

Qualidade de Vídeo em Redes de Acesso Fixo sem Fio com Gateways 5G: Uma Avaliação Objetiva

Paulo Silva, Flávio Silva, Mathews Lima, Nelson Ion, Matheus Doria, Antonio Campos, Augusto Neto e Vicente Sousa

Resumo— Este trabalho propõe uma avaliação objetiva da qualidade de vídeo em ambientes de Acesso Fixo sem Fio com gateways 5G, utilizando transmissão em resolução 4K como cenário de teste. O estudo considera quatro métricas para avaliar a qualidade de vídeo sob diferentes condições de rede e modulação. A metodologia envolve o uso do protocolo MPEG-DASH para transmissão adaptativa, com captura, reconstrução e comparação de vídeos degradados com o vídeo original. Os resultados mostram que ativar a modulação 256-QAM no enlace 5G proporciona desempenho superior, com maiores estabilidade, fidelidade perceptiva e taxa útil média maior do que com 64-QAM.

Palavras-Chave— Vídeo UHD, PSNR, SSIM, VMAF, Taxa útil de transmissão, 5G.

I. INTRODUÇÃO

O Acesso Fixo Sem Fio (*Fixed Wireless Access* – FWA) é uma tecnologia planejada para transformar o ambiente digital durante os estágios iniciais da implantação de sistemas celulares de quinta geração (5G). O FWA fornece serviços de Internet aos consumidores finais com custos de infraestrutura mais baixos, utilizando redes fixas dedicadas e redes móveis compartilhadas [1].

O FWA oferece opções de banda larga sem fio mais flexíveis para residências e empresas. Os dispositivos FWA 5G operam com taxas de transmissão compatíveis com o 5G New Radio (5G-NR) abaixo de 7 GHz [2] e estão sendo oferecidos por muitas operadoras do mundo. Contudo, essa taxa de transmissão pode não ser suficiente para transmissão de vídeo com definição ultra-alta (*ultra high definition* – UHD), caso esteja sendo compartilhada por múltiplos usuários.

Vídeos em UHD têm uma resolução de 3840 x 2160 pixels e seu *streaming* requer taxa específica para ser assistido com qualidade de experiência (QoE) [3]. De acordo com [4], a taxa útil (*throughput*) da conexão deve ser de pelo menos 25 Mbps, para assistir a um *streaming* de vídeo UHD com qualidade [4]. Outra exigência do *streaming* UHD é a latência e a confiabilidade, que podem oscilar devido a diversos fatores de rede.

Assim, alguns trabalhos têm investigado QoE para vídeo UHD. No estudo desenvolvido em [5], os autores investigaram

o acesso de *streaming* de vídeo UHD em redes de última milha 5G com redes locais FWA. Eles avaliaram o gargalo do enlace FWA em condições de rede congestionadas, considerando diferentes protocolos de taxa de bits adaptativa. Os autores usaram um ambiente simulado e comprovaram que o algoritmo BOLA (Buffer Occupancy based Lyapunov Algorithm) é o que apresenta melhor desempenho. Esse trabalho usou uma análise subjetiva de QoE.

Outros autores preferem utilizar uma análise objetiva de QoE. Na ferramenta VQMTK apresentada em [6], os autores integraram 14 métricas de vídeo. A ferramenta oferece uma interface web e um script Bash que combina todas as métricas em uma única ferramenta. Testes de desempenho demonstraram que a ferramenta é capaz de lidar com todas as métricas integradas usando amostras de vídeo 4K. A ferramenta pode ser usada em ambientes científicos e educacionais.

No trabalho proposto em [7], os autores apresentaram uma nova estrutura de avaliação projetada que se concentra na visão computacional em vez de métricas de qualidade perceptuais humanas. Foram utilizados modelos avançados de aprendizado de máquina e indicadores de qualidade de vídeo personalizados para aprimorar a precisão preditiva do desempenho do reconhecimento de objetos sob diversas condições.

No estudo divulgado em [8], os autores apresentaram um esquema de classificação para métodos de avaliação da qualidade de vídeo objetiva em camadas de mídia com referência completa e referência reduzida. O esquema classifica um método de acordo com as características visuais naturais ou perceptivas (do sistema visual humano) consideradas. Modelos objetivos de qualidade de vídeo, da camada de mídia, para vídeos de resolução padrão e de alta definição foram revisados e comparados exaustivamente.

Observa-se que, para entender melhor o desempenho do vídeo UHD em redes FWA 5G, deve-se entender como os parâmetros das redes podem afetar a avaliação da qualidade de vídeo. Assim, esse trabalho propõe uma análise de como métricas de desempenho de redes afetam as métricas de análise objetiva de qualidade de vídeo em uma rede 5G real.

II. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

Recentemente, tem havido uma necessidade crescente de desenvolver técnicas objetivas de medição de qualidade que possam prever automaticamente a qualidade percebida de imagem e vídeo. Esses métodos são úteis em uma variedade de aplicações de processamento de imagem e vídeo [9].

Todos os autores são do Leading Advanced Technologies Center of Excellence (LANCE), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, E-mails: flavio.silva.016@ufrn.edu.br, paulo.eduardo.093@ufrn.edu.br, mathews.lima.085@ufrn.edu.br, nelson@imd.ufrn.br, matheus.fagundes.067@ufrn.edu.br, antonio.campos@ufrn.br, augusto@dimap.ufrn.br, vicente.sousa@ufrn.edu.br. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Nas últimas três décadas, um grande esforço foi feito para desenvolver métodos objetivos de avaliação da qualidade de imagem e vídeo, que incorporam medidas de qualidade perceptual considerando as características do sistema visual humano. O grupo de especialistas em qualidade de vídeo (Video Quality Experts Group - VQEG) foi formado para desenvolver, validar e padronizar novos métodos objetivos de medição para a qualidade do vídeo [8].

Para avaliar o desempenho da aplicação FWA na transmissão de vídeo em resolução 4K, serão utilizadas as métricas objetivas complementares de análise: Relação sinal-ruído de pico (*Peak Signal-to-Noise Ratio* - PSNR), Índice de medida da similaridade estrutural (*Structural Similarity Index Measure* - SSIM) e Fusão de Avaliação Multimétodo de Vídeo (*Video Multimethod Assessment Fusion* - VMAF). A métrica PSNR será empregada para mensurar a fidelidade numérica entre o vídeo original e o vídeo recebido, considerando o erro de reconstrução em nível de pixel. O PSNR é amplamente utilizado porque é simples de calcular, tem significados físicos claros e é matematicamente fácil de lidar para fins de otimização. Quanto maior o PSNR, melhor a qualidade do vídeo [8], [10], [11]. Um PSNR maior que 30 dB, geralmente, é considerado de boa qualidade. Se o PSNR for menor que 20 dB, ocorre uma degradação perceptível.

Essa métrica pode não refletir adequadamente a percepção visual, o que justifica o uso conjunto da SSIM, que avalia a similaridade estrutural entre os quadros com base em luminância, contraste e textura, fornecendo uma visão mais alinhada à qualidade percebida pelo usuário. Para uma avaliação de qualidade mais precisa, deve-se considerar usar o SSIM e/ou o VMAF [12]–[14].

O índice SSIM fornece uma medida quantitativa da qualidade do outro sinal de imagem. O SSIM compara luminância, contraste e estrutura de imagens. Os valores variam de -1 a 1 , em que 1 significa similaridade perfeita [8].

O VMAF é uma métrica baseada em aprendizado de máquina desenvolvida pela Netflix. Ela combina vários recursos de qualidade (e.g., perda de detalhes ou blocos) em uma única pontuação perceptual entre 0 e 100 [15]. Se seu valor estiver entre 90 e 100, tem-se uma excelente qualidade de vídeo.

Além dessas métricas de qualidade de vídeo, este trabalho utiliza a taxa útil no enlace FWA (enlace 5G) e no enlace Wi-Fi, para analisar o quanto essas taxas influenciam na qualidade dos vídeos.

III. METODOLOGIA DOS TESTES

Os testes de qualidade de vídeo apresentados neste artigo foram realizados no *testbed* 5G ilustrado na Fig. 1. O sistema 5G é composto de um núcleo de rede (5G Core - 5GC) Open5GS [16] e uma rede de acesso 5G (gNB) baseada na pilha srsRAN [17]. O *front-end* de rádio frequência foi implementado por meio de uma placa de rádio definido por *software* (*Universal Software Radio Peripheral* - USRP), modelo Ettus B210, manipulada pela Interface de Programação de Aplicações (*Application Programming Interface* - API)

USRP Hardware Driver (UHD). O *Gateway* FWA é um *smartphone* Motorola G50 5G, que recebe sinal 5G da gNB e o roteia via Wi-Fi para as estações dos clientes finais. As estações Wi-Fi são *notebooks* e computadores *desktops* utilizando o Wi-Fi 5. O enlace 5G tem 20 MHz de largura de banda e adaptação de enlace em duas configurações: (i) MCS_{max} com 64-QAM, permitindo ordens de modulação com 2, 4 e 6 bits por símbolo; e (ii) MCS_{max} com 256-QAM, que inclui a ordem de modulação 8 na maior MCS e MIMO 2x2. A escolha do Esquema de Modulação e Codificação (*Modulation and Coding Scheme* - MCS) é feita com base na qualidade do enlace, com maior MCS (maior ordem de modulação) para enlaces de melhor qualidade. As estações Wi-Fi estão a 4,5 m do roteador FWA, que está 3 m da gNB.

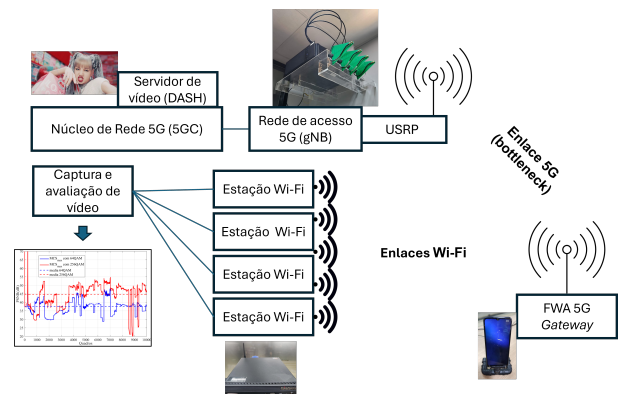


Fig. 1: *Testbed* 5G para medição de qualidade de vídeo 4K.

O vídeo de entrada é processado para cinco resoluções (4K, Full HD, HD, SD e nSD - baixa resolução), cada uma com taxas de bits específicas. O áudio é codificado em Codificação de Áudio Avançada (*Advanced Audio Coding* - AAC) com 128 kbps, e os segmentos DASH são configurados com duração de 2 segundos. Os *scripts* para realização do experimento foram projetados para operar em sistemas baseados em Linux com as ferramentas FFmpeg, Ffprobe e MP4Box instaladas. A metodologia envolve sete etapas principais:

- 1) Configuração do ambiente do Servidor MPEG-DASH.
- 2) Codificação de áudio.
- 3) Codificação de vídeo.
- 4) Geração do manifesto DASH.
- 5) Captura dos pacotes.
- 6) Reconstrução de vídeos.
- 7) Cálculo de métricas.

Cada etapa é descrita brevemente a seguir.

1) *Configuração do ambiente do servidor*: A configuração do ambiente do servidor envolve a instalação das ferramentas Docker (versão 28.0.1, *build* 068a01e), FFmpeg (versão 4.4.2-0ubuntu0.22.04.1), MP4Box (GPAC, versão 2.0-rev2.0.0+dfsg1-2) e da biblioteca VMAF (*Release* v3.0.0 - *commit*: b9ac69e6); a criação dos diretórios para armazenar o vídeo original e o vídeo segmentado; bem como o *download* do vídeo *Big Buck Bunny* (4K, 60 fps) e seu corte para uma duração de 3 minutos (10800 quadros).

2) *Codificação de áudio e vídeo*: O áudio é extraído e codificado em AAC (128 kbps). Foram geradas múltiplas versões do vídeo, com diferentes resoluções e taxas de bits, de forma a viabilizar a adaptação dinâmica à largura de banda disponível. Todas as versões foram codificadas utilizando o *codec* H.264. A Tabela I apresenta as resoluções adotadas, bem como as respectivas taxas de bits atribuídas a cada categoria de qualidade.

TABELA I: Resoluções e respectivas taxas de bits utilizadas.

Categoria	Resolução	Taxas de bits (Mbps)
4K	3840×2160	18, 16 e 14
Full HD	1920×1080	12 e 10
HD	1280×720	8 e 6
SD	854×480	5, 4 e 3
Baixa resolução	640×360	2.5, 2 e 1.8

3) *Geração do Manifesto DASH*: O MP4Box cria o manifesto e os segmentos com 2 segundos cada. Foi utilizado o perfil `dashavc264:live` para garantir compatibilidade com *streaming* ao vivo.

4) *Captura dos pacotes*: O vídeo degradado, que é recebido nas estações Wi-Fi, é salvo pelo procedimento de captura dos pacotes do vídeo por meio das ferramentas de monitoramento de tráfego `tcpdump` e `Wireshark`. O `tcpdump` é utilizado para salvar o tráfego em um arquivo `.pcap`, enquanto o `Wireshark` é utilizado para filtrar os pacotes relacionados aos segmentos DASH, exportando em um arquivo com extensão `.csv`.

5) *Reconstrução de vídeos*: Após a captura dos pacotes, um *script* em Python foi desenvolvido para: (i) Baixar os segmentos recebidos do servidor DASH, de acordo com a resolução recebida de cada um; (ii) Concatenar segmentos agrupados por resolução recebida (cada mudança de resolução gera um novo grupo com segmentos correspondentes a essa resolução); (iii) Descarte de segmentos repetidos, que tenham sido recebidos pelo usuário durante a transmissão do vídeo; (iv) *Upscaling* dos grupos de segmentos concatenados para a qualidade de referência (i.e., 3840x2160); e finalmente, (v) Concatenação de todos os grupos, gerando o vídeo degradado final.

6) *Cálculo de Métricas*: As métricas PSNR, SSIM e VMAF são computadas por meio do `FFmpeg`, com os filtros `psnr`, `ssim` e `libvmaf`, comparando o vídeo original (`Video-Original.mp4`) com o vídeo degradado (`Video-Degradado.mp4`). Os comandos utilizados foram:

- **PSNR**: `ffmpeg -i Video-Original.mp4 -i Video-Degradado.mp4 -lavfi "[0:v][1:v]psnr=stats_file=psnr.txt" -f null (calcula a PSNR e grava no arquivo psnr.txt).`
- **SSIM**: `ffmpeg -i Video-Original.mp4 -i Video-Degradado.mp4 -lavfi "[0:v][1:v]ssim=stats_file=ssim.txt" -f null (calcula o SSIM e grava no arquivo ssim.txt).`
- **VMAF**: `ffmpeg -i Video-Original.mp4 -i Video-Degradado.mp4 -lavfi "[0:v][1:v]libvmaf=log_path=vmaf.xml"`

`-f null` (calcula o VMAF e grava no arquivo `vmaf.xml`).

IV. RESULTADOS

Além das três métricas objetivas de qualidade de vídeo (PSNR, SSIM, VMAF), que são complementares (como discutido na Seção II), as taxas úteis dos enlaces envolvidos na entrega do vídeo serão analisadas. Essas quatro métricas, combinadas, oferecem uma avaliação robusta e abrangente do desempenho do serviço de vídeo 4K sobre FWA, permitindo entender tanto os aspectos técnicos de telecomunicações quanto a qualidade final entregue ao usuário.

A Fig. 2 mostra a comparação da métrica de qualidade de vídeo PSNR em dB ao longo dos quadros do vídeo para duas configurações de MCS máxima do *testbed*. O MCS com taxa máxima de modulação de 64-QAM (MCS_{max} com 64-QAM) apresenta mais quedas abruptas e prolongadas na PSNR (ex.: entre quadros 6000 a 9000) e raramente ultrapassa os 37,6 dB, o que é razoável. Isso mostra maior sensibilidade às variações do canal ou do conteúdo transmitido, com quedas frequentes na qualidade. Já para um MCS com taxa máxima de modulação de 256-QAM (MCS_{max} com 256-QAM), observa-se um melhor desempenho global, com média de PSNR superior e menos quedas abruptas. O uso de 256-QAM provoca picos de PSNR, chegando a mais de 60 dB, o que representa uma excelente qualidade de reconstrução do vídeo. A média está por volta de 45 dB, superior à da MCS_{max} com 64-QAM. Os picos iniciais muito altos podem indicar condições de canal muito favoráveis nos primeiros quadros. Além de maior média e menos oscilações bruscas de PSNR, a configuração MCS_{max} com 256-QAM apresenta menos perdas de qualidade de vídeo no experimento. Isso sugere que as condições de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) do enlace 5G FWA são favoráveis ao uso de maiores MCSs (com modulação 256-QAM), proporcionando melhor desempenho final em qualidade de vídeo.

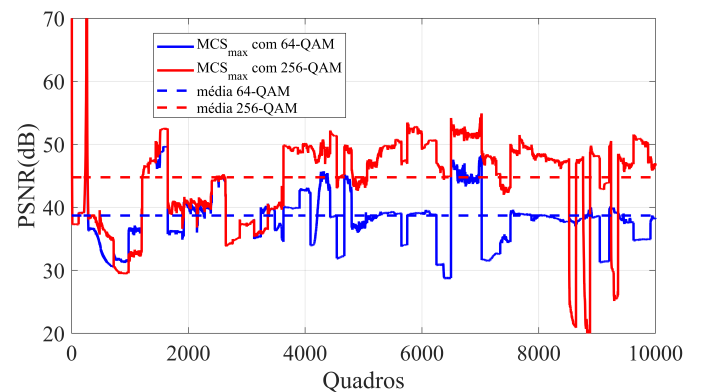


Fig. 2: PSNR (dB) em função dos quadros recebidos.

A Fig. 3 ilustra a comparação do SSIM para 10.000 quadros de vídeo, considerando as duas configurações de taxa máxima de modulação, 64 e 256-QAM. Para a configuração MCS_{max} com 64-QAM, observa-se uma maior instabilidade, com várias quedas abruptas abaixo de 0,90 e, em alguns trechos extremos, chega a valores abaixo de 0,75. A média (linha azul tracejada)

está ligeiramente abaixo de 0,92, indicando que, apesar dos picos bons, as quedas frequentes prejudicam a qualidade média perceptual. Essas quedas provavelmente refletem falhas temporárias na transmissão de um vídeo com compressão, que afetam a estrutura visual dos quadros. Para MCS_{max} com 256-QAM, pode-se observar que se mantém valores de SSIM consistentemente elevados, a maior parte do tempo acima de 0,95. A média (linha vermelha tracejada) está próxima de 0,973, indicando excelente qualidade perceptiva. Há poucos momentos de queda significativa e, quando ocorrem, o sistema tende a se recuperar rapidamente. Assim, pode-se mostrar que a configuração MCS_{max} com 256-QAM é mais estável e com melhor preservação da estrutura visual dos quadros. Já a configuração MCS_{max} com 64-QAM é mais suscetível a distorções estruturais perceptíveis. Isso reforça a análise feita por meio da PSNR, a configuração do *testbed* proporciona condições favoráveis de SNR no enlace 5G FWA, que refletem no maior uso de modulações de alta ordem. Isso se reflete em maior aproveitamento do canal e melhor qualidade de vídeo.

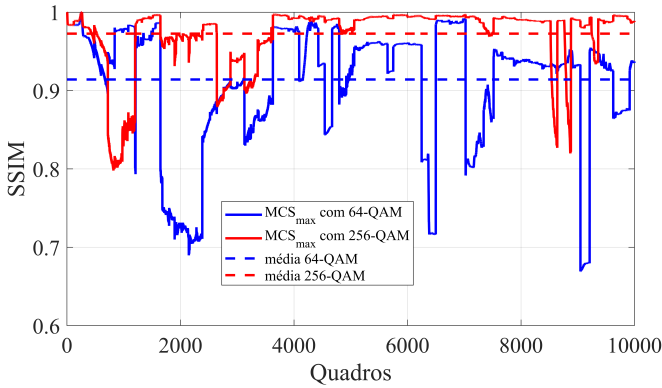


Fig. 3: SSIM em função dos quadros recebidos.

Fig. 4 ilustra a variação do VMAF ao longo dos quadros do vídeo 4k baixado, comparando as duas configurações de MCSs máximas testadas. Para a configuração MCS_{max} com 64-QAM, observam-se oscilações mais frequentes, com algumas quedas abruptas, abaixo de 70%. Apesar disso, mantém-se um desempenho razoável, com boa parte dos quadros com VMAF acima de 80%. A média (linha tracejada azul) está um pouco abaixo da média obtida na configuração MCS_{max} com 256-QAM, indicando uma qualidade média ligeiramente inferior. Para a configuração MCS_{max} com 256-QAM, ocorrem oscilações iniciais mais intensas, inclusive com quedas acentuadas entre os quadros 8000 e 9500, com valores abaixo de 60%. No entanto, o comportamento é estável, com valores consistentemente altos, acima de 90%. A média (linha tracejada vermelha) é maior que a média da configuração MCS_{max} com 64-QAM, indicando desempenho global superior. A melhor estabilidade e média de qualidade perceptual da configuração MCS_{max} com 256-QAM confirma o padrão já observado nas métricas de PSNR e SSIM. As quedas iniciais mais severas sugerem que o canal pode ter passado por momentos de instabilidade ou adaptação, o que impactou temporariamente a qualidade.

Outra métrica importante para avaliar o desempenho do

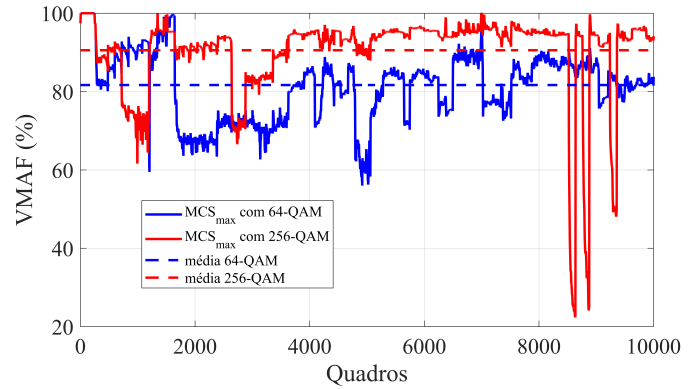


Fig. 4: VMAF (%) em função dos quadros recebidos.

canal de comunicação, em cenários de acesso fixo sem fio, é a taxa útil ao longo do tempo. A taxa útil é a taxa efetiva na recepção, contabilizando os bits recebidos corretamente.

A Fig. 5 mostra a taxa útil do enlace 5G FWA obtida nos experimentos para as duas configurações testadas. A configuração MCS_{max} com 64-QAM apresenta taxas menores. A taxa útil média é 16 Mbps. Já para a configuração MCS_{max} com 256-QAM apresenta taxa útil mais alta. Para esta configuração, a taxa média ficou próxima de 19 Mbps. Isso confirma que a configuração MCS_{max} com 256-QAM e 20 MHz, promove maior taxa útil em situações favoráveis de canal, como a configurada no *testbed* deste artigo. Contudo, mesmo com condições de canal favoráveis, a capacidade de transmissão do enlace FWA na configuração MCS_{max} com 64-QAM e 20 MHz foi capaz de manter a qualidade do vídeo 4k de forma estável. Com a configuração MCS_{max} com 256-QAM, a taxa útil mostra alguns vales profundos, quedas temporárias, mas mantém um nível médio mais elevado ao longo do tempo e atinge picos superiores a 35 Mbps, enquanto a configuração MCS_{max} com 64-QAM raramente ultrapassa 30 Mbps.

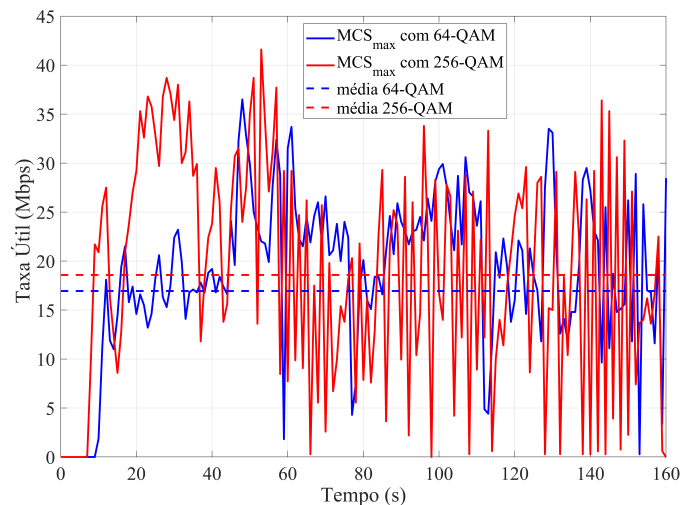


Fig. 5: Taxa útil (Mbps) em função dos quadros recebidos.

Todos os resultados mostrados até o momento consideram uma estação Wi-Fi. A Tabela II mostra os resultados para

experimentos com três estações Wi-Fi conectadas, comparando os valores médios das métricas do experimento com somente uma estação Wi-Fi. As configurações do enlace FWA 5G são as mesmas dos experimentos anteriores. Os valores entre parênteses na tabela representam a diferença entre o desempenho com um e três estações Wi-Fi. Como esperado, todas as métricas sofrem redução com o aumento do número de estações Wi-Fi, que concorrem pelos recursos de transmissão do enlace FWA 5G. É possível perceber também que a redução de desempenho é menor para a configuração MCS_{max} com 256-QAM, pois, nessa configuração, o enlace FWA 5G tem mais capacidade de absorver demanda por taxa de transmissão.

TABELA II: Desempenho das métricas para diferentes modulações e número de usuários.

Métrica	MCS _{max} 64-QAM		MCS _{max} 256-QAM	
	1	3	1	3
PSNR (dB)	38,70	37,63 (-1,07)	44,79	44,37 (-0,42)
SSIM	0,91	0,89 (-0,02)	0,97	0,96 (-0,01)
VMAF (%)	81,67	80,23 (-1,44)	91,10	90,55 (-0,55)
Taxa útil (Mbps)	16,95	13,82 (-3,13)	18,58	15,57 (-3,01)

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação objetiva da qualidade de vídeo transmitido por enlaces de Acesso Fixo sem Fio com Gateways 5G, considerando conteúdos em resolução 4K. Por meio da medição das métricas PSNR, SSIM, VMAF e da análise da taxa de útil, foi possível observar o impacto direto da escolha da taxa máxima de modulação da adaptação de enlace no desempenho final da transmissão.

Os resultados demonstraram que a MCS com modulação máxima de 256-QAM proporciona ganhos significativos em qualidade de vídeo em relação à MCS com 64-QAM como modulação máxima. A modulação de ordem superior apresentou maior fidelidade visual, menos variações abruptas e uma taxa útil de transmissão média superior, confirmando sua viabilidade técnica para aplicações de vídeo UHD em ambientes FWA. Observou-se coerência de resultado qualitativo entre métricas objetivas e análise de *throughput* ao avaliar a experiência do usuário em redes 5G FWA.

Trabalhos futuros incluem a avaliação de outras configurações do *testbed*, incluindo configurações MIMO, maior largura de banda, comparação de algoritmos de escalonamento na gNB, diferentes numerologias do NR, maior número de estações conectadas e a coleta de outras métricas do enlace 5G FWA (e.g., taxa de erro, SNR, distribuição de MCSs).

REFERÊNCIAS

- [1] H. Asplund, D. Astely, P. von Butovitsch, T. Chapman, M. Frenne, F. Ghasemzadeh *et al.*, *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments: Bridging the Gap Between Theory and Practice*. Amsterdam: Academic Press, 2020.
- [2] K. Topyan and M. Ulema, "Architectural and Financial Considerations for Deploying 5G Based Fixed Wireless Access," in *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.

- [3] J. Navarro-Ortiz, P. Romero-Diaz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. J. Ramos-Munoz, and J. M. Lopez-Soler, "A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 905–929, 2020.
- [4] T. Kimura, T. Kimura, A. Matsumoto, and K. Yamagishi, "Balancing Quality of Experience and Traffic Volume in Adaptive Bitrate Streaming," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 15 530–15 547, 2021.
- [5] K. H. Khan and W. Goodridge, "Ultra-HD Video Streaming in 5G Fixed Wireless Access Bottlenecks," in *Proceedings of the International Conference on Computer Engineering and Communication Networks (CECNet)*, 2021.
- [6] W. Moína-Rivera, J. Gutiérrez-Aguado, and M. Garcia-Pineda, "Video Quality Metrics Toolkit: An Open Source Software to Assess Video Quality," *SoftwareX*, vol. 23, p. 101427, 2023.
- [7] S. Chikkerur, V. Sundaram, M. Reisslein, and L. J. Karam, "Objective Video Quality Assessment Methods: A Classification, Review, and Performance Comparison," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 57, no. 2, pp. 165–182, Jun. 2011.
- [8] M. Leszczuk, L. Janowski, J. Nawala, and A. Boev, "Objective Video Quality Assessment Method for Object Recognition Tasks," *Electronics*, vol. 13, p. 1750, 2024.
- [9] K. Ma, Z. Wang, X. Jin, J. Wang, H. Zhang, Y. Zhang, S. Liu, X. Wang, L. Yu, and L. Ma, "Perceptual Video Quality Assessment: A Survey," *arXiv preprint arXiv:2402.03413*, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2402.03413>
- [10] M. Vranješ, S. Rimac-Drlje, and D. Žagar, "Objective video quality metrics," in *Proceedings of the 49th International Symposium ELMAR-2007*, Zadar, Croatia, Sep. 2007.
- [11] Z. Wang, E. Simoncelli, and A. Bovik, "Multiscale structural similarity for image quality assessment," in *Conf. Rec. 37th Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, vol. 2, 2003, pp. 1398–1402.
- [12] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, 2004.
- [13] Z. Wang, L. Lu, and A. C. Bovik, "Video quality assessment using structural distortion measurement," in *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, Rochester, NY, USA, 2002.
- [14] Z. Wang, L. Lu, and A. Bovik, "Video quality assessment based on structural distortion measurement," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 19, no. 2, pp. 121–132, Feb. 2004.
- [15] R. Rassool, "Vmaf reproducibility: Validating a perceptual practical video quality metric," in *2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, Cagliari, Italy, 2017, pp. 1–2.
- [16] Open5GS Project, "Open5GS: Open Source 5G/4G EPC and 5GC," <https://open5gs.org/>, 2025, acessado em: 21 maio 2025.
- [17] srsRAN Project, "srsRAN: Open Source 4G and 5G Software Radio Suite," <https://www.srsran.com/>, 2025, acessado em: 21 maio 2025.