

Rede 5G-SA privada e as tecnologias WLAN atuais: um comparativo experimental

Gabriel Fré, Renan Abud, André Sampaio e Alessandro Luz

Resumo—Este trabalho consiste em uma verificação experimental do desempenho das redes sem fio atuais, dentre as quais tem-se Wifi 4 (IEEE 802.11/n), Wifi 6 (IEEE 802.11/ax) e 5G *Stand Alone*, comparando as capacidades de cada uma das tecnologias quanto a cobertura ambientes internos. Os resultados apresentados permitem verificar o comportamento de cada uma das tecnologias com diferentes densidades de conexões, para se trazer uma visão geral sobre a viabilidade destes sistemas e seu desempenho performados sobre aplicações reais de grande importância para indústria.

Palavras-Chave—5G, Wifi 6, desempenho, indoor.

Abstract—This work consists of an experimental verification of current wireless networks performance, which are Wifi 4 (IEEE 802.11/n), Wifi 6 (IEEE 802.11/ax) and 5G *Stand Alone*, aiming to compare the capabilities of each technology to cover indoor environments. The results give an outline about the behavior of each technology in different connection densities. Finally, there is an overview about the feasibility of those system in order que achieve high performance application for industry

Keywords—5G, Wifi 6, Performance indoor.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com o Fórum Econômico Mundial, entidade que atua desde 2018 para reconhecer, encorajar e escalar a transformação digital de empresas referências em manufatura ao redor do mundo, a conectividade tem sido a base para o desenvolvimento sustentável da indústria [1]. Em sua última publicação feita em colaboração com *McKinsey & Company* [2], todas as 103 empresas engajadas reportaram o uso de tecnologias de conectividade como base para transformação digital em seus campos de manufatura. Dentre as tecnologias envolvidas tem-se gêmeos digitais, *data lake*, serviços baseados em nuvem, nuvens privadas, inteligência artificial, IIoT e realidade aumentada e virtual foram extensivamente utilizadas, de modo a cumprir os requisitos estabelecidos pelo Fórum. Portanto, estas tecnologias tem contribuído, direta ou indiretamente para a redução do consumo energético em mais 40%, elevando em pelo menos 40% a emissão dos chamados gases verdes (GHG, *Greenhouse gas*) [3] e reduzido o consumo de água em mais de 44%, com redução do desperdício de materiais em ao menos 15% [1].

Estes benefícios são possíveis majoritariamente pelas tecnologias de conectividade *wireless*, como observado em [4]–[6].

Gabriel Fré (gabriel.fre@fit-tecnologia.org.br), Renan Abud (renan.abud@fit-tecnologia.org.br), André Sampaio (andre.sampaio@fit-tecnologia.org.br) e Alessandro Luz (alessandro.luz@fit-tecnologia.org.br) são vinculados ao Flextronics Instituto de Tecnologia, que financiou este trabalho (14.2020-Gemini-H21003TA21). Por questões que envolve a política de proteção a informação do Fit, os nomes dos fabricantes das tecnologias testadas foram preservados.

Em âmbito industrial as tecnologias devem cumprir requisitos de desempenho que envolvem elevada vazão baixa latência, altos indicadores de disponibilidade e confiabilidade, tal como apresentado por Ludwing et al. [7], Ahrend et al. [8], entre outros. Neste trabalho é avaliado o desempenho de uma aplicação típica em manufatura de eletrônicos quando operando sobre rede 5G-SA (*Stand Alone*) comercial e duas das tecnologias mais comumente encontradas em ambientes fabris, as redes WLAN (*wireless local area network*) WiFi 4 e WiFi 6 [9]. Os resultados apresentados permitem estabelecer uma relação de complexidade e viabilidade entre as redes Wifi e a nova proposta de redes 5G-SA privadas [10], [11].

II. A ESTRUTURA DOS TESTES

A Fig. 1 exibe a configuração utilizada nos testes, com o servidor de aplicações provendo serviços por meio das redes sem fio analisadas.

Neste trabalho foi considerada uma aplicação muito recorrente no chão de fábrica em se tratando da manufatura de eletrônicos, que é a gravação de *firmware* ou *software* nos dispositivos em linha de montagem. Foram utilizadas três estruturas de rede sem fio distintas, sendo duas delas do tipo WLAN: WiFi 4 (IEEE 802.11/n) [12] e WiFi 6 (IEEE 802.11/ax) [13], que operam, respectivamente, nas fixas de 2,4 e 5,8 GHz com potência de transmissão máxima de 250 mW e uma infra-estrutura de rede 5G-SA privada com células de tamanho reduzido (*picocells*) e baixa potência (200 mW), apropriadas para aplicações *indoor*. A faixa de frequência de operação da rede 5G se define entre 3,3 e 3,8 GHz [14]. Trata-se da denominada banda 78, faixa do espectro licenciada cujo direito de utilização é outorgado pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) [15]. Todos os equipamentos utilizados são comerciais, tanto na parte da infra-estrutura das redes quanto nos terminais utilizados como clientes da operação.

O sistema apresentado na Fig. 1 tem ao centro um servidor de aplicação (*Application Server*), que envia cíclica e continuamente arquivos de 100 MB para os clientes da aplicação. Sempre que um terminal conclui o *download*, é enviada uma mensagem de êxito para o servidor, que armazena os dados reportados para serem exibidos no *dashboard* e pós-processados para extração das informações de desempenho do sistema. A Fig. 1 exibe a infra-estrutura de rede 5G que está circunscrita abaixo do servidor de aplicações, o qual é conectado ao núcleo da rede (*5G-NR Edge Core*) por interface Ethernet, sendo exposto dentro do quadrado verde. Entre o núcleo da rede e a célula (*5G-NR picocell*) existem os equipamentos que

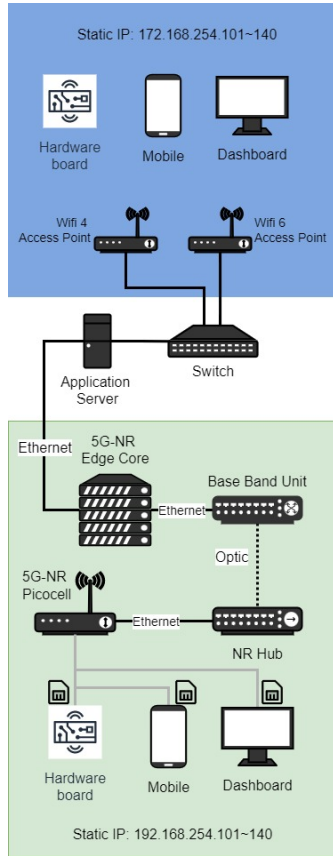


Fig. 1. Diagrama em blocos funcionais do sistema de apresentado. Ao centro há o servidor de aplicações que gerencia e provisiona o serviço de transferência de dados utilizado. Abaixo, em verde, o sistema 5G SA e acima, no quadro azul, as redes de acesso WLAN.

compõe arquitetura de uma rede móvel *stand alone*: *Baseband Unit* (BBU), em que os sinais são adequados ao padrão 5G, incluindo plano de controle e plano de usuário, entre outras sinalizações, o *NR Hub*, permite a distribuição destes sinais pelas células, se conectando a BBU por meio de enlace óptico, dadas as altas velocidades exigidas pelo protocolo. Há também a infraestrutura de rede WLAN, que se conecta ao servidor de aplicação por interface Ethernet, tendo um *switch* para prover as rotas entre acessos Wifi 4 e Wifi 6, sendo que este subsistema aparece na Fig. 1 circunscrito acima do servidor de aplicação, apresentado dentro do quadrado azul. Ressalta-se que tanto o sistema 5G quanto as WLAN, foram provisionados com interface Ethernet, com cabos CAT-6 capaz de entregar para ambos os sistemas uma vazão máxima de 10 GB/s [16].

III. O TERMINAL DE REDE

Com o sistema apresentado neste trabalho, pode-se conectar quaisquer dispositivos com interface Wifi, o que inclui *notebooks*, *smartphones* e outros dispositivos, sendo assim, optou-se pelo uso das, já difundidas, Raspberry Pi[®]4 [17], as quais permitem o acesso a redes wifi de forma nativa. No entanto para que fosse possível a conexão com rede 5G, fora necessário associar um módulo de conexão apropriado para esta tecnologia. O modelo escolhido foi o Quectel[™]RM500q [18]. Utilizou-se 10 exemplares de cada

conjunto Raspberry Pi[®]4 + Quectel[™]RM500q, como mostrado na Fig. 2 e os testes foram conduzidos a uma distância fixa de 10 metros entre os terminais de rede e as antenas.



Fig. 2. Conjunto de terminais de redes para testes. São 10 exemplares de conjunto Raspberry Pi[®]4 + Quectel[™]RM500q, de modo a permitir a avaliação do desempenho de aplicações de transferência de grande volume de dados nas três arquiteturas de redes propostas.

Os terminais utilizam uma versão personalizada de Linux embarcado compilado com os *drivers* dos módulos 5G. Além disso, a aplicação que promove a transferência de dados em grande volume de forma contínua, rodando sobre este sistema operacional. A aplicação, escrita em python [19], tem como objetivo receber os pacotes enviados pelo servidor de aplicação, registrar os tempos de envio, quantidade de *bytes* recebidos, quantidades de *bytes* retransmitidos e o tempo ocioso. A conexão entre os terminais e o servidor de aplicação se dá por meio do protocolo *websocket*, através de uma conexão TCP (*Transmission Control Protocol*). É importante ressaltar que a ferramenta iPerf [20] poderia ter sido utilizada para realização dos testes de desempenho, porém, visando a integração do sistema apresentado ao ambiente industrial, considerou-se mais interessante utilizar os dados reportados por uma aplicação real do que por uma ferramenta de testes. A Fig. 3, apresenta o sistema descrito em exibição ao público.

IV. RESULTADOS

Neste trabalho, utilizou-se a vazão efetiva, R_{eff} , para avaliar o desempenho das redes testadas. Este valor é entendido como a quantidade total de dados transferidos do servidor de aplicação para todos os clientes cadastrados no teste, cujo cálculo é dado por

$$R_{\text{eff}}(c) = \left(\frac{1}{t_f - t_i} \right) \sum_{n=1}^Q B(n) * 8 * 10^{-6}, \quad (1)$$

em que, $R_{\text{eff}}(c)$ indica a taxa de bits efetivamente transferida para o cliente c durante a janela de testes, que se define entre t_i e t_f , respectivamente o tempo que marca o início e o final de cada teste. O termo $B(n)$ é a quantidade de *bytes* contida no n -ésimo pacote recebido, os demais operadores convertem a quantidade para megabits por segundo. A quantidade total de pacotes transmitida para cada cliente é representada por Q . Considerando que (1) compõe a taxa de *bits* para cada

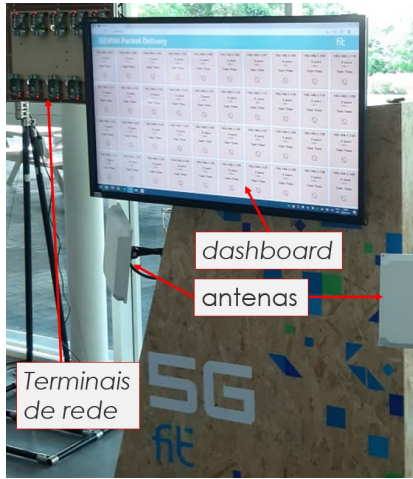


Fig. 3. Protótipo do sistema proposto em exibição ao público. Pode-se notar o terminal de *dashboard*, as antenas utilizadas e o conjunto de terminais de rede gerando resultados à partir da transferência de grande volume de dados.

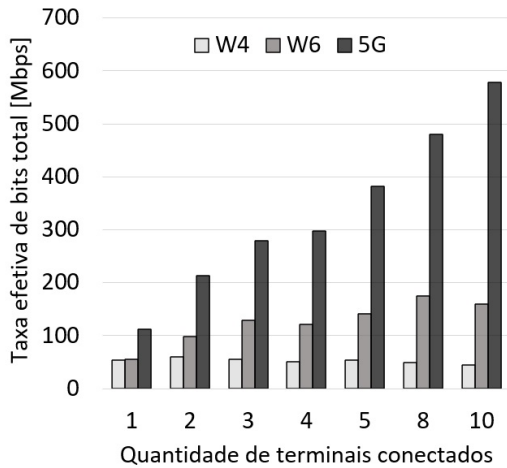


Fig. 4. Taxa efetiva de bits total em função do número de clientes atendidos, considerando o uso de tecnologia Wifi4 [12], Wifi 6 [13] e 5G [14].

cliente conectado durante o teste, a taxa de *bits* total, R_t , que é entregue para todos os terminais em cada teste, é dada por

$$R_t = \sum_{c=1}^{10} R_{\text{eff}}(c), \quad (2)$$

A Fig. 4 apresenta os valores da taxa efetiva de *bits* para as três redes avaliadas, considerando diferentes quantidades de clientes.

A metodologia utilizada para composição dos dados observados nas Figs. 4 e 5 consideram que cada rodada de teste foi realizada com a mesma quantidade de clientes, ou seja, o primeiro teste com apenas um cliente ($c = 1$) consumindo um total de Q pacotes, no segundo teste, foram dois clientes, com Q pacotes para cada um, e assim por diante, até que fossem atendidos um total de 10 clientes. Pode-se observar que a rede 5G é mais adequada para lidar com maior densidade de conexões pelo fato de que a taxa efetiva aumenta conforme a quantidade de clientes também aumenta. O mesmo ocorre com

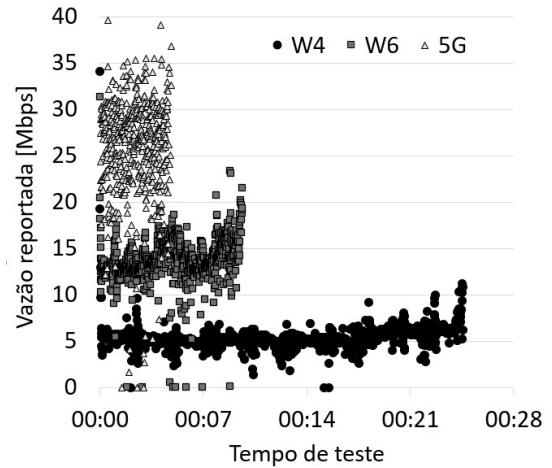


Fig. 5. Reportes de todos os 10 clientes enviados ao servidor de aplicação ao longo da janela de testes.

a tecnologia Wifi 6, em proporções menores. Na mesma figura pode-se notar a melhora evidente que ocorreu entre Wifi 4 e Wifi 6, esta última se mostrando mais adequada para atender maiores quantidades de conexões.

Na Fig. 5, é possível analisar os eventos em sequência cronológica. Apesar de os testes não terem sido realizados simultaneamente, nesta imagem os resultados foram sobrepostos de modo a facilitar a visualização dos dados. Cada ponto no gráfico indica um reporte feito por um dos 10 clientes ao longo da janela de testes. A altura do ponto com relação ao eixo horizontal revela a taxa de bits percebida para cada reporte. A figura também permite entender a relação entre a taxa efetiva total de bits e a taxa efetiva reportada por cada cliente, evidenciando uma dispersão aproximadamente de aproximadamente 26% no Wifi 4, 27% no Wifi 6 e 37% no 5G. Estes valores indicam uma melhor alocação de recursos da rede para o 5G. Esta afirmativa pode ser corroborada ao se levar em conta que as tecnologias baseadas em Wifi são oportunísticas no que se refere a ocupação de espectro, ao passo que em 5G, por fazer uso de espectro licenciado, existe uma sincronia que permite uma melhor utilização dos tempos envolvidos na operação. Ao tomar o tempo de duração de cada teste ($t_f - t_i$), e relacionar com o tempo em que cada cliente esteve ativo durante o mesmo teste, tem-se um relação de utilização de 61% em Wifi 4, 72% em Wifi 6 e 97% no 5G. Portanto, contribuem para o melhor desempenho do 5G, não apenas a maior largura de banda disponível e espectro dedicado, mas também a alocação dos recursos ao longo do tempo de operação.

V. CONCLUSÕES

O desempenho da rede 5G se mostrou superior, em termos de taxa de bits, se comparado com a tecnologia Wifi 6, intermediária em termos de performance, ainda que demonstrado grande avanço com relação a tecnologia Wifi 4. Foi notado que em Wifi 4, a taxa de bits reduz conforme o número de clientes aumenta, enquanto que para Wifi 6, o maior desempenho foi percebido para maiores quantidades de conexão, havendo um

pico na performance para 8 conexões simultâneas, das 10 possíveis com o estrutura de testes disponível. Em termos de arquitetura de rede, o sistema 5G é muito diferente dos dois anteriores, se destacando principalmente pela capacidade de gerenciar grandes quantidades clientes, manter o sincronismo das conexões e distribuir os recursos de rede. Por outro lado, uma rede 5G apresenta maior custo de aquisição, implantação e manutenção se comparado com redes WLAN, além da maior complexidade de gestão. Os dados obtidos mostram grande potencial para que as rede de quinta geração possam operar em ambiente fabril (*shop floor*) como uma alternativa aos complexos sistemas cabeados, que atualmente são a única forma viável e confiável de provisionar os equipamentos e maquinários de manufatura.

A utilização de redes sem fio de alta capacidade Wifi 6 e 5G, como demonstrado neste trabalho, poderão ser utilizadas para reduzir a infraestrutura de cabeamento nas plantas de complexos industriais, haja vista o potencial apresentado em lidar com grandes concentrações de conexões simultâneas, características inovadoras para redes comerciais destinadas a usuário final. Como continuidade imediata deste trabalho, pretende-se aumentar a quantidade de clientes para verificar o comportamento dos sistemas com maior carga, e também conduzir os testes no chão de fábrica, a fim de avaliar como as interferências e do ambiente fabril afetarão o desempenho já observado.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao FIT - Flextronics Instituto de tecnologia, Sorocaba-SP, departamento de desenvolvimento de hardware Sketch-to-Scale.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Betti and E. de Boer, “The global lighthouse network playbook for responsible industry transformation,” tech. rep., 2022.
- [2] M. Löffler and A. Tschiesner, “The internet of things and the future of manufacturing,” *McKinsey & Company*, vol. 4, 2013.
- [3] K. Gillingham and J. H. Stock, “The cost of reducing greenhouse gas emissions,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 32, no. 4, pp. 53–72, 2018.
- [4] M. Gundall, J. Schneider, H. D. Schotten, M. Aleksy, D. Schulz, N. Franchi, N. Schwarzenberg, C. Markwart, R. Halfmann, P. Rost, et al., “5g as enabler for industrie 4.0 use cases: challenges and concepts,” in *2018 IEEE 23rd international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*, vol. 1, pp. 1401–1408, IEEE, 2018.
- [5] C. Kalalas and J. Alonso-Zarate, “Massive connectivity in 5g and beyond: Technical enablers for the energy and automotive verticals,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp. 1–5, 2020.
- [6] M.-T. Suer, C. Thein, H. Tchouankem, and L. Wolf, “Multi-connectivity as an enabler for reliable low latency communications—an overview,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 156–169, 2020.
- [7] S. Ludwig, M. Karrenbauer, A. Fellan, H. D. Schotten, H. Buhr, S. Seetaraman, N. Niebert, A. Bernardy, V. Seelmann, V. Stich, et al., “A5g architecture for the factory of the future,” in *2018 IEEE 23rd international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*, vol. 1, pp. 1409–1416, IEEE, 2018.
- [8] U. Ahrend, M. Aleksy, M. Berning, J. Gebhardt, F. Mendoza, and D. Schulz, “Challenges of the digital transformation: The role of sensors, sensor networks, iot-devices, and 5g,” in *2019 First International Conference on Societal Automation (SA)*, pp. 1–12, IEEE, 2019.
- [9] M. Balkonis, “Wifi evolution “beyond wifi 6”,” Master’s thesis, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, 2021.
- [10] D. Berisha, “5g sa and nsa solutions,” 2021.

- [11] S. Senk, S. A. Itting, J. Gabriel, C. Lehmann, T. Hoeschele, F. H. Fitzek, and M. Reisslein, “5g nsa and sa campus network testbeds for evaluating industrial automation,” in *European Wireless 2021; 26th European Wireless Conference*, pp. 1–8, VDE, 2021.
- [12] E. Perahia, “Ieee 802.11 n development: history, process, and technology,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 7, pp. 48–55, 2008.
- [13] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, “A tutorial on ieee 802.11 ax high efficiency wlangs,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 2018.
- [14] A. Sengupta, A. R. Alvarino, A. Catovic, and L. Casaccia, “Cellular terrestrial broadcast—physical layer evolution from 3gpp release 9 to release 16,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 66, no. 2, pp. 459–470, 2020.
- [15] Brasil, “Resolução anatel nº 742, de 1º de março de 2021,” *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 2021.
- [16] D. Law, “Ieee 802.3 ethernet www.ieee802.org/3;”
- [17] Raspberry Pi Foundation, *Raspberry Pi 4 Computer Model B*, 2019.
- [18] Quectel, *RM500Q - GL Hardware Design*, 3 2021. Rev. 1.1.
- [19] W. Donat and C. Krause, *Learn Raspberry Pi Programming with Python*. Springer, 2014.
- [20] P. RAJABZADEH, “Monitoring network performance with iperf,” 2018.