



**INSTITUTO
FEDERAL**
Paraíba

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Campus João Pessoa

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação

Nível Mestrado Profissional

JEFFERSON MAXMILIANO OLIVEIRA DAS MERCÊS

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS WI-FI
5, WI-FI 6 E REDES 5G PRIVATIVAS PARA APLICAÇÕES
DE VÍDEO NA INDÚSTRIA 4.0**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOÃO PESSOA - PB

2026

Jefferson Maxmiliano Oliveira das Mercês

**Análise do Desempenho das Tecnologias Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e
Redes 5G Privativas para Aplicações de Vídeo na Indústria 4.0**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito final para obtenção do título de Mestre em Tecnologia da Informação pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB.

Orientador: Prof. Dr. Ruan Delgado Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Portela Sousa

João Pessoa - PB

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha - *campus* João Pessoa, PB.

M554a Mercês, Jefferson Maxmiliano Oliveira das.

Análise do desempenho das tecnologias wi-fi 5, wi-fi 6 e redes 5G privativas para aplicações de vídeo na indústria 4.0 / Jefferson Maxmiliano Oliveira das Mercês. – 2026.

81 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Informação) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação (PPGTI), 2026.

Orientação: Profº. Dr. Ruan Delgado Gomes.

Coorientação: Profº Dr. Marcelo Portela Sousa.

1. Wi-fi 5. 2. Wi-fi 6. 3. 5 G. 4. Transmissão de vídeo - tempo real. 5. Redes sem fio. I. Título.

CDU 621.391(043)

JEFFERSON MAXMILIANO OLIVEIRA DAS MERCÊS

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS WI-FI 5, WI-FI 6 E REDES 5G PRIVATIVAS PARA
APLICAÇÕES DE VÍDEO NA INDÚSTRIA 4.0**

DISSERTAÇÃO apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologia da Informação, pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB - Campus João Pessoa.

Aprovado em 07 de agosto de 2026.

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruan Delgado Gomes

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Portela Sousa

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Coorientador

Prof. Dr. Leandro Cavalcanti de Almeida

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Examinador

Prof. Dr. Waslon Terllizzie Araújo Lopes

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Examinador

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ruan Delgado Gomes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/08/2026 14:26:44.
- **Waslon Terlizzie Araújo Lopes**, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 07/08/2026 14:58:13.
- **Leandro Cavalcanti de Almeida**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/08/2026 15:35:45.
- **Marcelo Portela Sousa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/08/2026 08:09:03.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 889664
Verificador: 53deca66fd
Código de Autenticação:



RESUMO

O avanço das redes sem fio no contexto da Indústria 4.0 exige soluções capazes de atender a aplicações com elevados requisitos de taxa de transmissão, baixa latência e alta confiabilidade, principalmente em sistemas de visão computacional e monitoramento em tempo real. Nesse cenário, tecnologias como Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac), Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) e as redes 5G privadas destacam-se como alternativas promissoras para a transmissão de vídeo em ambientes industriais. Neste contexto, estudos experimentais em ambientes industriais são necessários para avaliar o desempenho dessas tecnologias em diferentes cenários. Esta dissertação analisa o desempenho dessas soluções em duas etapas experimentais. Na primeira fase, foi realizada a comparação entre as tecnologias Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 para a transmissão de dados, considerando os requisitos de taxa de *bits* de um *middleware* de vídeo. Na segunda fase, comparou-se o desempenho de uma rede Wi-Fi 6 e de uma rede 5G privada na transmissão de vídeo em tempo real em um ambiente industrial. A arquitetura experimental estabelece dois domínios de acesso sem fio configurados sob condições equivalentes, de modo a garantir a comparabilidade dos resultados. O ambiente utiliza um *middleware* de vídeo responsável pela geração e transmissão de fluxos a 30 FPS (*Frames Per Second*), com resoluções que variam de VGA até DCI 4K. A análise considera métricas diretamente associadas à qualidade do vídeo, como taxa de *bits*, manutenção da taxa de quadros e perda de quadros, além da avaliação de diferentes larguras de canal no Wi-Fi 6 (20, 40 e 80 MHz) e cenários com e sem linha de visada. O conjunto experimental da segunda fase totaliza 640 execuções, correspondendo a aproximadamente 53 horas e 30 minutos de medições contínuas. Os resultados indicam que, em cenários de menor exigência de taxa de *bits*, como VGA e HD, ambas as tecnologias atendem aos requisitos da aplicação com desempenho semelhante. Entretanto, à medida que a demanda por taxa de *bits* aumenta, as diferenças estruturais entre as tecnologias tornam-se mais evidentes. O Wi-Fi 6 apresenta maior variabilidade na taxa de *bits*, comportamento associado ao mecanismo de acesso ao meio baseado em contenção CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), especialmente em condições de elevada ocupação espectral. Em contrapartida, a rede 5G privada mostra maior previsibilidade temporal e menor oscilação nas métricas de taxa de *bits*. Contudo, a rede 5G apresenta maior sensibilidade a cenários sem linha de visada em resoluções mais elevadas, como DCI 4K, nos quais se observa redução da taxa média de transmissão. Como contribuição, o trabalho fornece uma base experimental para apoiar a tomada de decisão quanto à adoção de redes Wi-Fi 6 ou 5G privadas em aplicações industriais de vídeo, ao evidenciar vantagens, limitações e comportamentos distintos de cada tecnologia sob diferentes condições operacionais.

Palavras-chave: Wi-Fi 5; Wi-Fi 6; 5G privadas; Transmissão de vídeo em tempo real.

ABSTRACT

The advancement of wireless networks in the context of Industry 4.0 requires solutions capable of supporting applications with stringent requirements for high data rates, low latency, and high reliability, such as computer vision systems and real-time monitoring. In this context, technologies such as Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac), Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), and private 5G networks have emerged as promising alternatives for video transmission in industrial environments. In this scenario, experimental studies in industrial settings are still needed to evaluate the performance of these technologies under different operating conditions. This dissertation analyzes the performance of these solutions through two experimental phases. In the first phase, Wi-Fi 5 and Wi-Fi 6 technologies were compared for data transmission while considering the bitrate requirements of a video middleware. In the second phase, the performance of a Wi-Fi 6 network and a private 5G network was compared for real-time video transmission in an industrial environment. The experimental architecture establishes two wireless access domains configured under equivalent conditions to ensure the comparability of the results. The environment employs a video middleware responsible for generating and transmitting video streams at 30 FPS (Frames Per Second), with resolutions ranging from VGA to DCI 4K. The analysis considers metrics directly related to video quality, including bitrate, frame rate maintenance, and frame loss, as well as the evaluation of different Wi-Fi 6 channel bandwidths (20, 40, and 80 MHz) under both line-of-sight and non-line-of-sight scenarios. The experimental campaign conducted in the second phase comprises a total of 640 executions, corresponding to approximately 53 hours and 30 minutes of continuous measurements. The results indicate that, for scenarios with lower bitrate requirements, such as VGA and HD resolutions, both technologies satisfy the application requirements with comparable performance. However, as bitrate demand increases, the structural differences between the technologies become more evident. Wi-Fi 6 exhibits greater bitrate variability, a behavior associated with the contention-based CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) medium access mechanism, particularly under conditions of high spectrum occupancy. In contrast, the private 5G network shows greater temporal predictability and lower fluctuations in bitrate-related metrics. Nevertheless, the private 5G network shows higher sensitivity to non-line-of-sight scenarios at higher resolutions, such as DCI 4K, where a reduction in the average transmission rate is observed. As main contribution, this work provides an experimental basis to support decision-making regarding the adoption of Wi-Fi 6 or private 5G networks for industrial video applications by highlighting the advantages, limitations, and distinct performance characteristics of each technology under different operating conditions.

Keywords: Wi-Fi 5; Wi-Fi 6; private 5G networks; Real-time video transmission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectros de um sinal FDM e OFDM.	23
Figura 2 – Espectros de um sinal OFDM e OFDMA.	25
Figura 3 – Organização do espectro em OFDM e OFDMA.	27
Figura 4 – Recurso ML.	30
Figura 5 – Pilares de casos de uso da Rede 5G.	32
Figura 6 – Estrutura básica do <i>core</i> de uma rede 5G.	34
Figura 7 – Estrutura básica da RAN de uma Rede 5G.	35
Figura 8 – Arquitetura do <i>middleware</i> de transmissão de vídeo.	41
Figura 9 – Arquitetura do <i>testbed</i> utilizada nos experimentos em laboratório.	49
Figura 10 – Imagem por satélite e ambiente industrial interno do SENAI (CITI/CAM).	51
Figura 11 – Visão interna do ambiente industrial do SENAI (CITI/CAM), com destaque para a máquina de usinagem CNC modelo ROMI 1250.	52
Figura 12 – Máquina de usinagem por eletroerosão, modelo CNC 600.	52
Figura 13 – Topologia lógica empregada no experimento.	53
Figura 14 – Disposição física dos equipamentos empregados no experimento.	54
Figura 15 – Mapa do ambiente industrial.	54
Figura 16 – Arquitetura do orquestrador em Python.	57
Figura 17 – Taxa de transferência e perda de pacotes com Wi-Fi 5/6 (20 MHz).	61
Figura 18 – Taxa de transferência e perda de pacotes com Wi-Fi 5/6 (40 MHz).	62
Figura 19 – Taxa de transferência e perda de pacotes com Wi-Fi 5/6 (80 MHz).	63
Figura 20 – Número de clientes suportados por cada resolução de vídeo.	64
Figura 21 – Taxa de <i>bits</i> e FPS ao longo do tempo sob condição NLOS para resolução VGA.	65
Figura 22 – Taxa de <i>bits</i> e FPS ao longo do tempo sob condição NLOS para resolução HD.	66
Figura 23 – Taxa de <i>bits</i> e FPS ao longo do tempo sob condição NLOS para resolução DCI 4k.	67
Figura 24 – Valores médios e desvios padrão da taxa de <i>bits</i> e do FPS obtidos nos experimentos com Wi-Fi 6.	68
Figura 25 – Valores médios e desvios padrão da taxa de <i>bits</i> e do FPS obtidos nos experimentos com 5G.	69
Figura 26 – Valores médios e desvios padrão da taxa de <i>bits</i> e do FPS obtidos nos experimentos com Wi-Fi 6 e 5G.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Comparação das especificações dos padrões Wi-Fi 4 e Wi-Fi 5.	21
Tabela 2	– Comparação das especificações dos padrões Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6.	24
Tabela 3	– Comparação entre os padrões Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7.	29
Tabela 4	– Taxas de <i>bits</i> necessárias para diferentes resoluções de vídeo utilizadas no experimento.	50
Tabela 5	– Comparação de custos dos equipamentos utilizados na implementação dos cenários Wi-Fi 6 e 5G.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>
AP	<i>Access Point</i>
ATIM	<i>Ad hoc Traffic Indication Message</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CAT5e	<i>Category 5 enhanced</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CN	<i>Core Network</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
CU	<i>Central Unit</i>
DCI 4K	<i>Digital Cinema Initiatives 4K</i>
DIFS	<i>Distributed Inter-Frame Space</i>
DU	<i>Distributed Unit</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
eMBB	<i>enhanced Mobile Broadband</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FHD	<i>Full High Definition</i>
FPS	<i>Frames Per Second</i>
FTP 3	<i>File Transfer Protocol 3</i>

GTP	<i>GPRS Tunneling Protocol</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
HD	<i>High Definition</i>
ICI	<i>Inter-Carrier Interference</i>
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAI	<i>Multiple Access Interference</i>
MEC	<i>Mobile Edge Computing</i>
ML	<i>Multi-Link</i>
mmWave	<i>Millimeter Wave</i>
mMTC	<i>massive Machine Type Communications</i>
MU-MIMO	<i>Multi-User Multiple-Input Multiple-Output</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
NLOS	<i>Non-Line of Sight</i>
NPN	<i>Non-Public Networks</i>
NR	<i>New Radio</i>
NR-U	<i>New Radio in Unlicensed Spectrum</i>
NRF	<i>Network Repository Function</i>
NSA	<i>Non-Standalone</i>
NS	<i>Network Slicing</i>
NSTR	<i>Non-Simultaneous Transmit and Receive</i>

OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
PCF	<i>Policy Control Function</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDU	<i>Packet Data Unit</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PSM	<i>Power Save Mode</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
QUADHD	<i>Quad High Definition</i>
RACH	<i>Random Access Channel</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RTT	<i>Round-Trip Time</i>
RU	<i>Resource Unit</i>
SA	<i>Standalone</i>
SBA	<i>Service-Based Architecture</i>
SBRC	Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos
SIMPIF	Simpósio de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação
SMF	<i>Session Management Function</i>
SNPN	<i>Standalone Non-Public Network</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>
STA	<i>Station</i>

STR	<i>Simultaneous Transmit and Receive</i>
SU-MIMO	<i>Single-User Multiple Input Multiple Output</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TEID	<i>Tunnel Endpoint Identifier</i>
TS	<i>MPEG Transport Stream</i>
TWT	<i>Target Wake Time</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UHD	<i>Ultra High Definition</i>
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communications</i>
UXGA	<i>Ultra Extended Graphics Array</i>
VBR	<i>Variable Bit Rate</i>
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
WIA-FA	<i>Wireless Networks for Factory Automation</i>
WVGA	<i>Wide Video Graphics Array</i>
XGA	<i>Extended Graphics Array</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
1.2	Estrutura do Documento	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Visão Geral Sobre Tecnologias de Redes Locais Sem Fio Para a Indústria	18
2.2	Padrão Wi-Fi 5	20
2.2.1	Técnica OFDM	22
2.3	Padrão Wi-Fi 6	24
2.3.1	Técnica OFDMA	26
2.3.2	Padrões Wi-Fi 6 E	28
2.4	Padrão Wi-Fi 7	29
2.5	Redes Móveis	30
2.5.1	Redes Móveis de Quinta Geração	31
2.5.2	Arquitetura das Redes Móveis 5G	33
2.5.3	<i>5G Core Network</i>	33
2.5.4	Rede de Acesso de Rádio (RAN)	34
2.5.4.1	<i>Separação de Plano de Controle e do Plano de Dados</i>	35
2.5.5	Protocolo GPRS <i>Tunneling Protocol</i>	36
2.5.6	Redes 5G Privativas	37
2.5.6.1	<i>Arquiteturas de Implantação</i>	37
2.5.7	Espectro de Frequência de Redes 5G Privativas	38
2.6	Desafios de Aplicações de Vídeo para a Indústria 4.0	38
2.7	<i>Middleware</i> de Distribuição de Vídeo	40
2.8	Controle de Acesso ao Meio em Redes Wi-Fi e 5G	41
3	TRABALHOS RELACIONADOS	43
4	METODOLOGIA	48
4.1	Comparação Entre Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 em Laboratório	48
4.2	Comparação Entre Wi-Fi 6 e 5G Privativas em Ambiente Industrial	51
4.2.1	Topologia Experimental	51
4.2.2	Parâmetros das Redes Sem Fio	55
4.2.3	Orquestração dos Experimentos	56
4.3	Custos de Implementação das Redes Wi-Fi 6 e 5G Privativas	58

5	RESULTADOS	60
5.1	Análise dos Resultados: Comparação Entre Redes Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 em Laboratório	60
5.2	Análise dos Resultados: Comparação Entre Redes Wi-Fi 6 e 5G em Ambiente Industrial	65
5.2.1	Síntese dos Resultados Obtidos Para a Rede Wi-Fi 6	68
5.2.2	Síntese dos Resultados Obtidos Para a Rede 5G	69
5.2.3	Consolidação dos Resultados de Comparação das Tecnologias Avaliadas . .	69
5.3	Discussão	71
6	CONCLUSÕES	73
6.1	Trabalhos Futuros	74
	 REFERÊNCIAS	 76

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das redes sem fio desempenha um papel importante no contexto da Indústria 4.0, pois viabiliza a conectividade com desempenho adequado às aplicações industriais, como sistemas de visão computacional, monitoramento em tempo real e controle remoto de dispositivos, entre outros. Essas aplicações demandam redes com alta taxa de transmissão, baixa latência e confiabilidade (IIoT, 2025). Nesse cenário, tecnologias como Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e redes 5G privadas destacam-se como alternativas promissoras para atender a esses requisitos.

O Wi-Fi 6 introduz avanços relevantes nos mecanismos de acesso múltiplo, com destaque para o OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*), que divide o canal em unidades de recurso e permite transmissões simultâneas para diferentes dispositivos, e para o MU-MIMO (*Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*), que amplia a capacidade de atendimento simultâneo pelo AP (*Access Point*). Esses mecanismos elevam a eficiência espectral, reduzem a contenção e melhoram o desempenho em cenários com múltiplos dispositivos ativos (Rathor; Joshi, 2021; Skendzic; Mustac; Balon, 2021; Suer; Jose; Tchouankem, 2022).

Por sua vez, as redes 5G privadas adotam uma arquitetura baseada no agendamento centralizado dos recursos de rádio. Nesse modelo, a estação base (*gNB*) coordena a comunicação e define, dinamicamente, quais dispositivos podem transmitir ou receber dados, em quais intervalos de tempo e por meio de quais recursos de frequência. Essa distribuição considera fatores como as condições do canal, a quantidade de dados a transmitir, a prioridade do serviço e os requisitos de QoS (*Quality of Service*) de cada fluxo. Essa abordagem favorece a previsibilidade temporal, o controle de latência e uma maior granularidade na priorização de tráfego, características relevantes para aplicações industriais que exigem estabilidade e confiabilidade na transmissão de dados.

Diante dessas diferenças estruturais, esta dissertação descreve, em uma primeira etapa, uma comparação entre as tecnologias Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6, considerando a transmissão de dados associada aos requisitos de um *middleware* de vídeo (Neto et al., 2024). Os experimentos ocorreram no laboratório de capacitação do Assert, localizado no *campus* Campina Grande do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB).

Em uma segunda etapa, é realizada uma comparação entre redes Wi-Fi 6 e redes 5G privadas, com foco na transmissão de vídeo em tempo real em um ambiente industrial. Os experimentos ocorreram nas instalações do SENAI – Centro de Inovação e Tecnologia Industrial / SENAI – Centro de Ações Móveis (CITI/CAM), na cidade de Campina Grande, Paraíba, em um galpão industrial com aproximadamente 180 metros de comprimento. Para garantir a comparabilidade dos resultados, o trabalho estabelece uma topologia lógica experimental que avalia ambas as tecnologias sob condições equivalentes, por meio da configuração de dois

domínios de acesso sem fio distintos, um para cada tecnologia de rede sem fio avaliada.

O trabalho utiliza um *middleware* de vídeo responsável pela captura e pelo processamento dos fluxos transmitidos. O sistema transmite vídeos a 30 FPS, com resoluções de VGA até DCI 4K. A partir desses fluxos, o experimento avalia o comportamento das redes quanto à estabilidade da taxa de *bits*, de FPS e à ocorrência de perda de quadros. Embora a taxa de *bits* e o FPS possam apresentar correlação, essas métricas representam aspectos distintos da transmissão. A taxa de *bits* indica o volume de dados transportado por unidade de tempo, enquanto o FPS representa a continuidade temporal do vídeo, ao indicar a quantidade de quadros processados ou recebidos por segundo. A análise conjunta permite verificar se a rede suporta o volume de dados requerido e, simultaneamente, mantém a fluidez do vídeo, pois uma taxa de *bits* elevada não garante, por si só, a entrega regular dos quadros. Essa abordagem permite analisar os limites operacionais de cada tecnologia frente aos requisitos de aplicações industriais (Hoppari et al., 2021). O experimento também considerou variações de largura de canal no Wi-Fi 6 (20, 40 e 80 MHz) e diferentes condições de enlace, incluindo cenários com linha de visada LOS (*Line of Sight*) e sem linha de visada NLOS (*Non-Line of Sight*).

Como principal contribuição, esta dissertação fornece uma base experimental para a tomada de decisão quanto à adoção das redes de Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 ou 5G privativas em aplicações industriais de transmissão de vídeo em tempo real. Os resultados identificam vantagens, limitações e comportamentos distintos de cada tecnologia, especialmente sob condições de alta demanda. O trabalho também estabelece fundamentos técnicos que subsidiam pesquisas futuras em redes sem fio industriais, com foco em desempenho, previsibilidade e escalabilidade.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar empiricamente, o desempenho das tecnologias Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e redes 5G privativas com base nos requisitos de transmissão definidos por um *middleware* de vídeo. A análise considera os seguintes indicadores de desempenho: taxa de *bits*, de FPS e perda de pacotes. O objetivo é identificar os limites operacionais de cada tecnologia frente aos requisitos de aplicações de vídeo no contexto da Indústria 4.0.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Comparar o desempenho entre as tecnologias Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 em ambiente de laboratório;
- Desenvolver uma ferramenta para a geração de tráfego sintético com taxas de transferência baseadas nos valores de taxa de *bits* fornecidos por um *middleware* de vídeo (Neto et al., 2024);
- Analisar redes Wi-Fi 6 e 5G privativas, com ênfase nas diferenças técnicas relacionadas à capacidade de transmissão e ao suporte a múltiplos dispositivos;

- Montar e configurar um cenário experimental em contexto industrial para comparar o desempenho entre as tecnologias avaliadas;
- Desenvolver uma ferramenta para orquestrar o experimento e processar os dados coletados, além de calcular métricas quantitativas, como taxa de *bits*, FPS e perda de quadros;
- Comparar o desempenho das redes Wi-Fi 6 e 5G privadas em cenários industriais, com o uso de um *middleware* de vídeo, por meio da análise da influência de parâmetros como largura de canal, condição do enlace e volume de tráfego.

1.2 Estrutura do Documento

Os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 aborda os conceitos e fundamentos que embasam o estudo, incluindo uma revisão das tecnologias Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e redes 5G privadas, com foco em suas características, desempenho e aplicações em ambientes industriais. Também são descritos trabalhos relacionados a esta dissertação;
- O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada no trabalho. O capítulo também discute os ambientes experimentais, as ferramentas desenvolvidas e o procedimento de coleta e análise dos dados;
- O Capítulo 5 discute os resultados obtidos nos experimentos e a comparação do desempenho das redes Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e 5G privadas;
- O Capítulo 6 contém as considerações finais e descreve as perspectivas de estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento desta dissertação e foca nas tecnologias de redes sem fio aplicadas a ambientes industriais. O escopo compreende tanto os padrões IEEE 802.11 quanto as redes móveis de quinta geração. O texto contextualiza a evolução dessas tecnologias diante das demandas da Indústria 4.0 e destaca os aspectos técnicos que influenciam o desempenho, a confiabilidade e a escalabilidade das soluções de conectividade. A análise parte da premissa de que a comunicação sem fio eficiente constitui um elemento central para viabilizar aplicações como controle remoto, monitoramento em tempo real e automação inteligente, as quais exigem conectividade de baixa latência, alta confiabilidade e capacidade de operação em ambientes dinâmicos (Technology, 2023).

Inicialmente, são descritos os principais padrões IEEE 802.11, com ênfase no Wi-Fi 5, Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E (802.11ax na banda de 6 GHz) e Wi-Fi 7 (802.11be). O estudo aborda os mecanismos de acesso ao meio, os esquemas de modulação, as taxas de transmissão suportadas e os avanços em QoS (*Quality of Service*) para cada padrão. O trabalho também apresenta os princípios das redes móveis de quinta geração, com ênfase em sua arquitetura e nos mecanismos de acesso ao meio, incluindo as redes 5G privadas.

Na sequência, são discutidos os principais desafios enfrentados pelas redes sem fio em ambientes industriais, incluindo variações na taxa de transmissão, perda de pacotes, interferências e densidade de dispositivos. Ao final, o estudo estabelece a base conceitual para a comparação entre as tecnologias Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e redes 5G privadas, análise que é aprofundada nos capítulos posteriores deste trabalho.

2.1 Visão Geral Sobre Tecnologias de Redes Locais Sem Fio Para a Indústria

As redes sem fio desempenham um papel estratégico no ambiente industrial, ao viabilizarem flexibilidade, mobilidade e conectividade para aplicações da Indústria 4.0 (Chiavassa; Scanzio; Cena, 2025). A ausência de cabeamento físico permite reconfigurações ágeis no *layout* da planta, facilita a instalação de novos dispositivos e reduz os custos com infraestrutura (Artetxe et al., 2023). Além disso, a mobilidade oferecida aos sensores, câmeras, atuadores e dispositivos portáteis amplia as possibilidades de monitoramento contínuo e controle remoto, aspectos importantes para a automação e a eficiência operacional em tempo real.

Nesse cenário, os padrões IEEE 802.11, popularmente conhecidos como Wi-Fi, evoluíram significativamente em relação às gerações anteriores e passaram a oferecer taxas de *bits* mais elevadas. Contudo, apesar desses avanços, o uso do Wi-Fi em ambientes críticos, como os

industriais, ainda enfrenta limitações relacionadas à confiabilidade e estabilidade das conexões. Por isso, estudos adicionais são necessários para avaliar esses desafios. Tecnologias recentes, como o Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e suas evoluções, implementam melhorias que as tornam mais adequadas para ambientes com alta densidade de dispositivos, tráfego intenso de dados e requisitos rigorosos de desempenho (Bartolín-Arnau et al., 2025). A capacidade de operar em diferentes faixas de frequência e de oferecer recursos de QoS confere a essas tecnologias o potencial para suportar aplicações exigentes, como a transmissão de vídeo em tempo real e serviços que demandam altas taxas de *bits*. Entretanto, ainda há desafios a serem investigados, especialmente em ambientes como os industriais e em cenários nos quais múltiplos dispositivos coexistem e compartilham o mesmo espectro.

Há outras tecnologias, como o TSCH (*Time-Slotted Channel Hopping*), que se caracterizam como redes de baixa potência projetadas para proporcionar comunicação confiável e eficiente em termos energéticos. Essas redes atendem especialmente às aplicações de IoT e automação industrial, pois adotam mecanismos de agendamento baseados em *slots* de tempo e técnicas de salto de canal, que mitigam interferências e reduzem o consumo de energia (Nielsen et al., 2022). Embora o Wi-Fi e o TSCH (IEEE 802.15.4e) operem na mesma faixa de 2,4 GHz, seus propósitos e arquiteturas diferem significativamente. O Wi-Fi é projetado para oferecer altas taxas de transmissão e pode atingir, em valor nominal, até 9,6 Gbps com o padrão IEEE 802.11ax, sob condições ideais (Merces et al., 2025). Em contrapartida, o TSCH prioriza a confiabilidade da comunicação e opera com taxas nominais significativamente inferiores, de até 250 kbps, mas pode apresentar maior confiabilidade em ambientes ruidosos (Chwalisz, 2018).

Outra tecnologia de destaque no contexto industrial é o WirelessHART, um protocolo sem fio padronizado pela IEC 62591 (IEC, 2016), desenvolvido especificamente para aplicações em ambientes industriais. Assim como o TSCH, o WirelessHART opera na faixa de 2,4 GHz e suporta taxa de transmissão nominal de até 250 kbps, sendo projetado para garantir alta confiabilidade, baixo consumo de energia e tolerância a falhas. Ele emprega uma arquitetura baseada em redes em malha (*mesh*), com roteamento dinâmico e redundante entre os dispositivos. Cada nó da rede seleciona automaticamente o melhor caminho para comunicação com o *gateway*, considerando parâmetros como RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), que representa a intensidade do sinal recebido, e o número de saltos, que corresponde à quantidade de nós intermediários entre a origem e o *gateway* (Kostadinovic et al., 2020; Cena et al., 2020).

Outra solução sem fio voltada para a indústria é o ISA100.11a, padronizado pela IEC 62734 (IEC, 2019). Essa tecnologia compartilha diversas características com o WirelessHART, como a operação na faixa de 2,4 GHz e o uso de topologia em malha. No entanto, o ISA100.11a apresenta maior flexibilidade e modularidade, pois permite uma configuração mais eficiente dos dispositivos de campo e oferece suporte nativo ao IPv6 (*Internet Protocol version 6*) (Adriano; Rosario; Rodrigues, 2018). A arquitetura é composta por dispositivos sensores e atuadores que se conectam a um *gateway* central, o qual executa funções de roteamento, gerenciamento de

rede e segurança. O processo de formação da rede ocorre por meio de anúncios periódicos enviados pelo *gateway*, aos quais os dispositivos respondem com solicitações de associação. Após o estabelecimento da conexão, os nós transmitem dados operacionais de forma periódica ou sob demanda, conforme a programação definida pelo sistema de gerenciamento. O ISA100.11a também implementa mecanismos de reconfiguração dinâmica e priorização de tráfego, o que o torna adequado para aplicações industriais que exigem maior confiabilidade (Padrah et al., 2020).

Apesar da evolução observada nos padrões de redes sem fio e da melhoria alcançada em diferentes aspectos, como maiores taxas de *bits* e melhor suporte à co-existência entre múltiplos usuários, a adoção de redes sem fio em ambientes industriais impõe desafios relacionados a diferentes fatores, como a interferência eletromagnética e problemas de propagação. Isso se deve à quantidade de obstáculos e equipamentos com materiais refletivos nos ambientes industriais, o que pode prejudicar a confiabilidade dessas redes (Trusova; Zavjalov, 2021; Varghese Anitha e Tandur, 2014). Para superar essas limitações, é necessário realizar a correta seleção das tecnologias a serem empregadas para as diferentes aplicações, aliada ao planejamento adequado de cobertura.

As redes 5G privadas representam uma abordagem para a conectividade industrial, oferecendo uma infraestrutura local dedicada baseada na tecnologia 5G NR (*5th Generation New Radio*). Diferentemente das redes 5G públicas, essas redes são implantadas e operadas por organizações industriais em ambientes como fábricas, armazéns, portos e minas (Kokkonien-Tarkkanen et al., 2019; Patra; Shah, 2025). Esse modelo garante controle total sobre a infraestrutura, segurança e QoS (Li et al., 2023). O 5G apresenta uma interface sem fio unificada que atende a diferentes requisitos de aplicações industriais. O padrão contempla três categorias principais de serviços (Series, 2015): eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*), com uma taxa de dados de pico de até 10 Gbps; mMTC (*Massive Machine-type Communication*), com uma densidade de conexão de até 1 milhão de nós/km²; e uRLLC (*ultrareliable, low-latency communications*), fornecendo uma latência de plano de usuário de 1 ms, com confiabilidade maior que 99,999%. Tal capacidade não está disponível em outras tecnologias sem fio industriais existentes (Aijaz, 2020).

2.2 Padrão Wi-Fi 5

As redes sem fio Wi-Fi 5, baseadas no padrão IEEE 802.11ac, introduzem melhorias significativas em relação ao IEEE 802.11n (Kaewkiriya, 2017), que é o padrão predecessor. Essas melhorias respondem às demandas crescentes por conectividade em ambientes com muitos dispositivos e em aplicações que requerem transmissão de dados em tempo real, como jogos *online* e *streaming* de vídeos em alta resolução. No contexto industrial, esses avanços tornam-se ainda mais relevantes, ao viabilizar uma conectividade confiável e de alto desempenho, importante para a automação de processos e para a eficiência operacional (Fernandes et al.,

2021).

O IEEE 802.11ac introduz mudanças principalmente na camada física, em comparação ao IEEE 802.11n. O padrão suporta canais de 20, 40 e 80 MHz e oferece suporte opcional para operação em canais de 160 MHz, mas apenas na banda de 5 GHz. Pontos de acesso IEEE 802.11ac com *dual band* costumam operar como dispositivos (IEEE 802.11n) na banda de 2,4 GHz (Fernandes et al., 2021). A tecnologia também adota o método de modulação baseado em OFDM, conforme detalhado na Seção 2.2.1, com suporte à modulação 256-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) (o padrão predecessor dá suporte apenas até a modulação 64-QAM), o que permite alcançar taxas de *bits* nominais de até 6,93 Gbps (Dianu; Riihijärvi; Petrova, 2014).

Outro avanço importante do Wi-Fi 5 é a adoção do MU-MIMO (*Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*), que utiliza múltiplas antenas tanto no transmissor quanto no receptor. Ao contrário do SU-MIMO (*Single-User Multiple Input Multiple Output*), que permite a comunicação com apenas um dispositivo por vez (Heo et al., 2020), o MU-MIMO possibilita a transmissão simultânea para múltiplos dispositivos, o que aumenta a eficiência da rede. No entanto, o padrão oferece suporte apenas ao MU-MIMO no sentido *downlink*, com até oito fluxos espaciais distribuídos entre, no máximo, quatro clientes. Esse recurso permite que vários dispositivos recebam dados simultaneamente do AP, o que reduz a competição pelo canal sem fio (Bandyopadhyay et al., 2023). Por exemplo, no modo de 80 MHz, o sistema pode transmitir pacotes simultaneamente para quatro clientes, com taxa de 866,6 Mbps por cliente, ao considerar dois fluxos espaciais por dispositivo. Essa configuração resulta em uma taxa agregada de 3,46 Gbps, valor quatro vezes superior ao obtido sem o uso de MU-MIMO (Nee, 2011). Esse aprimoramento beneficia especialmente ambientes com alta densidade de dispositivos, como fábricas inteligentes, pois garante conexões simultâneas e mais estáveis para múltiplos equipamentos.

A Tabela 1 resume as principais diferenças entre os padrões Wi-Fi 4 e Wi-Fi 5, com destaque aos avanços nas camadas física e MAC (*Medium Access Control*) que possibilitam melhorias significativas em termos de capacidade, modulação e taxa de transmissão dos dados.

Tabela 1 – Comparação das especificações dos padrões Wi-Fi 4 e Wi-Fi 5.

Característica	Wi-Fi 4 (802.11n)	Wi-Fi 5 (802.11ac)
Banda de frequência (GHz)	2,4 / 5	5
Tecnologia PHY	OFDM	OFDM
Largura de canal (MHz)	20 / 40	20 / 40 / 80 / 160
Modulação	64-QAM	256-QAM
Tecnologia MIMO	MIMO	MU-MIMO (<i>downlink</i>), até 4 usuários
Economia de energia	PSM	PSM
Taxa nominal de dados (Gbps)	0,6	6,93

Fonte: Adaptado de (Mozaffariahrar; Theoleyre; Menth, 2022).

O padrão IEEE 802.11ac também inclui o modo de economia de energia denominado PSM (*Power Save Mode*), que permite aos dispositivos sem fio reduzir o consumo energético ao alternar entre os estados ativo e de baixo consumo (*sleep*). Ao ativar esse modo, o dispositivo entra em um estado de inatividade controlada, no qual a interface de rádio permanece desligada temporariamente. Nesse período, o dispositivo não transmite ou recebe dados, o que reduz o consumo de aproximadamente 1,0 W (modo ativo) para cerca de 0,13 W (modo *sleep*), alcançando uma economia de até 87% (Zheng; Hou; Sha, 2004).

Para evitar a perda de dados durante o modo *sleep*, o padrão IEEE 802.11 adota um mecanismo de sincronização baseado em intervalos de *beacon*. Esses intervalos consistem em períodos regulares nos quais os dispositivos da rede sem fio são ativados de forma coordenada para realizar a sincronização e verificar a presença de dados pendentes (Bhargava; Raghava, 2022). Ao final de cada intervalo de *beacon*, todos os dispositivos da rede realizam o envio de mensagens de controle, conhecidas como ATIM (*Ad hoc Traffic Indication Message*). Durante uma janela específica (*ATIM window*), os transmissores informam quais dispositivos possuem pacotes armazenados para entrega. Caso um dispositivo receba uma ATIM direcionada a ele, envia um ACK e permanece ativo até o fim do intervalo para receber os dados. Na ausência de pacotes pendentes, o dispositivo retorna ao estado de baixo consumo até o próximo ciclo de *beacon* (Zheng; Hou; Sha, 2004). No entanto, o PSM apresenta limitações, sobretudo em cenários com tráfego reduzido. Mesmo na ausência de dados para transmissão, os dispositivos precisam permanecer ativos a cada intervalo de *beacon* para monitorar as mensagens ATIM. Como consequência, mesmo com apenas 10% de carga de tráfego, os dispositivos permanecem ativos, em média, durante 50% do tempo para realizar a troca de mensagens de controle, o que resulta em consumo adicional de energia, mesmo na ausência de atividade efetiva na rede (Palacios-Trujillo et al., 2016; Bhargava; Raghava, 2022).

O Wi-Fi 5 adicionalmente emprega o *Beamforming*, técnica que direciona o sinal com precisão para os dispositivos conectados, em vez de distribuí-lo de forma omnidirecional. Esse recurso amplia o alcance efetivo da rede e melhora a qualidade do sinal (Bartolín-Arnau et al., 2025).

2.2.1 Técnica OFDM

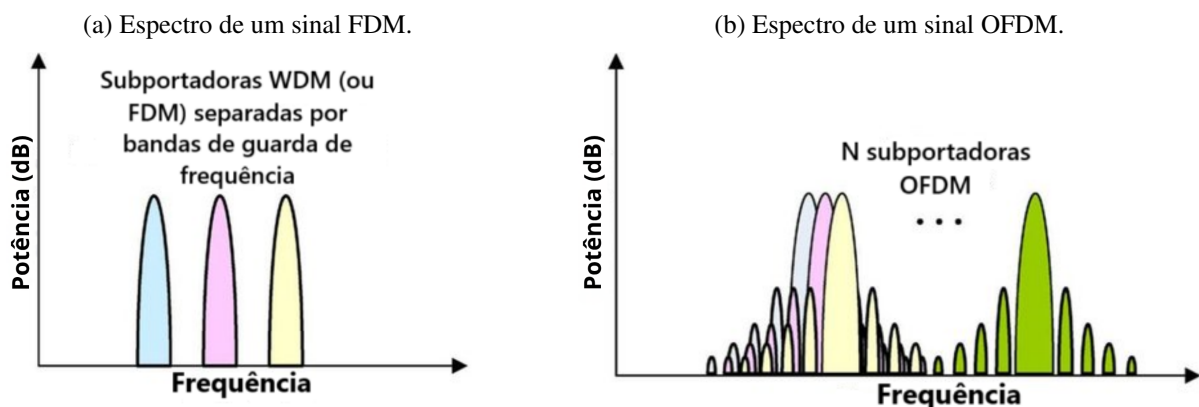
A técnica OFDM foi desenvolvida para aplicações em sistemas de telecomunicações (Arano; Azurdia-Meza, 2016). Esse método utiliza a transmissão paralela de dados por meio de múltiplas subportadoras, ou seja, sinais de diferentes frequências que compartilham o mesmo canal de comunicação. Cada subportadora admite modulação independente por técnicas como QAM ou PSK (*Phase Shift Keying*). A QAM codifica os dados ao variar simultaneamente a amplitude de dois sinais portadores em quadratura, o que permite representar múltiplos *bits* por símbolo. Por outro lado, a PSK emprega mudanças na fase da portadora para representar a informação e oferece maior eficiência contra ruído, embora com menor capacidade de

transmissão (Arrano; Azurdia-Meza, 2016).

A organização ortogonal das subportadoras diferencia o OFDM de outras técnicas, como FDM (*Frequency Division Multiplexing*). Essa propriedade permite que as subportadoras compartilhem o espectro de forma sobreposta, sem causar interferência entre si. O receptor consegue separar cada uma delas por meio de métodos matemáticos, o que torna o sistema eficiente no combate à interferência intersimbólica (*Intersymbol Interference* – ISI), um efeito recorrente em canais dispersivos, que são caracterizados pela presença de múltiplos caminhos de propagação com diferentes atrasos, fazendo com que cópias defasadas do mesmo sinal cheguem ao receptor, provocando sobreposição entre símbolos consecutivos. Com a aplicação de filtros apropriados, o receptor recupera individualmente as subportadoras, mesmo quando suas frequências se sobrepõem parcialmente (Pathak, 2012).

O OFDM apresenta avanços em relação à técnica FDM, a qual requer a inserção de bandas de guarda entre as subportadoras para evitar interferências entre os sinais adjacentes. Embora essa estratégia funcione, ela desperdiça parte do espectro, pois parte da largura de banda total é reservada apenas para proteção contra sobreposições (MEDEIROS et al., 2021). No OFDM, essas bandas de guarda tornam-se desnecessárias devido à ortogonalidade das subportadoras, que permite sua sobreposição sem prejuízo à integridade da transmissão. Essa característica resulta em um uso mais eficiente do espectro, conforme ilustrado na Figura 1. Na Figura 1a, observa-se o espectro de um sinal FDM, onde cada subportadora está separada por uma banda de guarda. A Figura 1b apresenta o espectro de um sinal OFDM, em que as subportadoras estão dispostas de forma mais compacta e com sobreposição no domínio da frequência. Essa sobreposição só é possível porque as subportadoras são ortogonais entre si, ou seja, mesmo que compartilhem partes do espectro, elas podem ser separadas matematicamente no receptor sem interferência mútua. Isso resulta em alta eficiência espectral e permite a transmissão de um maior volume de dados em uma mesma faixa de frequência (MEDEIROS et al., 2021).

Figura 1 – Espectros de um sinal FDM e OFDM.



Fonte: Adaptado de (Kafal, 2012).

Além de eliminar a necessidade de bandas de guarda, a técnica OFDM também apresenta

vantagens em relação ao domínio do tempo. Ao dividir o canal em várias subportadoras com taxas de transmissão reduzidas, a técnica amplia a duração de cada símbolo, o que torna o sistema menos sensível à dispersão temporal causada por multipercurso, um problema que ocorre em ambientes internos ou com um grande número de reflexões (Pinto; Albuquerque, 2002). Em sistemas convencionais de portadora única, as múltiplas réplicas do sinal chegam ao receptor em instantes ligeiramente diferentes e provocam interferência entre símbolos consecutivos. Essa interferência dificulta a correta interpretação do símbolo atual, pois partes do símbolo anterior ainda são recebidas. O OFDM reduz significativamente esse problema ao aumentar a duração dos símbolos em cada subportadora e, principalmente, ao implementar um intervalo de guarda com extensão cíclica, que atua como uma proteção contra os atrasos introduzidos por caminhos refletidos. Dessa forma, o sistema mantém a ortogonalidade entre as subportadoras e evita a sobreposição entre símbolos consecutivos, mesmo em canais com propagação multipercurso (Pinto; Albuquerque, 2002; Solutions et al.,).

2.3 Padrão Wi-Fi 6

O Wi-Fi 6, baseado no padrão IEEE 802.11ax, representa uma evolução significativa em relação ao Wi-Fi 5. O novo padrão inclui melhorias voltadas ao suporte de múltiplos dispositivos conectados de forma simultânea e às crescentes demandas por altas taxas de transferência (Mozaffariahrar; Theoleyre; Menth, 2022). Uma das vantagens do padrão Wi-Fi 6 é a capacidade de operar nas bandas de frequência de 2,4 GHz e 5 GHz, enquanto o padrão Wi-Fi 5 está limitado à banda de 5 GHz. Além disso, o padrão permite o uso de larguras de canal de 20, 40, 80 e 160 MHz, conforme a faixa de frequência disponível e o suporte do AP à configuração dessas larguras de canal.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os padrões Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6, com destaque para os avanços introduzidos na camada física e na capacidade de transmissão.

Tabela 2 – Comparação das especificações dos padrões Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6.

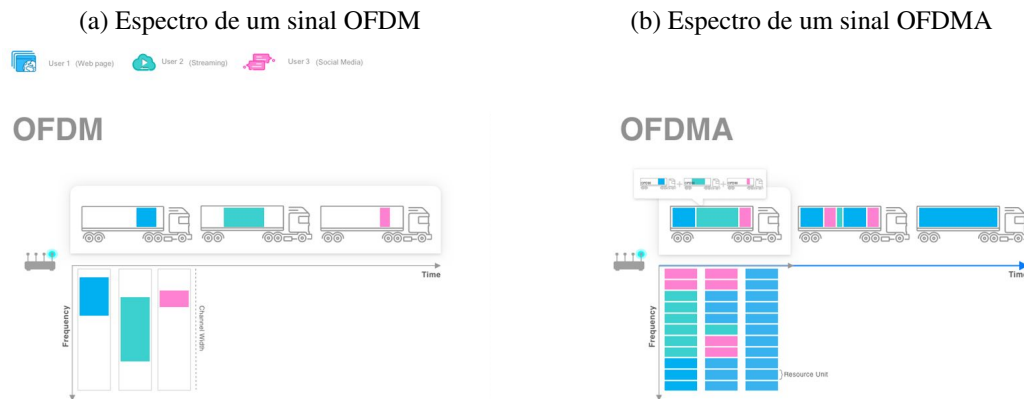
Característica	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)
Banda de frequência (GHz)	5	2,4 / 5
Tecnologia PHY	OFDM	OFDMA
Largura de canal (MHz)	20 / 40 / 80 / 160	20 / 40 / 80 / 160
Modulação	256-QAM	1024-QAM
Tecnologia MIMO	MU-MIMO (<i>downlink</i>), 4 usuários	MU-MIMO (<i>uplink</i> e <i>downlink</i>), 8 usuários
Economia de energia	PSM	TWT
Taxa nominal de dados (Gbps)	6,93	9,6

Fonte: Adaptado de (Li; Wang, 2024).

O padrão IEEE 802.11ax aprimora o mecanismo de acesso ao canal ao introduzir a

tecnologia de acesso múltiplo OFDMA, que é discutida em mais detalhes na Seção 2.3.1. Assim como no Wi-Fi 5, também há suporte para o MU-MIMO, com o objetivo de otimizar o desempenho em ambientes com múltiplos usuários. A Figura 2 ilustra a diferença entre os esquemas de múltiplo acesso OFDM e OFDMA.

Figura 2 – Espectros de um sinal OFDM e OFDMA.



Fonte: Adaptado de (ASUS, 2024).

Na Figura 2a, o modelo baseado em OFDM é representado por “caminhões” que transportam, individualmente, as cargas de cada usuário. Cada “caminhão” representa um símbolo OFDM que ocupa toda a largura de canal disponível e é usado para enviar os dados de apenas um usuário por vez. As cores azul, verde e rosa representam os pacotes dos usuários 1 (navegação web), 2 (*streaming* de vídeo) e 3 (redes sociais), respectivamente. Mesmo quando um usuário tem pouca informação a transmitir, como o usuário 1, ele ainda utiliza um “caminhão” inteiro, desperdiçando largura de banda e tempo de uso do canal.

Por sua vez, na Figura 2b, o OFDMA divide o canal em múltiplas unidades de recurso e permite que diferentes usuários compartilhem o mesmo símbolo OFDM. Cada “caminhão” transporta pacotes de vários usuários de forma simultânea e organiza os dados no domínio da frequência e do tempo. As cores representam os mesmos usuários, e suas transmissões podem ser alocadas com precisão, de acordo com a demanda de cada um. Assim, o Usuário 1 envia um pequeno pacote, enquanto o Usuário 2 ocupa mais subportadoras para transmitir um fluxo contínuo, como o de vídeo. Isso permite um uso mais eficiente do espectro e diminui a latência, especialmente em cenários com muitos dispositivos ativos. Dessa forma, o OFDMA otimiza a ocupação do canal ao permitir transmissões simultâneas, reduzindo o tempo de espera dos usuários e melhorando a eficiência da rede (Wang; Huang; Shao, 2022).

O Wi-Fi 6 suporta a modulação 1024-QAM, o que amplia a capacidade de transmissão de dados e permite alcançar uma taxa de *bits* nominal de até 9,6 Gbps (Tokhirov, Ezozbek; Aliev, Ravshan, 2023). Além disso, o padrão estende o suporte ao MU-MIMO para os sentidos de *downlink* e *uplink*, o que supera a limitação do Wi-Fi 5, que o aplicava apenas ao *downlink*. O Wi-Fi 6 permite a comunicação simultânea com até oito clientes, tanto no *downlink* quanto no

uplink. Com essa evolução, o AP transmite e recebe dados de múltiplos dispositivos e otimiza o desempenho da rede em ambientes com alta densidade de usuários (Rathor; Joshi, 2021). Esses avanços tornam os sistemas Wi-Fi adequados para aplicações de maior criticidade, como aquelas presentes em contextos industriais, que exigem baixa latência e alta confiabilidade (Suer; Jose; Tchouankem, 2022).

O Wi-Fi 6 também implementa o recurso TWT (*Target Wake Time*), que tem o objetivo de melhorar a eficiência energética e o gerenciamento da rede, especialmente em cenários com alta densidade de dispositivos conectados. Diferente do mecanismo PSM, que exige que os dispositivos despertem periodicamente para verificar a presença de dados a serem transmitidos (Bhargava; Raghava, 2022), o TWT estabelece janelas de tempo específicas nas quais os dispositivos transmitem ou recebem dados e permanecem em estado de baixo consumo fora desses períodos. O AP e as estações negociam acordos de agendamento que determinam os horários exatos de ativação, o que reduz o consumo de energia e amplia a autonomia de dispositivos móveis, como *smartphones*, *laptops* e equipamentos IoT (*Internet of Things*) (Nurchis; Bellalta, 2019). Cada acordo TWT especifica três parâmetros principais: o *Target Wake Time* θ_i , que indica o início do próximo período de atividade; o *TWT Wake Interval* τ_i , que define o intervalo entre dois períodos consecutivos de ativação; e o *Nominal Wake Duration* d_i , que representa o tempo de permanência da estação em estado ativo. Esses parâmetros determinam o ciclo de operação dos dispositivos de forma precisa e coordenada (Venkateswaran et al., 2024).

O padrão IEEE 802.11ax também permite diferentes modos de operação do TWT, organizados segundo dois critérios principais: a forma de agendamento, individual ou *broadcast*, e o tipo de negociação, explícito ou implícito, além da opção de operação com ou sem *trigger*. No modo individual, o AP estabelece acordos de TWT personalizados com cada ST, o que permite definir ciclos de ativação ajustados ao perfil de tráfego de cada dispositivo. Por outro lado, no modo *broadcast* o AP define e anuncia um cronograma comum de atividade para um grupo de estações, por meio de quadros de gerenciamento enviados periodicamente pelo AP, denominados *Beacon frames*. Todas as STAs (*Stations*) que aderirem a esse acordo seguem os mesmos parâmetros de tempo, ativando suas interfaces de rede em conjunto. Esse modo é especialmente eficiente em redes com um grande número de dispositivos com padrões de comunicação semelhantes, como dispositivos IoT, pois reduz a sinalização e o consumo de energia (Nurchis; Bellalta, 2019). No modo explícito, o acordo de TWT é estabelecido com troca direta de mensagens entre o AP e a STA, o que permite maior controle sobre os parâmetros. Já no modo implícito, não há negociação direta, o AP determina os parâmetros de forma fixa e espera que as STAs os sigam ciclicamente (Venkateswaran et al., 2024).

2.3.1 Técnica OFDMA

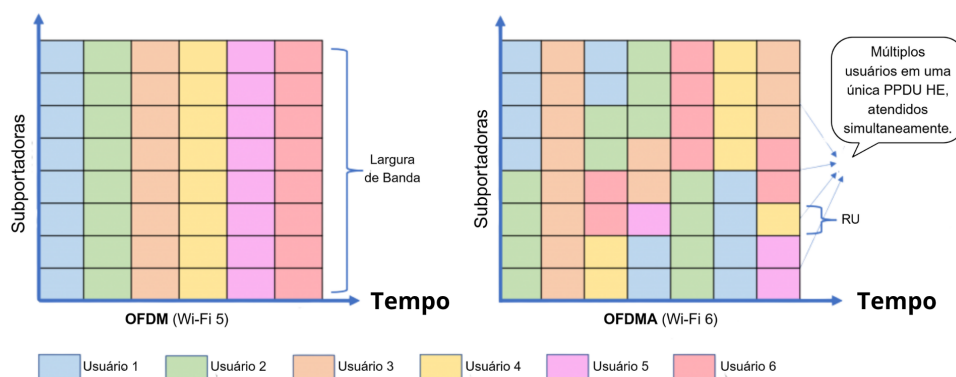
O OFDMA representa uma evolução significativa da técnica OFDM, desenvolvida para viabilizar o acesso múltiplo eficiente em sistemas de comunicação sem fio. Enquanto o OFDM

transmite dados de um único usuário através de subportadoras ortogonais, o OFDMA estende essa abordagem ao permitir que múltiplos usuários compartilhem simultaneamente o espectro disponível, de forma dinâmica e escalável (Morelli; Kuo; Pun, 2007).

No OFDMA, a estrutura do espectro é organizada em subportadoras ortogonais, que se agrupam em subcanais e são atribuídas a diferentes usuários dentro de uma grade bidimensional de tempo e frequência. Essa grade, denominada malha tempo-frequência, é composta por células chamadas REs (*Resource Elements*), cada uma correspondendo à transmissão de uma subportadora durante um único símbolo OFDM (Hussain et al., 2007). Os REs constituem a menor unidade de alocação no sistema. Ao agrupar diversos REs, formam-se as RUs (*Resource Units*), que representam os blocos efetivos de recursos atribuídos dinamicamente a cada estação. No Wi-Fi 6, o tamanho de cada RU é alterado de acordo com a largura de canal disponível e a demanda específica do usuário, o que permite um controle mais granular do acesso ao meio (Morelli; Kuo; Pun, 2007).

A Figura 3 ilustra essa organização. No lado esquerdo, observa-se o funcionamento do modelo tradicional baseado em OFDM, no qual um único usuário ocupa todo o espectro durante um intervalo de tempo. No lado direito, o Wi-Fi 6 aplica o OFDMA para particionar a grade em diferentes RUs e permite a transmissão simultânea de múltiplos usuários, como indicado pelas diferentes cores.

Figura 3 – Organização do espectro em OFDM e OFDMA.



Fonte: Adaptado de (Cisco, 2025).

Uma das principais vantagens do OFDMA é sua capacidade de adaptação dinâmica, tanto em frequência quanto em tempo. Essa adaptabilidade é importante para maximizar a eficiência espectral e atender aos requisitos de QoS. Além disso, o sistema pode aplicar modulação e AMC (*Adaptive Modulation and Coding*), que consiste em uma codificação adaptativa, de forma independente para cada usuário (Long et al., 2024). Dessa forma, um terminal com boas condições de canal pode utilizar 64-QAM, enquanto outro, em condições degradadas, opera com BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) ou QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). Essa estratégia garante equilíbrio entre desempenho e confiabilidade e otimiza a capacidade do sistema mesmo em cenários variados (Morelli; Kuo; Pun, 2007).

No entanto, o funcionamento eficiente do OFDMA exige uma sincronização precisa entre os usuários, principalmente no enlace de *uplink*, onde múltiplos terminais transmitem de forma simultânea para o AP. Pequenos desvios de tempo ou frequência entre os usuários podem comprometer a ortogonalidade entre as subportadoras, o que leva à ocorrência de dois tipos principais de interferência:

- ICI (*Inter-Carrier Interference*) corresponde à interferência entre portadoras e ocorre quando a perda de ortogonalidade faz com que a energia de uma subportadora se dissipe sobre as demais, o que dificulta a separação correta dos sinais e degrada a qualidade da recepção (García; Oberli, 2009);
- MAI (*Multiple Access Interference*) caracteriza a interferência entre usuários e ocorre quando as transmissões simultâneas de diferentes terminais, alocados em RUs distintas, não estão perfeitamente sincronizadas, o que provoca sobreposição indevida entre os sinais de usuários distintos (Perron; Diggavi; Telatar, 2009).

Esse cenário se torna ainda mais crítico em ambientes com mobilidade, nos quais os usuários estão sujeitos a variações rápidas de canal, atrasos de propagação e efeitos *Doppler*, que consistem na mudança da frequência do sinal recebido devido ao movimento relativo entre transmissor e receptor. Nessas condições, o sistema exige mecanismos de sincronização e correção de frequência para manter a ortogonalidade, o que representa um dos principais desafios no projeto e na operação de sistemas baseados em OFDMA. Para lidar com esse problema, o sistema emprega mecanismos de sincronização, como canais de *ranging* dedicados e algoritmos de correção de tempo e frequência. Os terminais enviam sequências de pré-sincronização, com base nas quais o AP estima o atraso e o deslocamento de frequência de cada usuário. Após essa estimativa, o sistema ajusta os parâmetros de transmissão dos terminais e garante que suas subportadoras permaneçam ortogonais e não se sobreponham indevidamente (Morelli; Kuo; Pun, 2007; Hussain et al., 2007).

2.3.2 Padrões Wi-Fi 6 E

O crescimento no número de dispositivos habilitados para Wi-Fi e demanda por conexões mais rápidas e com maior capacidade saturaram a utilização das bandas de 2,4 GHz e 5 GHz (Dogan-Tusha et al., 2023). Para enfrentar esse desafio, o Wi-Fi 6 E, uma extensão do Wi-Fi 6, adiciona suporte à banda não licenciada de 6 GHz. Com essa nova faixa de frequência, a quantidade de canais disponíveis é ampliada, o que reduz o congestionamento da rede e aumenta a largura de banda disponível. Essa combinação permite taxas de transferência de dados mais elevadas e estáveis, especialmente em ambientes com alta densidade de dispositivos conectados (Jiang et al., 2023; Naik; Park, 2021).

2.4 Padrão Wi-Fi 7

O padrão IEEE 802.11be, conhecido como Wi-Fi 7 (Khorov; Levitsky; Akyildiz, 2020), prioriza o aumento da taxa de transferência. Para isso, adota a modulação 4096-QAM, canais com largura de 20, 40, 80, 160 e 320 MHz e MU-MIMO com 16 fluxos espaciais. Com essas melhorias, o Wi-Fi 7 alcança uma capacidade teórica de transmissão de até 46 Gbps, superando o Wi-Fi 6, cuja capacidade teórica máxima é de 9,6 Gbps. Um dos avanços mais debatidos pelos desenvolvedores da tecnologia é a operação ML (*multi-link*). Esse recurso permite que os dispositivos ampliem a largura de banda disponível ao utilizar simultaneamente múltiplos canais sem fio. O ML combina diferentes segmentos de espectro e transmite dados de forma paralela por meio de múltiplos canais de frequência. Essa abordagem aumenta a eficiência no uso do espectro, eleva a taxa de transferência, reduz atrasos e aprimora a confiabilidade na entrega das informações. Ao comparar com a operação tradicional em banda larga Wi-Fi, o ML utiliza o espectro de forma mais flexível (Korolev; Levitsky; Khorov, 2022; Khorov; Levitsky; Akyildiz, 2020).

A Tabela 3 apresenta uma síntese dessas evoluções e compara os padrões Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7 quanto à modulação, à largura de canal, à tecnologia MIMO e à capacidade de transmissão.

Tabela 3 – Comparação entre os padrões Wi-Fi 6 e Wi-Fi 7.

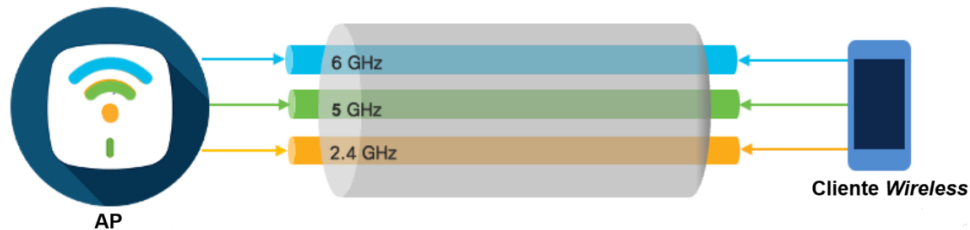
Característica	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Banda de frequência (GHz)	2,4 / 5 / 6	2,4 / 5 / 6
Tecnologia PHY	OFDM, OFDMA	OFDM, OFDMA
Largura de canal (MHz)	20 / 40 / 80 / 160	20 / 40 / 80 / 160 / 320
Modulação	1024-QAM	4096-QAM
Tecnologia MIMO	MU-MIMO (<i>uplink e downlink</i>) 8 usuários	MU-MIMO (<i>uplink e downlink</i>) 16 usuários
Economia de energia	TWT	TWT
Taxa nominal de dados (Gbps)	9,6	46

Fonte: Adaptado de (Mozaffariahrar; Theoleyre; Menth, 2022; Chen et al., 2022).

O recurso ML permite usar vários canais como *links* lógicos independentes, ou seja, acessar cada canal independentemente um do outro. A Figura 4 apresenta esse conceito, com os canais de 2,4, 5 e 6 GHz juntos em um único link lógico que estabelece a conexão entre o AP e o cliente. Essa operação é denominada STR (*Simultaneous Transmit and Receive*) e permite que os dispositivos enviem e recebam dados ao mesmo tempo por múltiplos canais. No entanto, quando os canais operam em frequências muito próximas (Levitsky; Okatev; Khorov, 2020), a transmissão em um canal pode interferir na recepção em outro. Essa interferência resulta da sobreposição ou saturação dos sinais e compromete a qualidade da comunicação. Os

APs mitigam esse tipo de interferência ao empregar cadeias de rádio independentes e filtros de alta qualidade que isolam os sinais. Esses recursos reduzem significativamente os impactos da interferência entre canais.

Figura 4 – Recurso ML.



Fonte: Adaptado de (Wi-Fi NOW, 2025).

Para enfrentar as limitações causadas pela interferência entre canais adjacentes, o Wi-Fi 7 introduz o modo de operação não-STR NSTR (*Non-Simultaneous Transmit and Receive*). Nesse modo, os dispositivos só transmitem por múltiplos canais quando os contadores de *backoff*, mecanismos que controlam o tempo de espera antes da transmissão, de todos os links atingem simultaneamente zero, o que evita interferências. Além disso, quando um quadro exige reconhecimento imediato, o sistema alinha os tempos de término de todos os quadros transmitidos. Caso não atenda a essa condição, o sistema realiza a transmissão apenas no canal cujo contador de *backoff* é reduzido a zero antes dos demais, o que garante que o acesso ao meio ocorra de forma ordenada e assegura a integridade da comunicação (Levitsky; Okatev; Khorov, 2020).

Embora o padrão Wi-Fi 7 apresente avanços em relação ao Wi-Fi 6, este trabalho avalia apenas o Wi-Fi 6. Essa escolha decorre do fato de o Wi-Fi 6 constituir uma tecnologia madura e com grande disponibilidade de dispositivos que suportam este padrão. Além disso, durante o desenvolvimento deste trabalho, a disponibilidade de equipamentos com suporte ao Wi-Fi 7 permaneceu limitada. Como perspectiva para trabalhos futuros, prevê-se a avaliação do Wi-Fi 7.

2.5 Redes Móveis

Embora os padrões IEEE 802.11 representem a principal solução de conectividade local em ambientes industriais, eles não constituem a única tecnologia sem fio disponível para esse cenário (Bartolín-Arnau et al., 2025). Em aplicações que demandam maior cobertura, mobilidade e mecanismos avançados de gerenciamento de recursos, as redes móveis são uma alternativa complementar. As redes móveis evoluíram ao longo de diferentes gerações até culminarem no 5G, a geração mais recente em operação. Essa geração atende aos requisitos de baixa latência, alta confiabilidade e elevada capacidade exigidos por aplicações industriais. Para contextualizar, este trabalho apresenta inicialmente uma breve descrição da evolução do 4G para o 5G e, em seguida, descreve os princípios, a arquitetura e os mecanismos de acesso ao meio do 5G.

2.5.1 Redes Móveis de Quinta Geração

Introduzida em 2009, a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), base das redes 4G, passou por sucessivas evoluções que ampliaram a eficiência espectral, aumentaram as taxas de dados e reduziram a latência. Essas evoluções, denominadas LTE-Advanced e LTE-Advanced Pro, estabeleceram os fundamentos técnicos que culminaram no desenvolvimento do 5G (Sauter, 2021). Nesse contexto, por volta de 2012, tiveram início os debates sobre a quinta geração de comunicações móveis, motivados pelas limitações das redes 4G diante das novas demandas de conectividade (Sauter, 2021).

A partir desse processo evolutivo, o escopo da LTE foi ampliado de forma a atender a diversos casos de uso posteriormente associados ao 5G, com destaque para as categorias de eMBB (*enhanced Mobile Broadband*), voltada a aplicações que demandam altas taxas de transmissão, e mMTC (*massive Machine Type Communications*), relacionada ao suporte massivo de dispositivos. Dessa forma, em uma definição mais ampla, o 5G passa a ser caracterizado principalmente pelos casos de uso que suporta, e não exclusivamente por uma tecnologia específica de acesso via rádio (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

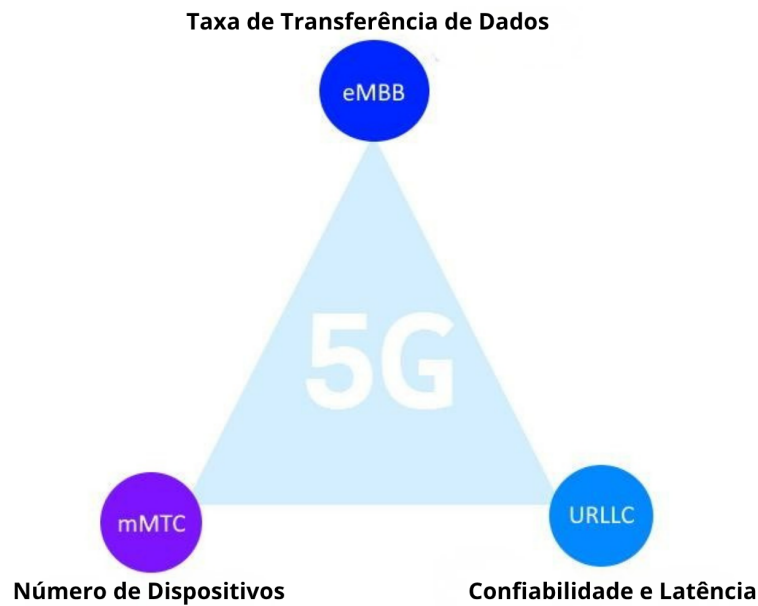
Apesar da versatilidade para atender a casos de uso diversos, a LTE apresenta limitações frente a requisitos mais rigorosos do 5G, especialmente em cenários que demandam latências ultrabaixas, como aqueles associados à categoria URLLC (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications*), voltada para aplicações que exigem comunicação com altíssima confiabilidade e tempos de resposta extremamente reduzidos. Diante desse contexto, o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) iniciou, em 2016, o desenvolvimento da tecnologia NR (*New Radio*), uma nova interface de acesso via rádio cuja primeira especificação foi concluída em 2017 (Peterson; Sunay, 2020). O 5G NR foi projetado para atender aos requisitos mais avançados do 5G e incorporar inovações tecnológicas recentes. Diferentemente da LTE, seu desenvolvimento não ficou condicionado a fortes restrições de compatibilidade retroativa, o que permitiu maior flexibilidade na definição da nova interface aérea (Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016).

Em paralelo ao desenvolvimento do NR como nova interface de acesso via rádio, o 3GPP introduziu o 5G *Core Network* (5G CN), uma arquitetura de rede projetada para suportar tanto o 5G quanto a evolução da LTE. O 5G CN oferece conectividade nativa ao NR, mas também pode operar de forma integrada com a rede EPC (*Evolved Packet Core*), correspondente ao *Core* das redes 4G. Nessa configuração, denominada modo NSA (*Non-Standalone*), as tecnologias LTE e NR coexistem e operam de forma complementar. Essa abordagem permite a introdução gradual do 5G sobre infraestruturas LTE já existentes (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

A partir dessa evolução arquitetural, o 5G passou a contemplar diferentes perfis de aplicação, organizados em três principais categorias de casos de uso: eMBB, mMTC e URLLC, conforme ilustra a Figura 5, descritas a seguir:

- **eMBB:** Essa categoria representa a evolução dos serviços de banda larga móvel, oferece

Figura 5 – Pilares de casos de uso da Rede 5G.



Fonte: Adaptado de (Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016).

maiores taxas de transmissão de dados e melhora a qualidade de experiência do usuário. Ela suporta aplicações com elevada demanda de largura de banda e pode alcançar taxas de até 10 Gbps em cenários ideais (Peterson; Sunay, 2020; Aijaz, 2020);

- **mMTC**: Viabiliza a conexão simultânea de um grande número de dispositivos, como sensores e atuadores, e suporta densidades de conexão da ordem de até 1 milhão de nós/km². Ela prioriza dispositivos de baixo custo e de reduzido consumo energético, o que permite longos períodos de operação com bateria (Peterson; Sunay, 2020; Aijaz, 2020);
- **URLLC**: Essa categoria atende a aplicações que exigem latência extremamente baixa e elevada confiabilidade, oferecendo latência no plano do usuário da ordem de 1 ms e alcançando níveis de confiabilidade de 99,999%. Ela se destina a aplicações críticas, como controle industrial em tempo real e automação de fábricas (Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016; Aijaz, 2020).

Embora essas categorias sejam úteis para a definição dos requisitos técnicos do 5G, muitos casos de uso não se enquadram de forma exclusiva em apenas uma delas. Há, por exemplo, serviços que exigem elevada confiabilidade sem requisitos rigorosos de latência ultrabaixa, bem como dispositivos de baixo custo cujas restrições energéticas não são tão críticas, o que evidencia a sobreposição parcial entre as diferentes categorias de serviço (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

2.5.2 Arquitetura das Redes Móveis 5G

A arquitetura das redes móveis 5G implementa melhorias em parâmetros como taxa de transferência de dados, latência, confiabilidade e capacidade de dispositivos conectados. Essa arquitetura foi projetada como uma infraestrutura de base capaz de suportar novas aplicações, como dispositivos IoT, automação industrial, veículos autônomos e comunicações críticas em tempo real. O 5G CN e a RAN (*Radio Access Network*) asseguram a interconexão eficiente e segura entre usuários, dispositivos e serviços (Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016).

2.5.3 5G Core Network

O *core* da rede 5G constitui a infraestrutura responsável por prover serviços e conexões da rede, realizar o controle de acesso dos usuários e aplicar as políticas de tráfego de dados. Ele apresenta flexibilidade e escalabilidade, e integra funções de rede virtualizadas, conforme o conceito de NFV (*Network Function Virtualization*), que operam sobre uma infraestrutura predominantemente orientada a *software*. Tal abordagem representa uma evolução significativa em relação às arquiteturas centralizadas e proprietárias, fortemente dependentes de *hardware*, características das gerações anteriores. Na arquitetura do 5G, o *core* é responsável pelo gerenciamento de mobilidade, autenticação de dispositivos, estabelecimento de sessões de dados e aplicação de políticas de rede (Peterson; Sunay, 2020).

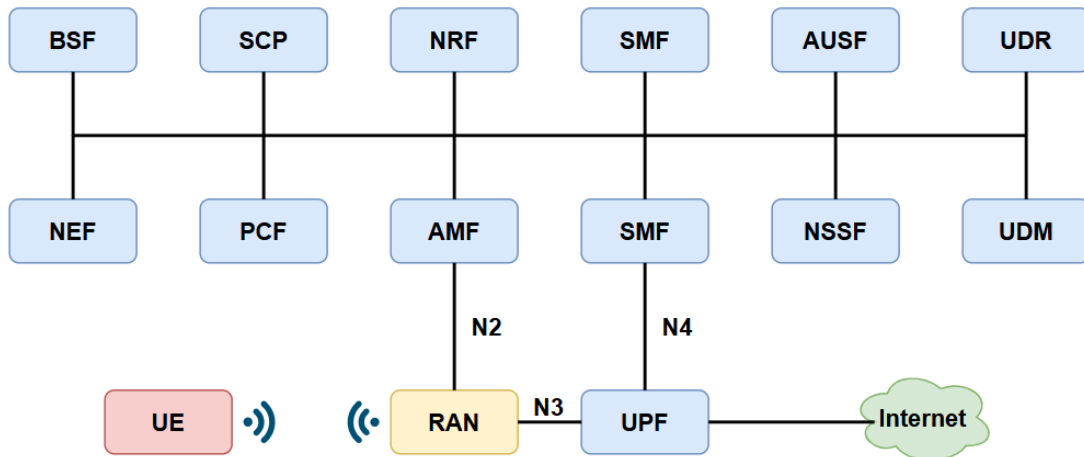
A virtualização constitui um pilar importante da arquitetura do 5G CN. Por meio da tecnologia de NFV, ele alcança maior flexibilidade e escalabilidade, o que permite o provisionamento dinâmico de recursos conforme a demanda. Essa característica contribui para a redução de custos operacionais e viabiliza a implantação ágil de novos serviços. A abordagem baseada em *software* substitui equipamentos proprietários por soluções padronizadas, o que favorece a interoperabilidade entre diferentes fornecedores (Peterson; Sunay, 2020; Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016).

Outro aspecto importante do 5G CN é sua capacidade de suportar o fatiamento de rede (*Network Slicing* - NS), o que permite criar múltiplas redes virtuais sobre a mesma infraestrutura física. Cada fatia recebe configuração e otimização para atender aos requisitos específicos de diferentes aplicações e serviços. Por exemplo, uma fatia pode atender a cenários industriais ou de IoT, para conectar sensores com baixa demanda de largura de banda, enquanto outra fornece comunicações ultra confiáveis e de baixa latência, voltadas a aplicações críticas, como veículos autônomos (Peterson; Sunay, 2020).

Dentre as funções que compõem o 5G CN, a AMF (*Access and Mobility Management Function*) gerencia o registro e a mobilidade dos usuários na rede, assegura transições eficientes entre diferentes células de acesso e atende a cenários de alta mobilidade, como veículos conectados e trens de alta velocidade (Peterson; Sunay, 2020). A Figura 6 apresenta a estrutura básica do 5G CN e a localização da AMF entre as demais funções integradas à rede, das quais as mais

relevantes para esta dissertação são descritas a seguir:

Figura 6 – Estrutura básica do *core* de uma rede 5G.



Fonte: Desenvolvido pelo autor, baseado em (Peterson; Sunay; Davie, 2023).

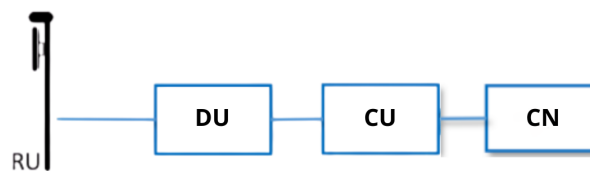
- **SMF (Session Management Function):** Estabelece e gerencia as sessões de dados entre os dispositivos e a rede, além de controlar parâmetros de QoS de acordo com os requisitos das aplicações (Lee et al., 2024);
- **UPF (User Plane Function):** Realiza o encaminhamento e o processamento do tráfego de dados do usuário, o que permite a distribuição do plano de dados ao longo da infraestrutura (Makondo et al., 2024);
- **PCF (Policy Control Function):** Define e aplica políticas de uso dos recursos de rede e assegura a priorização de serviços críticos sempre que necessário (L; Patwary, 2024);
- **NRF (Network Repository Function):** Mantém um catálogo centralizado das funções de rede disponíveis e de suas capacidades, o que possibilita a descoberta dinâmica de serviços e garante interoperabilidade, escalabilidade e operação eficiente do 5G CN.

2.5.4 Rede de Acesso de Rádio (RAN)

A RAN conecta os equipamentos dos usuários (*User Equipment* - UE) ao 5G CN e constitui a base da infraestrutura de comunicação sem fio (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020). Essa camada viabiliza o acesso à rede móvel e assegura a interface entre os dispositivos finais e as funções centrais do sistema 5G. Nesse contexto, a RAN foi projetada para atender aos rigorosos requisitos de desempenho das redes 5G, como elevada capacidade de transmissão de dados, baixa latência e suporte a alta densidade de dispositivos. Para atingir esses objetivos, a arquitetura implementa tecnologias como MU-MIMO, comunicação em ondas milimétricas (*Millimeter Wave* - mmWave) e operação em faixas de espectro não licenciadas (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020; Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016).

Além dessas inovações no nível físico e de acesso ao meio, a RAN adota uma arquitetura funcionalmente desagregada, composta pela CU (*Central Unit*) e DU (*Distributed Unit*), o que garante maior flexibilidade e escalabilidade à rede, conforme apresentado na Figura 7 (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020). A CU centraliza as funções de controle e gerenciamento de recursos, coordena a alocação de recursos de rádio, controla a mobilidade dos usuários, realiza a orquestração das diferentes fatias, gerencia as sessões de comunicação e estabelece a conexão com as DUs. A DU, por sua vez, executa o processamento de sinais em tempo real e mantém interação direta com as RUs (*Radio Units*), ao executar funções como codificação, decodificação, modulação, demodulação e mapeamento dos canais de transporte dos sinais oriundos ou destinados à RU (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

Figura 7 – Estrutura básica da RAN de uma Rede 5G.



Fonte: Adaptado de (Peterson; Sunay; Davie, 2023).

Essa separação funcional amplia a capacidade de adaptação da RAN e permite que as operadoras implementem arquiteturas flexíveis, de acordo com as necessidades específicas do ambiente e das aplicações, ao mesmo tempo em que suporta funções de controle, como autenticação de dispositivos, configuração de sessões de dados, gerenciamento de mobilidade e alocação de recursos de rádio entre diferentes DUs (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

2.5.4.1 Separação de Plano de Controle e do Plano de Dados

Na RAN 5G, a separação entre o plano de controle e o plano de dados aumenta a eficiência operacional e amplia a flexibilidade da arquitetura. O plano de controle gerencia a sinalização relacionada à autenticação, à configuração de conexões e ao gerenciamento de mobilidade entre os dispositivos e a rede. Já o plano de dados transporta o tráfego de dados do usuário (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

No plano de controle, a função de sinalização de controle de recurso de rádio RRC (*Radio Resource Control*) gerencia a configuração das conexões e realiza a alocação dinâmica de recursos. O RRC coordena o *handover* entre células e assegura a continuidade do serviço, inclusive em cenários de alta mobilidade, como em veículos conectados (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

No plano de dados, a interface de rádio utiliza tecnologias como OFDMA para alocar de forma eficiente os recursos espectrais entre múltiplos usuários. A rede realiza a codificação e decodificação de canal, modula e transmite pacotes com foco em altas taxas de transferência e

baixa latência. A arquitetura também utiliza técnicas como *beamforming* dinâmico para melhorar a qualidade do sinal e reduzir interferências, especialmente em faixas de frequência mais elevadas, como as ondas milimétricas (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020; Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016).

2.5.5 Protocolo GPRS *Tunneling Protocol*

O GTP (*GPRS Tunneling Protocol*) é um protocolo da camada de rede, baseado em IP (*Internet Protocol*), cuja principal função consiste em criar túneis para transportar pacotes de dados do usuário e mensagens de sinalização do plano de controle através da RAN e do 5G CN (Peterson; Sunay, 2020). Para isso, o protocolo encapsula as unidades de dados de pacote PDU (*Packet Data Unit*) do usuário e permite o roteamento desses pacotes pela infraestrutura da rede de forma independente.

Na arquitetura 5G, esse mecanismo de tunelamento integra o funcionamento do plano de dados e utiliza o GTP como protocolo padrão nas interfaces N3, que conecta a RAN à UPF, e N9, que interliga diferentes UPFs (Peterson; Sunay, 2020). Para garantir a correta operação desse mecanismo, o plano de controle, por meio de funções como o SMF, coordena o estabelecimento, a modificação e o encerramento dos túneis GTP associados a cada sessão de usuário e assegura o correto encaminhamento do tráfego no plano de dados.

Quando a UE envia um pacote IP para um destino externo, a rede trata esse pacote como carga útil, adiciona um cabeçalho GTP-U e encapsula o conjunto em um datagrama UDP (*User Datagram Protocol*)/IP para transporte na rede (Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016; Peterson; Sunay, 2020). Esse processo introduz um nível adicional de identificação específico da sessão móvel e permite à rede distinguir os fluxos pertencentes a diferentes usuários.

O cabeçalho GTP-U possui uma estrutura simplificada e inclui apenas os campos necessários para o correto encaminhamento no *core* da rede móvel. Diferentemente da comunicação TCP (*Transmission Control Protocol*)/IP, o GTP acrescenta um nível adicional de identificação específico para a sessão móvel. Entre os principais campos do cabeçalho, destacam-se:

- **Flags de Versão:** Versão do GTP;
- **Tipo de Mensagem:** São 8 *bits* que definem o tipo de mensagem GTP;
- **Comprimento:** Campo de 16 *bits* que especifica o tamanho da carga útil do GTP;
- **TEID (*Tunnel Endpoint Identifier*):** Identificador de 32 *bits* que associa cada pacote a um túnel específico. Ao receber um pacote encapsulado, a UPF utiliza o TEID para identificar a sessão correspondente e aplicar as regras de QoS, cobrança e roteamento antes de encaminhá-lo ao destino final (Peterson; Sunay, 2020).

2.5.6 Redes 5G Privativas

Para atender às demandas específicas de indústrias e empresas, o 3GPP definiu especificações para a implementação de redes 5G privativas, também denominadas NPN (*Non-Public Networks*), que consistem em infraestruturas locais projetadas para oferecer conectividade sem fio dedicada em áreas geográficas delimitadas e de acesso restrito (Wen et al., 2022).

Diferente das redes públicas disponibilizadas por operadoras, as redes 5G privativas permitem que as próprias organizações exerçam controle direto sobre suas operações. O proprietário define a alocação de recursos, estabelece políticas de priorização de tráfego e implementa mecanismos de segurança conforme os requisitos do ambiente. Esse modelo assegura que dados sensíveis permaneçam dentro das instalações da organização, o que fortalece a segurança das informações. Além disso, a rede privada mantém as capacidades associadas aos três pilares do 5G (eMBB, mMTC e URLLC) e possibilita suporte a aplicações com requisitos heterogêneos de desempenho (Homayouni et al., 2023).

2.5.6.1 Arquiteturas de Implantação

Para a implantação de redes 5G privativas, o 3GPP analisou casos de uso e definiu duas arquiteturas de implantação: o modelo autônomo SA (*Standalone*) e o modelo integrado à rede pública. A implementação privada da rede 5G SA, conhecida como SNPN (*Standalone Non-Public Network*), é um sistema isolado e independente, onde não há dependência de uma rede pública ou operadora. Portanto, todas as funções de rede, como a RAN e o 5G CN, são contidas dentro do perímetro lógico da organização. Este modelo oferece o mais alto nível de customização, controle e segurança, pois utiliza identificadores de rede únicos e, frequentemente, espectro de frequência privado, o que garante total isolamento físico e lógico (Jerichow et al., 2020).

Por outro lado, a implantação integrada à rede pública conta com o suporte de uma operadora e não estabelece isolamento físico completo. Esse modelo oferece um nível menor de customização e controle, mas apresenta um custo de implantação menor (Homayouni et al., 2023). Para a implementação de redes 5G privativas integradas à rede pública, destacam-se três possíveis modelos de conexão (Osseiran; Monserrat; Marsch, 2016; Peterson; Sunay, 2020):

- **RAN Compartilhada:** A rede privada e a operadora compartilham parte da infraestrutura da RAN, enquanto mantêm separadas as demais funções de rede. Esse modelo mantém o tráfego de dados do usuário restrito à área local;
- **RAN e Plano de Controle Compartilhados:** A operadora compartilha a infraestrutura da RAN e assume as funções do plano de controle. O tráfego de dados do usuário permanece na rede local. Essa abordagem pode utilizar diferentes fatias de rede;

- **Hospedada pela Operadora:** A operadora hospeda integralmente a rede privada e roteia todo o tráfego de dados por meio da infraestrutura pública. A virtualização de funções de rede assegura o isolamento lógico entre os serviços privados e públicos.

2.5.7 Espectro de Frequência de Redes 5G Privativas

A disponibilidade de espectro constitui um fator limitante, pois as frequências abaixo de 6 GHz atendem a outros serviços de comunicação. Nesse cenário, a implantação de redes 5G privativas contempla três opções principais para a obtenção de espectro (Wen et al., 2022):

- **Espectro Licenciado:** O espectro é obtido diretamente junto a uma operadora de rede móvel, que destina parte de suas faixas licenciadas para uso privado (Peterson; Sunay, 2020);
- **Espectro Privado Dedicado:** A organização adquire o espectro diretamente do órgão regulador nacional. Esse modelo assegura maior previsibilidade de desempenho, pois elimina interferências externas e permite a operação totalmente independente de operadoras públicas (Peterson; Sunay, 2020). No Brasil, a faixa de 3,7–3,8 GHz foi destinada ao uso industrial;
- **Espectro Não Licenciado:** A rede utiliza faixas de uso livre, como 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz, o que reduz significativamente os custos de implantação. Entretanto, essa alternativa pode gerar preocupações em ambientes industriais devido ao risco de interferência externa, que compromete a continuidade do serviço e a confiabilidade exigida por aplicações de missão crítica (Dahlman; Parkvall; Skold, 2020).

A escolha do modelo de espectro impacta diretamente o desempenho das redes 5G privativas, especialmente em aplicações industriais que demandam comunicação confiável, baixa latência e elevada capacidade de transmissão. Entre essas aplicações, estão os sistemas de vídeo para a Indústria 4.0, cujos desafios de implementação são discutidos na próxima seção.

2.6 Desafios de Aplicações de Vídeo para a Indústria 4.0

Nos últimos anos, os sistemas de análise de vídeo assumiram um papel fundamental em ambientes industriais, especialmente com a introdução da visão computacional como etapa inicial no controle de qualidade em linhas de produção (Wagner et al., 2023). No entanto, os dispositivos de captura de vídeo utilizados nesses cenários frequentemente apresentam limitações de processamento, o que exige a transmissão das imagens para dispositivos com *hardware* de maior poder computacional. Nesse contexto, a rede exerce uma função crítica ao viabilizar a distribuição eficiente de vídeos em tempo real, com alta taxa de transmissão e baixa latência.

Diante desse cenário, a MEC (*Mobile Edge Computing*) é um paradigma que estende os recursos de computação em nuvem para a borda da rede, por meio da implantação de servidores locais próximos aos elementos de acesso, como as estações base eNodeBs (*Evolved Node B*) no 4G e gNodeBs (*Next Generation Node B*) no 5G. Esses servidores MEC executam funções como *cache*, transcodificação e pré-processamento de fluxos de vídeo, o que reduz a latência e evita o envio contínuo de dados para *data centers* remotos. Essa arquitetura aprimora serviços de vídeo sob demanda e *streaming* ao vivo, além de possibilitar novos casos de uso, como análise de vídeo em tempo real (Khan et al., 2022).

Nesse contexto, o *middleware* é um componente importante na evolução da computação, preenchendo a lacuna entre dispositivos de ponta distribuídos e sistemas de nuvem centralizados. À medida que a computação de borda cresce em destaque devido à crescente demanda por processamento de baixa latência, análises em tempo real e aplicações descentralizadas, as soluções de *middleware* estão em evolução para permitir comunicação, gerenciamento de recursos e gerenciamento de fluxos de vídeo (Cate, 2023).

No cenário de aplicações distribuídas de vídeo com suporte à computação em borda, o *middleware* atua como uma camada intermediária responsável por integrar módulos dedicados à captura, ao processamento, à distribuição e à disponibilização dos fluxos de vídeo (Neto et al., 2024). A Seção 2.7 descreve a arquitetura e os principais mecanismos do *middleware* adotados na segunda parte desta dissertação.

Com esse cenário, é importante que a rede ofereça uma alta taxa de transmissão para permitir a distribuição adequada de vídeos em tempo real. Estudos experimentais mostram que, para vídeos em resolução FHD (*Full High Definition*) (1920×1080), é necessária uma taxa de *bits* mínima de 7,5 Mbps para se obter boa qualidade perceptiva, tanto ao utilizar o *codec* H.264 quanto o H.265. Para vídeos em UHD (*Ultra High Definition*) (3840×2160), o *codec* H.264 exige pelo menos 11,55 Mbps, enquanto o H.265 atinge boa qualidade a partir de 9 Mbps (Uhrina et al., 2021). A adoção de *codecs*, como H.265 e VP9, permite alcançar boa qualidade visual mesmo com taxas de transmissão menores. Em resoluções como 960×544, uma taxa de *bits* entre 1 e 2 Mbps atende aos requisitos de qualidade. Uma experiência satisfatória ocorre quando o vídeo apresenta boa nitidez, fluidez nos movimentos, ausência de travamentos e sincronização adequada entre áudio e imagem. Esses avanços em compressão contribuem para otimizar o uso dos recursos de rede, viabilizando a distribuição eficiente de vídeos em tempo real sem comprometer a experiência do usuário (Nia, 2024).

Dessa forma, a transmissão de vídeo em tempo real exige redes com baixa latência e altas taxas de transferência de dados, a fim de garantir o envio contínuo de dados, como imagens de câmeras de vigilância ou comandos de controle remoto. O Wi-Fi 6 apresenta características que o tornam uma alternativa viável para ambientes industriais, por oferecer flexibilidade e suporte a múltiplos dispositivos conectados. No entanto, sua adoção em larga escala ainda enfrenta desafios. A configuração da rede requer ajustes em parâmetros como alocação de canais, potência

de transmissão e uso de recursos como OFDMA e MU-MIMO. Além disso, sob alta carga de tráfego, o desempenho do Wi-Fi 6 pode ser comprometido, ao gerar maior latência, perdas de pacotes e redução da precisão em aplicações sensíveis, como o controle de UGVs (*Unmanned Ground Vehicles*) e transmissão de vídeo em tempo real (Rikalovic et al., 2022; Mozaffariahrar; Theoleyre; Menth, 2022).

Diante dessas limitações, reforça-se a necessidade de alternativas que conciliem desempenho, confiabilidade e flexibilidade. Tradicionalmente, redes cabeadas representaram uma solução viável nesses ambientes, ao oferecer estabilidade e baixa latência. No entanto, tecnologias sem fio, como as redes 5G privadas e o próprio Wi-Fi 6, surgem como opções mais flexíveis e menos invasivas, com potencial para atender aos requisitos de largura de banda e latência inferiores a 10 ms impostos por aplicações industriais (Peto et al., 2020; Ganesan et al., 2021).

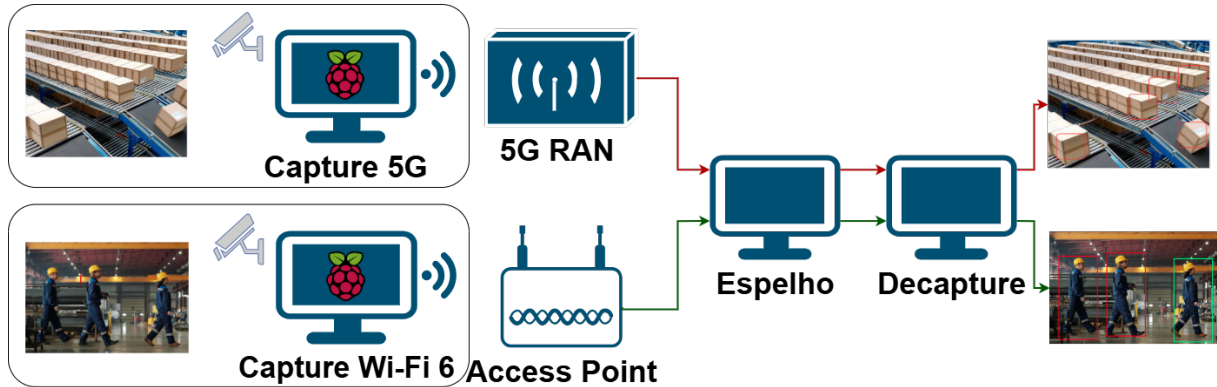
2.7 *Middleware* de Distribuição de Vídeo

A transmissão de vídeo em ambientes industriais envolve múltiplos componentes, como dispositivos de captura, mecanismos de transporte, servidores de distribuição e aplicações de processamento. Esses elementos exigem integração coordenada para garantir desempenho adequado e operação consistente. Uma camada de *software* organiza a comunicação, padroniza interfaces e controla o fluxo de dados entre os módulos do sistema.

O *middleware* de distribuição de vídeo desempenha esse papel ao atuar como uma camada intermediária entre dispositivos de captura, mecanismos de transporte de dados e sistemas de processamento. Essa camada abstrai a heterogeneidade dos dispositivos e das tecnologias de rede e fornece serviços padronizados de comunicação. Dessa forma, simplifica o desenvolvimento e a operação de aplicações de vídeo em ambientes industriais (Buyya; Srirama, 2019).

O *middleware* descrito em (Neto et al., 2024) prioriza a distribuição eficiente de vídeo e estabelece uma separação clara entre as funções de comunicação e as aplicações finais. Essa estrutura permite uma avaliação mais controlada do comportamento da infraestrutura de rede, característica relevante para ambientes industriais. Esta dissertação utiliza o *middleware* de vídeo descrito em (Neto et al., 2024), que é composto por três módulos principais, organizados conforme a arquitetura apresentada na Figura 8 e descritos a seguir:

- **Módulo Capture:** Esse módulo executa no dispositivo de aquisição de vídeo. Ele encapsula as imagens em pacotes UDP ou TCP e transmite o fluxo ao servidor de distribuição, denominado Espelho (Silva et al., 2025);
- **Módulo Espelho:** Esse módulo atua como servidor de distribuição com base no modelo (*publisher/subscriber*). Cada fluxo associa-se a um tópico específico, o que permite que assinantes recebam cópias do fluxo em tempo real;

Figura 8 – Arquitetura do *middleware* de transmissão de vídeo.

Fonte: Adaptado de (Chaves et al., 2025).

- **Módulo Decaptura:** O módulo recebe o fluxo de vídeo, executa a decodificação e disponibiliza o conteúdo por meio de dispositivos virtuais de vídeo no Linux (`/dev/video*`). O sistema permite o acesso ao fluxo como se ele tivesse origem em uma câmera local.

Essa arquitetura reduz a complexidade do processo de transmissão e facilita o desenvolvimento de algoritmos de processamento (Neto et al., 2024; Chaves et al., 2025).

2.8 Controle de Acesso ao Meio em Redes Wi-Fi e 5G

As camadas MAC do Wi-Fi e do 5G NR apresentam diferenças estruturais em relação ao modelo de compartilhamento do meio sem fio. O Wi-Fi adota um mecanismo distribuído baseado em contenção, enquanto o 5G NR emprega um modelo centralizado baseado em reserva e agendamento. Essas diferenças derivam das premissas adotadas para cada tecnologia e influenciam diretamente métricas como latência, previsibilidade e eficiência espectral.

No Wi-Fi, especialmente nas versões baseadas no padrão IEEE 802.11, o acesso ao meio ocorre por meio do mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Cada estação realiza o sensoriamento do canal antes de transmitir e somente inicia a transmissão quando detecta o meio ocioso por um intervalo denominado DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*). O DIFS corresponde a um tempo mínimo de espera definido pelo padrão IEEE 802.11 que deve transcorrer após o canal tornar-se livre antes que uma estação possa iniciar o processo de transmissão. Caso identifique o meio ocupado, a estação executa um procedimento de *backoff* aleatório e reduz progressivamente o contador apenas enquanto o canal permanecer livre.

Em contraste, o 5G é projetado para o uso intensivo do espectro, alocando deliberadamente diferentes segmentos do espectro disponível para diferentes usuários (Peterson; Sunay; Davie, 2023). Inversamente, no 5G NR, o acesso ao meio é gerenciado por meio de um agendamento centralizado, coordenado pela gNodeB e implementado principalmente na subcamada

MAC. A alocação explícita de recursos nos domínios de tempo, frequência e espaço, tornada possível pelo uso do OFDMA, elimina a contenção de canal e proporciona maior eficiência espectral e previsibilidade de desempenho, mesmo em cenários com um elevado número de dispositivos (Peterson; Sunay; Davie, 2023).

Na arquitetura do 5G NR, a subcamada MAC exerce um papel central no controle do meio. Ela realiza a alocação dinâmica de blocos de recursos RBs (*Resource Blocks*) nos domínios de tempo e frequência. Com base em indicadores de qualidade de canal CQI (*Channel Quality Indicator*), requisitos de QoS e estado dos *buffers* dos dispositivos, o agendador da gNodeB define quais usuários transmitem, em qual instante e com qual largura de banda. Além do agendamento, a subcamada MAC executa a multiplexação de canais lógicos em canais de transporte, aplica políticas de priorização de tráfego e coordena retransmissões do tipo HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*). O HARQ combina correção direta de erros FEC (*Forward Error Correction*) com retransmissões, o que permite recuperar blocos corrompidos com baixa latência. A MAC também gerencia o acesso inicial ao meio por meio do RACH (*Random Access Channel*), utilizado pelo equipamento do usuário para solicitar sincronização e recursos iniciais à gNodeB (Cuevas, 2024).

As camadas superiores RLC (*Radio Link Control*), PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) e RRC (*Radio Resource Control*) complementam o funcionamento do sistema ao prover confiabilidade adicional, segurança e controle de mobilidade. Contudo, o caráter determinístico do acesso ao meio no 5G NR resulta principalmente do modelo de agendamento implementado na subcamada MAC. Essa estrutura centralizada permite maior estabilidade em termos de latência, melhor aproveitamento espectral, especialmente em ambientes com grande densidade de dispositivos (Peterson; Sunay; Davie, 2023; Dahlman; Parkvall; Sköld, 2021).

Em síntese, o Wi-Fi privilegia a simplicidade arquitetural e a flexibilidade operacional por meio de um mecanismo distribuído baseado em contenção. O 5G NR, por sua vez, prioriza o controle centralizado e a alocação determinística de recursos, características que favorecem aplicações críticas, comunicações ultra-confiáveis e ambientes com elevada densidade de usuários.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo descreve um conjunto de trabalhos relacionados ao tema desta dissertação, com foco em estudos que avaliam o desempenho de tecnologias de comunicação sem fio aplicadas à Indústria 4.0, com ênfase no Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e redes 5G. São analisados aspectos associados à transmissão de vídeo, aos requisitos de qualidade de serviço e aos principais indicadores de desempenho utilizados para caracterizar essas tecnologias.

Em relação ao trabalho descrito em (Suer; Jose; Tchouankem, 2022), esta dissertação se diferencia por avaliar redes 5G privadas, além das tecnologias Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6. O estudo realizou uma análise experimental sobre a latência e a confiabilidade das redes Wi-Fi 6 em comparação com o Wi-Fi 5. O objetivo da pesquisa foi identificar as melhorias de desempenho oferecidas pelo Wi-Fi 6 em relação à geração anterior. Os autores consideraram perfis de tráfego periódico voltados a aplicações industriais, como a robótica móvel. O estudo também analisou os impactos do tráfego secundário de redes concorrentes e da operação de dispositivos em diferentes níveis de sinal na eficácia do Wi-Fi 6.

Os resultados do estudo mostram que, em aplicações de robótica móvel, o Wi-Fi 6 possibilita que 99% dos pacotes sejam transmitidos abaixo do requisito de 10 ms de latência, ao considerar cinco usuários e largura de canal de 80 MHz. Nessas condições, a latência correspondente ao percentil 99 no Wi-Fi 6 permanece inferior a 10 ms, enquanto que para o Wi-Fi 5 esse valor ultrapassa 30 ms. Com a introdução de tráfego de fundo gerado por uma rede que opera no mesmo canal, os resultados indicam que, para canais de 20 MHz e cinco usuários, a latência no percentil 99 do Wi-Fi 6 atinge picos superiores a 470 ms, ao passo que no Wi-Fi 5 esse valor atinge aproximadamente 250 ms. Para canais de 40 MHz sob interferência, com cinco usuários, a latência no percentil 99 foi de 15 ms no Wi-Fi 6, enquanto que no Wi-Fi 5 atingiu 50 ms. Por fim, ao utilizar uma largura de canal de 80 MHz, mesmo sob interferência, a latência no percentil 99 do Wi-Fi 6 permanece abaixo de 10 ms para cinco estações, enquanto que no Wi-Fi 5 esse valor supera 30 ms.

Em uma perspectiva complementar, o artigo (Rajendran et al., 2023) apresenta um estudo sobre o desempenho de aplicações de *streaming* de vídeo utilizando o recurso TWT no Wi-Fi 6, com o objetivo de aprimorar a experiência do usuário por meio do agendamento e alocação de recursos. Os autores adotaram dois modelos de geração de tráfego: o modelo CBR (*Constant Bit Rate*), que gera rajadas de tamanho fixo equivalentes a uma taxa de *bits* de 15,6 Mbps a 30 FPS, sendo cada rajada transmitida a cada 6 segundos; e o modelo VBR (*Variable Bit Rate*), que simula o comportamento real do tráfego de vídeo, em que o tamanho dos *frames* varia, com intervalos entre rajadas entre 2 e 10 segundos, mantendo a mesma taxa de *bits* de 15,6 Mbps a 30 FPS. O estudo avaliou a capacidade do TWT em garantir os parâmetros de QoS, especificamente a taxa de transferência média e o *status* de integridade do *buffer* do cliente.

Os resultados do estudo indicam que, ao habilitar o TWT, o sistema mantém o *throughput* próximo ao valor nominal de 61,2 Mbps para tráfego CBR. Com o TWT ativado, o *throughput* atingiu valores de 61,2, 56,6, 62,4, 59,4 e 61,4 Mbps em cinco execuções. Para tráfego VBR, o *throughput* sem TWT foi de 56,8 Mbps, enquanto que, com o recurso ativado, apresentou valores de 62,8, 61,0, 65,9, 64,2 e 58,1 Mbps nas cinco execuções. Os clientes preservaram a saúde do *buffer*, com baixa ocorrência de eventos de *buffer underrun*, o que assegurou a entrega contínua dos pacotes de vídeo durante sessões de *streaming* de aproximadamente 2 minutos. Nos experimentos, o TWT foi configurado para manter os dispositivos ativos durante apenas 30% do tempo de cada sessão. Mesmo com oito fluxos de vídeo simultâneos, o estudo não identificou diferença perceptível no desempenho entre os modelos de tráfego CBR e VBR. Embora o trabalho não tenha avaliado o consumo de energia, destaca-se que o TWT possibilita a economia energética, ao permitir que os dispositivos entrem em modo de baixo consumo quando não transmitem ou recebem dados.

A relação desse estudo com esta dissertação está na utilização de tráfego de vídeo para avaliar o desempenho do Wi-Fi 6 e sua capacidade de atender aos requisitos da aplicação. Entretanto, os trabalhos diferem quanto ao escopo e às métricas consideradas. O estudo de (Rajendran et al., 2023) concentra-se no impacto do TWT sobre a vazão e a integridade do *buffer*, com uma taxa de *bits* específica. Esta dissertação, por sua vez, realiza uma avaliação mais ampla do desempenho da rede, considerando diferentes resoluções de vídeo, larguras de canal, condições de enlace e quantidades de dispositivos. Além disso, analisa métricas como taxa de *bits*, de FPS e perda de quadros e compara as tecnologias Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e 5G privativas em ambientes laboratoriais e industriais.

O trabalho descrito em (Zreikat, 2020) avaliou a coexistência entre 5G e Wi-Fi 6 por meio do simulador MOSEL-2 (Meer, 2025). Esta dissertação se diferencia ao apresentar uma comparação entre redes 5G e Wi-Fi 6 em um ambiente real. No estudo citado, os autores implementaram um modelo em que a célula é dividida em duas zonas virtuais: a zona interna, atendida pelo Wi-Fi 6, e a zona externa, coberta pelo 5G. As simulações reproduziram ambientes como residências, escritórios e áreas abertas.

Os autores analisaram métricas de desempenho, como probabilidade de bloqueio do usuário, taxa de erro de *bits* (BER), latência e *throughput*, sob diferentes padrões de tráfego, como navegação, *download* web e *streaming* de vídeo. As simulações utilizaram cargas entre 7 a 76 Mbps de taxa de *bits* oferecida. Os resultados indicaram que ambos os sistemas apresentam probabilidade de bloqueio inferior a 0,1%. Em relação à latência, tanto o 5G quanto o Wi-Fi 6 mantiveram valores entre 0,07 ms e 0,10 ms, sempre abaixo do limiar de 1 ms. Quanto ao *throughput*, apesar de a célula ter a capacidade de entregar até 76 Mbps, o *throughput* efetivamente entregue apresenta limitações: com Wi-Fi 6, a célula entrega cerca de 1 Mbps; com 5G, aproximadamente 7,5 Mbps e, na coexistência das duas tecnologias, a capacidade máxima atingiu 8,5 Mbps, resultado da soma dos valores individuais. Apesar de a célula suportar

até 76 Mbps, fatores como a divisão de zonas e a alocação desigual de recursos limitam o desempenho de cada tecnologia individualmente.

Na mesma linha de investigações por meio de simulação, o trabalho descrito em (Maldonado et al., 2021) compara o desempenho das tecnologias Wi-Fi 6 e 5G NR em um cenário industrial *indoor*, ao simular um galpão de $120 \times 50 \times 5$ metros, com 60 dispositivos distribuídos uniformemente. Os autores avaliam diferentes quantidades de pontos de acesso (1, 2, 4, 8 e 12) e testam tanto o espectro licenciado do 5G NR quanto o não licenciado, que inclui o Wi-Fi 6 e o 5G NR-U (*New Radio in Unlicensed spectrum*). O objetivo consiste em otimizar o uso de cada tecnologia de acordo com suas características específicas, como protocolo de comunicação, faixas de frequência, mobilidade, largura de banda, latência e QoS. Para atingir esse propósito, os autores baseiam suas análises em modelos de tráfego definidos pelo 3GPP (3GPP, 2024), utilizando o protocolo FTP 3 (*File Transfer Protocol 3*).

Como resultado, o Wi-Fi 6 atinge latência inferior a 1 ms e confiabilidade de 99,999% sob carga limitada a 0,16 bps/Hz. Ao aumentar o requisito de latência para 4 ms, o Wi-Fi 6 suporta até 1,13 bps/Hz e atinge 2,5 bps/Hz quando o requisito de latência chega a 100 ms. O 5G NR-U apresenta desempenho superior ao do Wi-Fi 6 para requisitos de latência abaixo de 1 ms, suportando até 0,31 bps/Hz de tráfego, enquanto o Wi-Fi 6 mantém o limite de 0,16 bps/Hz. No entanto, ao considerar limites de latência acima de 2 ms, o 5G NR-U supera o Wi-Fi 6 e atinge capacidade próxima de 3,75 bps/Hz, enquanto o Wi-Fi 6 chega a aproximadamente 2,5 bps/Hz. O 5G NR licenciado apresenta o melhor desempenho geral, mantendo cargas superiores a 0,72 bps/Hz para aplicações com latência inferior a 1 ms.

Além dos estudos baseados em simulação, pesquisas experimentais também têm avaliado alternativas ao Wi-Fi em cenários industriais. O trabalho apresentado em (Liang et al., 2021) compara experimentalmente as redes WIA-FA (*Wireless Networks for Factory Automation*), padronizadas pela IEC por meio da norma IEC 62948 (IEC, 2025), e IEEE 802.11n no contexto da manufatura. A análise é focada em parâmetros como latência, confiabilidade e desempenho em ambientes fabris. Os autores utilizam um ambiente experimental de 7×10 metros, sem obstáculos, e operam no canal de 2,462 GHz. Eles testam diferentes cargas de rede ao variar o número de dispositivos, de 16 a 96 nós, e o período de geração de dados, entre 6 ms e 100 ms e com cada pacote possuindo 45 bytes. O estudo considera tanto cenários *order-free* (sem restrição de ordem de transmissão) quanto *ordered* (com ordem de transmissão rígida).

Para testar diferentes níveis de interferência, os autores utilizaram o canal real de um ambiente de escritório, onde observaram variações na utilização do canal, o RSSI e o ruído ao longo do dia. Esse monitoramento permitiu reproduzir condições reais e não ideais de interferência, incluindo rajadas de ruído e instabilidades causadas pela presença de múltiplas redes sem fio operando no mesmo canal em diferentes horários. Os resultados mostraram que a WIA-FA mantém uma transmissão estável, confiável e com latência significativamente menor que o Wi-Fi, mesmo em redes com 96 dispositivos. Por exemplo, a WIA-FA apresentou um RTT

(*Round-Trip Time*) médio 40% inferior ao do Wi-Fi e *jitter* entre 0,6 e 2,46 ms, enquanto o Wi-Fi registrou *jitter* entre 7,65 e 932,2 ms. A WIA-FA também manteve menos de 2% de pacotes perdidos por *timeout*, ao passo que o Wi-Fi apresentou taxas de perda superiores a 10%. Em cenários *ordered*, a taxa de pacotes fora de ordem no Wi-Fi alcançou entre 4% e 15%, enquanto na WIA-FA esse índice permaneceu entre 1% e 3%.

De modo semelhante, o trabalho apresentado em (Segura et al., 2024) descreve um estudo experimental conduzido em ambiente real que investiga o desempenho e a escalabilidade do 5G, Wi-Fi 6 e da conectividade múltipla em ambientes industriais internos. Os autores realizaram experimentos práticos no laboratório “Aalborg University 5G Smart Production Lab”, avaliando métricas como latência RTT e perda de pacotes para diferentes tamanhos de pacote (64 e 1250 bytes), em cenários tanto estacionários quanto de mobilidade. Os autores variaram o número de dispositivos de 1 a 10 e realizaram testes específicos com 1, 4, 7 e 10 dispositivos conectados. Como diferencial em relação ao estudo de (Segura et al., 2024), esta dissertação utiliza um *middleware* de vídeo para avaliar o desempenho da rede por meio de métricas diretamente associadas à transmissão de vídeo, como taxa de *bits*, FPS e taxa de perda de quadros. Além disso, o trabalho realiza a transmissão de vídeo em resoluções que variam de VGA até DCI 4K em ambiente industrial, o que permite analisar o desempenho e a escalabilidade do Wi-Fi 5G, Wi-Fi 6 e redes 5G privadas sob a perspectiva da qualidade de serviço de vídeo.

Nesse contexto, os resultados reportados em (Segura et al., 2024) reforçam a relevância da presente dissertação, pois evidenciam melhorias relacionadas à redução da latência, à diminuição da perda de pacotes e à maior escalabilidade do Wi-Fi 6 em comparação com gerações anteriores de redes sem fio. Em cenário estacionário com pacotes de 64 bytes, o Wi-Fi 6 apresentou latência entre 3,1 ms e 5,3 ms conforme o número de dispositivos aumentou, mas registrou valores acima de 100 ms, no percentil 99,99, com 7 e 10 dispositivos. Por outro lado, o 5G SA exibiu latência de 3,7 ms a 6,7 ms, com o percentil 99,99, variando de 12,6 ms (1 dispositivo) a 23,8 ms (10 dispositivos). No cenário de mobilidade com pacotes de 64 bytes, o Wi-Fi 6 manteve latência entre 2,7 ms e 5,6 ms, porém apresentou valores acima de 120 ms, no percentil 99,99 independentemente da quantidade de dispositivos, principalmente devido ao *roaming* entre APs. Por sua vez, o 5G SA registrou latência mediana de 4,8 ms a 8,0 ms, com o percentil 99,99, variando de 17,9 ms (1 dispositivo) a 25,4 ms (10 dispositivos), mantendo-se sempre abaixo de 27 ms. Em relação à perda de pacotes, o Wi-Fi 6 apresentou até cinco pacotes perdidos durante a transmissão de um total de 1 milhão de pacotes enviados, com intervalo fixo de 10 ms entre os envios. Em contrapartida, o 5G demonstrou desempenho superior, com perda limitada a dois pacotes nas mesmas condições de teste.

De modo complementar, o estudo descrito em (Yamaguchi; Onishi; Sakamoto, 2024) investiga experimentalmente a entrega de vídeo holográfico por meio de múltiplas tecnologias de acesso (LAN, Wi-Fi 6 e 5G). A avaliação abrange taxa de transmissão (*throughput*), RTT, perda de pacotes e estabilidade da transmissão. Os resultados mostram que tanto o Wi-Fi 6 quanto o

5G possuem capacidade para transmitir *streaming* de vídeo Full HD, mas apresentam diferenças significativas em latência e estabilidade. A rede LAN cabeada atinge RTT inferior a 1 ms, enquanto o Wi-Fi 6 mantém RTT médio entre 2 e 3 ms. Em contraste, a rede 5G local apresenta RTT substancialmente mais elevado, variando entre 25 e 75 ms, com picos superiores a 100 ms, o que provoca perda de quadros e redução da qualidade do vídeo. Os autores concluem que, embora ambas as soluções sem fio atendam aos requisitos de serviços de vídeo, a manutenção de baixa latência com estabilidade constitui um desafio fundamental, especialmente em implantações locais de 5G.

Embora os trabalhos citados neste capítulo apresentem contribuições relevantes, eles não avaliam o desempenho das redes sob tráfego gerado por uma aplicação real de vídeo em ambiente industrial. Diferentemente dos estudos anteriores, esta dissertação investiga o desempenho do Wi-Fi 6 e do 5G quando submetidos ao tráfego produzido por um *middleware* de vídeo em ambiente industrial. A arquitetura proposta avalia o desempenho da rede na direção de *uplink* e coleta indicadores como taxa de *bits*, FPS e perda de quadros. Esses indicadores permitem determinar como o desempenho da rede impacta a qualidade do vídeo recebido, requisito fundamental para a operação confiável de sistemas de análise de vídeo industrial.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia adotada nos experimentos e detalha as configurações de *hardware* e *software*, bem como os procedimentos utilizados para a coleta e a análise dos dados. O capítulo apresenta, de forma clara e estruturada, todas as etapas dos experimentos e assegura a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. Inicialmente, o capítulo apresenta os experimentos de comparação entre Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 realizados em laboratório. Em seguida, o capítulo apresenta os experimentos que envolvem Wi-Fi 6 e redes 5G privadas em ambiente industrial e descreve o ambiente físico no qual os experimentos ocorreram.

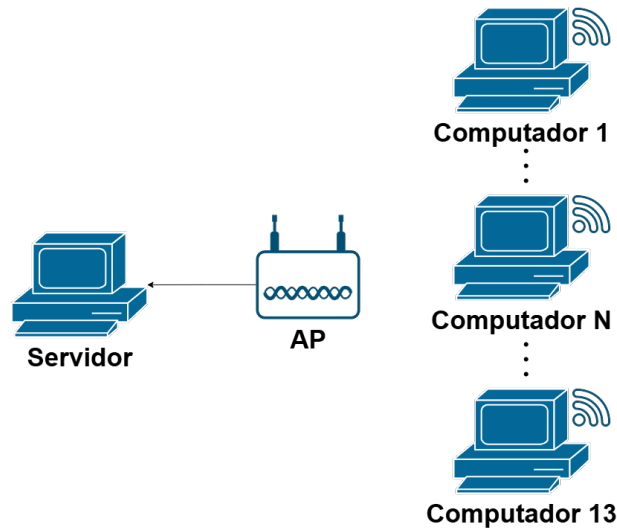
Posteriormente, os dispositivos utilizados são descritos, incluindo os modelos e as respectivas funções no *testbed*. Na sequência, são apresentadas as configurações implementadas em cada tecnologia de transmissão. O capítulo também descreve os *softwares* desenvolvidos em linguagem Python e detalha o módulo responsável pela orquestração da execução dos experimentos, bem como o módulo destinado ao tratamento e à análise dos dados coletados. Por fim, o capítulo apresenta os custos de implementação das redes Wi-Fi 6 e 5G privadas, de acordo com os equipamentos utilizados nos experimentos.

4.1 Comparação Entre Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 em Laboratório

O primeiro estudo experimental descrito nesta dissertação teve como objetivo realizar uma comparação entre as redes Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6. O estudo ocorreu no laboratório de capacitação do Assert, localizado no *campus* Campina Grande do IFPB. O ambiente contou com 14 computadores, dos quais um atuou como servidor. As especificações de *hardware* são apresentadas a seguir:

- CPU: Intel *Core* i7-6700 de 3,40 (Intel, 2015);
- RAM: 32 GB DDR4 2133 MHz;
- Sistema Operacional: Linux Mint 21.2 64 *bits* (Linux Mint, 2023) ;
- Adaptador de rede: PCIe AX3000 Wi-Fi 6 TX50E (TP-Link, 2022).

A Figura 9 apresenta a arquitetura adotada no cenário do *testbed*. Nessa configuração, o servidor é conectado ao AP TP-Link AX3600 (TP-Link, 2025a) por meio de uma conexão *Ethernet*, enquanto os clientes se conectam via Wi-Fi na banda de 5,8 GHz. Todos os experimentos foram realizados em redes locais sem acesso à Internet, o que elimina a competição por largura de banda externa na rede sem fio. Os computadores e o AP foram posicionados para garantir uma intensidade de sinal entre -36 dBm e -55 dBm.

Figura 9 – Arquitetura do *testbed* utilizada nos experimentos em laboratório.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Durante esta etapa da pesquisa, dois programas na linguagem C foram desenvolvidos para gerar tráfego durante o experimento. Inicialmente, o estudo previa a utilização do *middleware* de vídeo. No entanto, no período em questão, o *middleware* não oferecia suporte ao uso de arquivos de vídeo como fonte de entrada, pois aceitava exclusivamente câmeras. Além disso, o laboratório não dispunha da quantidade de 13 câmeras necessária para a execução dos experimentos. Diante dessa limitação, os programas foram desenvolvidos com o objetivo de viabilizar a geração e a transmissão do fluxo de dados no ambiente experimental, reproduzindo tráfegos similares aos gerados pelo *middleware*.

Para isso, os programas desenvolvidos em C não realizam a transmissão direta de vídeos. Em vez disso, utilizam os requisitos de transmissão de vídeo associados a diferentes resoluções, que variam de VGA até DCI 4K, para gerar tráfego equivalente. Esses requisitos consideram vídeos codificados em MJPEG (*Motion JPEG*) a uma taxa de 30 quadros por segundo, conforme detalhado na Tabela 4.

O primeiro programa executa no servidor e configura as portas lógicas utilizadas na comunicação com os clientes. Cada cliente utiliza uma porta lógica específica, o que permite a identificação do cliente e o armazenamento dos dados coletados em um arquivo no formato CSV (*Comma-Separated Values*). O segundo programa executa nos clientes e gera tráfego UDP com base nos requisitos do *middleware* descrito em (Neto et al., 2024). Esse programa envia dados ao servidor com taxa de *bits* constante, conforme apresentado na Tabela 4, o que permite a medição de métricas como *throughput* e taxa de perda de pacotes.

Para iniciar o experimento, um único cliente gera tráfego em direção ao servidor. Cada sessão do experimento possui duração de 5 minutos para cada resolução. Dessa forma, uma sessão completa com as oito resoluções possui duração total de 40 minutos. Após essa etapa, um novo cliente é adicionado ao experimento e passa a transmitir dados simultaneamente ao

Tabela 4 – Taxas de *bits* necessárias para diferentes resoluções de vídeo utilizadas no experimento.

Nome	Resolução de Vídeo (pixels)	Taxa de <i>Bits</i> (Mbps)	Taxa de Quadros (FPS)
VGA (Video Graphics Array)	640 x 480	2,54	30
WVGA (Wide Video Graphics Array)	800 x 480	3,83	30
XGA (Extended Graphics Array)	1024 x 768	5,52	30
HD (High Definition)	1280 x 720	8,03	30
UXGA (Ultra Extended Graphics Array)	1600 x 1200	12,67	30
FHD (Full High Definition)	1920 x 1080	19,09	30
QUADHD (Quad High Definition)	2560 x 1440	109,84	30
DCI 4K (Digital Cinema Initiatives 4K)	4096 x 2160	185,02	30

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

servidor. Esse processo se repete de forma incremental até que 13 clientes transmitam dados simultaneamente ao servidor.

Para automatizar o processo de execução dos experimentos, foi desenvolvido um programa em Python responsável pela orquestração do experimento, por meio do acesso aos computadores clientes com o uso do protocolo SSH (*Secure Shell*). O programa utiliza a biblioteca Paramiko (Paramiko, 2026) para estabelecer conexões SSH com 13 computadores que atuam como clientes. O programa recebe como parâmetro uma lista dos dispositivos, armazenada em um arquivo no formato `.txt`, no qual cada linha contém o endereço IP, o nome de usuário, a senha e o nome do computador, separados por dois pontos (:).

Em seguida, o programa acessa o primeiro computador por meio de SSH e inicia a transmissão do fluxo de dados. Após o início da execução, o sistema aguarda 2400 segundos (*sleep 2400*) antes de reiniciar o processo para a próxima iteração. O contador de execuções é incrementado até atingir o número total de 13 iterações, nas quais o número de computadores conectados simultaneamente ao servidor aumenta progressivamente a cada execução. Ao final de cada experimento, outro programa desenvolvido em Python processa os dados armazenados em arquivos CSV e gera os gráficos utilizados na análise dos resultados.

4.2 Comparação Entre Wi-Fi 6 e 5G Privativas em Ambiente Industrial

O segundo estudo experimental realizado nesta dissertação teve como objetivo comparar o desempenho de comunicação do Wi-Fi 6 com uma rede 5G privativa em um ambiente industrial real, utilizando o *middleware* de vídeo para a geração de tráfego. Os experimentos foram conduzidos nas instalações do SENAI – Centro de Inovação e Tecnologia Industrial / SENAI – Centro de Ações Móveis (CITI/CAM), localizadas na cidade de Campina Grande, Paraíba, dentro de um galpão industrial de aproximadamente 180 m, conforme ilustrado na Figura 10. O experimento descrito nesta dissertação focou em uma área específica deste galpão, destacada na Figura 10, com uma área de aproximadamente 247 m², o que corresponde a 13 x 19 metros.

Figura 10 – Imagem por satélite e ambiente industrial interno do SENAI (CITI/CAM).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O ambiente selecionado apresenta características típicas de um cenário industrial, com a presença de máquinas de usinagem CNC (*Computer Numerical Control*). Entre os equipamentos instalados, destacam-se o centro de usinagem ROMI 1250 (S.A., 2025), ilustrado na Figura 11, e a máquina de usinagem por eletroerosão CNC 600, apresentada na Figura 12.

Esses equipamentos introduzem obstáculos físicos e potenciais fontes de interferência eletromagnética, fatores que influenciam diretamente a propagação do sinal e impactam a avaliação do desempenho das tecnologias de comunicação sem fio analisadas neste trabalho.

4.2.1 Topologia Experimental

Para possibilitar a comparação entre a rede Wi-Fi 6 e a rede 5G privativa, a foi desenvolvida uma topologia lógica que avalia ambas as tecnologias sob condições equivalentes.

Figura 11 – Visão interna do ambiente industrial do SENAI (CITI/CAM), com destaque para a máquina de usinagem CNC modelo ROMI 1250.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 12 – Máquina de usinagem por eletroerosão, modelo CNC 600.

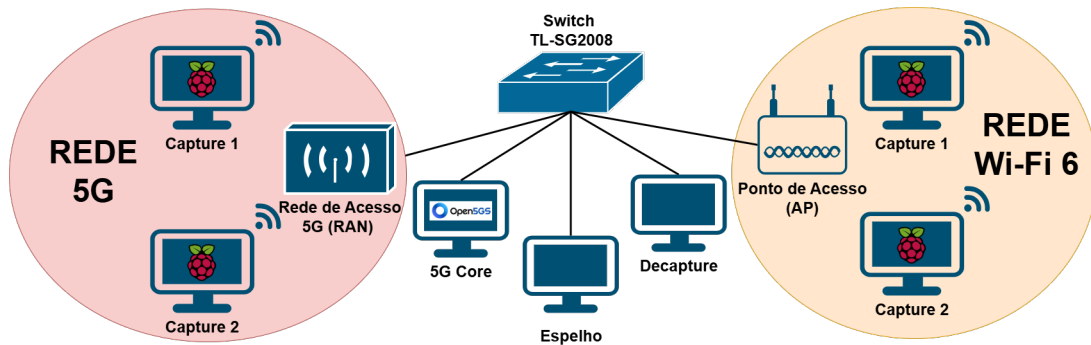


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme apresentado na Figura 13, a topologia integra dois domínios de acesso sem fio distintos, interconectados por uma infraestrutura de rede cabeada centralizada.

No domínio da rede 5G, dois dispositivos de captura de vídeo (*Capture 1* e *Capture 2*) conectam-se à rede por meio da RAN, que estabelece a comunicação com o 5G Core e executa as funções de controle e encaminhamento de dados. No domínio da rede Wi-Fi 6, outros dois dispositivos de captura de vídeo (*Capture 1* e *Capture 2*) conectam-se ao AP, que interliga esse domínio ao restante da infraestrutura por meio de uma rede cabeada e realiza o encaminhamento do tráfego para os demais componentes do sistema.

Figura 13 – Topologia lógica empregada no experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

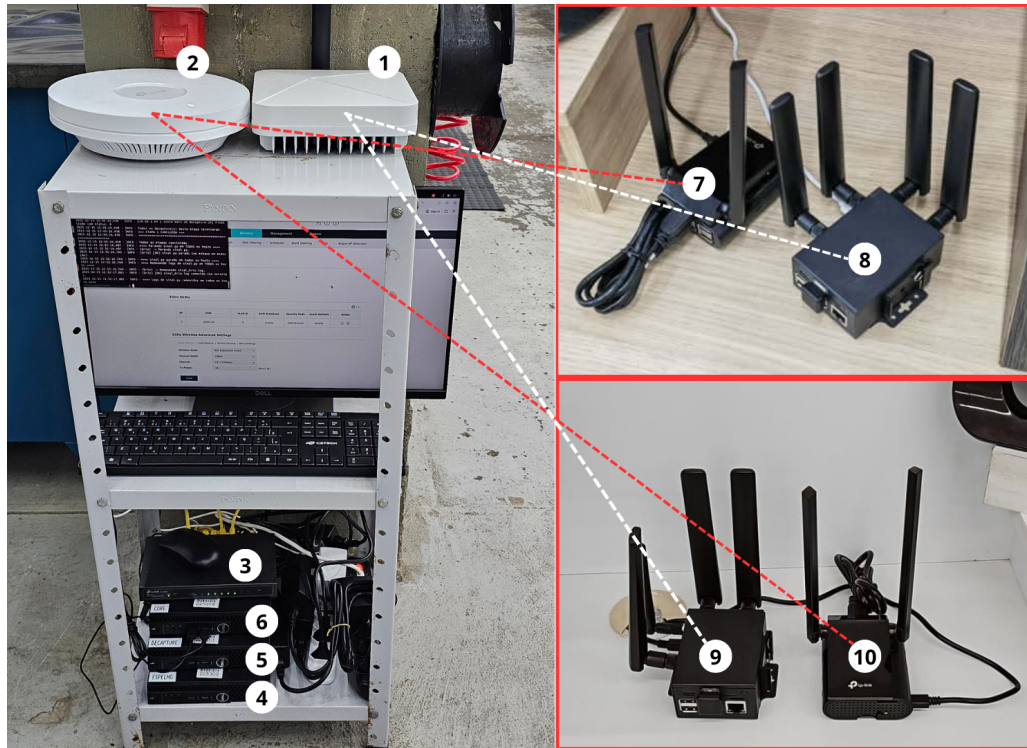
Para prover a comunicação entre ambos os domínios de acesso e os computadores responsáveis pela execução do *middleware* de vídeo, composto pelos módulos Espelho e Decapture, descritos na Seção 2.7, bem como pelo 5G Core, todos os componentes conectam-se ao *switch*, modelo TL-SG2008 (TP-Link, 2025b), que interconecta os elementos da topologia.

Além da topologia lógica, o trabalho definiu a disposição física dos equipamentos no ambiente experimental e a identificação numérica dos *hosts*, conforme ilustrado na Figura 14. O experimento utilizou três computadores com processadores Intel Core i5 de 9ª geração, 16 GB de RAM e sistema operacional Linux Ubuntu 22.04.5 LTS (Dell Technologies, 2026). Esses computadores foram utilizados para executar o 5G Core e o *middleware* de vídeo. Duas unidades Raspberry Pi 4B acopladas ao módulo 5G RM520N-GL (⑧, ⑨) (Waveshare, 2026) foram utilizadas como UEs para a rede 5G. Para a rede Wi-Fi 6, duas unidades Raspberry Pi 5 conectadas por meio da porta USB 3.0 ao adaptador Wi-Fi 6 TP-Link AX1800 (⑦, ⑩) (TP-Link, 2026) foram utilizadas. A RAN 5G compreende um rádio 5G NR Sunwave nCELL-F2240 (①) (Sunwave Communications, 2026). Para a rede Wi-Fi 6, foi utilizado um AP TP-Link AX3600 (②) (TP-Link, 2025a). Por fim, um *switch* TP-Link TL-SG2008 (③) foi utilizado para interconectar o rádio 5G, o AP Wi-Fi 6 e os computadores.

Os dispositivos Raspberry Pi atuam como o terceiro componente da solução de *middleware* de vídeo e correspondem ao módulo Capture, responsável pela leitura do fluxo de vídeo e por sua transmissão ao servidor de distribuição. Eles foram posicionados em locais fixos dentro do ambiente industrial, organizados em dois pares de nós de captura para cada tecnologia avaliada. O primeiro par, composto pelo Capture 1 (5G) ⑧ e pelo Capture 1 (Wi-Fi 6) ⑦, localiza-se a aproximadamente 13,66 m da RU 5G e do AP Wi-Fi 6, em condição sem linha de visada direta (NLOS). O segundo par, composto pelo Capture 2 (5G) ⑨ e pelo Capture 2 (Wi-Fi 6) ⑩, conforme ilustrado na Figura 15, está localizado a aproximadamente 8,93 m da RU 5G e do AP Wi-Fi 6 com linha de visada direta (LOS). Essa disposição permite a comparação do desempenho das tecnologias 5G e Wi-Fi 6 sob diferentes condições de enlace.

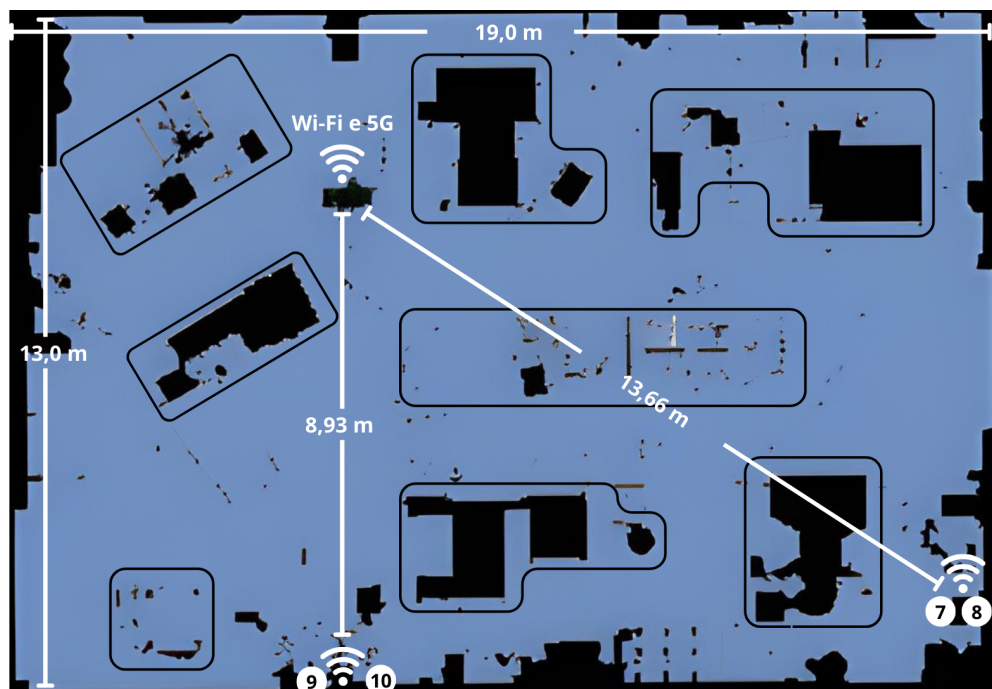
O experimento também aproveitou uma funcionalidade do *middleware* que aceita arqui-

Figura 14 – Disposição física dos equipamentos empregados no experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 15 – Mapa do ambiente industrial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

vos de vídeo no formato TS (MPEG *Transport Stream*) como entrada. Essa abordagem elimina a dependência de *hardware* físico de captura (câmeras) e garante controle preciso sobre o conteúdo

transmitido ao longo dos experimentos, uma vez que todos os experimentos utilizaram o mesmo conjunto de vídeos. Os vídeos utilizados foram originalmente obtidos na resolução DCI 4K e, posteriormente, convertidos para diferentes resoluções, por meio do uso da ferramenta FFmpeg, conforme apresentado na Tabela 4, sendo então transmitidos pelo *middleware* de vídeo. Por fim, o estudo dedicou o computador ⑥ à hospedagem do *Core* da rede 5G com o uso do Open5GS.

4.2.2 Parâmetros das Redes Sem Fio

O Open5GS é um projeto aberto para a implementação do *Core* de rede 5G e permite a criação de redes privativas ou ambientes de teste para pesquisa e desenvolvimento. Sua arquitetura modular suporta tanto o modo NSA, que integra componentes para as redes 4G e 5G, quanto o SA, que segue a Arquitetura Baseada em Serviços SBA (*Service-Based Architecture*) definida pelo 3GPP. Sua instalação e uso são simplificados por pacotes pré-compilados para distribuições como Ubuntu e Debian, além de suportar implantações em contêineres via Kubernetes ou OpenShift, o que o torna versátil para ambientes de nuvem. A rede 5G privativa avaliada nesta dissertação é do tipo SA e utiliza o Open5GS na versão 2.7.2, implementado em contêineres Docker (Herles Upareeth, 2025).

A RAN gerencia a conectividade sem fio entre o UE e o 5G *Core*. Na arquitetura adotada, a RAN da empresa Sunwave permite a configuração de parâmetros fundamentais da rede 5G, como frequência de operação, PLMN (*Public Land Mobile Network*), largura de banda e potência do sinal transmitido. No ambiente experimental, foi atribuído o PLMN ID 00101, reservado para fins de teste e desenvolvimento conforme os padrões do 3GPP. Este identificador foi configurado de forma integrada no Open5GS, na RAN e nos cartões SIM utilizados, o que garante a interoperabilidade entre todos os elementos da rede.

A RAN foi configurada para operar na banda N78 (3300–3800 MHz), com suporte a MIMO 2T2R (duas antenas transmissoras e duas receptoras) e largura de banda de 100 MHz. Além disso, adotou-se um esquema TDD (*Time Division Duplex*) 1D3U, no qual três símbolos são dedicados ao *uplink* e um símbolo ao *downlink*. Essa configuração prioriza o tráfego assimétrico com ênfase no *uplink*, característica relevante para aplicações de *streaming* contínuo de vídeo partindo dos UEs. Com essa configuração, a RAN 5G fornece taxas de *bits* nominais de até 329 Mbps no *downlink* e 335 Mbps no *uplink*, conforme especificado no *datasheet* do equipamento (Sunwave Communications, 2026). Entretanto, nos experimentos realizados com o Raspberry Pi 4B equipado com o módulo 5G RM520N-GL, observaram-se taxas máximas de 270 Mbps no *downlink* e 141 Mbps no *uplink*, provavelmente em função das limitações de processamento e interface do *hardware* do UE.

Para a rede Wi-Fi 6, o AP utilizado possui uma taxa nominal de *bits* 2402 Mbps ao empregar modulação 1024-QAM na banda de 5 GHz. No entanto, a taxa de *bits* real depende da largura de canal utilizada e da qualidade do sinal, que define o esquema de modulação utilizado. Nos experimentos, foram avaliadas apenas três larguras de canal (20 MHz, 40 MHz e 80 MHz)

devido à ausência de suporte do AP à largura de 160 MHz. Em testes preliminares realizados com o Raspberry Pi 5 e adaptadores Wi-Fi 6 TP-Link AX1800, com uma largura de canal de 80 MHz, foi possível atingir taxas de *bits* de 320 Mbps no *downlink* e 265 Mbps no *uplink*.

4.2.3 Orquestração dos Experimentos

Para a execução dos experimentos, dois programas foram desenvolvidos utilizando a linguagem Python. O primeiro programa atua como orquestrador dos experimentos, sendo responsável pelo controle das etapas de execução e pela sincronização dos módulos do *middleware* de vídeo. O segundo programa realiza o pós-processamento dos dados coletados, incluindo a organização das amostras, a análise estatística e a geração dos gráficos utilizados na avaliação das tecnologias analisadas.

Antes do início das rodadas experimentais, o módulo Espelho é iniciado manualmente e mantido em execução em segundo plano. Esse módulo permanece ativo durante todo o experimento e desempenha um papel importante na arquitetura proposta, pois garante a replicação contínua e transparente dos fluxos de vídeo gerados pelos dispositivos de captura para o módulo Decapture. Somente após a confirmação da correta execução do Espelho, o programa de orquestração entra em operação. A partir desse ponto, o sistema estabelece conexões remotas com os dispositivos distribuídos no ambiente experimental por meio do protocolo SSH. Para essa finalidade, o código utiliza a biblioteca Paramiko (Paramiko, 2026), que viabiliza o acesso remoto aos nós de captura para o início da transmissão e aos nós responsáveis pela recepção dos vídeos no Decapture. Esse mecanismo assegura a padronização das execuções e reduz a necessidade de intervenções manuais.

Cada rodada experimental possui duração total de 40 minutos e segue um procedimento previamente definido para assegurar a comparação dos resultados. Durante esse intervalo, o sistema avalia, de forma sequencial, as resoluções de vídeo VGA, WVGA, XGA, HD, UXGA, FHD, QHD e DCI 4K, dedicando 5 minutos a cada resolução. Para cada configuração, o sistema coleta dados de desempenho, como métricas de FPS, taxas de *bits* e perda de quadros. O processo de coleta de dados é realizado de forma idêntica tanto para a rede Wi-Fi 6 quanto para a rede 5G.

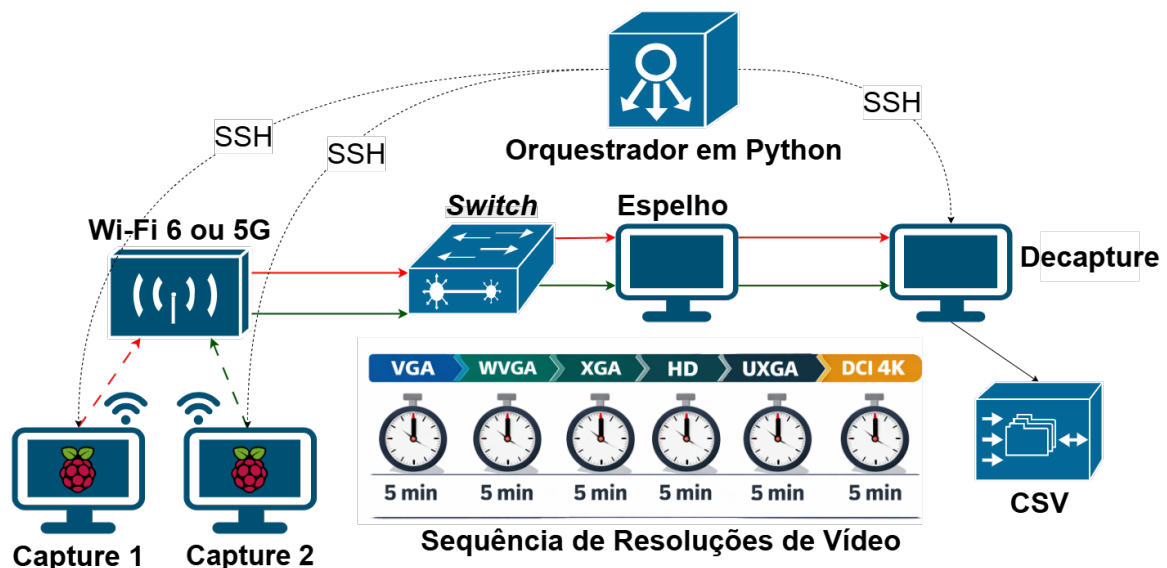
No início de cada rodada experimental, o sistema estabelece comunicação com os dispositivos de captura e inicia remotamente o envio dos fluxos de vídeo por meio do módulo Capture. Esses processos são executados em segundo plano, com o registro das respectivas identificações de cada dispositivo de captura. Cada dispositivo é identificado por uma chave no *middleware* de vídeo, sendo o Capture 1 associado à chave “web” e o Capture 2 à chave “brio”. Essa estratégia possibilita o monitoramento das execuções, bem como o controle preciso e o encerramento ordenado dos processos ao final de cada etapa experimental.

Após a inicialização dos módulos responsáveis pela captura (Capture), o sistema executa de forma sincronizada os módulos Decapture, responsáveis pela recepção dos fluxos de vídeo, pelo processamento dos dados recebidos e pela extração das métricas de desempenho relacionadas

a FPS, taxa de *bits* e taxa de perda de quadros, parâmetros diretamente associados à qualidade do vídeo recebido.

A cada alteração de resolução, o sistema realiza automaticamente a coleta das métricas, extraídas diretamente do *middleware* de vídeo, e as armazena em arquivos no formato CSV para posterior análise. Após percorrer todas as resoluções definidas, o experimento aumenta a quantidade de módulos Capture ativos de forma simultânea. No domínio Wi-Fi, por exemplo, durante os primeiros 40 minutos, apenas o Capture 1 (“Web”) permanece em operação. Após esse intervalo, inicia-se uma nova etapa, na qual tanto o Capture 1 (“web”) quanto o Capture 2 (“brio”) transmitem simultaneamente, o que adiciona uma rodada adicional de 40 minutos com transmissão concorrente de ambos os nós, conforme ilustrado na Figura 16, que apresenta a arquitetura do orquestrador desenvolvido em Python.

Figura 16 – Arquitetura do orquestrador em Python.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O procedimento de coleta ocorre de forma idêntica tanto na rede Wi-Fi 6 quanto na rede 5G, o que assegura a consistência metodológica e possibilita a comparação direta dos resultados obtidos entre as duas tecnologias. A execução dos experimentos ocorre de maneira sequencial entre os domínios de acesso, de modo que apenas um domínio é avaliado por vez, a fim de evitar sobrecarga nos módulos Espelho e Decapture. Por esse motivo, a transmissão simultânea limita-se a, no máximo, a dois módulos Capture por rodada experimental.

Ao final de cada rodada, o programa de orquestração aguarda a conclusão de todos os processos ativos nos módulos Capture e Decapture. Esse procedimento garante a integridade do ambiente experimental e prepara o sistema para a execução da rodada subsequente.

O segundo programa realiza o processamento, a organização e a visualização dos dados coletados durante os experimentos. O código utiliza a biblioteca Pandas (Pandas Developers,

2026) para manipular e analisar os dados, e emprega as bibliotecas Seaborn (Seaborn Developers, 2026) e Matplotlib (Matplotlib Developers, 2026) para gerar os gráficos.

Na etapa inicial, o programa define um mapeamento para padronizar as legendas utilizadas nos gráficos. Para os experimentos com Wi-Fi 6, o sistema associa cada largura de canal avaliada (20, 40 e 80 MHz) aos respectivos conjuntos de dados. Para os experimentos com 5G, o programa identifica os arquivos apenas pela tecnologia de acesso. Além disso, o mapeamento também diferencia os dispositivos de captura utilizados (denominados “brio” e “web”) e identifica os cenários com linha de visada e sem linha de visada.

Em seguida, o programa realiza a leitura dos arquivos CSV resultantes da concatenação de 10 repetições para cada dispositivo e para cada configuração experimental. O sistema adiciona identificadores referentes à tecnologia utilizada, à largura de canal (quando aplicável) e ao dispositivo de captura, o que permite consolidar todas as amostras em um único *DataFrame*. Na sequência, o programa realiza o processamento dos dados, padroniza as resoluções e reorganiza a estrutura da base para permitir a comparação entre os diferentes cenários experimentais. Os programas desenvolvidos estão acessíveis em um repositório público do GitHub¹

Para a análise gráfica, o programa gera gráficos de barras agrupadas por meio da função *catplot* da biblioteca Seaborn. Para cada resolução de vídeo, o sistema apresenta os valores médios das métricas FPS, taxa de *bits* e taxa de perda de quadros, além das respectivas barras de desvio padrão. O programa organiza as métricas em linhas distintas, o que permite a comparação direta do desempenho considerando FPS, taxa de *bits* e taxa de perda de quadros nos diferentes cenários experimentais.

4.3 Custos de Implementação das Redes Wi-Fi 6 e 5G Privativas

Esta seção apresenta uma estimativa detalhada dos custos envolvidos na implementação das redes Wi-Fi 6 e 5G privativa utilizadas nos experimentos. O objetivo é fornecer uma visão a respeito dos recursos financeiros necessários para replicar o estudo e avaliar a viabilidade econômica das tecnologias analisadas, conforme apresentado na Tabela 5.

Para a implementação do *middleware* de vídeo e do *Core* 5G, foram utilizados três computadores Dell OptiPlex 3070 Micro. Na rede Wi-Fi 6, os custos incluem o AP TP-Link AX3600, duas Raspberry Pi 5 utilizadas como UEs e dois adaptadores USB 3.0 TP-Link AX1800. Na rede 5G privativa, os custos incluem a RAN, com todas as taxas de importação já incluídas, além de dois Raspberry Pi 4B equipados com o módulo 5G RM520N-GL. Não foram contabilizados os custos dos periféricos apresentados na Figura 14, como mouse, teclado, monitor, filtros de linha e cabos de rede CAT5e (*Category 5 enhanced*).

A análise detalhada dos custos permite comparar não apenas o desempenho das tecnologias, mas também a relação entre investimento e benefícios obtidos, o que oferece subsídios para

¹ <https://github.com/jeffersonMaxmiliano/network-performance-analysis>

Tabela 5 – Comparação de custos dos equipamentos utilizados na implementação dos cenários Wi-Fi 6 e 5G.

Equipamento	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Wi-Fi 6 (R\$)	Custo 5G (R\$)
Dell OptiPlex 3070 Micro	3	1.899,00	5.697,00	5.697,00
Switch TP-Link TL-SG2008	1	908,00	908,00	908,00
RAN Sunwave nCELL-F2240	1	65.476,53	*	65.476,53
Raspberry Pi 4B com módulo 5G RM520N-GL	2	1.500,00	*	3.000,00
Raspberry Pi 5	2	1.798,00	1.798,00	*
Adptador Wi-Fi 6 TP-Link AX1800	2	471,36	471,36	*
AP TP-Link AX3600	1	1.444,00	1.444,00	*
Total (R\$)			10.318,36	75.081,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

decisões sobre a adoção dessas tecnologias em cenários industriais.

Embora o custo total da infraestrutura 5G privativa seja superior ao da solução Wi-Fi 6, é importante ressaltar que a análise financeira não deve ser feita de forma isolada. A arquitetura 5G oferece recursos avançados nativos, tais como o fatiamento de rede, que permite isolar virtualmente os fluxos de dados para garantir QoS e latências ultrabaixas determinísticas para aplicações críticas. Além disso, diferenciais como maior densidade de dispositivos conectados por célula.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta inicialmente os resultados da comparação entre as tecnologias Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 com larguras de canal de 20, 40 e 80 MHz, em ambiente de laboratório. A avaliação considera as métricas de taxa de transferência e perda de pacotes.

Em seguida, são apresentados os resultados da comparação entre a tecnologia Wi-Fi 6 e uma rede 5G privativa. Essa análise considera as métricas de FPS, taxa de *bits* e taxa de perda de quadros, obtidas a partir do *middleware* de vídeo utilizado nos experimentos. Os experimentos ocorreram em ambiente industrial sob dois cenários de propagação: com linha de visada direta e sem linha de visada. O estudo apresenta os resultados das séries temporais para as resoluções VGA, HD e DCI 4K. Na sequência, o texto sintetiza os resultados obtidos com o Wi-Fi 6. Posteriormente, o capítulo apresenta os resultados referentes à rede 5G. Por fim, o trabalho consolida os resultados e estabelece a comparação entre as tecnologias avaliadas.

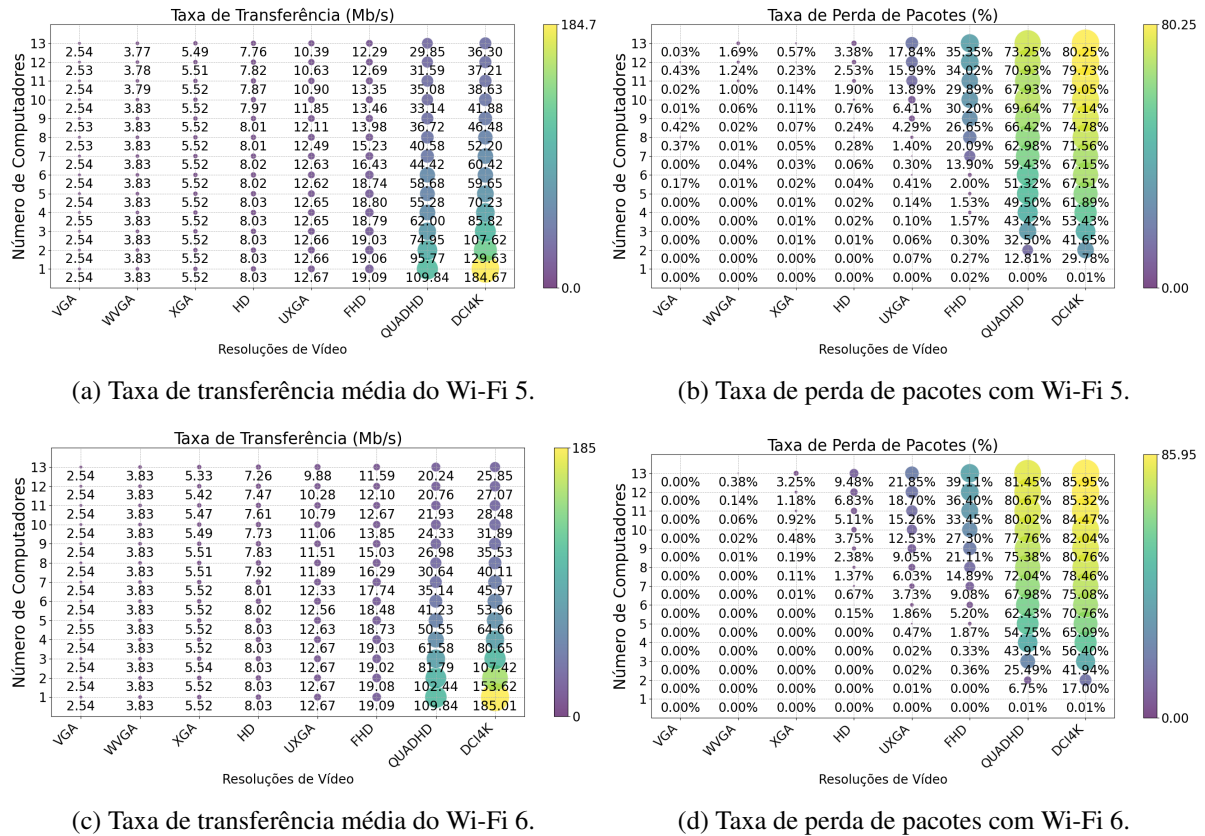
5.1 Análise dos Resultados: Comparação Entre Redes Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 em Laboratório

A Figura 17 apresenta a taxa de transferência e a taxa de perda de pacotes para as tecnologias de Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 com largura de banda de 20 MHz, considerando todas as combinações entre o número de computadores e as resoluções de vídeo avaliadas. No eixo X é mostrada a resolução de vídeo (a taxa de *bits* de cada resolução consta na Tabela 4), enquanto que o número de computadores utilizados nos experimentos aparece no eixo Y. As bolhas representam as médias obtidas nos experimentos. Quanto maior a bolha, maior o valor observado.

A análise detalhada desse cenário é apresentada na Figura 17a, que mostra o desempenho superior do Wi-Fi 5 em relação ao Wi-Fi 6, ilustrado na Figura 17c. Esse resultado ocorre devido às características do mecanismo de acesso múltiplo OFDMA introduzido no Wi-Fi 6. Esse mecanismo tem como objetivo principal aumentar a eficiência espectral por meio da divisão do canal em RUs, que permitem transmissões simultâneas para múltiplos dispositivos. Entretanto, o OFDMA apresenta maior eficiência em canais mais largos, como 40, 80 ou 160 MHz, nos quais a maior quantidade de subportadoras possibilita uma divisão mais eficiente do espectro e uma melhor alocação de recursos entre os dispositivos da rede (Mozaffariahrar; Theoleyre; Menth, 2022).

Em contrapartida, em canais de 20 MHz, o número reduzido de subportadoras limita a quantidade de RUs disponíveis e reduz os ganhos associados ao uso do OFDMA. Nessa situação, o mecanismo de multiplexação baseado em OFDM, utilizado no Wi-Fi 5, pode apresentar desempenho semelhante ou até superior, especialmente em cenários com menor largura de banda disponível.

Figura 17 – Taxa de transferência e perda de pacotes com Wi-Fi 5/6 (20 MHz).



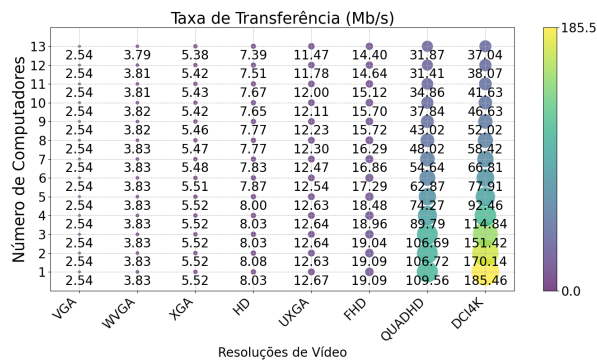
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados experimentais indicam que, com largura de banda de 20 MHz, a taxa de perda de pacotes aumenta significativamente para resoluções de vídeo superiores a HD, tanto no Wi-Fi 5 quanto no Wi-Fi 6. Esse comportamento se intensifica à medida que o número de clientes simultâneos cresce, pois o aumento da demanda por largura de banda provoca maior competição pelo meio de transmissão e eleva a probabilidade de congestionamento e retransmissões, o que impacta diretamente a qualidade da transmissão de dados.

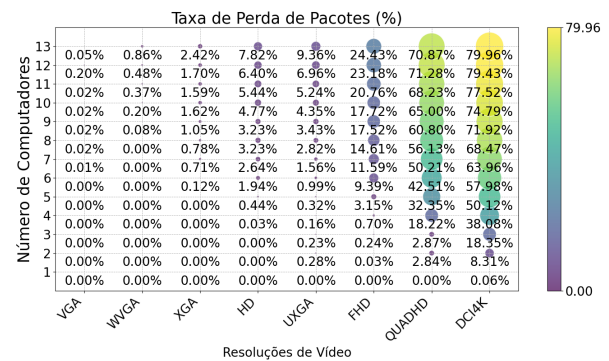
As Figuras 18a e 18c apresentam a média da taxa de transferência dos dados em canais de 40 MHz, considerando as diferentes resoluções de vídeo e o número de computadores conectados simultaneamente. Para resoluções que exigem menor taxa de transferência, como VGA, WVGA e XGA, os resultados indicam valores semelhantes entre as duas tecnologias, pois essas resoluções demandam um menor volume de dados mesmo com o aumento do número de clientes.

Com o aumento da resolução do vídeo, a rede passa a exigir uma maior taxa de transferência para comportar o fluxo de dados. Nesse cenário, o Wi-Fi 6 apresenta desempenho superior ao Wi-Fi 5, principalmente em condições de maior carga na rede. Na resolução FHD, com 13 clientes conectados simultaneamente, o Wi-Fi 6 alcança um desempenho aproximadamente 10% superior ao Wi-Fi 5. Esse comportamento também ocorre em resoluções que exigem maior largura de banda, como DCI 4K, nas quais a diferença atinge aproximadamente 14% com 13

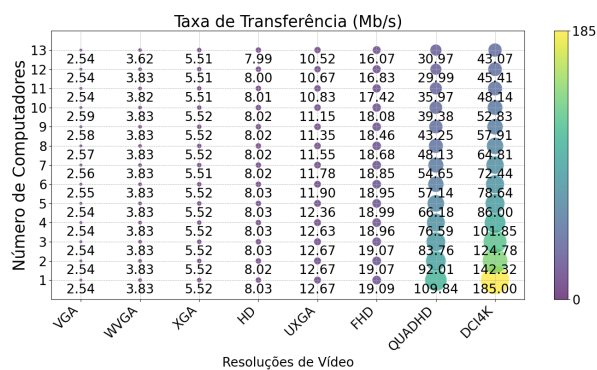
Figura 18 – Taxa de transferência e perda de pacotes com Wi-Fi 5/6 (40 MHz).



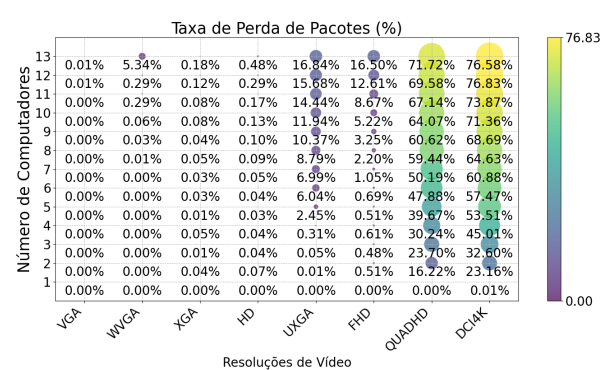
(a) Taxa de transferência média do Wi-Fi 5.



(b) Taxa de perda de pacotes com Wi-Fi 5.



(c) Taxa de transferência média do Wi-Fi 6.



(d) Taxa de perda de pacotes com Wi-Fi 6.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

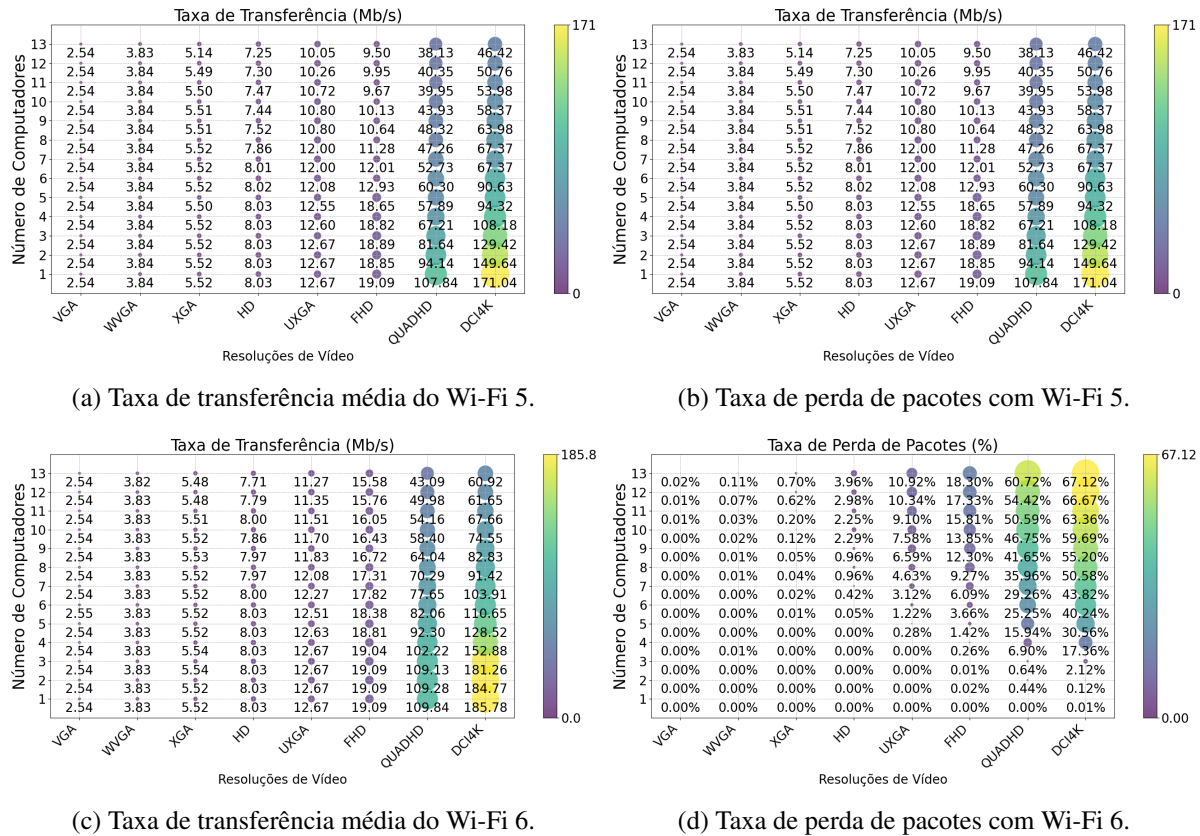
computadores conectados.

As Figuras 18b e 18d apresentam a taxa de perda de pacotes para as tecnologias Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 em canais de 40 MHz. Nas resoluções que exigem menor taxa de transmissão, como VGA e WVGA, ambas as tecnologias apresentam níveis muito baixos de perda de pacotes. No entanto, o Wi-Fi 6 mantém perda praticamente nula mesmo com o aumento do número de clientes conectados simultaneamente. Em VGA, por exemplo, o Wi-Fi 6 comporta até 11 clientes sem registrar perda de pacotes.

À medida que a resolução do vídeo aumenta, a rede passa a exigir maior capacidade de transmissão, o que eleva a probabilidade de perda de pacotes. Nesse cenário, o Wi-Fi 6 apresenta desempenho superior ao Wi-Fi 5. A partir da resolução XGA, com 13 computadores conectados simultaneamente, o Wi-Fi 6 apresenta valores menores de perda de pacotes em comparação ao Wi-Fi 5, sobretudo nas resoluções mais altas, como FHD, QuadHD e DCI 4K.

As Figuras 19a e 19c apresentam a taxa de transferência alcançada com Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6, respectivamente, ao utilizar canais de 80 MHz. Os resultados indicam que o Wi-Fi 6 supera, de forma consistente, o desempenho do Wi-Fi 5 em todas as resoluções avaliadas. Observa-se uma melhoria de 5,97% na resolução HD, 10,83% em UXGA, 39,02% em FHD, 11,51% em QUADHD e 23,80% em DCI 4K. Esses resultados evidenciam a maior eficiência do Wi-Fi 6

Figura 19 – Taxa de transferência e perda de pacotes com Wi-Fi 5/6 (80 MHz).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

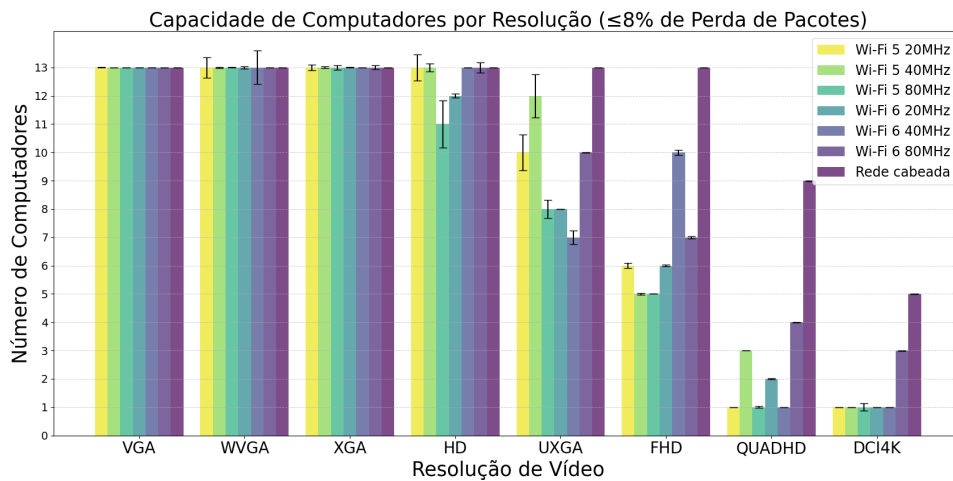
em cenários com maior largura de banda disponível, nos quais mecanismos como OFDMA, MU-MIMO e melhorias no agendamento de transmissões contribuem para uma utilização mais eficiente do espectro e para o atendimento simultâneo de múltiplos dispositivos.

As Figuras 19b e 19d apresentam a taxa de perda de pacotes observada nos experimentos. A partir da resolução UXGA, ambas as tecnologias registram taxas de perda de pacotes superiores a 10%. Entretanto, esse limite ocorre com 9 computadores no cenário com Wi-Fi 5, enquanto no Wi-Fi 6 o mesmo nível de perda ocorre apenas com 12 computadores, o que indica maior capacidade de suporte a dispositivos simultâneos. Na resolução HD, o Wi-Fi 5 registra uma taxa de perda de pacotes de 9,42%, enquanto o Wi-Fi 6 apresenta apenas 3,96% mesmo com 13 dispositivos conectados simultaneamente, o que demonstra maior capacidade do padrão mais recente em cenários com múltiplos clientes.

Por fim, a Figura 20 apresenta o número máximo de computadores suportados por cada tecnologia de comunicação e configuração de canal para diferentes resoluções de vídeo. A análise considera um limiar máximo de perda de pacotes de 8%, permitindo uma taxa média de 24 quadros por segundo, valor que proporciona uma experiência visual satisfatória para aplicações de vídeo em tempo real (Monteiro et al., 2024).

As tecnologias avaliadas suportam a capacidade máxima do cenário, correspondente a

Figura 20 – Número de clientes suportados por cada resolução de vídeo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

13 computadores simultâneos, nas resoluções VGA, WVGA e XGA. A partir da resolução HD, as diferenças de desempenho tornam-se mais evidentes, pois resoluções mais altas demandam taxas de *bits* maiores. Esse aumento da demanda por largura de banda maior aumenta a carga sobre a rede e reduz o número máximo de computadores suportados.

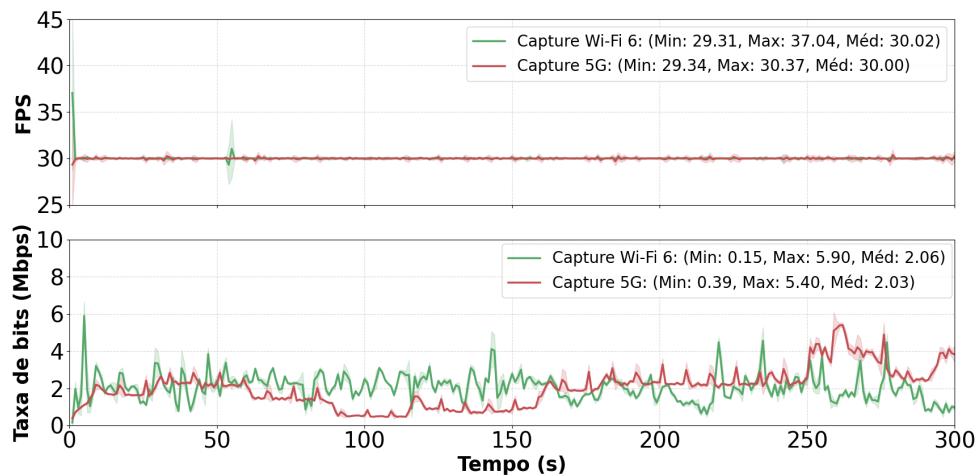
Nesse cenário, as tecnologias passam a apresentar comportamentos distintos conforme a capacidade de transmissão disponível. O Wi-Fi 6 com canal de 80 MHz apresentou o melhor desempenho entre as tecnologias sem fio avaliadas nas resoluções QuadHD e DCI 4K, ao suportar até 4 e 3 computadores, respectivamente. Em contrapartida, as configurações de Wi-Fi 5 e do próprio Wi-Fi 6 com canais de menor largura apresentaram redução progressiva da capacidade à medida que a resolução aumentou. A rede cabeada manteve a capacidade máxima até a resolução FHD e suportou 9 computadores na resolução QuadHD e 5 na resolução DCI 4K, estabelecendo a referência de desempenho do ambiente experimental.

Esse comportamento evidencia a influência das características de cada tecnologia na capacidade de atender aplicações de vídeo de alta resolução. Esses resultados evidenciam que o Wi-Fi 6 oferece maior capacidade para aplicações de vídeo de alta resolução em ambientes com múltiplos dispositivos. As melhorias introduzidas pelo padrão IEEE 802.11ax, como OFDMA e MU-MIMO, aumentam a eficiência espectral, reduzem a contenção pelo meio e ampliam o número de dispositivos atendidos simultaneamente. Além disso, o MU-MIMO do Wi-Fi 6 suporta até oito fluxos espaciais simultâneos, enquanto o Wi-Fi 5 suporta até quatro, característica que explica a maior capacidade experimental obtida pelo Wi-Fi 6 (Mozaffariahrar; Theoleyre; Menth, 2022).

5.2 Análise dos Resultados: Comparação Entre Redes Wi-Fi 6 e 5G em Ambiente Industrial

A Figura 21 apresenta a taxa de *bits* e o FPS ao longo do tempo durante o experimento de 5 minutos, realizado sob a condição NLOS, com vídeo VGA para a rede 5G e a rede Wi-Fi 6, com uma largura de banda de 80 MHz. As curvas escuras indicam os valores médios calculados sob as 10 repetições, enquanto as regiões sombreadas ao redor dessas curvas ilustram a variabilidade observada entre as diferentes execuções.

Figura 21 – Taxa de *bits* e FPS ao longo do tempo sob condição NLOS para resolução VGA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Como o acesso ao canal depende de decisões probabilísticas associadas à contenção entre múltiplas estações, o Wi-Fi 6 apresenta variações abruptas na taxa de *bits*, o que explica os vales e picos acentuados observados nos resultados.

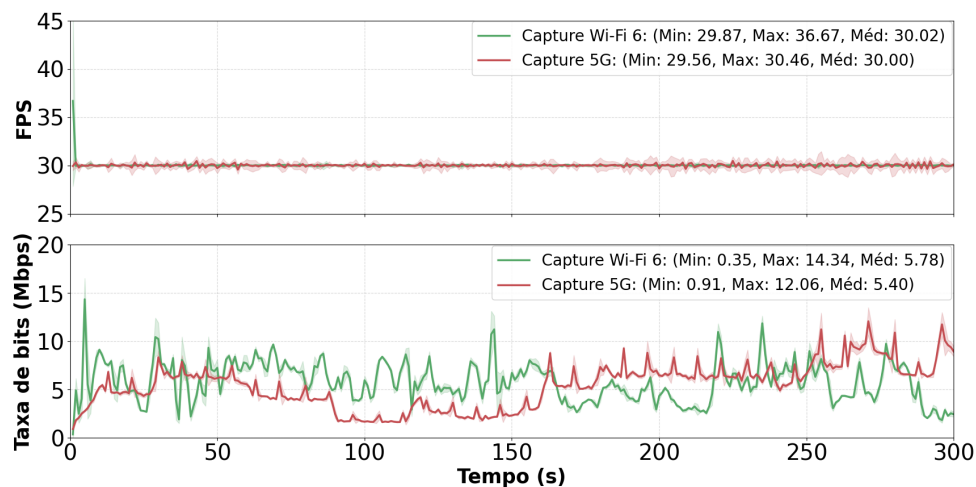
Em contraste, a rede 5G privada opera sob um regime mais estável e determinístico, mantendo uma taxa de *bits* média de 2,06 Mbps. Embora a rede 5G apresente um pico de taxa de *bits* inferior ao do Wi-Fi, o fato de suas amplitudes máximas de pico serem menores, até 5,40 Mbps, mostra um mecanismo de escalonamento de recursos mais determinístico e rigidamente controlado. Neste modelo, a RAN aloca blocos de recursos de tempo e frequência de maneira controlada e previsível, sem contenção direta pelo meio.

Em relação ao FPS, ambas as tecnologias mantêm taxas de quadros médias próximas ao valor alvo de 30 FPS, com 30,02 FPS para o Wi-Fi 6 e 30 FPS para o 5G. No entanto, a análise temporal revela que o Wi-Fi 6 exibe picos instantâneos de até 37,04 FPS. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito de rajada (*bursting effect*) nos *buffers* da rede. Quando o mecanismo CSMA/CA adia as transmissões de quadros porque o meio de comunicação é detectado como ocupado, os dados se acumulam temporariamente em filas de espera (Karupongsiri; Suwanmanee, 2018). Assim que o canal é liberado, o sistema transmite esses pacotes em uma rajada concentrada, elevando momentaneamente a taxa de entrega acima do valor nominal.

Embora as transmissões em rajada aumentem a taxa de entrega instantânea, elas também podem levar a variações transitórias de latência e *jitter*, o que pode impactar negativamente aplicações industriais, como veículos autônomos e automação industrial (Jain et al., 2025). Por outro lado, a rede 5G não apresenta variações significativas, mantendo uma progressão temporal estável e um padrão de entrega de quadros mais uniforme. Essas descobertas sugerem que as redes 5G podem fornecer um serviço mais previsível para aplicações de vídeo que exigem alta resolução. Embora não tenham sido realizados experimentos com um número maior de UEs, é razoável esperar que o Wi-Fi se torne ainda mais instável em tais cenários, em comparação à rede 5G, devido aos mecanismos baseados em contenção empregados na camada MAC.

Os resultados apresentados na Figura 22 evidenciam o comportamento da taxa de *bits* e do FPS ao longo do tempo para a resolução HD sob condição NLOS. Durante a transmissão na resolução HD, em comparação à VGA, ambas as tecnologias mantêm uma estabilidade consistente na taxa de quadros, com médias praticamente idênticas ao valor alvo de 30 FPS. As variações instantâneas permanecem limitadas e não indicam degradações sustentadas na entrega de vídeo.

Figura 22 – Taxa de *bits* e FPS ao longo do tempo sob condição NLOS para resolução HD.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As diferenças tornam-se mais evidentes na taxa de *bits*. O Wi-Fi 6 atinge o valor máximo de 14,34 Mbps e apresenta uma média de 5,78 Mbps, enquanto o 5G registra um pico de 12,06 Mbps e uma média de 5,40 Mbps. Apesar do maior valor máximo, o Wi-Fi 6 apresenta maior dispersão temporal, com oscilações mais pronunciadas ao longo do intervalo analisado.

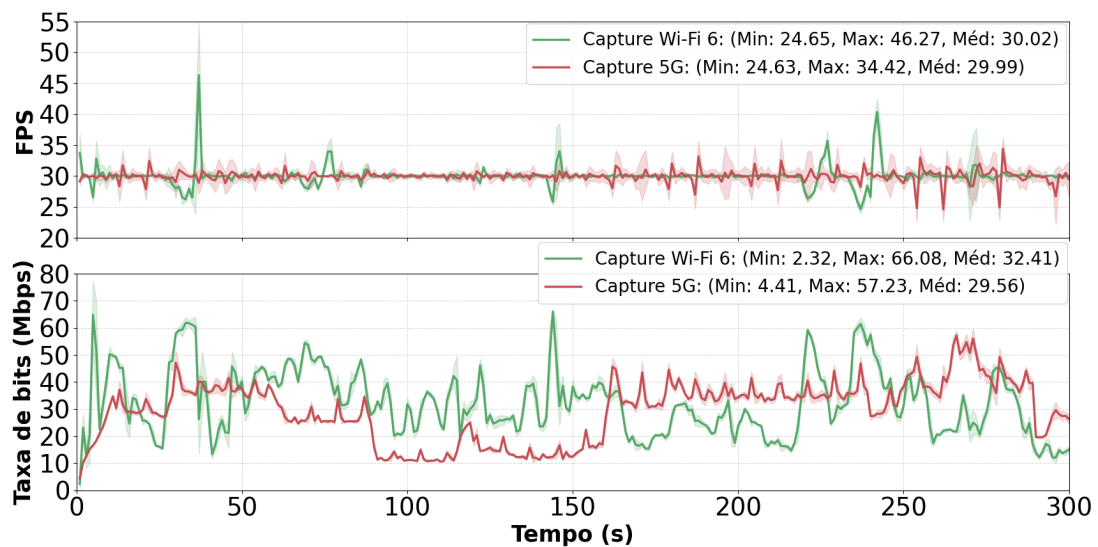
O 5G, por sua vez, mantém um perfil mais uniforme, com menor amplitude entre valores mínimos e máximos. Embora não alcance os maiores picos observados no Wi-Fi 6, a curva do 5G apresenta menor irregularidade, o que evidencia maior previsibilidade na alocação de recursos mesmo sob condição NLOS.

Esse comportamento indica que, para a resolução HD, ambas as redes atendem ade-

quadamente à demanda da aplicação. No entanto, o Wi-Fi 6 apresenta maior instabilidade na taxa instantânea, enquanto o 5G preserva maior regularidade temporal, característica relevante para aplicações industriais que priorizam a estabilidade em vez de picos momentâneos de desempenho.

A Figura 23 apresenta as mesmas métricas supracitadas. Em comparação com as resoluções VGA e HD, observa-se um aumento na taxa de *bits*, resultado esperado em razão da maior resolução.

Figura 23 – Taxa de *bits* e FPS ao longo do tempo sob condição NLOS para resolução DCI 4k.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação ao FPS, ambas as redes mantêm médias próximas de 30 FPS, 30,02 para o Wi-Fi 6 e 29,99 para o 5G. Contudo, a resolução DCI 4K amplia as variações instantâneas, com pico de 46,27 FPS no Wi-Fi 6 e 34,42 FPS no 5G. O Wi-Fi 6 apresenta maior flutuação devido ao efeito de rajada (*bursting effect*).

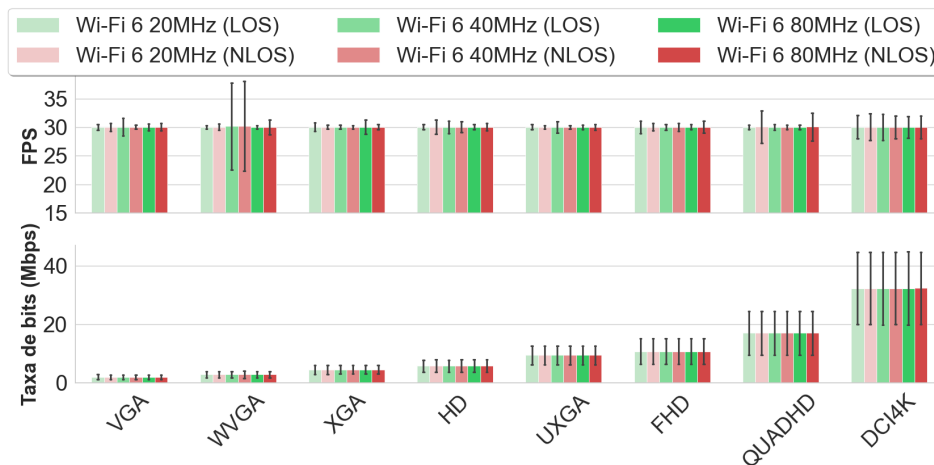
Entretanto, essa maior capacidade do Wi-Fi 6 acompanha variações mais acentuadas ao longo do tempo, com quedas bruscas e recuperações rápidas, enquanto o 5G se mantém mais estável, mesmo sob maior demanda na taxa de *bits*. Esse comportamento confirma o padrão observado nos cenários VGA, HD e DCI 4K, em que o Wi-Fi 6 apresenta maior variabilidade temporal e atinge picos superiores, enquanto o 5G mantém maior regularidade. Além disso, os experimentos realizados nessas três resoluções não registram perda de quadros.

Ao relacionar este resultado aos anteriores, observa-se que o aumento da resolução e da taxa exigida evidencia as diferenças estruturais entre os mecanismos de acesso. No cenário HD, ambas as tecnologias atendem à aplicação com comportamento semelhante. No DCI 4K, o Wi-Fi 6 explora de forma mais intensa sua capacidade de pico, enquanto o 5G mantém maior estabilidade e previsibilidade na entrega de dados.

5.2.1 Síntese dos Resultados Obtidos Para a Rede Wi-Fi 6

Os resultados experimentais obtidos para a rede Wi-Fi 6 são apresentados na Figura 24, que apresenta os valores médios e os desvios padrão da taxa de *bits* e do FPS obtidos para as três larguras de canal avaliadas (20, 40 e 80 MHz), para os dois nós Wi-Fi (NLOS e LOS) e para todas as resoluções de vídeo testadas, de VGA até DCI 4K. O valor de FPS manteve-se em torno de 30 FPS em todas as resoluções avaliadas. No entanto, o sistema registrou flutuações ocasionais na largura de banda de 40 MHz, especificamente na resolução WVGA. Essas variações podem estar associadas à ocorrência de interferência eletromagnética transitória ou a alterações no perfil de multicaminho do ambiente, possivelmente decorrentes da operação de equipamentos de usinagem por eletroerosão no ambiente industrial.

Figura 24 – Valores médios e desvios padrão da taxa de *bits* e do FPS obtidos nos experimentos com Wi-Fi 6.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

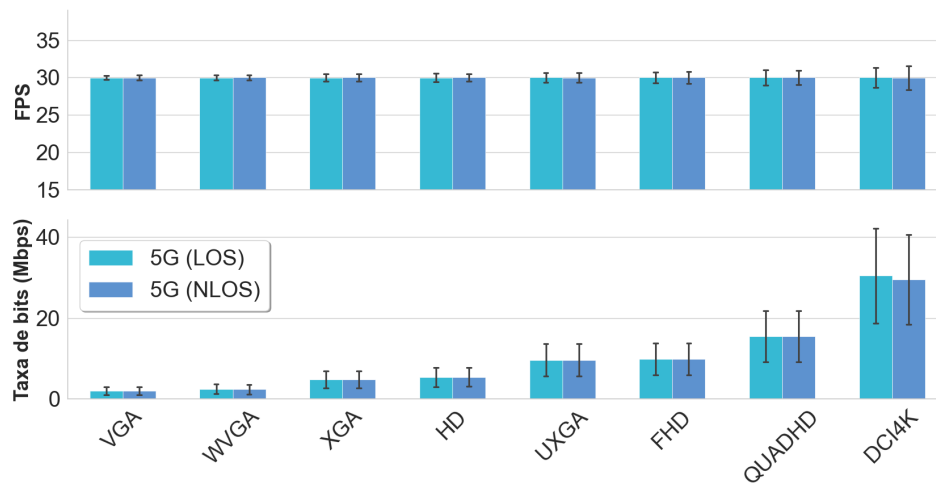
Em relação à taxa de *bits*, os resultados evidenciam uma relação aproximadamente proporcional entre a resolução de vídeo e a largura de banda requerida. As resoluções mais baixas, de VGA a HD, apresentaram taxas médias inferiores a 10 Mbps. Em contrapartida, formatos de ultra-alta definição, como QUADHD e DCI 4K, elevaram a taxa de *bits* média para faixas entre aproximadamente 15 e 32 Mbps, respectivamente.

O padrão Wi-Fi 6 atendeu a esses requisitos em todas as larguras de canal analisadas (20, 40 e 80 MHz). Entretanto, o sistema registrou aumento no desvio padrão na taxa de *bits* nas resoluções mais elevadas (QUADHD e DCI 4K). Esse comportamento indica uma maior variabilidade instantânea do tráfego, decorrente da elevada demanda por taxa de *bits* imposta por essas resoluções. Os resultados indicam que o uso de canais com menores larguras pode beneficiar esse tipo de aplicação, pois tais configurações sustentam a taxa de *bits* necessária mesmo em resoluções mais altas e permitem a implantação de múltiplos APs em canais ortogonais, o que amplia a conectividade para um número maior de nós.

5.2.2 Síntese dos Resultados Obtidos Para a Rede 5G

Os resultados experimentais referentes à rede 5G seguem a mesma estrutura apresentada na Seção 5.2.1. A Figura 25 apresenta a comparação entre os nós 5G nos cenários LOS e NLOS, para resoluções de VGA até DCI 4K, com base nas métricas de FPS e taxa de *bits*. Cada dispositivo alcançou aproximadamente 30 FPS em todas as resoluções avaliadas e apresentou maior variabilidade apenas na resolução DCI 4K. Esses resultados demonstram que a tecnologia atende aos requisitos de transmissão sem degradação perceptível, mesmo nas resoluções mais elevadas.

Figura 25 – Valores médios e desvios padrão da taxa de *bits* e do FPS obtidos nos experimentos com 5G.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação à taxa de *bits*, as resoluções mais baixas exibiram valores consistentemente reduzidos, com flutuações discretas e desvios padrão pouco expressivos, tanto em LOS quanto em NLOS. A partir da resolução UXGA e, de forma mais acentuada em QUADHD e DCI 4K, a taxa média de *bits* aumentou de maneira significativa, acompanhada por uma elevação no desvio padrão, o que indica maior variabilidade do tráfego em cenários de alta demanda.

A comparação entre LOS e NLOS evidencia comportamento semelhante nas resoluções mais baixas. No entanto, nas resoluções mais elevadas, especialmente em DCI 4K, o cenário NLOS apresentou redução na taxa de *bits* média e maior dispersão dos valores. Esse resultado indica maior sensibilidade do enlace 5G às condições de propagação quando a aplicação impõe requisitos elevados de vazão. Durante os experimentos, não ocorreu perda de quadros.

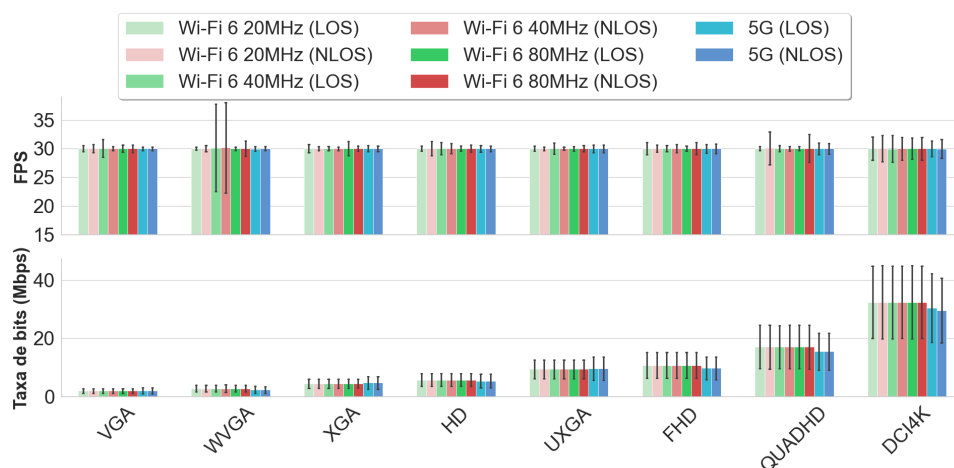
5.2.3 Consolidação dos Resultados de Comparação das Tecnologias Avaliadas

A consolidação dos resultados experimentais desta dissertação evidencia o comportamento das tecnologias Wi-Fi 6 e 5G em ambiente industrial, nos cenários LOS e NLOS, para diferentes resoluções de vídeo e larguras de canal, conforme apresentado na Figura 26.

Os resultados demonstram que ambas as tecnologias mantêm a taxa de quadros em aproximadamente 30 FPS em todas as resoluções avaliadas, inclusive em DCI 4K, conforme registrado pelo *middleware* de vídeo. A estabilidade do FPS confirma que tanto o Wi-Fi 6 quanto o 5G atendem às exigências da aplicação de transmissão de vídeo.

No entanto, as diferenças entre as tecnologias tornam-se mais evidentes na análise da taxa de *bits* e de sua variabilidade. O Wi-Fi 6 utiliza o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA, no qual os dispositivos competem pelo canal de forma distribuída. Por esse motivo, o desempenho depende diretamente da largura de canal configurada e das condições instantâneas do meio. Canais de 80 MHz proporcionam maior capacidade de vazão e acomodam resoluções maiores em um único canal. Já os canais de 20 e 40 MHz entregam vazão adequada com melhor eficiência espectral e maior possibilidade de reutilização de frequência, o que favorece implantações com múltiplos APs.

Figura 26 – Valores médios e desvios padrão da taxa de *bits* e do FPS obtidos nos experimentos com Wi-Fi 6 e 5G.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O 5G, por sua vez, opera com agendamento centralizado no domínio do tempo e da frequência, o que reduz a imprevisibilidade associada à contenção do meio de comunicação. Essa característica proporciona maior previsibilidade de entrega, especialmente sob cargas elevadas. Em contrapartida, o sistema demonstra maior sensibilidade à degradação de enlace em condição NLOS nas resoluções mais altas, particularmente em DCI 4K, onde se observa redução da taxa média de *bits* e aumento do desvio padrão.

A comparação direta evidencia que o Wi-Fi 6 apresenta elevada flexibilidade de implantação, com possibilidade de segmentação espectral por meio de múltiplos APs em canais ortogonais, característica vantajosa em ambientes industriais densos. O 5G destaca-se pela previsibilidade do enlace e pelo controle centralizado de recursos, atributos relevantes para aplicações que exigem garantia de qualidade de serviço. De forma integrada, os resultados confirmam que ambas as tecnologias atendem aos requisitos de transmissão de vídeo em alta resolução em

ambiente industrial. A escolha entre Wi-Fi 6 e 5G deve considerar não apenas a taxa de dados alcançada, mas também a densidade de dispositivos, a estratégia de planejamento espectral e os custos de implantação, os quais foram apresentados na Seção 4.3.

Assim, esta dissertação demonstra, por meio de avaliação experimental, que o Wi-Fi 6 e o 5G constituem soluções tecnicamente viáveis para aplicações de Indústria 4.0 baseadas em vídeo de alta definição. A arquitetura do sistema e os requisitos operacionais determinam a tecnologia mais adequada para cada cenário específico.

5.3 Discussão

Na primeira fase deste estudo, foi realizada uma comparação entre o desempenho das redes Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6 com base em 2.184 execuções experimentais, conduzidas sob diferentes larguras de canal (20, 40 e 80 MHz) e densidades de dispositivos conectados (de 1 a 13). Os resultados indicam que o Wi-Fi 6, quando configurado com canais de 80 MHz, alcança ganhos em eficiência e capacidade, sobretudo em cenários com elevada densidade de dispositivos. Por outro lado, o Wi-Fi 5 apresenta melhor desempenho em canais de 20 MHz, principalmente em ambientes com baixa densidade de dispositivos, nos quais as vantagens do OFDMA no Wi-Fi 6 tornam-se limitadas devido à menor quantidade de subportadoras disponíveis.

Na segunda fase da pesquisa, o estudo comparou o desempenho das redes Wi-Fi 6 e 5G privativa a partir de 640 execuções experimentais conduzidas sob diferentes condições de enlace, com linha de visada e sem linha de visada, e sob diferentes larguras de canal no Wi-Fi 6 (20, 40 e 80 MHz). O conjunto experimental totaliza aproximadamente 53 horas e 30 minutos de medições contínuas, o que fornece uma base empírica para a análise apresentada nesta dissertação.

Os resultados evidenciam diferenças estruturais entre os mecanismos de acesso ao meio. O Wi-Fi 6, fundamentado em acesso distribuído por contenção, apresenta maior variabilidade em cenários com elevada ocupação espectral, especialmente em resoluções maiores, como DCI 4K. Por sua vez, a rede 5G privativa, baseada em agendamento centralizado, mantém maior previsibilidade temporal, com menor oscilação nas métricas de taxa de *bits*.

Nos cenários de menor exigência de taxa de *bits*, como VGA até HD, ambas as tecnologias atendem aos requisitos da aplicação com desempenho semelhante, o que indica que a escolha tecnológica pode considerar critérios adicionais, como custo de implementação, escalabilidade e integração com a infraestrutura existente. Entretanto, à medida que a demanda por taxa de *bits* aumenta, as diferenças entre os modelos de acesso tornam-se mais evidentes. O Wi-Fi 6 tende a maximizar a taxa agregada quando há disponibilidade espectral, enquanto o 5G prioriza estabilidade e controle de qualidade de serviço.

A análise também demonstra que o impacto do cenário NLOS manifesta-se de forma distinta em cada tecnologia. No Wi-Fi 6, a comparação entre as condições de LOS e NLOS não evidencia diferenças significativas nas métricas analisadas, no cenário avaliado. Em contrapartida,

no 5G, especialmente na resolução DCI 4K, observa-se um impacto mais pronunciado da condição de enlace sem linha de visada, com redução na taxa de *bits* em relação ao cenário LOS, comportamento que difere do verificado no Wi-Fi 6 para o cenário avaliado.

Por fim, os dados coletados constituem uma base de referência para aplicações com requisitos semelhantes de desempenho. Esses resultados permitem avaliar, de forma objetiva, se os níveis de desempenho observados atendem aos requisitos de aplicações específicas, como sistemas de visão computacional, monitoramento em tempo real e controle remoto de dispositivos na Indústria 4.0. Desse modo, o estudo subsidia decisões técnicas mais fundamentadas em futuras implementações e pesquisas no contexto de redes sem fio industriais.

6 CONCLUSÕES

Na primeira fase deste trabalho, foi realizada a comparação entre as tecnologias Wi-Fi 5 (802.11ac) e Wi-Fi 6 (802.11ax) com foco na taxa de transferência de dados necessária para atender aos requisitos de um *middleware* de vídeo no contexto da Indústria 4.0. Em um ambiente experimental, a avaliação considerou métricas como taxa de transmissão e perda de pacotes sob diferentes níveis de carga e números de dispositivos conectados simultaneamente (de 1 a 13). Os resultados indicam que o Wi-Fi 6 apresenta melhorias em relação ao Wi-Fi 5, principalmente em cenários com múltiplos dispositivos e alta demanda de tráfego, principalmente quando utiliza canais de maior largura, como 80 MHz. Nessa configuração, o Wi-Fi 6 suportou até quatro computadores na resolução QUADHD e três na resolução DCI 4K, enquanto as demais configurações sem fio apresentaram capacidade inferior. Recursos como OFDMA, TWT e MU-MIMO bidirecional aumentam a eficiência espectral e contribuem para maior estabilidade na transmissão de dados. Embora o Wi-Fi 5 permaneça adequado para ambientes com menor demanda, o Wi-Fi 6 mostra-se mais apropriado para aplicações industriais que exigem comunicação sem fio eficiente e confiável.

Na segunda fase da pesquisa, foi realizada uma comparação empírica entre as tecnologias Wi-Fi 6 e 5G privativa para aplicações de transmissão de vídeo em ambientes industriais, com o uso de um *middleware* de vídeo. A avaliação considerou diferentes resoluções, condições de enlace (LOS e NLOS) e configurações de largura de canal (20, 40 e 80 MHz) no Wi-Fi 6. A partir do delineamento experimental adotado, o estudo analisou métricas como taxa de bits, FPS e perda de quadros, o que permitiu uma comparação objetiva entre as duas tecnologias sob distintos níveis de carga.

Os resultados mostram que ambas as tecnologias atendem aos requisitos de aplicações com menor exigência de taxa de dados, como VGA e HD, e apresentam desempenho semelhante nas métricas avaliadas. Entretanto, à medida que a demanda por taxa de transmissão aumenta, especialmente em resoluções como Full HD e DCI 4K, as diferenças estruturais entre os mecanismos de acesso ao meio tornam-se mais evidentes. O Wi-Fi 6 apresenta maior capacidade de maximização de vazão em cenários com maior largura de canal, sobretudo em 80 MHz, ao explorar de forma eficiente a disponibilidade espectral. Em contrapartida, a rede 5G privativa mantém maior previsibilidade temporal e controle mais rigoroso dos recursos, em função de sua arquitetura baseada em agendamento centralizado.

A análise dos cenários NLOS evidencia comportamentos distintos entre as tecnologias. O Wi-Fi 6 mantém desempenho relativamente estável entre as condições de LOS e NLOS nas métricas analisadas. Por outro lado, o 5G apresenta maior sensibilidade à condição de enlace em cenários de alta demanda, com redução na taxa de bits em resoluções mais elevadas. Esse

resultado indica que fatores ambientais e características de propagação podem influenciar de maneira diferenciada cada tecnologia.

Dessa forma, este trabalho fornece uma base experimental para subsidiar a tomada de decisão em ambientes industriais com demanda por transmissão de vídeo em tempo real. Os resultados avaliam, de maneira objetiva, a adequação de cada tecnologia a diferentes perfis de aplicação, ao considerar desempenho, previsibilidade e requisitos de qualidade de serviço. Além das contribuições técnicas, os resultados obtidos validam a viabilidade do uso do Wi-Fi 6 em aplicações industriais com requisitos mais elevados, especialmente no contexto de transmissão de vídeo em tempo real e evidenciam a maior previsibilidade temporal proporcionada pela rede 5G privativa.

Em síntese, os objetivos propostos foram alcançados por meio da avaliação experimental das tecnologias Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 e 5G privativa para aplicações de vídeo no contexto da Indústria 4.0. O trabalho comparou o desempenho dessas tecnologias, identificou seus limites operacionais e analisou a influência da largura de canal, da condição do enlace e do volume de tráfego sobre a taxa de *bits*, de FPS e a perda de quadros. Também foram desenvolvidas ferramentas para gerar tráfego sintético, orquestrar os experimentos e processar os dados coletados. Por fim, a montagem e a configuração dos cenários experimentais, tanto em laboratório quanto em ambiente industrial, permitiram identificar as vantagens e limitações de cada tecnologia e fornecer subsídios técnicos para a escolha da solução mais adequada a diferentes requisitos de transmissão de vídeo.

Como desdobramento da pesquisa, este trabalho resultou na publicação dos seguintes artigos:

- **MERCES, J. M. O. ; GALVAO, J. S. S. ; OLIVEIRA, M. M. ; GOMES, R. D. ; SILVA, M. P. ; SOUSA, M. P.** Evaluating the Limits of Wi-Fi 5, and Wi-Fi 6 Networks for Industrial Video Applications. In: 43^a Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) - Trilha de Interação com a Indústria, 2025, Natal;
- **MERCES, J. M. O.; GALVAO, J. S. S. ; SOUSA, M. P. ; LOPES, W. T. A. ; SILVA, M. P. ; GOMES, R. D.** Comparative Evaluation of Wi-Fi 6 and Private 5G for Uplink Video Transmission in Industrial Settings. In: 31st IEEE Symposium on Computers and Communications, 2026, Vilamoura, Algarve, Portugal.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, o estudo pode ampliar a análise para cenários com um maior número de fluxos simultâneos, a fim de avaliar o comportamento das tecnologias sob condições nas quais múltiplos dispositivos transmitem dados de forma concorrente. O trabalho também pode incluir a avaliação de mobilidade, especialmente em aplicações que envolvem robôs móveis

ou dispositivos portáteis, nas quais a variação do enlace impacta diretamente métricas como latência, taxa de *bits* e estabilidade do fluxo de vídeo.

A pesquisa também pode integrar arquiteturas de computação de borda para examinar a influência do processamento distribuído na redução da latência. Além disso, o estudo pode analisar o impacto de mecanismos de priorização de tráfego, com a definição de políticas que favoreçam fluxos críticos em detrimento de outros, e avaliar seus efeitos sobre a qualidade de serviço, a previsibilidade temporal e o desempenho global do sistema.

O trabalho também pode estender os experimentos para todo o galpão industrial do SENAI e considerar topologias de rede mais complexas, com um maior número de APs, rádios 5G e UEs. Essa ampliação permite avaliar aspectos como interferência co-canal, planejamento de cobertura, procedimentos de *handover* e escalabilidade da infraestrutura. A adoção de cenários com maior densidade de dispositivos e diversidade de aplicações amplia o escopo experimental e fortalece a validade dos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

- 3GPP. *5G for the Connected World*. 2024. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/5g-for-the-connected-world>>. Acesso em: 20 maio 2024. Citado na página 45.
- ADRIANO, J. D.; ROSARIO, E. C. d.; RODRIGUES, J. J. Wireless sensor networks in industry 4.0: WirelessHART and ISA100.11a. In: *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 924–929. Citado na página 19.
- AIJAZ, A. Private 5G: The future of industrial wireless. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 14, n. 4, p. 136–145, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 32.
- ARRANO, H. F.; AZURDIA-MEZA, C. A. OFDM: today and in the future of next generation wireless communications. In: *2016 IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- ARTETXE, E. et al. Wireless technologies for industry 4.0 applications. *Energies*, v. 16, p. 1349, 01 2023. Citado na página 18.
- ASUS. *O que é OFDMA?* 2024. Disponível em: <<https://www.asus.com/br/support/faq/1042759/>>. Acesso em: 24 nov. 2024. Citado na página 25.
- BANDYOPADHYAY, D. et al. Network throughput improvement in Wi-Fi 6 over Wi-Fi 5: A comparative performance analysis. In: *2023 International Conference on Computer, Electrical Communication Engineering (ICCECE)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6. Citado na página 21.
- BARTOLÍN-ARNAU, L. M. et al. Exploring the potential of Wi-Fi in industrial environments: A comparative performance analysis of IEEE 802.11 standards. *Telecom*, v. 6, n. 2, 2025. ISSN 2673-4001. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4001/6/2/40>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado 3 vezes nas páginas 19, 22 e 30.
- BHARGAVA, V.; RAGHAVA, N. An enhancement for IEEE 802.11 STA power saving and access point memory management mechanism. *Electronics*, v. 11, n. 23, 2022. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/11/23/3914>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 26.
- BUYYA, R.; SRIRAMA, S. N. Middleware for fog and EDGE computing: Design issues. In: _____. *Fog and EDGE Computing: Principles and Paradigms*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 123–144. Citado na página 40.
- CATE, M. *Middleware and the Future of EDGE Computing*. [S.l.: s.n.], 2023. Citado na página 39.
- CENA, G. et al. Evaluating and modeling IEEE 802.15.4 TSCH resilience against Wi-Fi interference in new-generation highly-dependable wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, v. 106, p. 102199, 2020. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870519310509>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 19.

- CHAVES, R. et al. Enabling parallel processing at the EDGE for real-time video analysis applications. In: *Anais do XVI Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2025. p. 58–65. ISSN 2595-2692. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/wpeif/article/view/35278>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 41.
- CHEN, C. et al. Overview and performance evaluation of Wi-Fi 7. *IEEE Communications Standards Magazine*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 12–18, 2022. Citado na página 29.
- CHIAVASSA, P.; SCANZIO, S.; CENA, G. *On the Suitability of Wi-Fi for Interconnecting Moving Equipment in Industrial Environments*. 2025. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2506.06074>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 18.
- CHWALISZ, M. Demonstration of efficient coexistence of IEEE 802.15.4e tsch and IEEE 802.11. In: *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–2. Citado na página 19.
- Cisco. *Wi-Fi 6 OFDMA: Resource unit (RU) allocations and mappings*. 2025. Disponível em: <<https://ciscocentral.blogspot.com/2020/05/{Wi-Fi}-6-ofdma-resource-unit-ru-allocations-and-mappings.ht>>. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado na página 27.
- CUEVAS, S. R. *5G Radio Protocols: A Quick Structural Guide*. 2024. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/5g-radio-protocols-quick-structural-guide-sergio-rivera-cuevas-blffe/>>. Acesso em: 27 fev. 2026. Citado na página 42.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *5G NR The Next Generation Wireless Access Technology*. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 31, 32, 34, 35, 36 e 38.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. 2nd. ed. Oxford: Academic Press, 2021. ISBN 9780128223208. Citado na página 42.
- Dell Technologies. *Dell OptiPlex 3070 Micro — Especificações do Processador*. 2026. Disponível em: <https://www.dell.com/support/manuals/pt-br/optiplex-3070-micro/opti3070_micro_setiup_specs/processador?guid=guid-72cc410a-de1d-44be-b12f-78ca48e7182a&lang=pt-br>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 53.
- DIANU, M.-D.; RIIHIJÄRVI, J.; PETROVA, M. Measurement-based study of the performance of IEEE 802.11ac in an indoor environment. In: *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 5771–5776. Citado na página 21.
- DOGAN-TUSHA, S. et al. Indoor and outdoor measurement campaign for unlicensed 6 GHz operation with Wi-Fi 6E. In: *2023 26th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6. Citado na página 28.
- 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. Citado na página 21.

GANESAN, P. et al. Comparative analysis on industrial iot communication protocols and its future directives. In: *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Citado na página 40.

GARCÍA, M.; OBERLI, C. Intercarrier interference in OFDM: A general model for transmissions in mobile environments with imperfect synchronization. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Springer, v. 2009, n. 1, p. 786040, 2009. Citado na página 28.

HEO, Y. et al. Performance comparison of SU- and MU-MIMO in 802.11ax: Delay and throughput. In: *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 879–882. Citado na página 21.

Herles Upareeth. *docker_open5gs — Ambiente 5G Core virtualizado com Docker*. 2025. Disponível em: <https://github.com/herlesupreeth/docker_open5gs>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 55.

HOMAYOUNI, S. et al. Design and development of private 5G standalone network for vertical industries. In: *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 369–374. Citado na página 37.

HOPPARI, M. et al. Performance of the 5th generation indoor wireless technologies-empirical study. *Future Internet*, v. 13, n. 7, 2021. ISSN 1999-5903. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-5903/13/7/180>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 16.

HUSSAIN, I. et al. OFDMA as the technology for the next generation mobile wireless internet. In: *2007 Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 14–14. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

IEC. *International Standard*. 2016. Disponível em: <<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/20801/5e71d6f73e724d5f8fd9ddd4f3a36aaa/IEC-62591-2016.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2025. Citado na página 19.

IEC. *International Standard*. 2019. Disponível em: <<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/100979/7ce19419f2b14a3caac7d81f39d63dab/IEC-62734-2014-AMD1-2019.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2025. Citado na página 19.

IEC. *International Electrotechnical Commission*. 2025. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/en/publication/32718>>. Acesso em: 27 jun. 2025. Citado na página 45.

IIOT, I. N. . *Wireless Broadband Alliance: Wi-Fi predictions for 2025*. 2025. Disponível em: <<https://iebmedia.com/news/tech-updates/wireless-broadband-alliance-{Wi-Fi}-predictions-for-20>>. Acesso em: 17 jun. 2025. Citado na página 15.

Intel. *Intel Core i7-6700. Especificações*. 2015. Disponível em: <<https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/products/sku/88196/intel-core-i76700-processor-8m-cache-up-to-4-00-ghz/specifications.html>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 48.

JAIN, G. et al. Exploring low-latency communication protocols for time-sensitive industrial automation and autonomous vehicle systems. In: *2025 International Conference on Computing, Intelligence, and Application (CIACON)*. [S.l.: s.n.], 2025. p. 1–7. Citado na página 66.

- JERICHOW, A. et al. 3GPP non-public network security. *Journal of ICT Standardization*, v. 8, n. 1, p. 57–76, 2020. Citado na página 37.
- JIANG, H. et al. A wideband circularly polarized dielectric patch antenna with a modified air cavity for Wi-Fi 6 and Wi-Fi 6E applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 22, n. 1, p. 213–217, 2023. Citado na página 28.
- KAEWKIRIYA, T. Performance comparison of Wi-Fi IEEE 802.11ac and Wi-Fi IEEE 802.11n. In: *2017 2nd International Conference on Communication Systems, Computing and IT Applications (CSCITA)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 235–240. Citado na página 20.
- KAFAL, M. *Intensity Modulation of Optical OFDM Signals Using Two Cascaded SOA's*. 2012. Citado na página 23.
- KARUPONGSIRI, C.; SUWANMANEE, S. Performance evaluation of wlan 802.11x and lte network for 5G handover. In: *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 337–340. Citado na página 65.
- KHAN, M. A. et al. A survey on mobile EDGE computing for video streaming: Opportunities and challenges. *IEEE Access*, v. 10, p. 120514–120550, 2022. Citado na página 39.
- KHOROV, E.; LEVITSKY, I.; AKYILDIZ, I. F. Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7. *IEEE Access*, v. 8, p. 88664–88688, 2020. Citado na página 29.
- KOKKONIEMI-TARKKANEN, H. et al. Enabling safe wireless harbor automation via 5g urlhc. In: *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 403–408. Citado na página 20.
- KOROLEV, N.; LEVITSKY, I.; KHOROV, E. Analytical model of multi-link operation in saturated heterogeneous Wi-Fi 7 networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 11, n. 12, p. 2546–2549, 2022. Citado na página 29.
- KOSTADINOVIC, M. et al. Quality analysis of data transferring through the process of modeling wireless network. In: *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5. Citado na página 19.
- L, A. S.; PATWARY, M. Optimizing 3GPP 5G NEF Integration: Enhancing Programmable Networks Through NEF and UPF Interoperability. In: *2024 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 423–427. Citado na página 34.
- LEE, J. et al. Federated Learning-Empowered Mobile Network Management for 5G and Beyond Networks: From Access to Core. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 26, n. 3, p. 2176–2212, 2024. Citado na página 34.
- LEVITSKY, I.; OKATEV, Y.; KHOROV, E. Study on simultaneous transmission and reception on multiple links in IEEE 802.11be networks. In: *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (EnT)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- LI, W. et al. An efficient fixed and mobile cooperative backup strategy based on 5G private network. In: *2023 IEEE 11th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 90–94. Citado na página 20.

- LI, X.; WANG, Y. A Triple-Port, Triple-Band Wi-Fi Antenna Covering the 2.4/5/6 GHz Bands With a Small Clearance and High Isolation for Metal-Bezel Smartphones. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 23, n. 6, p. 1814–1818, 2024. Citado na página 24.
- LIANG, W. et al. An experimental evaluation of WIA-FA and IEEE 802.11 networks for discrete manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 17, n. 9, p. 6260–6271, 2021. Doi.org/10.1109/TII.2021.3051269. Citado na página 45.
- Linux Mint. *Linux Mint 21.2*. 2023. Disponível em: <<https://www.linuxmint.com/edition.php?id=311>>. Acesso em: 22 abr. 2024. Citado na página 48.
- LONG, F. et al. Adaptive Modulation and Coding With LDPC Codes and Retransmission for Ultraviolet Communication. *IEEE Photonics Journal*, v. 16, n. 3, p. 1–10, 2024. Citado na página 27.
- MAKONDO, N. et al. A Review of PFCP Cyber Attacks in 5G Standalone for Robotic Telesurgery Services. In: *2024 International Conference on Next Generation Computing Applications (NextComp)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–7. Citado na página 34.
- MALDONADO, R. et al. Comparing Wi-Fi 6 and 5G downlink performance for industrial IoT. *IEEE Access*, v. 9, p. 86928–86937, 2021. Doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3085896. Citado na página 45.
- Matplotlib Developers. *Matplotlib — Visualization with Python*. 2026. Disponível em: <<https://matplotlib.org/>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 58.
- MEDEIROS, W. D. d. et al. Estudo, implementação e análise do sistema de comunicação OFDM. Universidade Federal de Campina Grande, 2021. Citado na página 23.
- MEER, P. D. H. de. *Modeling, Specification and Evaluation Language*. 2025. Disponível em: <<https://www.fim.uni-passau.de/en/computer-networks/research/projects/mosel-2/>>. Acesso em: 15 jul. 2025. Citado na página 44.
- MERCES, J. et al. Core 5G open source com ran comercial: Uma avaliação de desempenho em rede 5G privativa. In: . [S.l.: s.n.], 2025. Citado na página 19.
- 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. Citado na página 63.
- MORELLI, M.; KUO, C.-C. J.; PUN, M.-O. Synchronization Techniques for Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): A Tutorial Review. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 7, p. 1394–1427, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MOZAFFARIAHRAR, E.; THEOLEYRE, F.; MENTH, M. A survey of Wi-Fi 6: Technologies, advances, and challenges. *Future Internet*, v. 14, n. 10, 2022. ISSN 1999-5903. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-5903/14/10/293>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado 6 vezes nas páginas 21, 24, 29, 40, 60 e 64.
- NAIK, G.; PARK, J.-M. J. Coexistence of Wi-Fi 6e and 5G NR-U: Can we do better in the 6 GHz bands? In: *IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–10. Citado na página 28.

NEE, R. V. Breaking the gigabit-per-second barrier with 802.11ac. *IEEE Wireless Communications*, v. 18, n. 2, p. 4–4, 2011. Citado na página 21.

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. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/webmedia/article/view/30315>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado 6 vezes nas páginas 15, 16, 39, 40, 41 e 49.

NIA, M. F. *Explore Cross-Codec Quality-Rate Convex Hulls Relation for Adaptive Streaming*. 2024. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2408.09044>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 39.

NIELSEN, O. et al. Mobility-focused joining in TSCH networks. In: *2022 IEEE 47th Conference on Local Computer Networks (LCN)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 271–274. ISSN 0742-1303. Citado na página 19.

NURCHIS, M.; BELLALTA, B. Target wake time: Scheduled access in IEEE 802.11ax WLANs. *IEEE Wireless Communications*, v. 26, n. 2, p. 142–150, 2019. Doi.org/10.1109/MWC.2019.1800163. Citado na página 26.

OSSEIRAN, A.; MONSERRAT, J. F.; MARSCH, P. *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 31, 32, 33, 34, 36 e 37.

PADRAH, Z. et al. An isa100.11a model implementation for accurate industrial WSN simulation in ns-3. In: *2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado na página 20.

PALACIOS-TRUJILLO, R. et al. Maximum achievable energy efficiency of TXOP power save mode in IEEE 802.11ac WLANs. In: *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7. Citado na página 22.

Pandas Developers. *pandas — Python Data Analysis Library*. 2026. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 58.

Paramiko. *Welcome to Paramiko*. 2026. Disponível em: <<https://www.paramiko.org/>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 56.

PATHAK, N. OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) Simulation using Matlab. *International Journal of Engineering Research & Technology*, v. 1, n. 6, p. 1–6, 2012. Citado na página 23.

PATRA, P. K.; SHAH, M. M. Smart mining with private 5G technology: Revolutionizing industry. 2025. Citado na página 20.

PERRON, E.; DIGGAVI, S.; TELATAR, E. The interference-multiple-access channel. In: *2009 IEEE International Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. Citado na página 28.

PETERSON, L.; SUNAY, O. *5G Mobile Networks: A Systems Approach*. 1. ed. [S.l.]: Morgan Claypool Press, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 31, 32, 33, 36, 37 e 38.

PETERSON, L.; SUNAY, O.; DAVIE, B. *Private 5G: A Systems Approach*. CyberEdu, 2023. Disponível em: <<https://5g.cyberedu.com.br/core.html>>. Acesso em: 20 fev. 2026. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35, 41 e 42.

PETO, J. et al. 5G support for industrial IoT applications— challenges, solutions, and research gaps. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 3, p. 828, feb 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s20030828>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 40.

PINTO, E. L.; ALBUQUERQUE, C. P. de. A técnica de transmissão OFDM. *Revista Científica*, v. 1516, p. 2338, 2002. Citado na página 24.

RAJENDRAN, G. et al. Performance evaluation of video streaming applications with target wake time in Wi-Fi 6. In: *2023 15th International Conference on COMMunication Systems NETWORKS (COMSNETS)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 802–807. Doi.org/10.1109/COMSNETS56262.2023.10041325. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

RATHOR, R. G.; JOSHI, R. D. Performance analysis of IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) Technology using Multi-user MIMO and Up-Link OFDMA for dense environment. In: *2021 IEEE 2nd International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, Communication (AESPC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 26.

RIKALOVIC, A. et al. Industry 4.0 implementation challenges and opportunities: A technological perspective. *IEEE Systems Journal*, v. 16, n. 2, p. 2797–2810, 2022. Citado na página 40.

S.A., R. *Linha ROMI D – Nova Geração*. 2025. Disponível em: <<https://www.romi.com/produtos/linha-romi-d-nova-geracao/>>. Acesso em: 24 fev. 2026. Citado na página 51.

SAUTER, M. *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2021. ISBN 9781119714699. Citado na página 31.

Seaborn Developers. *Seaborn — Statistical Data Visualization*. 2026. Disponível em: <<https://seaborn.pydata.org/>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 58.

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. Doi.org/10.1109/TLA.2021.948014610.1109/ACCESS.2024.3404870. Citado na página 46.

SERIES, M. IMT vision—framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. *Recommendation ITU*, Electronic Publication Geneva, Switzerland, v. 2083, n. 0, p. 1–21, 2015. Citado na página 20.

SILVA, R. L. D. et al. Reducing latency of distributed video applications through in-network computing at the EDGE. In: *2025 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software-Defined Networking (NFV-SDN)*. [S.l.: s.n.], 2025. p. 1–6. Citado na página 40.

SKENDZIC, A.; MUSTAC, K.; BALON, B. Switching to Wi-Fi 6 technology in a soho environment. In: *2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1306–1311. Citado na página 15.

SOLUTIONS, S. et al. *Keysight Technologies and Skyworks Solutions Applying a Very Wide-Bandwidth Millimeter-Wave Testbed to Power Amplifier DPD*. Citado na página 24.

SUER, M.-T.; JOSE, P.; TCHOUANKEM, H. Experimental evaluation of IEEE 802.11ax - low latency and high reliability with Wi-Fi 6? In: *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 377–382. Citado 3 vezes nas páginas 15, 26 e 43.

Sunwave Communications. *5G NR Femtocell nCELL-F2240*. 2026. Disponível em: <<http://en.sunwave.com/5G-NR-Femtocell-nCELL-F2240-pd40428730.html>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 55.

Technology. *2023 Industrial Wireless Technology Update*. 2023. Disponível em: <<https://iebmedia.com/technology/iiot/2023-industrial-wireless-technology-update/>>. Acesso em: 21 jul. 2024. Citado na página 18.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340203020>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 25.

TP-Link. *Placa de Rede PCIE AX3000 Wi-Fi 6 TX50E. Especificações*. 2022. Disponível em: <<https://www.tp-link.com/br/home-networking/adapter/archer-tx50e/#specifications>>. Acesso em: 22 abr. 2024. Citado na página 48.

TP-Link. *TP-Link EAP660 HD AX3600*. 2025. Disponível em: <<https://www.tp-link.com/br/business-networking/ceiling-mount-ap-wcma/eap660-hd/>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 53.

TP-Link. *TP-Link TL-SG2008 JetStream — Switch de Rede Gigabit Smart de 8 Portas*. 2025. Disponível em: <<https://www.tp-link.com/uk/service-provider/smart-switch/tl-sg2008/>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 53.

TP-Link. *Archer TX20U Plus*. 2026. Disponível em: <<https://www.tp-link.com/pt/home-networking/adapter/archer-tx20u-plus/>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 53.

TRUSOVA, K.; ZAVJALOV, S. Challenges in the organization of a wireless network in complex industrial scenario. In: *2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 116–120. Citado na página 20.

UHRINA, M. et al. Impact of scene content on high resolution video quality. *Sensors*, v. 21, n. 8, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2872>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 39.

VARGHESE ANITHA E TANDUR, D. Requisitos e desafios da tecnologia sem fio na indústria 4.0. In: *Conferência Internacional sobre Computação e Informática Contemporâneas de 2014 (IC3I)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 634–638. Citado na página 20.

VENKATESWARAN, S. K. et al. IEEE 802.11ax Target Wake Time: Design and Performance Analysis in ns-3. In: *Proceedings of the 2024 Workshop on Ns-3*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2024. (WNS3 '24), p. 10–18. ISBN 9798400717635. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3659111.3659115>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 26.

WAGNER, R. et al. IndustrialEDGEml - end-to-end EDGE-based computer vision system for industry 5.0. *Procedia Computer Science*, v. 217, p. 594–603, 2023. ISSN 1877-0509. 4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705092202333X>>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 38.

WANG, J.; HUANG, G.; SHAO, Z. Performance evaluation of Wi-Fi 6 and technology prospects of Wi-Fi. In: *2022 International Conference on Information Processing and Network Provisioning (ICIPNP)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 91–95. Citado na página 25.

Waveshare. *RM520N-GL 5G HAT com Case*. 2026. Disponível em: <https://www.waveshare.com/wiki/RM520N-GL_5G_HAT>. Acesso em: 9 set. 2026. Citado na página 53.

WEN, M. et al. Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, v. 16, n. 1, p. 7–25, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

Wi-Fi NOW. *Multi-fold success with Wi-Fi 7 multi-link operation*. 2025. Disponível em: <<https://wifinowglobal.com/news-and-blog/multi-fold-success-with-{Wi-Fi}-7-multi-link-operation-ml>>. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado na página 30.

YAMAGUCHI, K.; ONISHI, M.; SAKAMOTO, Y. Evaluation of transmission performance for streaming CGH video based on computer holography and electro-holography. In: *2024 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 689–694. Citado na página 46.

ZHENG, R.; HOU, J.; SHA, L. Performance analysis of the IEEE 802.11 power saving mode. 01 2004. Citado na página 22.

ZREIKAT, A. Performance evaluation of 5G/WiFi-6 coexistence. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, v. 14, p. 904–913, 12 2020. Doi.org/10.46300/9106.2020.14.116. Citado na página 44.