

Avaliação de Redes Wi-Fi para Transmissão de Vídeo no Contexto da Indústria 4.0

Jefferson Maxmiliano O. das Mercês (IFPB, Campus João Pessoa), Ruan Delgado Gomes (IFPB, Campus João Pessoa) e Marcelo Portela Sousa (IFPB, Campina grande)

Área de conhecimento:(Tabela CNPq): 3.04.06.03-0 Sistemas de Telecomunicações.

Palavras-Chave: Wi-Fi 6, Wi-Fi 5, Rede *Ethernet*, 5G.

1 Introdução

O padrão Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) implementa melhorias significativas em relação ao seu predecessor, o Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac), e atende às crescentes demandas de conectividade em ambientes de alta densidade e aplicações em tempo real, como *streaming* de vídeo em alta resolução (Tokhirov, Ezozbek; Aliev, Ravshan, 2023). Essas inovações também são relevantes no contexto industrial, onde a conectividade confiável e de alto desempenho é crucial para a eficiência operacional e automação de processos (FERNANDES et al., 2021). Embora o Wi-Fi ofereça maior flexibilidade operacional, ele não assegura o mesmo nível de confiabilidade e estabilidade das redes cabeadas. Dessa forma, mesmo com os avanços dos padrões de redes sem fio, as redes cabeadas permanecem essenciais na infraestrutura, assegurando confiabilidade, estabilidade e altas taxas de transmissão.

Para aprimorar a análise das tecnologias de rede Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e cabeada no contexto de aplicações de visão computacional, foi desenvolvido um *testbed* para avaliar cada tecnologia de maneira independente e comparar suas funcionalidades em diversos cenários. Métricas como vazão, taxa de perda de pacote e número máximo de clientes suportados por cada tecnologia foram analisadas. Essas métricas são importantes para determinar se as aplicações empregadas na Indústria 4.0 operam de forma eficiente com cada tecnologia. Este estudo visa auxiliar a tomada de decisão sobre implementação e otimização de redes, garantindo conectividade eficaz e confiável em ambientes industriais.

Para os experimentos, foram gerados tráfegos de rede a partir de múltiplos clientes, utilizando taxas de dados correspondentes a transmissões de vídeo codificadas em MJPEG (*Motion JPEG*) em diferentes resoluções. Avaliou-se o desempenho da rede para diversas larguras de canal, tanto em redes Wi-Fi 5 quanto em Wi-Fi 6, empregando o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) na camada de transporte.

Os resultados desta avaliação demonstram variações significativas de capacidade e confiabilidade entre as tecnologias analisadas. Para ampliar o alcance das conclusões e investigar soluções mais abrangentes, é fundamental examinar outras tecnologias sem fio e seu potencial de integração com redes 5G. Pesquisas adicionais possibilitam a compreensão de como múltiplas arquiteturas de rede podem colaborar para atender aos requisitos das aplicações industriais (SEGURA et al., 2024).

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve a Metodologia Experimental; a Seção 3 apresenta os resultados; e a Seção 4 apresenta as Considerações Finais e direcionamentos para trabalhos futuros.

2 Metodologia Experimental

O estudo experimental foi realizado utilizando 14 computadores, sendo um deles responsável por atuar como servidor e 13 como clientes. A Figura 1 apresenta a arquitetura adotada no *testbed*, onde o servidor está conectado ao *Access Point* (AP) AX 3600 EAP660 HD por meio de uma conexão *Ethernet*, enquanto os clientes conectam-se via Wi-Fi na faixa de frequência de 5,8 GHz. Para a avaliação do desempenho da rede cabeada, um *switch* Huawei S5735-L48T4X-A1 foi utilizado para interligar os computadores, utilizando cabos Cat 6 UTP.

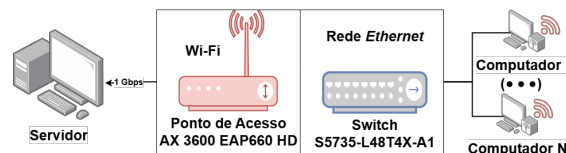


Figura 1: Arquitetura do *testbed* para avaliação de redes Wi-Fi e *Ethernet*.

Os testes foram realizados em redes locais sem acesso à Internet. No cenário de rede sem fio, os computadores e o ponto de acesso foram posicionados de modo a garantir potência de sinal entre -36 dBm e -55 dBm. O ponto de acesso utilizado possibilitou a variação da largura de canal entre 20 MHz e 80 MHz, conforme a configuração do teste, tanto para Wi-Fi 5 quanto para Wi-Fi 6. Cada sessão de teste teve uma duração de 5 minutos; posteriormente, um cliente adicional era introduzido, resultando em múltiplos clientes transmitindo dados de forma simultânea. Esse procedimento foi repetido até atingir 13 clientes simultaneamente enviando dados ao servidor.

Dois *scripts* em linguagem C foram desenvolvidos para implementar o experimento. O primeiro, executado no servidor, configura as portas lógicas para comunicar-se com os clientes e salva os dados coletados em um arquivo CSV (*Comma-Separated Values*). O segundo, executado nos clientes, gera tráfego UDP direcionado ao servidor em taxa de bits constante, o que possibilita a medição de parâmetros como *throughput* e taxa de perda de pacotes no servidor. Após configurar o servidor, um *script* em Python estabelece conexões SSH com os clientes para iniciar seus respectivos programas. Ao final dos experimentos, os dados coletados foram processados e analisados por meio de *scripts* em Python.

As taxas de bits consideradas no experimento baseiam-se nos requisitos de transmissão de vídeo para diversas resoluções e foram obtidas a partir da codificação de um fluxo de vídeo MJPEG a 28 FPS (*Frames per Second*), conforme detalhado na Tabela 1 (NETO et al., 2024).

Tabela 1: Taxas de bits necessárias para diferentes resoluções de vídeo usadas no experimento

Nome	Resolução de vídeo (px)	Bitrate (Mbps)
VGA (<i>Video Graphics Array</i>)	640 × 480	2,54
WVGA (<i>Wide Video Graphics Array</i>)	800 × 480	3,83
XGA (<i>Extended Graphics Array</i>)	1024 × 768	5,52
HD (<i>High Definition</i>)	1280 × 720	8,03
UXGA (<i>Ultra Extended Graphics Array</i>)	1600 × 1200	12,67
FHD (<i>Full High Definition</i>)	1920 × 1080	19,09
QUADHD (<i>Quad High Definition</i>)	2560 × 1440	109,84
DCI 4K (<i>Digital Cinema Initiatives 4K</i>)	4096 × 2160	185,02

Ao final dos experimentos, os dados coletados foram processados e analisados por meio de *scripts* em Python.

3 Resultados

A Figura 2 apresenta o número máximo de clientes suportados por cada tecnologia e configuração de rede em várias resoluções de vídeo. O estudo estabeleceu um limiar de perda de pacotes de 8%, valor que assegura 24 quadros por segundo em média e qualidade visual satisfatória (MONTEIRO et al., 2024). O gráfico resume o desempenho de cada tecnologia conforme o número de clientes e das exigências de taxa de dados.

Os resultados demonstram que o Wi-Fi 6 proporciona um gerenciamento de tráfego superior em ambientes densos, quando utilizando canais de maior largura. Recursos avançados, como MU-MIMO (*Multiple-User Multiple-Input Multiple-Output*) e OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*), aprimoram a efi-

ciência espectral e ampliam o suporte a múltiplos dispositivos em simultâneo. Especificamente, o MU-MIMO no Wi-Fi 6 suporta até oito conexões simultâneas, o dobro do Wi-Fi 5 (MOZAFFARIAHRAR; THEOLEYRE; MENTH, 2022). Embora o Wi-Fi 6 traga avanços significativos, a adoção de redes cabeadas ainda é fundamental para garantir qualidade de serviço em aplicações industriais e de alta demanda.

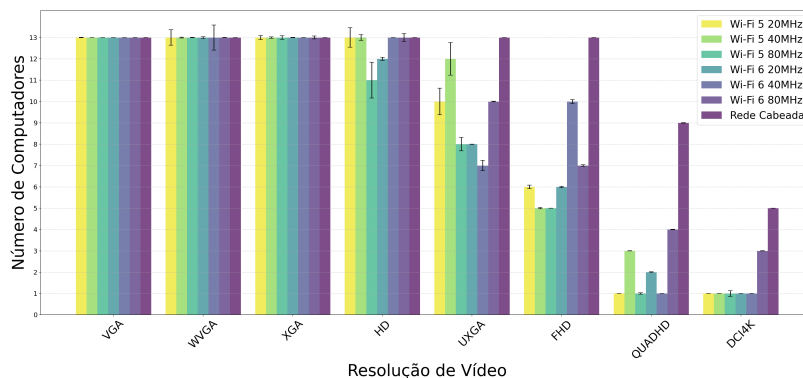


Figura 2: Capacidade de Computadores por Resolução (8% Perda de Pacotes).

4 Considerações Finais e Trabalhos Futuros

O estudo conduziu 2.184 testes comparativos entre redes Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e cabeada para avaliar o desempenho de cada tecnologia em diferentes cenários. Com base nas combinações de taxas de transferência e no número de clientes utilizados, os resultados fornecem parâmetros para selecionar a tecnologia que melhor atende a cada aplicação, pois revelam a capacidade de transferência e o número máximo de clientes suportados simultaneamente por cada solução. Como trabalhos futuros, propõe-se estender a análise ao Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax na banda de 6 GHz), replicar este experimento em um ambiente industrial real e realizar uma comparação com redes 5G privadas.

Agradecimentos

Agradecemos à EMBRAPPII (BFA2301.0001), Cisco, Prysmian, MPT Cable e CNPq (305536/2021-4).

Referências

- FERNANDES, M. d. M. et al. Industrial automation as a service: A new application to industry 4.0. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 12, p. 2046–2053, 2021. Doi.org/10.1109/TLA.2021.9480146.
- MONTEIRO, L. V. et al. L4s in private 5g industrial networks: A case study for real-time video transmission in programmable networks. In: *2024 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–4.
- MOZAFFARIAHRAR, E.; THEOLEYRE, F.; MENTH, M. A survey of Wi-Fi 6: Technologies, advances, and challenges. *Future Internet*, v. 14, n. 10, p. 293, 2022. Doi.org/10.3390/fi14100293.
- NETO, O. R. et al. Middleware para aplicações distribuídas de vídeo com suporte à computação na borda na indústria 4.0. In: *Proceedings of the 30th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2024. p. 215–222. ISSN 0000-0000. Doi.org/10.5753/webmedia.2024.242927. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/webmedia/article/view/30315>>.
- SEGURA, D. et al. An empirical study of 5g, wi-fi 6, and multi-connectivity scalability in an indoor industrial scenario. *IEEE Access*, v. 12, p. 74406–74416, 2024.
- Tokhirov, Ezozbek; Aliev, Ravshan. Analysis of the differences between Wi-Fi 6 and Wi-Fi 5. *E3S Web of Conf.*, v. 402, p. 03020, 2023. Doi.org/10.1051/e3sconf/202340203020.