada para realização desta dissertação, utilizamos um conjunto de ferramentas necessárias para realizar a medição e aferição da qualidade do vídeo. Fizemos uma breve revisão do simulador NS3 (*Network Simulator 3*), mostrando o módulo mmWave, assim como nossa abordagem para implementar a conectividade dupla.

4.2. Simulador de Rede – NS3

Os experimentos foram conduzidos sobre simulações criadas utilizando o simulador de eventos discretos NS3. Em tal software, foi incluído um módulo mmWave que é capaz de realizar simulações com dispositivos móveis conectados a um eNB (*evolved Node Base*) LTE e para um eNB mmWave (MEZZAVILLA et al., 2018a).

O NS-3 é uma ferramenta muito forte e flexível que simula topologias de rede, é um simulador de eventos discretos de código aberto que visa fornecer uma ferramenta avançada para pesquisa, desenvolvimento e uso educacional. A característica mais notável do NS-3 é que ele não está limitado a sistemas da Internet, mas os usuários usam para modelar sistemas não baseados na Internet. Indo mais a fundo, o NS-3 é construído como um sistema de bibliotecas de software que funcionam em conjunto (KOTTAS, 2017).

Esse simulador é desenvolvido em C++ e Python e, graças ao alto nível de detalhe que pode ser obtido ao implementar um determinado protocolo, oferece a possibilidade de estudar o desempenho de sistemas complexos, em particular, ele se concentra na pesquisa de redes de computadores. Nesta dissertação para realizar as simulações foram utilizados:

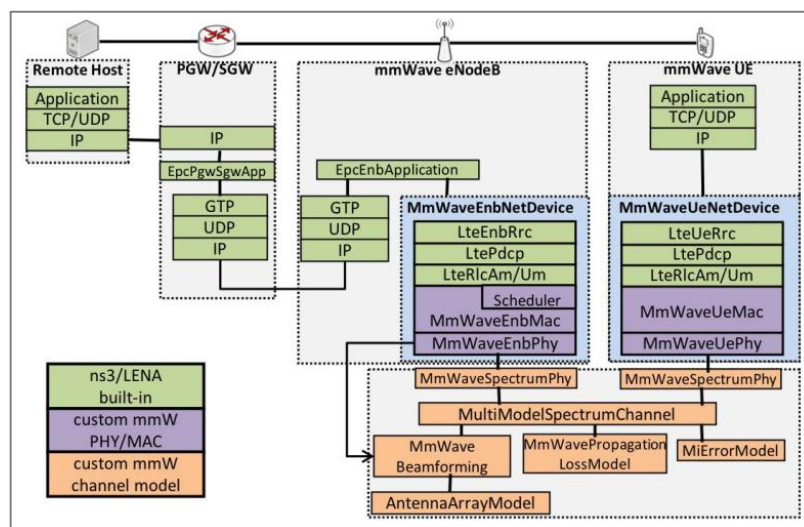
- O módulo LTE nativo do NS3, fornece uma implantação básica de dispositivos LTE para modelar um acesso de rádio realista e oferecer alguns elementos da rede.
- O módulo mmWave que foi desenvolvido por (MEZZAVILLA et al., 2015), esse módulo oferece modelo de canal, o PHY (*Physical*) e a camada MAC (*Medium Access Control*) para a pilha de protocolo 5G mmWave e tem dependência do módulo LTE para as camadas superiores.

- Utilizamos os módulos de núcleo do simulador que oferecem conectividade TPC/IP.

4.3. Módulo mmWave para o NS3

Frequências mmWave são consideradas um dos grandes facilitadores da tecnologia 5G devido ao seu potencial para alcançar as enormes taxas de transferência exigidas pelas futuras redes 5G. Diante disso, foi criado um módulo para o NS3 para realizar simulações de redes celular 5G operando em mmWaves.

Figura 6. Diagrama de Classe do Módulo mmWave.



Fonte: (MEZZAVILLA et al., 2018).

A arquitetura baseia-se no módulo LTE (LENA) do NS3, aproveitando a implementação detalhada de protocolos LTE/EPC, e implementa camadas PHY e MAC personalizadas. Na Figura 6, podemos observar que a arquitetura se baseia no módulo LTE (LENA) (BALDO et al., 2011), aproveitando a implementação detalhada de protocolos LTE/EPC (*Evolved Packet Core*) e implementa PHY personalizado e camadas MAC.

A estrutura das classes é implementada com um paradigma de interface, ou seja, a camada A se comunica com a camada B não diretamente chamando seus métodos, a Figura 6 mostra a composição de alto nível das classes *mmWaveEnbNetDevice* e *mmWaveUeNetDevice*, que representam o mmWave eNB e pilhas de rádio UE, respectivamente, juntamente com uma perspectiva sobre a estrutura de ponta a ponta do simulador.

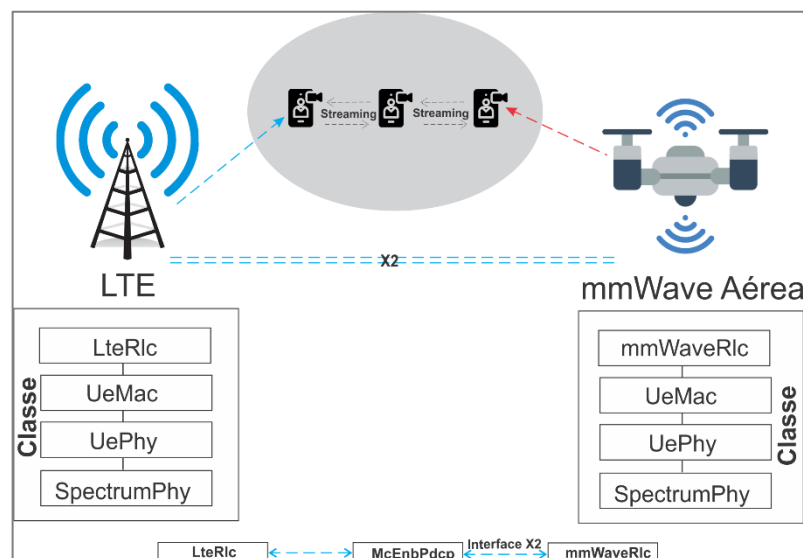
De acordo com (MEZZAVILLA et al., 2018), que apresenta um tutorial abrangente com uma descrição detalhada de todo o módulo, as principais características do módulo são:

- Suporte a uma ampla gama de modelos de canais, para frequências entre 0,5 e 100 GHz que são consideradas como as principais;
- Classes personalizadas de PHY e MAC que suportam a estrutura e numerologias do quadro 3GPP NR (*New Radio*);
- Conectividade dupla com estações base LTE, com transferência rápida de célula secundária e rastreamento de canal. Este trabalho foi baseado principalmente nesta última característica.

4.4 Arquitetura Proposta

Nesta seção, o modelo de sistema para redes aéreas 5G mmWave de conectividade dupla é apresentado. Consideramos dois cenários neste estudo, onde temos a conectividade dupla usando ondas milimétricas habilitadas para UAV e a rede LTE, durante a simulação o UAV-BS é conectado ao UE por *links* mmWave terá transmissão multimídia. Simulamos um cenário tradicional usando apenas a interface 4G para comparar a Qualidade de Experiência.

Figura 7. Arquitetura de Conectividade Dupla UAV- BS.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 7 apresenta o diagrama da arquitetura proposta, onde sistemas mmWave enfrentam muitos problemas como alta variabilidade do canal, bloqueio humano e

provavelmente usarão a conexão dupla. Admitimos que todos os UAVs têm energia suficiente para chegar à sua posição 3D no ar para realizar a comunicação com os UEs com altitude típica de 100 metros. Podemos observar na Figura 7 que existem camadas LTE Rlc, Mac, Phy e mmWave Rlc, Mac, Phy, como os dois sistemas possuem frequências diferentes, portanto, podem ser configurados independentemente.

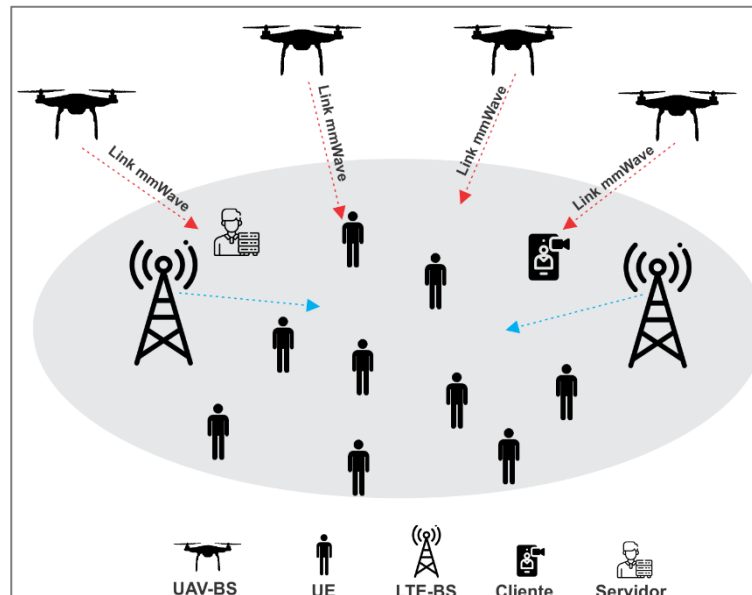
Analisamos a arquitetura que consiste no eNB LTE, no UAV-BS mmWave e nos UEs utilizando aplicação do tipo vídeo (*streaming*) (Fig. 7). O módulo de comunicação dupla do NS3 assume que as redes centrais do LTE e do mmWave são integrados, sendo assim, os eNBs do LTE e o mmWave compartilham a mesma rede de *backhaul*, isto é, ambos estão conectados uns aos outros através de *links X2*. Para realizar a integração utilizamos o PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), seguindo o modelo de exemplo presente no diretório do simulador no módulo mmWave.

O modelo de canal usado para as simulações neste trabalho é baseado no modelo de canal 3GPP para frequências de 6 – 100 GHz descrito em [Mezzavilla et al. 2018]. De acordo com o 3GPP, este modelo deve ser utilizado para a avaliação de tecnologias NR que dependem de comunicações no intervalo de banda entre 6 - 100 GHz, portanto, tornando-se um recurso extremamente importante para qualquer simulador de nível de sistema mmWave. Além do mais, temos a combinação modelo com o módulo de edifícios do NS3 para simular cenários 3D realistas.

O recurso de comunicação dupla utilizado nesta dissertação, foi introduzido porque as redes 5G mmWave provavelmente irão utilizar a multi-conectividade e inter-rede com legado de Tecnologias de Acesso Rádio (RATs) para aumentar a robustez em relação à mobilidade e dinâmica do canal (POLESE et al., 2017). Utilizamos o código fonte de comunicação dupla presente no novo ramo de transferência do módulo NS3 do repositório mmWave.

A Figura 8 ilustra o cenário de transmissão do vídeo proposto nesta dissertação. Neste cenário, o UAV-BS está fornecendo cobertura aos usuários através de links mmWave com objetivo de maximizar a área. A rede aérea 5G mmWave de conectividade dupla é baseada na combinação da estação base LTE terrestre tradicional comunicando-se com UAVs. O UAV-BS está fornecendo cobertura aos UEs e realiza o processo de transmissão do vídeo entre dois dispositivos, onde um apresentava-se como servidor (responsável pelo o envio do vídeo) e o outro como cliente (responsável pelo recebimento e reconstrução do vídeo).

Figura 8 Ilustração do Cenário de Transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

Dentro da aplicação “*server*”, temos a geração do trace do vídeo, pois uma das formas para implementar a simulação da transmissão de vídeo é transformar o tráfego de pacotes em um arquivo de trace para o NS-3, ou seja, temos o arquivo “.st” no qual é o rastreamento do remetente (informações sobre tipos de quadros, segmentação de pacotes, etc.). Temos também o despejo do remetente (remetente de despejo de pacotes IP) definido como “sd_a01_mmWave”. Já no lado do “*client*” temos o *Dump* do destinatário (receptor de despejo de pacotes IP) definido como “rd_a01_mmWave”.

4.5 Descrições do Vídeo

A base de dados dos vídeos utilizados neste trabalho pode ser baixada em qualquer repositório usado para estudos de avaliação de qualidade de vídeos e os critérios de escolha dos vídeos foram baseados na estrutura de movimentação e formato das imagens. As principais características dos vídeos usados são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características do Vídeo Utilizado.

Vídeo	Quadros	Tempo (seg.)	Formato	Resolução	FPS
Netflix_Square	600	10	4K	4096x2160	60

Na Tabela 4 tem-se as especificações do vídeo utilizado como: quadros, tempo em segundos, resolução e taxa de quadros. Quando se trata de avaliar a qualidade de vídeos, temos

como principal fator a resolução desses vídeos, pois desempenha um papel fundamental na hora da avaliação.

O número de dispositivos capazes de operar em redes sem fio de comunicação tem aumentado de forma significativa desde a padronização das tecnologias de acesso as redes sem fio. Como decorrência, a quantidade de informação digital que trafega sobre essas redes cresce de forma exponencial, e nesse sentido, as novas tecnologias de acesso têm provido uma largura de banda cada vez maior, minimizando a sobrecarga na rede.

Figura 9. Uma Cena do Vídeo Original.



Fonte: Autoria Própria.

Dentre as informações consideradas multimídias, as que têm ganhado destaque são os vídeos transmitidos sobre a rede de comunicação, conhecidos como *streaming* de vídeo, devido a popularização dos serviços que fornecem conteúdo de *streaming* de vídeo. Entretanto, neste trabalho utilizamos a transmissão de um vídeo com o formato 4K conforme ilustra a Figura 8.

4.5.1 Ferramentas

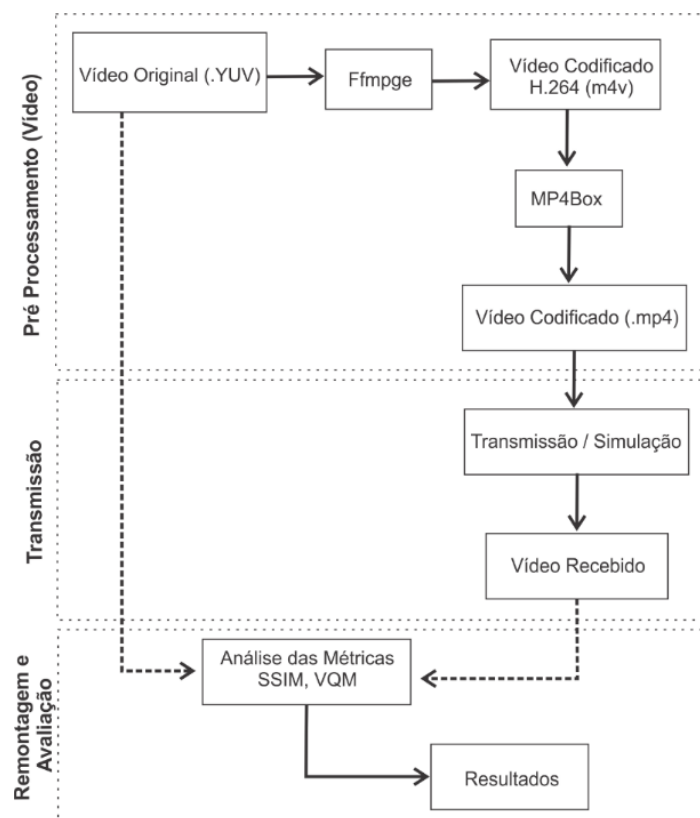
Para compreender o desempenho da qualidade de imagem durante a sua transferência no sistema proposto, utilizamos algumas ferramentas para realizar a codificação, decodificação, transmissão e análise do vídeo. A compilação dos dados e resultados apresentados neste trabalho, foram resultados de testes utilizando Evalvid.

Podemos considerar o Evalvid como uma estrutura completa e um conjunto de ferramentas capaz de avaliar a qualidade percebida pelo usuário na qualidade do vídeo transmitido através de uma comunicação real ou simulada rede no fluxo de multimídia de

vídeo. A ferramenta possibilita desenvolver métricas objetivas de avaliação de vídeo suportando vários *codecs* de vídeo, em especial, em termos de transmissão de vídeo em redes 5G (MINOPOULOS et al., 2020).

A Figura 9 apresenta as etapas da sequência de como seguirá o processo de codificação, decodificação, transmissão e análise dos vídeos nas simulações. No primeiro momento, tem-se a codificação do arquivo de vídeo original no formato YUV até chegar no formato MP4. Depois, seguimos com a simulação da transmissão do vídeo na tecnologia de redes 5G mmWave de conectividade dupla habilitadas para UAV utilizando o NS3. Outro passo importante está na decodificação do vídeo recebido para o formato YUV e por fim tem-se a análise de métricas objetivas do arquivo YUV original com o arquivo YUV recebido, fazendo o cálculo das métricas SSIM e VQM.

Figura 10. Fluxo de Etapas da Avaliação.



Fonte: Autoria Própria.

Para podermos fazer a avaliação de QoE usando o framework Evalvid, o primeiro passo é baixar vídeos em qualquer repositório usado para estudos de avaliação de qualidade de vídeos. O próximo passo é converter o arquivo original de entrada para o formato MP4, no

qual o arquivo contém os frames da amostra de vídeo. Os frames serão distribuídos em pacotes para a transmissão do vídeo com o protocolo de transporte (RTP).

Nas métricas utilizadas no trabalho, é necessário o vídeo de referência, que é o arquivo YUV original para poder fazer a comparação com o vídeo degradado gerado na simulação. Em seguida, geramos o arquivo de rastreamento de remetente (informações sobre tipos de quadros, segmentação de pacotes, etc).

Após a simulação da transmissão do vídeo na rede 5G mmWave de conectividade dupla feita pelo NS3, obtemos dois arquivos: *sd_a01* e *rd_a01*, *dump* do receptor (receptor de despejo de pacotes IP) e o despejo remetente (remetente de despejo de pacote IP) respectivamente. O próximo passo é a reconstrução do vídeo que possivelmente gerará um arquivo de vídeo corrompido devido à perda de frames, para isso, os arquivos de vídeo e rastreio são processados pela ferramenta *etmp4*. A última etapa é uma simples conversão do arquivo de saída MP4 para o formato YUV para poder fazer a comparação com o original e fazer o cálculo das métricas objetivas de QoE.

4.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, foi mostrado o modelo do sistema, as ferramentas utilizadas e os métodos utilizados para consolidação dos resultados, mencionando sobre as etapas essenciais do processo de desenvolvimento desta dissertação. A avaliação da QoE do vídeo transmitido na arquitetura proposta é um conjunto de parâmetros e ferramentas que podemos encontrar na literatura, entretanto, não encontramos esta abordagem para redes 5G mmWave habilitadas para UAVs. Toda esta pesquisa, bem como a arquitetura 5G mmWave de conectividade dupla assistida por UAV elaborada, é de grande benefício para a comunidade acadêmica, especialmente com os avanços nas comunicações.

5 Avaliação de Desempenho

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo é discutido a avaliação das aplicações do Streaming de vídeo, avaliando a QoE da aplicação em cenários LTE e o cenário 5G proposto nesta dissertação. Apresentamos os parâmetros de simulação e os resultados obtidos utilizando o simulador NS3 a partir do módulo mmWave apresentado previamente, com a inclusão do *framework* Evalvid para realizar a transmissão, recepção, codificação, decodificação e a avaliação da qualidade do vídeo.

5.2 Análise dos Resultados

Agora iremos considerar os resultados das métricas SSIM e VQM para efeito de avaliação do sinal de vídeo degradado em relação ao de referência. No caso da métrica SSIM valores altos são melhores e para a métrica VQM valores baixos são melhores. Nas tabelas e gráficos que seguem estão representados os resultados das métricas mencionadas. Utilizamos o módulo Evalvid para calcular as métricas de qualidade de experiência para os vídeos através de técnicas objetivas e a ferramenta VQMT (*Video Quality Measurement Tool*) que fornece funcionalidade para comparações de referência completa, onde, dois vídeos são analisados.

Os resultados das métricas SSIM e VQM foram obtidos executando 10 simulações e depois calculando a média para avaliar o sinal de vídeo degradado em relação ao de referência. No primeiro cenário utilizando a interface com conectividade dupla, criamos um contêiner com 40 UEs que estão se movendo de acordo com o modelo de mobilidade (*Random Waypoint*) (ALTHUNIBAT; BADARNEH; MESLEH, 2019) próximo de quatro BS LTE localizadas no mesmo local e seis UAV-BS. O segundo cenário em vez de usar conectividade dupla temos apenas a interface LTE, os parâmetros de simulação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros Gerais da Simulação.

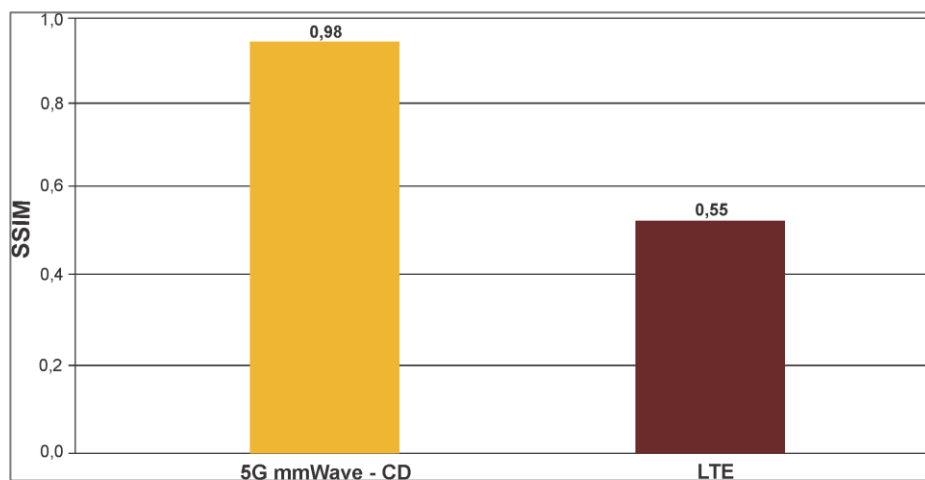
Parâmetros	Valor
Número de UEs	40
Qtd. Estação Base (BS)	2 (LTE) / 2 (UAV mmWave)
Área de Cobertura (km ²)	4
Potência de Transmissão (dBm)	40 (LTE) / 20 (UAV mmWave)
Frequências (GHz)	2.6 (LTE) / 26 (mmWave)
Tempo de Simulação	350 s

O fluxo dos vídeos foi ponta a ponta para os dois cenários considerados, os resultados de SSIM e VQM ao final da transmissão são representados em planilhas eletrônicas, os valores das métricas são calculados e apresentados a média quadro a quadro.

5.2.1 Avaliação Objetiva – SSIM

A métrica SSIM que corresponde o índice de similaridade estrutural, é uma métrica objetiva, com referência completa e direta que leva em consideração a medição da distorção estrutural da imagem. Conforme a Figura 10, a média geral SSIM para o cenário utilizando a interface com conectividade dupla foi de 0,98 mostrando uma alta qualidade de transmissão. Já, no cenário utilizando apenas o LTE o vídeo recebido pelo dispositivo obteve média SSIM igual a 0,55 mostrando uma alta degradação na qualidade do vídeo.

Figura 11. Média SSIM.



Fonte: Autoria Própria.

Com base nos resultados da Tabela 6 e no gráfico da Figura 10, fica claro que a média geral do SSIM do vídeo 4K simulado no sistema proposto é próximo a 1, sendo que valores altos são melhores para a métrica, o que significa uma correlação perfeita de duas imagens semelhantes.

Tabela 6. Valores da Métrica SSIM.

Valores	SSIM – 5G mmWave (DC)	SSIM – LTE
Valor Mín.	0,991059	0,524945
Valor Máx.	0,988992	0,558369
Valor Médio	0,988596	0,557932

O método leva em conta a correlação de perdas, distorção de luminância e distorção de contraste para a medição da degradação. O valor de SSIM pode variar de 0 a 1, sendo que na variação 1, a imagem recebida é exatamente igual a imagem original, ou seja, não há degradação.

5.2.2 Avaliação Objetiva – VQM

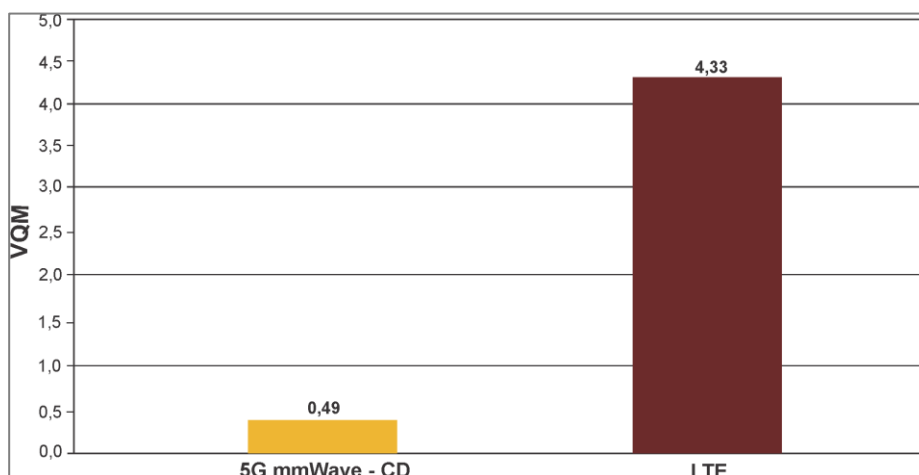
Considerando a métrica VQM, os vídeos que registram valores próximos de zero são considerados de boa qualidade e valores afastados de zero demonstram uma qualidade de transmissão ruim. De acordo com os dados apresentados na Tabela 7, os valores mínimos da métrica no sistema proposto e usando a interface LTE obtiveram 0,49 e 4,33 de VQM respectivamente.

Tabela 7. Valores da Métrica VQM.

Valores	VQM – 5G mmWave (CD)	VQM – LTE
Valor Mín.	0,498391	3,924853
Valor Máx.	0,537418	4,372938
Valor Médio	0,499727	4,339472

A Figura 11 apresenta os resultados da métrica VQM, em que identificamos valores próximos de 0 no cenário 5G mmWave – CD obtendo 0,49 de VQM demonstram uma ótima qualidade de transmissão. A transmissão no cenário LTE o vídeo obteve média 4,33 de VQM mostrando maior perda de qualidade e confirmando o quanto foi ruim a qualidade de transmissão do vídeo.

Figura 12. Média VQM.



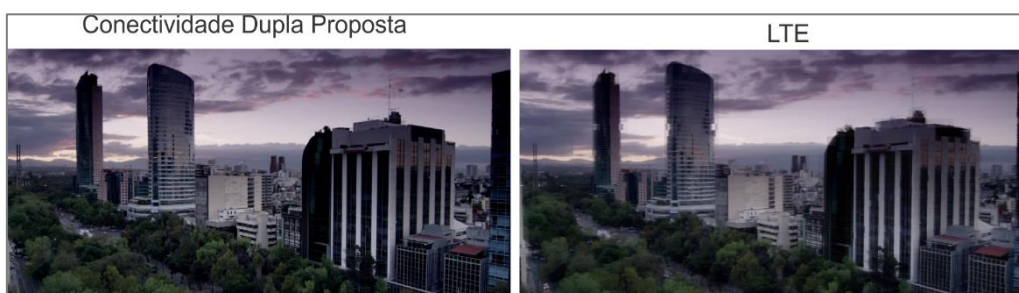
Fonte: Autoria Própria.

Segundo os dados mostrados na tabela 7 e na figura 11 acima, a média VQM para o vídeo 4K transmitido está próxima do melhor valor possível, possuindo pouca degradação. Já o vídeo transmitido apenas na interface LTE obteve uma média acima, comparado com a arquitetura proposta. Isso demonstra que em comparação a outra métrica citadas, também sofrem uma degradação bastante considerável. A métrica também usa o vídeo original e o degradado como entradas para avaliar a qualidade de vídeo.

5.2.3 Degradação dos Quadros e QoS

Levando em conta a perspectiva do usuário sobre o vídeo recebido, os *frames* dos vídeos transmitidos são comparados na Figura 12. Os quadros dão uma ajuda visual e conseqüentemente uma opinião sobre a qualidade do vídeo, permitindo comparar o desempenho de cada cenário.

Figura 13. Frames do Vídeo Transmitido.



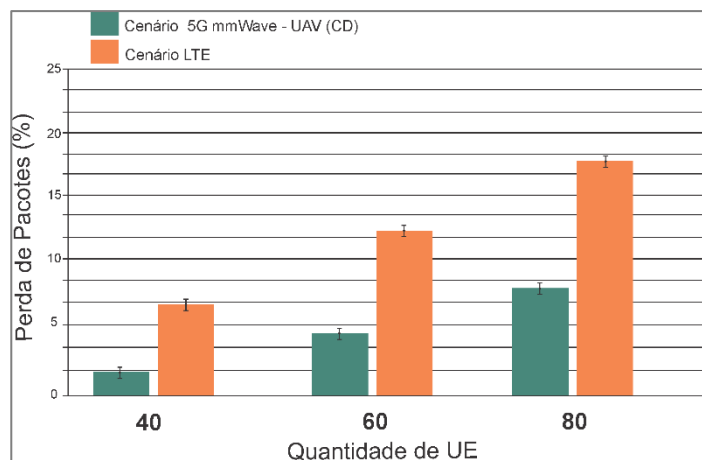
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 12 mostra os quadros do vídeo transmitido pelo sistema proposto e pela interface LTE. No cenário 2, usando apenas a interface LTE a qualidade do vídeo recebido é

pobre, sofrendo mais degradação, a qualidade dos quadros ficou bastante distorcida. A transmissão no cenário 1 com conectividade dupla, a qualidade do vídeo é visível, usuário apresentando excelente qualidade em relação ao cenário 2.

Para verificar melhor o desempenho da rede, consideramos dois parâmetros de QoS da rede, mesmo não sendo o principal foco da dissertação. Como utilizamos apenas o formato 4K para realizar a transmissão, fizemos uma variação na quantidade de UEs para realizar a avaliação da perda de pacotes e atraso durante o processo de transmissão.

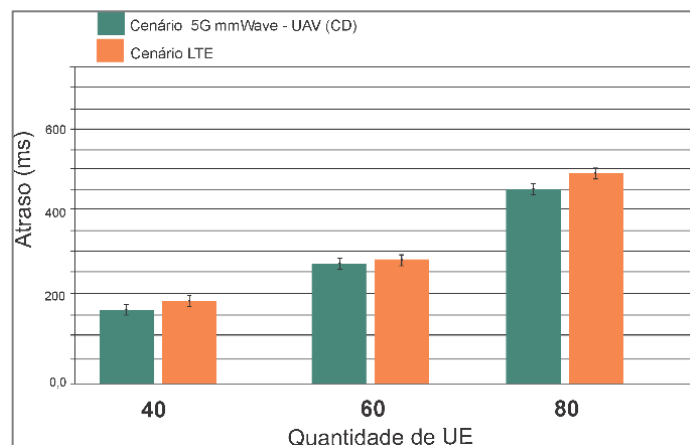
Figura 14. Resultados da Perda de Pacotes.



Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se que, para as quantidades de 40 a 80 UEs, tivemos um aumento na perda de pacotes com destaque maior no cenário LTE devido às limitações largura de banda e retransmissão. Para o cenário 5G mmWave habilitados para UAV de conectividade dupla, obtivemos melhores resultados em comparação com o cenário LTE, onde podemos relacionar com a análise QoE realizada.

Figura 15. Atraso Médio.



Fonte: Autoria Própria.

Para garantir melhor QoS em aplicações utilizando Streaming de vídeo 4K, analisamos também o atraso. Podemos observar na Figura 14, que o atraso aumentou proporcionalmente com o número de UEs conectados. Para a transmissão com 60 usuários conectados o atraso foi maior, mas similar ao resultado de 40 UEs. O cenário com 80 UEs tem resultados de atrasos piores que nos cenários de 40 e 60 UEs, mas para o cenário proposto foi melhor.

5.3 Conclusões do Capítulo

Analisando os resultados apresentados neste capítulo, é possível observar que a arquitetura proposta teve um desempenho satisfatório para fornecer garantias de conectividade e qualidade de experiência em streaming de vídeo 4K, proporcionando desta forma, maior cobertura contínua, melhor qualidade de transmissão e realizando comunicação ponta a ponta mais confiável.

6 Conclusões

Escrever esta dissertação de mestrado, como pesquisador na área de tecnologia da informação com ênfase em redes e telecomunicações representou um grande desafio, visto que essa área de pesquisa tem grande relevância para comunidade acadêmica bem como para a indústria. Discutir sobre essa temática cujo objetivo foi propor uma arquitetura 5G mmWave de conectividade dupla (CD) utilizando UAV-BS para fornecer garantias de conectividade, melhorar a cobertura e garantir qualidade de experiência em streaming de vídeo no formato 4K.

Os estudos dos referenciais teóricos para subsidiar esta pesquisa, ajudados pela minha análise em simulações multimídias utilizando vídeo, realizando comparações e testagens em diversos cenários de redes, permitiram-me uma melhor compreensão sobre os benefícios que as redes 5G mmWave irão proporcionar para aplicações multimídia utilizando vídeos como qualidade na transmissão, entrega confiável, menor distorção dos quadros permitindo uma melhor percepção do usuário. Ao longo desta dissertação, percebeu-se que a tecnologia 5G mmWave habilitadas para UAVs representa uma perspectiva para suprir o crescimento do tráfego de dados móveis.

Ficou evidenciado pelos resultados desta pesquisa, a viabilidade de se utilizar a arquitetura proposta para serviços multimídias utilizando vídeos, pois, conseguiu-se mais eficiência melhorando a Qualidade de Experiência em 43 % em comparação com a interface LTE, representado desta forma, uma melhor percepção do usuário durante o processo de transmissão. Além disso, percebeu-se que o vídeo 4K quando transmitido sofreu bastante dano na imagem tornando-se na maioria das vezes ruim ou pobre a qualidade, quando usado apenas da interface LTE.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, foram encontradas diversas dificuldades em relação a temática, principalmente, sobre o módulo mmWave que apresenta um grau de complexidade elevado para realizar a análise dos cenários utilizados. Por outro lado, outro desafio encontrado se dá pelo fato dos UAVs possuírem diversas características que precisam ser selecionadas para realizar as devidas simulações. Isso requer do pesquisador bastante tempo e seleções de pesquisas para embasamento teórico.

A utilização de BS aéreas usando UAVs tem sido visto como um complemento eficaz para os sistemas celulares atuais, para aumentar a capacidade sem fio e cobertura em cenários com demandas de tráfego ultradenso. Para implementar essa estrutura na prática, já temos diversos testes na prática sobre a tecnologia de UAVS, as principais áreas são sobre a modelagem de canal, planejamento da rede, gerenciamento de recursos, otimização de trajetória e eficiência energética. Portanto, a tecnologia atual de drones e outras tecnologias permitem que o sistema funcione corretamente.

Enfim, esta dissertação irá contribuir para a sociedade tecnológica, principalmente para a área da multimídia, redes e telecomunicações, visto que poderá servir de base para outros estudos a respeito de qualidade de experiência, haja vista que, apesar de ser realizado em redes 5G mmWave, ainda são muito tímidos os trabalhos sobre transmissões de *streaming* de vídeo realizados por UAVs em redes mmWave de conectividade dupla com qualidade de experiência utilizando o simulador NS-3.

6.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pretende-se verificar a qualidade de acordo com a mobilidade do usuário e conforme o mesmo vai se conectando em várias BS (avaliar o *handover*). Realizar a análise de cobertura variando a elevação do UAV e a distância horizontal para os UEs.

É relevante também investigar melhor o impacto das métricas de QoS e realizar outras simulações com diferentes tipos de resoluções e quadros de vídeos. Além disso, realizar uma comparação com outras métricas de QoE como MOS.

6.2 Produção Acadêmica

Os resultados obtidos nesta dissertação de mestrado foram publicados nos seguintes eventos:

1. PEREIRA, R. W. S.; SILVA, M. S. ; FERREIRA JUNIOR, J. J. H. . Análise de QoE para Streaming de Vídeo em Redes Aéreas 5G mmWave de Conectividade Dupla. In: IX Escola Regional de Computação do Ceará, Maranhão e Piauí, 2021, Quixadá CE. Anais da IX Escola Regional de Computação do Ceará, Maranhão e Piauí, 2021.
2. PEREIRA, R. W. S.; SILVA, M. S. ; FERREIRA JUNIOR, J. J. H. . QOE ASSESSMENT FOR VIDEO STREAMING OVER UAVASSISTED DUAL

CONNECTIVITY 5G MMWAVE NETWORKS. In: Brazilian Technology Symposium - BTSYM'21, 2021, Campinas SP. Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium - Emerging Trends and Challenges in Technology, 2021.

Referências

AFTABI MOMO, S. H.; MUNJURE MOWLA, M. Effect of human blockage on an outdoor mmWave channel for 5G communication networks. **2019 22nd International Conference on Computer and Information Technology, ICCIT 2019**, p. 18–20, 2019.

AGIWAL, M. et al. A Survey on 4G-5G Dual Connectivity: Road to 5G Implementation. **IEEE Access**, v. 9, p. 16193–16210, 2021.

AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 18, n. 3, p. 1617–1655, 2016.

AL-EMADI, S.; AL-MOHANNADI, A. Towards Enhancement of Network Communication Architectures and Routing Protocols for FANETs: A Survey. **3rd International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking, CommNet 2020**, 2020.

AL-SHAMMARI, B. K. J. et al. An Overview of mmWave Communications for 5G. **International Conference on Communication and Information Technology, ICICT 2021**, p. 133–139, 2021.

ALI MUTHANNA, M. S. et al. Analysis of the Advantages of Millimeter Waves for Video Traffic Transmission in 5G Networks. **Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020**, p. 51–53, 2020.

ALTHUNIBAT, S.; BADARNEH, O. S.; MESLEH, R. Random Waypoint Mobility Model in Space Modulation Systems. **IEEE Communications Letters**, v. 23, n. 5, p. 884–887, 2019.

BALDO, N. et al. An open source product-oriented LTE network simulator based on ns-3. **MSWiM'11 - Proceedings of the 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems**, p. 293–297, 2011.

BARB, G.; OTESTEANU, M. 4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G. **2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2020**, p. 37–40, 2020.

BHAJANTRI, L. B.; GANGADHARAIHAH, S. A comprehensive survey on resource management in internet of things. **Journal of Telecommunications and Information Technology**, v. 2020, n. 4, p. 27–43, 2020.

CAI, X. et al. Joint optimal multi-connectivity enabled user association and power allocation in mmWave networks. p. 1–6, 2021.

CHEN, W. C. 5G mmWAVE Technology Design Challenges and Development Trends. **2020 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test, VLSI-DAT 2020**, p. 5–8, 2020.

CRUZ, E. A Comprehensive Survey in Towards to Future FANETs. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 3, p. 876–884, 2018.

DAOUD, A. O.; TSEHAYAE, A. A.; FAYEK, A. R. A guided evaluation of the impact of research and development partnerships on university, industry, and government. **Canadian**

Journal of Civil Engineering, v. 44, n. 4, p. 253–263, 2017.

ERICSSON. Ericsson Mobility Report - November 2020. **Ericsson**, n. November, p. 36, 2020.

FENG, Z. et al. Spectrum Management for MmWave Enabled UAV Swarm Networks: Challenges and Opportunities. **IEEE Communications Magazine**, v. 57, n. 1, p. 146–153, 2019.

FOTOUHI, A.; DING, M.; HASSAN, M. DroneCells: Improving spectral efficiency using drone-mounted flying base stations. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 174, p. 1–14, 2021.

GURES, E. et al. A comprehensive survey on mobility management in 5G heterogeneous networks: Architectures, challenges and solutions. **IEEE Access**, v. 8, p. 195883–195913, 2020.

JULURI, P.; TAMARAPALLI, V.; MEDHI, D. Measurement of quality of experience of video-on-demand services: A survey. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 18, n. 1, p. 401–418, 2016.

KANG, J. et al. Optimizing the mmWave Channel Estimation Duration by Rate Prediction. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 2, p. 555–559, 2021.

KANG, S. et al. A dual-connection based handover scheme for ultra-dense millimeter-wave cellular networks. **2019 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2019 - Proceedings**, p. 0–5, 2019.

KHAN, M. A. et al. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols. **2017 1st International Conference on Latest Trends in Electrical Engineering and Computing Technologies, INTELLECT 2017**, v. 2018–Janua, p. 1–9, 2018.

KHAN, S. K. et al. Performance Evaluation of Next-Generation Wireless (5G) UAV Relay. **Wireless Personal Communications**, v. 113, n. 2, p. 945–960, 2020.

KHOSRAVI, Z. et al. Performance Evaluation of UAV-Assisted mmWave Operation in Mobility-Enabled Urban Deployments. **2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2018**, p. 1–5, 2018.

KOTTAS, T. F. Evaluation of LTE networks using NS-3 and Evalvid. n. October, 2017.

LAUDE, T. et al. A Comprehensive Video Codec Comparison. **APSIPA Transactions on Signal and Information Processing**, v. 8, n. 2019, 2019.

LI, B.; FEI, Z.; ZHANG, Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 2, p. 2241–2263, 2019.

LI, Z.; WANG, Y.; LIU, Y. Efficient Resource Allocation in UAV-BS Dual Connectivity Heterogeneous Networks. **9th International Conference on Information Science and Technology, ICIST 2019**, p. 234–239, 2019.

LIAO, K. et al. End-to-End Delay Analysis in mmWave UAV-assisted Wireless Caching Networks. [s.d.].

LIN, N. et al. A 3D smooth random walk mobility model for FANETs. **Proceedings - 21st IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, 17th IEEE International Conference on Smart City and 5th IEEE International Conference on Data Science and Systems, HPCC/SmartCity/DSS 2019**, p. 460–467, 2019.

LIOTOU, E. et al. Quality of experience management in mobile cellular network: Key issues and design challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 7, p. 145–153, 2015.

MEI, J.; WANG, X.; ZHENG, K. An intelligent self-sustained RAN slicing framework for diverse service provisioning in 5G-beyond and 6G networks. **Intelligent and Converged Networks**, v. 1, n. 3, p. 281–294, 2021.

MEZZAVILLA, M. et al. 5G mmWave Module for the ns-3 Network Simulator. [s.d.].

MEZZAVILLA, M. et al. End-to-end simulation of 5G mmWave networks. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 2237–2263, 2018a.

MEZZAVILLA, M. et al. End-to-end simulation of 5G mmWave networks. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 20, n. 3, p. 2237–2263, 2018b.

Millimeter wave is the missing piece of the 5G puzzle. n. October, 2021.

MINOPOULOS, G. et al. QoE Assessment of Video Codecs for Video Streaming over 5G Networks. **2020 3rd World Symposium on Communication Engineering, WSCE 2020**, p. 34–38, 2020.

MOHANTY, S. et al. Role of millimeter wave for future 5G mobile networks: Its potential, prospects and challenges. **1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology, ODICON 2021**, p. 5–8, 2021.

MONTEIRO, V. F. et al. Distributed RRM for 5G multi-rat multiconnectivity networks. **IEEE Systems Journal**, v. 13, n. 1, p. 192–203, 2019.

NIKHAT, S.; MEHMET-ALI, M. A Performance Evaluation of Millimeter-Wave Cellular Networks with User Mobility. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, v. 2018–May, p. 1–6, 2018.

NTONTIN, K.; VERIKOUKIS, C.; MEMBER, S. Relay-Aided Outdoor-to-Indoor Communication in Millimeter-Wave Cellular Networks. v. 14, n. 2, p. 2473–2484, 2020.

ÖHMANN, D. et al. Impact of mobility on the reliability performance of 5G multi-connectivity architectures. **IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC**, 2017.

ORTIZ, S. et al. A UAV-Based Content Delivery Architecture for Rural Areas and Future Smart Cities. **IEEE Internet Computing**, v. 23, n. 1, p. 29–36, 2019.

PARIDA, S.; MAJHI, S.; DAS, S. K. Wireless Powered Microwave and mmWave based Communication Networks - A Survey. **Proceedings of the 5th International Conference on Inventive Computation Technologies, ICICT 2020**, p. 98–102, 2020.

POLESE, M. et al. Improved Handover Through Dual Connectivity in 5G mmWave Mobile Networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 9, p. 2069–2084, 2017.

QUALCOMM. Future of 5G. n. February, p. 65, 2020.

RANGAN, S.; RAPPAPORT, T. S.; ERKIP, E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges. **Proceedings of the IEEE**, v. 102, n. 3, p. 366–385, 2014.

SALVA-GARCIA, P. et al. 5G-UHD: Design, prototyping and empirical evaluation of adaptive Ultra-High-Definition video streaming based on scalable H.265 in virtualised 5G networks. **Computer Communications**, v. 118, n. April 2017, p. 171–184, 2018.

SERRAL-GRACIÀ, R. et al. An overview of quality of experience measurement challenges for video applications in IP networks. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, v. 6074 LNCS, p. 252–263, 2010.

SEYBOLD, J. S. **Introduction to RF Propagation**. [s.l: s.n.].

SHAIKH, A.; KAUR, M. J. Comprehensive Survey of Massive MIMO for 5G Communications. **2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2019**, 2019.

SHAKERI, R. et al. Design Challenges of Multi-UAV Systems in Cyber-Physical Applications: A Comprehensive Survey and Future Directions. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 21, n. 4, p. 3340–3385, 2019.

SHAYEA, I. et al. Key challenges, drivers and solutions for mobility management in 5G networks: A survey. **IEEE Access**, v. 8, p. 172534–172552, 2020.

SHIBAGAKI, N.; KASHIMA, K.; SATO, Y. Millimeter-Wave-Based Fiber-Wireless Bridge Ethernet Data Connectivity. v. 36, n. 18, p. 3988–3998, 2018.

SOUSA, I.; QUELUZ, M. P.; RODRIGUES, A. A survey on QoE-oriented wireless resources scheduling. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 158, 2020.

SU, H. M.; MAW, A. H. Comparative Analysis of Video Streaming in Software Defined Networking. **Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Information Technologies, ICAIT 2020**, p. 12–17, 2020.

TAKAKU, Y. et al. Proof-of-Concept of Uncompressed 4K Video Transmission from Drone through mmWave. **2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2020**, p. 5–10, 2020.

UD DIN ARSHAD, Q. K.; KASHIF, A. U.; QUERSHI, I. M. A Review on the Evolution of Cellular Technologies. **Proceedings of 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST 2019**, p. 989–993, 2019.

WAHAB, A.; AHMAD, N.; SCHORMANS, J. Variation in QoE of Passive Gaming Video Streaming for Different Packet Loss Ratios. **2020 12th International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2020**, p. 1–4, 2020.

WANG, X.; GURSOY, M. C.; MEMBER, S. Coverage Analysis for Energy-Harvesting UAV-Assisted mmWave Cellular Networks. v. 37, n. 12, p. 2832–2850, 2019.

WICHTLHUBER, M. et al. RT-VQM: Real-time video quality assessment for adaptive video streaming using GPUs. **Proceedings of the 7th International Conference on Multimedia Systems, MMSys 2016**, p. 209–219, 2016.

XIAO, Z. et al. A Survey on Millimeter-Wave Beamforming Enabled UAV Communications and Networking. p. 1–54, 2021.

YANG, M. et al. Survey on QoE assessment approach for network service. **IEEE Access**, v. 6, p. 48374–48390, 2018.

YI, W. et al. A Unified Spatial Framework for UAV-Aided MmWave Networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. 67, n. 12, p. 8801–8817, 2019.

ZARAI, F.; BOUDRIGA, N.; OBAIDAT, M. S. Universal Mobile Telecommunications System. **Handbook of Computer Networks**, v. 2, p. 699–715, 2011.

ZENG, Y.; LYU, J.; ZHANG, R. Cellular-Connected UAV: Potentials, challenges and

promising technologies. **arXiv**, n. February, p. 120–127, 2018.

ZHOU, X. et al. Underlay drone cell for temporary events: Impact of drone height and aerial channel environments. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 2, p. 1704–1718, 2019.