

Avaliação de Desempenho da Transmissão de Vídeo em uma Rede 5G Privada Utilizando Soluções de Código Aberto

Rilbert L. da Silva, Rafael C. Chaves, Ruan D. Gomes, Otacílio de A. Ramos Neto, Michel C. Dias

Resumo— Na Indústria 4.0, aplicações de visão computacional exigem altas taxas de bits para transmitir imagens obtidas ao longo das plantas industriais para processamento na borda ou na nuvem. As redes 5G privadas podem atender a esse requisito e também oferecer baixa latência, o que é necessário para a integração com sistemas de controle. Nesse contexto, este artigo descreve um *testbed* de rede 5G privada para analisar o desempenho da transmissão de vídeo a partir de um dispositivo final para um servidor de borda via rede 5G. Foram avaliadas as taxas de bits e de quadros para diferentes resoluções de vídeo.

Palavras-Chave— Redes 5G privadas, transmissão de vídeo, Indústria 4.0.

Abstract— In Industry 4.0, computer vision applications require high bit rates to transmit images obtained throughout an industrial plant for processing at the edge or in the cloud. Private 5G networks can meet this requirement and also offer low latency, which is necessary for integration with control systems. In this context, this article describes a private 5G network testbed to analyze the performance of video transmission from an end device to an edge server via a 5G network. Bit rates and frame rates for different video resolutions were evaluated.

Keywords— Private 5G networks, video transmission, Industry 4.0.

I. INTRODUÇÃO

A pesquisa sobre redes de quinta geração (5G) tem crescido significativamente, impulsionada pelos casos de uso eMBB (*enhanced Mobile Broadband*), mMTC (*massive Machine Type Communications*) e URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*), que demandam alta taxa de transmissão de dados, capacidade de conectar inúmeros dispositivos e baixa latência. As redes 5G introduzem a desagregação do sistema em funções de rede menores, como a função de autenticação, controle de sessão e plano de dados, agrupadas para executar as finalidades de transmissão. O núcleo da rede (*Core Network* - CN) utiliza uma arquitetura baseada em serviços (*Service-Based Architecture* - SBA), enquanto a Rede de Acesso de Rádio (*Radio Access Network* - RAN) é dividida em Unidade de Rádio (RU), Unidade Centralizada (CU) e

Unidade Distribuída (DU) [1]. Projetos de código aberto, como Free5GC para o CN [6] e OpenAirInterface para a RAN [9], viabilizam a construção de redes 5G.

Uma característica importante da tecnologia 5G é a possibilidade de criação de redes privadas, especialmente no contexto da implantação de sistemas para a Indústria 4.0. A flexibilidade de uma rede 5G privada, atendendo a requisitos distintos através do fatiamento de rede, segurança cibernética robusta, e a operação em espectro protegido de interferências, apresenta um conjunto de vantagens no cenário de conectividade industrial. Diversos países, incluindo o Brasil, dedicaram parte do espectro para esta finalidade. Esse movimento cria oportunidades de negócios para operadoras de redes móveis (*Mobile Network Operators* - MNOs), como também capacita atores industriais e não MNOs a implementar suas próprias redes 5G privadas [2].

Este artigo avalia o desempenho de um sistema de distribuição de vídeo em *uplink* (UL) conectado a uma rede 5G privada, utilizando soluções de código aberto para a implementação da rede 5G. O método usado para avaliação consiste em realizar medições na infraestrutura de rede 5G, utilizando os *softwares* Free5GC para o CN, OpenAirInterface para a RAN e o Rádio Definido por *Software* (*Software-Defined Radio* - SDR) USRP B210 como RU. Com isso, foram analisados os parâmetros de latência e a taxa de transmissão de dados de *downlink* (DL) e UL, bem como o envio de fluxos de vídeo em UL, visando medir a taxa de quadros por segundo (*Frames per second* - FPS) e a taxa de bits úteis sendo consumidas pela aplicação de vídeo, para diferentes resoluções (de VGA até 4K).

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II descreve a estrutura e funcionamento de uma rede 5G utilizando implementações de código aberto; a Seção III aborda os trabalhos relacionados; a Seção IV descreve a especificação do *testbed* e funcionamento do *software* de distribuição de vídeo desenvolvido para realizar o experimento; A Seção V apresenta os resultados e discussões sobre os testes realizados; e, por fim, a seção V apresenta as conclusões do estudo, trazendo perspectivas de trabalhos futuros.

II. ESTRUTURA E *Softwares* DE CÓDIGO ABERTO PARA REDES 5G

O *Core Network* (CN) refere-se ao sistema que contempla funções para a autenticação, controle e gerenciamento do plano de dados dos usuários que tentam realizar o registro em sua base. Algumas das *Network Functions* (NFs) mais

Rilbert L. da Silva é discente do Mestrado em Engenharia Elétrica do IFPB (PPGEE), Campus João Pessoa, e-mail: rilbert.lima@academico.ifpb.edu.br; Rafael C. Chaves é discente de Graduação em Engenharia Elétrica do IFPB, Campus João Pessoa, e-mail: rafael.cavalcante@academico.ifpb.edu.br. Ruan D. Gomes é professor do PPGEE e do PPGTI no IFPB, Campus João Pessoa. Otacílio de A. Ramos Neto é professor do IFPB, Campus Guarabira. Michel C. Dias é professor da unidade acadêmica de indústria do IFPB, Campus João Pessoa. e-mails: {ruan.gomes, otacilio.amos, michel.dias}@ifpb.edu.br. Este trabalho é parcialmente apoiado pela EMBRAPA e pelas empresas Cisco, Prysmian e MPT Cable. Os autores também agradecem ao CNPq (305536/2021-4), ao IFPB e ao Polo de Inovação do IFPB.

importantes são a *Access and Mobility Management Function* (AMF), a *Session Management Function* (SMF), e a *User Plane Function* (UPF). A AMF encarrega-se de gerenciar o acesso e a mobilidade dos usuários na rede, coordenando a autenticação e autorização de dispositivos móveis e assegurando uma transição eficiente entre células e redes. Já o SMF supervisiona e controla as sessões de comunicação dos usuários e alocação de endereço IP, além de gerir a entrega de dados conforme o serviço requisitado pelo equipamento do UE. Por fim, a UPF é responsável pelo roteamento do tráfego de dados entre o UE e a rede externa [4]. Além disso, uma das características importantes que o CN possui é a divisão do plano de controle e do plano de usuário, sendo assim, pode-se aumentar ou reduzir os recursos alocados para a execução de um dos planos, sem que isso afete o outro [1].

Um dos projetos de CN que possui código aberto é o Free5GC, sendo este desenvolvido pela *National Yang Ming Chiao Tung University*. Ele oferece todos os componentes de *software*, em conformidade com os padrões da *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), a partir da *Release-15*. O Free5GC destaca-se por sua flexibilidade e modularidade, sendo compatível com sistemas operacionais de código aberto, o que amplia as opções de *hardware* suportadas e facilita a escalabilidade conforme a demanda da rede, além de possuir diversas pesquisas no meio acadêmico acerca de segurança [6], automação e inteligência de gerenciamento de redes que utilizam essa solução para o CN [7].

A RAN é a parte da rede que lida com a comunicação, transmissão e recepção de dados sem fio entre o UE e o CN da rede 5G. Com relação à desagregação, a RAN é dividida em blocos funcionais menores (RU, CU e DU) que podem ser executados em locais diferentes, seja na própria célula, em servidores na borda ou servidores na nuvem, conforme ilustrado na Figura 1.

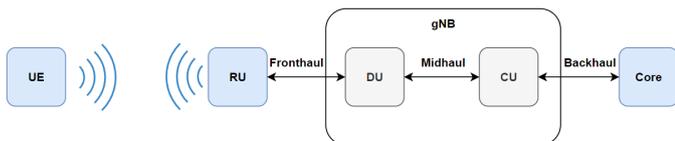


Fig. 1. Estrutura padrão de redes 5G (Baseado em [3]).

Mais especificamente, a CU é responsável por realizar o controle centralizado da RAN, de modo a gerenciar funções como: alocação de recursos, encriptação e proteção de integridade dos dados, coordenação de células e otimização de desempenho. Já a DU é responsável pela conexão entre a CU e a RU, realizando o processamento de sinais. Com isso, a DU lida com a codificação, decodificação, modulação, demodulação e mapeamento dos canais de transporte dos sinais oriundos ou destinados à RU. A RU é a interface do meio aéreo que permite a conexão entre o UE e a infraestrutura de rede 5G [1].

Para realizar a conexão e comunicação entre os módulos da gNB são utilizados os conceitos de *Fronthaul*, *Midhaul* e *Backhaul*. O *Fronthaul* é responsável pela comunicação entre a RU e o DU, dando suporte à conexão de camada de baixo nível e comunicação física de baixa latência, sendo conhecida

como *splits*. Já o *Midhaul* é responsável pela comunicação entre o DU e a CU através da interface F1, e também por conexões entre outras gNBs, utilizando a interface Xn. Por fim, o *Backhaul* é responsável pela comunicação da CU e o CN, através da interface NG [8].

Dentre os projetos de RAN que possuem código aberto está o OpenAirInterface 5G (OAI 5G), desenvolvido pela Eurecom. Ele oferece toda a pilha de *software* para implementação da RAN em conformidade com os padrões do 3GPP. Essa plataforma apresenta-se como uma alternativa flexível e acessível para a pesquisa, experimentação e desenvolvimento de tecnologias nas redes 5G. A flexibilidade do OAI 5G advém da capacidade de realizar a divisão funcional entre a CU e a DU, facilitando a escalabilidade do sistema e também possui suporte a separação de conexão entre a DU e a RU, chamados de *splits*. Pode-se utilizar o fracionamento tipo 7.2x, com RUs comerciais, e o tipo 8, por meio do uso de um SDR [9].

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Alguns trabalhos encontrados na literatura realizaram a avaliação de desempenho em cenários de rede 5G privada, utilizando implementações de código aberto e SDR.

Em [11], foram comparados dois *softwares* de RAN para redes 5G *standalone* (srsRAN e OpenAirInterface), utilizando o SDR USRP B210 no modo *Single-Input, Single-Output* (SISO). O OpenAirInterface apresentou menor latência média e maior taxa de transmissão de dados (DL), alcançando até 123,78 Mbps, devido à modulação de 256 QAM, enquanto o srsRAN suporta apenas 64 QAM. A maior latência do srsRAN é atribuída à falta de implementação do procedimento de *Radio Resource Control*.

No estudo [12], foram realizados testes de transmissão de dados e medição de latência na infraestrutura 5G. Em um cenário, imagens RAW em 4K foram transmitidas em DL do servidor para a UE, usando a USRP B210 no modo SISO, na frequência de 3,75 GHz e com largura de banda de 40 MHz. A taxa de bits alcançada foi cerca de 35 Mbps, similar ao teste com *iPerf*. No cenário de avaliação de latência, utilizando ping e um *software* de controle de pêndulo invertido, obteve-se uma latência média de 8,8 ms e 10,21 ms, respectivamente.

No estudo [13], é descrito um *testbed* de redes 5G SA privada de baixo custo usando soluções de código aberto, visando difundir o uso de *softwares* de redes 5G para pesquisa acadêmica e industrial. O *testbed* incluía dois servidores para CN e RAN, um módulo Quectel RM500Q-GL como UE e o SDR USRP B210 como RU, configurado a 3,72 GHz e 40 MHz de largura de banda. Foram apresentados resultados de desempenho com *iPerf* e *ping* no sentido UL, mostrando uma latência média de 11 ms e uma taxa de bits média de 8,38 Mbps.

No estudo [14], foi testada uma rede 5G SA *indoor* usando OpenAirInterface como CN e RAN, com o módulo RM500Q-GL como UE e as SDRs USRP B210 e N310 como RU, operando a 3,45 GHz com canais de 40 MHz e 60 MHz, respectivamente. A latência média foi de 8,51 ms (USRP B210) e 8,256 ms (USRP N310). A taxa de transferência foi de 126 Mbps (DL) e 18 Mbps (UL) para a USRP B210, e 390

Mbps (DL) e 28 Mbps (UL) para a USRP N310. A análise da área de cobertura mostrou valores de RSRP (*Reference Signal Received Power*) de -100 dBm a -121 dBm, RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) de -11 dB a -16 dB e SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*) de 1,0 dB a 18,0 dB em diferentes pontos de um escritório.

Dos trabalhos descritos, apenas [12] realizou uma avaliação considerando a transmissão de imagens nos testes. No entanto, foi considerado apenas o envio de imagens RAW no sentido de DL, não sendo analisados os desafios e limitações para envio de fluxos de vídeo em UL. Nas aplicações de visão computacional na Indústria 4.0 deve-se realizar a transmissão de vídeo no sentido de UL, de modo que imagens capturadas em diferentes partes da indústria possam ser processadas por uma infraestrutura de computação na borda ou na nuvem. Além disso, neste artigo é feita a avaliação da transmissão de vídeo codificado usando MJPEG para seis resoluções diferentes, partindo de VGA (640x480) até 4K (4096x2160).

IV. ESPECIFICAÇÃO DO Testbed E METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para a implementação do *testbed* são necessários servidores para executar as funções de DU, CU e do sistema de distribuição de vídeo (aplicação), bem como o *hardware* de RU para as transmissões e recepções no meio aéreo, além do UE que se conecta a essa infraestrutura.

Para o sistema de captura de vídeo, foi utilizada uma câmera Logitech Brio 4K conectada a uma Raspberry Pi 4 Model B, utilizando o Sistema Operacional Ubuntu 22.04. Já para os demais módulos, como as funções de rede do CN, RAN e do *software* de distribuição de vídeo, foram utilizados dois servidores com as configurações idênticas de *hardware*:

- OS: Ubuntu 20.04.6 LTS
- CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1240 v5 @ 3.50GHz (4 cores / 8 threads)
- RAM: 32 GB DDR4 - 2133 MHz
- SSD: 480 GB - Leitura: 500 MB/s - Escrita: 450 MB/s

Toda a configuração de rede 5G ficou no primeiro servidor e os demais módulos de distribuição de vídeo ficaram no segundo servidor.

No *testbed* foi utilizado o módulo 5G Quectel RM520N-GL como UE, conectado à Raspberry Pi 4 por meio de uma porta USB 3.0. O Quectel RM520N-GL conecta-se diretamente à infraestrutura 5G por meio da interface aérea e envia os fluxos de vídeo capturados da câmera pela Raspberry para a RU da rede 5G, conforme mostrado na Figura 2. O UE opera na banda N78, que usa a faixa de frequência de redes 5G privadas (3,7 GHz a 3,8 GHz), além de possuir uma alta taxa de transmissão de dados, necessários para atender a avaliação de desempenho da aplicação de vídeo.

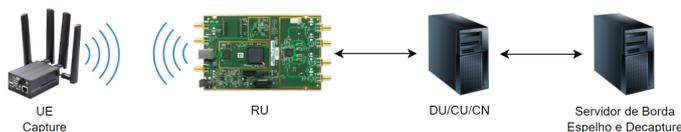


Fig. 2. Testbed utilizando o UE Quectel conectado a rede 5G.

Foi utilizada um SDR USRP B210 como RU, configurado com uma frequência central de 3,72 GHz. A USRP B210 possui uma largura de banda de até 40 MHz, com um *Subcarrier Spacing* de 30 kHz e operando no modo SISO, sendo este um limitante na taxa de transferência de dados, tanto em UL como em DL, em comparação com outras soluções de RU. A distância entre a RU a UE foi de 1,5 m, em um ambiente *indoor*. Os elementos de *hardware* que compõem o testbed são mostrados na Figura 3.



Fig. 3. Testbed real da rede 5G (UE à esquerda, servidores no centro e a RU do lado direito).

Além disso, foi utilizado um sistema de gravação e leitura de *Subscriber Identity Module* (SIM), composto pelos equipamentos *Omnikey CardMan 3121* e *sysmoISIM-SJA2*. Na configuração do cartão SIM, utilizou-se o *Public Land Mobile Network* (PLMN) de testes internacionais (00101) [15].

A. Software de Distribuição de Vídeo

O *software* de distribuição de vídeo utilizado neste artigo foi implementado de acordo com a arquitetura mostrada na Figura 4. Esse sistema é composto por três módulos fundamentais: o *Capture*, instalado no dispositivo de captura para encapsular as imagens em pacotes e enviar o fluxo de vídeo ao servidor de distribuição; o servidor de distribuição (Espelho), que faz o encaminhamento dos fluxos de vídeo para as máquinas responsáveis pelo processamento; e o *Decapture*, instalado nas máquinas de processamento para remontar os quadros e disponibilizar o fluxo de vídeo para as aplicações.

A transmissão do fluxo de vídeo é feita utilizando os protocolos TCP ou UDP na camada de transporte, onde um deles é selecionado no início da comunicação. Para os testes realizados neste artigo, foi utilizado TCP. É importante mencionar que os três componentes do *software* de distribuição de vídeo podem ser executados na mesma máquina ou em máquinas diferentes. Nos experimentos realizados para este artigo os módulos de Espelho e *Decapture* foram executados em uma mesma máquina de borda da rede 5G.

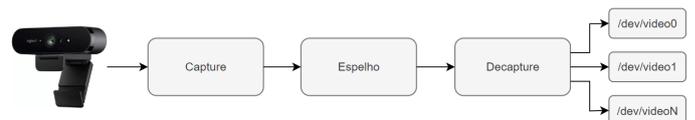


Fig. 4. Esquema de distribuição de vídeo.

V. RESULTADOS

Para a análise de desempenho, realizou-se testes iniciais de latência e taxa de transmissão de dados (vazão) de DL e

UL da interface aérea, compreendendo a comunicação da UE até o servidor de RAN e CN (Cenário 1), bem como testes de transmissão para o servidor de borda, compreendendo a comunicação do UE até o servidor que foi usado para executar os módulos de *software* da aplicação de vídeo (Espelho e *Decapture*) (Cenário 2). Esses testes iniciais foram realizados com a ferramenta *iPerf*. Posteriormente, executou-se o sistema de distribuição de vídeo, obtendo a taxa de quadros e a taxa de bits úteis do fluxo de vídeo consumido no servidor de borda.

Para a latência, obteve-se os gráficos mostrados nas Figuras 5 e 6, sendo respectivamente para os Cenários 1 e 2. Para o Cenário 1, tem-se o valor máximo de latência de 21,8 ms, com uma média de 12,45 ms e um valor mínimo de 7,48 ms. Já para o Cenário 2, o valor máximo de latência é de 23,9 ms, com uma média de 12,5 ms e um valor mínimo de 7,57 ms.

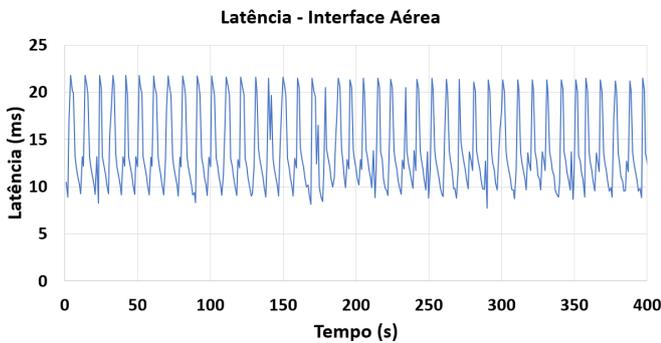


Fig. 5. Latência medida entre o serviço de captura e a interface aérea.

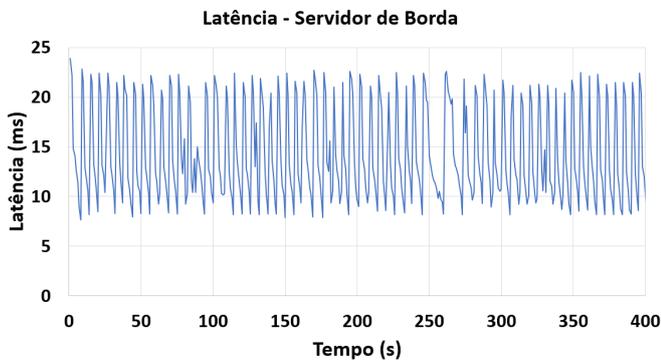


Fig. 6. Latência medida entre o serviço de captura e o servidor de borda.

Para a vazão, os valores obtidos são apresentados nos gráficos de *uplink* e *downlink*, como mostrado nas Figuras 7 e 8 para os cenários 1 e 2, respectivamente. Para o Cenário 1 observa-se o valor máximo de vazão de 81,90 Mbits/s, com uma média de 55,6 Mbits/s e um valor mínimo de 9,67 Mbits/s para o *downlink*. Já para o *uplink*, o valor máximo é de 30,50 Mbits/s, com uma média de 19,70 Mbits/s e um valor mínimo de 9,32 Mbits/s. Para o Cenário 2, o valor máximo é de 111 Mbits/s, com um valor médio de 94,4 Mbits/s e um valor mínimo de 13,30 Mbits/s para o *downlink*. Neste caso, o valor máximo é próximo ao alcançado em [11]. Já para o *uplink*, obteve-se o valor máximo de 31,5 Mbits/s, com um valor médio de 21 Mbits/s e um valor mínimo de 2,07 Mbits/s.

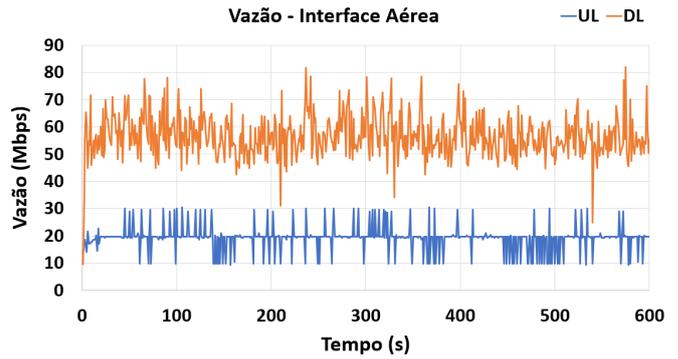


Fig. 7. Vazão em Mbits/s medida entre o serviço de captura e a interface aérea.

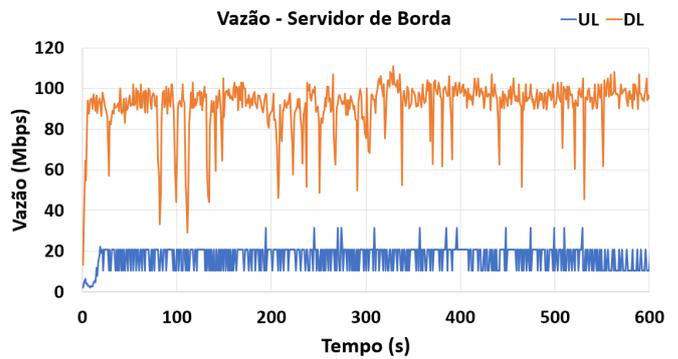


Fig. 8. Vazão em Mbits/s medida entre o serviço de captura e o servidor de borda.

Nota-se uma redução nos valores de vazão tanto de DL como de UL no Cenário 1 (interface aérea) em comparação com o Cenário 2 (servidor de borda). Essa característica dá-se pela sobrecarga do servidor que está processando o CN e RAN, em comparação ao servidor de borda. Portanto, ao executar a ferramenta *iPerf* no mesmo servidor utilizado para executar o CN e RAN, aconteceu uma sobrecarga, o que ocasionou uma queda de desempenho.

Após os testes iniciais com *iPerf*, foi executado o sistema de distribuição de vídeo. As taxas de bits e de quadros obtidas pelo *software Decapture* durante esse teste, para as diferentes resoluções de vídeo, são mostradas nas Figuras 9 e 10, respectivamente. É possível notar que a taxa de bits úteis foi similar para todas as resoluções, uma vez que há uma limitação da vazão de *uplink* da interface aérea, como verificado nos testes iniciais (valor médio de 21 Mbits/s). Por outro lado, nota-se que a taxa de quadros por segundo diminui à medida que a resolução aumenta, como esperado, sendo de 27 quadros por segundo na resolução VGA e chegando a um valor de aproximadamente 2,5 quadros por segundo na resolução 4K.

A partir desses resultados, percebe-se que é possível transmitir vídeo no sentido de UL, porém, nota-se algumas restrições. Devido à utilização de MJPEG (única codificação oferecida pela câmera na resolução 4K), obteve-se fluxos com altas taxas de bits. Utilizando outros tipos de codificadores, como H.264 ou H.265, espera-se atingir taxas de quadros

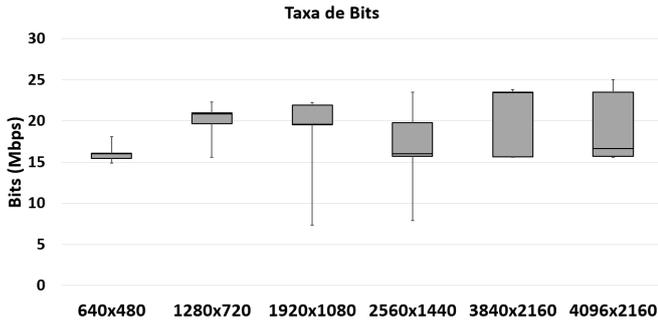


Fig. 9. Taxa de bits obtidas com o *software* de distribuição de vídeo.

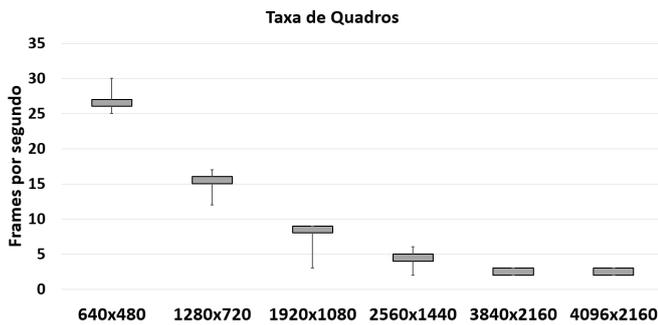


Fig. 10. Taxa de quadros obtidas com o *software* de distribuição de vídeo.

maiores, devido à redução na taxa de bits dos fluxos gerados. Também é importante mencionar que o equipamento de rádio utilizado é limitado, pois possui apenas uma largura de banda de 40 MHz, reduzindo a capacidade de transmissão de dados da rede 5G. Utilizando SDRs de maior capacidade ou RUs comerciais pode-se chegar a taxas de bits de UL bem maiores, o que viabilizaria alcançar altas taxas de quadro também para as resoluções mais altas. Esses aspectos serão considerados em trabalhos futuros.

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo descreve os resultados de um estudo de desempenho visando avaliar a transmissão de vídeo a partir da UE para um servidor de borda utilizando uma rede 5G privada, implementada com soluções de código aberto para a RAN e para o CN. O *testbed* construído é descrito e avaliado com testes iniciais para verificar a taxa de bits e a latência em dois cenários distintos, sendo o primeiro executando a aplicação cliente na mesma máquina que executa as funções de rede da RAN e do CN, e o segundo executando a aplicação cliente em outro servidor de borda. Verificou-se que ao executar a aplicação no mesmo servidor que executa as funções de rede, a taxa de bits obtida foi menor, devido à sobrecarga de processamento no servidor.

Posteriormente, foi realizada a avaliação do sistema de transmissão de vídeo utilizando a rede 5G. Para o cenário avaliado (imagens codificadas com MJPEG) verificou-se que a taxa de quadros obtida na aplicação que executa no servidor de borda varia de 27 (resolução VGA) a 2,5 quadros por segundo (resolução 4K). Embora a taxa de quadros seja baixa para altas resoluções (devido às limitações na taxa de bits de UL)

é possível implementar aplicações que não requerem a obtenção de muitas imagens por segundo (ex: monitoramento de sistemas ou estruturas estáticas ou com movimentação lenta). No entanto, taxas de quadros maiores podem ser alcançadas ao utilizar codificadores mais eficientes e RUs que ofereçam maiores taxas de bits de UL.

Como perspectiva de trabalhos futuros, propõe-se a utilização de SDR ou RUs comerciais que possuam uma maior largura de banda para transmissão e recepção com o *software* de distribuição de vídeo, bem como a avaliação de desempenho utilizando outros tipos de codificadores de vídeo, como H.264 e H.265. Além disso, pretende-se realizar estudos comparativos da rede 5G com outras tecnologias de redes sem fio, a exemplo de redes Wi-Fi 6.

REFERÊNCIAS

- [1] Dahlman, E., Parkvall, S. e Skold, J. 5G NR The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2nd edition, 2020.
- [2] Aijaz, A. Private 5G: The future of industrial wireless. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol 14, no 4. IEEE, 2020.
- [3] Software Radio Systems. O-RAN gNB Overview. Disponível em: https://docs.srsran.com/projects/project/en/latest/knowledge_base/source/oran_gnb/source/index.html. Acesso em: 20 de Maio 2024.
- [4] Jalalian, A., Yousefi, S. e Kunz, T. Network slicing in virtualized 5G Core with VNF sharing. Journal of Network and Computer Applications, vol. 215, 2023.
- [5] Dryjanski, M. 5G Core Network – Architecture, Network Functions, and Interworking. Disponível em: <https://www.rfglobalnet.com/doc/g-core-network-architecture-network-functions-and-interworking-0001>. Acesso em: 20 de Maio 2024.
- [6] Pepito, R. e Dutta, A. Open Source 5G Security Testbed for Edge Computing. IEEE 4th 5G World Forum (5GWF), 2021.
- [7] Kim, T., Kim, J., Ko, H., Seo, S., Jcon, Y., Jeong, H., Lee, S. e Pack, S. An Implementation Study of Network Data Analytic Function in 5G. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2022.
- [8] International Telecommunication Union. Characteristics of transport networks to support IMT-2020/5G. Disponível em: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=s&id=T-REC-G.8300-202005-I!!PDF-E&type=items. Acesso em: 20 de Maio 2024.
- [9] Nikaein, N., Marina, M. K., Manickam, S., Dawson, A., Knopp, R. e Bonnet, C. OpenAirInterface: A flexible platform for 5G research. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 44, no. 5, 2014.
- [10] Varga, P., Peto, J., Franko, A., Balla, D., Haja, D., Janky, F., Soos, G., Ficzer, D., Maliosz, M., Toka, L. 5G support for Industrial IoT Applications— Challenges, Solutions, and Research gaps. Sensors, vol. 20, no. 3, 2020.
- [11] Alves, R. P., Alves, J. G. A. da S., Camelo, M. R., Feitosa, W. O., Monteiro, V. F. e Cavalcanti, F. R. P. "Experimental comparison of 5G SDR platforms: srsRAN x OpenAirInterface". XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrt2023), São José dos Campos, Brazil, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2406.01485.
- [12] John, F., Sievers, B., Sellhorn, O. H. e Hellbrück, H. "Two Industrial Reference Demonstrators for High Throughput and Low Latency in 5G-Standalone (SA) Network Setups". ITG-Fachbericht 311: Mobilkommunikation, 2023.
- [13] John, F., Schuljak, J., Vosteen, L. B., Sievers, B., Hanemann, A. e Hellbrück, H. "A Reference Deployment of a Minimal Open-Source Private Industry and Campus 5G Standalone (SA) System". 10th International Conference on Information, Communication and Networks, Zhangye, China, 2022, doi: 10.1109/ICIN56848.2022.10006563.
- [14] Sahbafard, A., Schmidt, R., Kaltenberger, F., Springer, A. e Bernhard, H. "On the Performance of an Indoor Open-Source 5G Standalone Deployment". Wireless Communications and Networking Conference, Glasgow, Reino Unido, 2023, doi: 10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437264.
- [15] Cooper, P. "Not all 5G is equal: Interoperability between devices in private 5G networks today". Disponível em: <https://zeetta.com/blog/not-all-5g-is-equal/>. Acesso em: 26 de Julho 2024.