



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Christian Mailer

**Desenvolvimento e análise de um modelo de simulação para arquiteturas 5G
industriais**

Florianópolis
2022

Christian Mailer

**Desenvolvimento e análise de um modelo de simulação para arquiteturas 5G
industriais**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Alex Sandro Roschildt Pinto, Dr.
Coorientador: Prof. Adão Boava, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mailer, Christian

Desenvolvimento e análise de um modelo de simulação para arquiteturas 5G industriais / Christian Mailer ; orientador, Alex Sandro Roschildt Pinto, coorientador, Adão Boava, 2022.

83 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Ciência da Computação. 2. 5G. 3. Indústria 4.0. 4. URLLC. 5. TSN. I. Pinto, Alex Sandro Roschildt. II. Boava, Adão. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. IV. Título.

Christian Mailer

Desenvolvimento e análise de um modelo de simulação para arquiteturas 5G industriais

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 07 de dezembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ciro André Pitz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Frank Augusto Siqueira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em
Ciência da Computação.

Profa. Patricia Della Méa Plentz, Dra.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Alex Sandro Roschildt Pinto, Dr.
Orientador

Prof. Adão Boava, Dr.
Coorientador

Florianópolis, 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores Dr. Adão Boava e Dr. Alex Roschildt Pinto pela assistência provida durante esse mestrado cujos resultados espero serem de grande valia para acadêmicos e pesquisadores da área de comunicações móveis.

Também, estendo meus agradecimentos à minha família pelo apoio e incentivo ao meu aperfeiçoamento acadêmico.

Por fim, registro aqui meu reconhecimento a todos os pesquisadores da área de redes móveis, especialmente de 5G, pela dedicação e trabalho despendidos que foram muito importantes para solidificar a presente dissertação.

“Vivemos tempos líquidos. Nada é para durar” (Zygmunt Bauman, 2004)

RESUMO

A quinta geração de rede móvel (5G) permite atingir uma baixa latência ao mesmo tempo em que se oferece uma alta confiabilidade. Essas características atendem muito bem aplicações industriais e possibilitam a integração de um *framework* sem fio sem comprometer o determinismo requerido por redes industriais. Empregar os padrões TSN (*Time-Sensitive Networking*) na arquitetura 5G é a melhor solução, hoje, para que se mantenha a compatibilidade com as implementações industriais existentes e para tornar a rede móvel capaz de oferecer a sincronização e a baixa latência requerida. No entanto, não existem muitas pesquisas que exploram os elementos quantitativos por trás desse tipo de arquitetura, o que é essencial para se projetar e gerenciar tais redes. O presente trabalho propôs um estudo experimental do comportamento de redes 5G no qual foram exploradas a influência da numerologia, tamanho da *payload*, distância e tipo de cenário industrial em redes 5G através de simulações no *software* 5G-LENA e análises gráficas. Os resultados demonstraram que as antenas de acesso e UE (*User Equipment*) precisam estar mais elevadas no ambiente industrial para que o nível do sinal sofra menos perdas e alcance distâncias maiores e, no caso da frequência de 28 GHz, precisa ser utilizado um nível de potência superior a 25 dBm. Numerologias maiores acarretaram em menor tempo de latência, sendo o fator determinante para se atender o limite de 1 ms. Largura de banda não influenciou nos valores de latência dos pacotes de 100 *bytes*, porém impactou nos valores de *jitter* nas numerologias iguais e superiores a 1, dado que maior banda provocou um *jitter* menor. Já para pacotes maiores (acima de 250 *bytes*), maiores bandas diminuíram o tempo de latência. Bandas de 100 MHz ou maiores e numerologias iguais ou acima de 2 devem ser empregadas para manter a latência abaixo de 1 ms, sendo que numerologias iguais ou acima de 3 são mais indicadas por oferecer maior margem para atrasos, e, portanto, mais confiáveis para pacotes maiores do que 250 *bytes*.

Palavras-chave: 5G; Indústria 4.0; URLLC; TSN; Numerologia; Latência; Simulação.

ABSTRACT

The fifth generation of mobile networks (5G) allows achieving low latency while providing high reliability. These characteristics serve very well industrial applications and enable the integration of a wireless framework without compromising the determinism required by industrial networks. Employing Time-Sensitive Networking (TSN) standards in the 5G architecture is currently the best solution to maintain compatibility with existing industrial implementations and to make the mobile network capable of providing the required synchronization and low latency. However, there are not many researches that explore the quantitative elements behind this type of architecture, which is essential for designing and managing such networks. This work proposed an experimental study of the behavior of 5G networks in which the influence of numerology, payload size, distance, and type of industrial scenario on 5G networks was explored through simulations in the 5G-LENA software and graphical analyses. The results showed that the access and User Equipment (UE) antennas need to be higher in the industrial environment so that the signal level suffers less loss and reaches greater distances and, in the case of the 28 GHz frequency, a power level higher than 25 dBm must be used. Larger numerologies resulted in lower latency, being the determining factor to meet the 1 ms requirement. Bandwidth did not influence the latency values of 100 bytes packets, but did affect the jitter values in numerologies equal to or above 1, since larger bandwidth caused lower jitter. For larger packets (above 250 bytes), larger bandwidth decreased latency. Bandwidths of 100 MHz or larger and numerologies equal to or above 2 should be used to keep latency below 1 ms, with numerologies equal to or above 3 being more indicated for offering a greater margin for delays and therefore being more reliable for packets larger than 250 bytes.

Keywords: 5G; Industry 4.0; URLLC; TSN; Numerology; Latency; Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos de uma rede 5G	22
Figura 2 – Classes de uso do 5G	23
Figura 3 – Protocolos entre RAN e AMF para troca de dados de controle.....	25
Figura 4 – Protocolos entre UE, RAN e AMF para troca de dados de usuário.....	26
Figura 5 – Protocolos entre gNB e UE para troca de dados de usuário	29
Figura 6 – Protocolos entre gNB e UE para troca de dados de controle	29
Figura 7 – Máquina de estados RRC	31
Figura 8 – <i>Single beam</i> , na esquerda, e <i>multi beam</i> , na direita	31
Figura 9 – SU-MIMO, na esquerda, e UM-MIMO, na direita	32
Figura 10 – Estrutura de um frame.....	34
Figura 11 – Exemplo de <i>slicing</i> no 5G.....	36
Figura 12 – Pilha de protocolos do padrão PROFINET NRT e RT.....	37
Figura 13 – Modelo inteiramente distribuído para TSN	38
Figura 14 – Modelo rede centralizada/usuário distribuído para TSN.....	39
Figura 15 – Modelo inteiramente centralizado para TSN	40
Figura 16 – Arquitetura em que uma rede 5G atua como uma ponte (<i>Bridge</i>) TSN..	40
Figura 17 – Arquitetura simulada	54
Figura 18 – Posição do acesso e dos UEs nos ambientes industriais simulados	56
Figura 19 – Posição das amostras avaliadas nos ambientes industriais simulados..	57
Figura 20 – Arquitetura simulada	58
Figura 21 – Mapa de SNR para o cenário <i>Sparse Low</i>	60
Figura 22 – Mapa de SNR para o cenário <i>Dense Low</i>	61
Figura 23 – Mapa de SNR para o cenário <i>Sparse High</i>	62
Figura 24 – Mapa de SNR para o cenário <i>Dense High</i>	62
Figura 25 – Mapa de SNR para o cenário <i>High High</i>	63
Figura 26 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 45m	66
Figura 27 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 75m	66
Figura 28 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 105m	67
Figura 29 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 135m	68
Figura 30 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 45m	69
Figura 31 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 75m	69
Figura 32 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 105m	70

Figura 33 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 135m	71
Figura 34 – FDA para numerologia 2	73
Figura 35 – FDA para numerologia 3	74
Figura 36 – FDA para numerologia 4	74
Figura 37 – FDA para numerologia 5	75
Figura 38 – Média de latência em função do tamanho da <i>payload</i>	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características de QoS referente a 5QI padrões de baixa latência.....	23
Quadro 2 – Comparativo de algumas diferenças entre o rádio 4G e 5G.....	27
Quadro 3 – Numerologias suportadas no 5G.....	33
Quadro 4 – Tecnologias do 5G que reduzem a latência	35
Quadro 5 – Simuladores de 5G de código aberto	42
Quadro 6 – Características dos diferentes cenários fabris.....	45
Quadro 7 – Comparação dos trabalhos relacionados	51
Quadro 8 – Configurações de ambiente para cada um dos cenários testados	55
Quadro 9 – Configurações adicionais para os testes de latência e <i>jitter</i>	57
Quadro 10 – Configurações adicionais para os testes de latência e <i>jitter</i>	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Numerologias suportadas no 5G.....	34
Tabela 2 – Quantidade de resultados encontrados para cada busca	46
Tabela 3 – Latência média, em ms, para cada cenário, frequência e distância	64
Tabela 4 – <i>Jitter</i> médio, em ms, para cada cenário, frequência e distância	65
Tabela 5 – Latência média (ms) para cada frequência e numerologia μ	72
Tabela 6 – <i>Jitter</i> médio (ms) para cada frequência e numerologia μ	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5QI	5G QoS Identifier
AGV	Automated Guided Vehicle
AM	Acknowledged Mode
AMF	Access And Mobility Management Function
BS	Base Station
BWP	Bandwidth Part
CCTC	Centre Tecnològic De Telecomunicacions De Catalunya
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Centralized Network Configuration
CoMP	Coordinated Multipoint
CP	Cyclic Periods
CUC	Centralized User Configuration
DFT-s-OFDM	Direct Fourier Transform spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DH	Dense Clutter, High BS
DL	Dense Clutter, Low BS
DL/UL	Downlink/Uplink
DN	Data Network
DS-TT	Device-Side TSN Translator
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FDA	Função de Distribuição Acumulada
FR	Frequency Range
GBR	Guaranteed Bit Rate
gNB	gNodeB
GPRS	General Packet Radio Service
GTP-U	GPRS tunneling protocol for the User Plane
HH	High Tx, High Rx
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
hybrid-ARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
I/O	Input/Output
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

IETF	Internet Engineering Task Force
InF	Indoor Factory
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
IRT	Isochronous Real-Time
ISD	Inter Site Distance
L2TP	Layer Two Tunneling Protocol
LOS	Line of Sight
LSPs	Large Scale Parameters
LTE	Long Term Evolution
LDPC	Low-Density Parity-Check
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMIMO	Massive Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine-Type Communication
mmWave	Millimeter wave
MU-MIMO	Multi User Mimo
NAS	Non-Access Stratum
NeSTiNg	Network Simulator for Time-Sensitive Networking
NF	Network Function
NFV	Network Function Virtualization
NG	New Generation
NG-AP	New Generation Application Protocol
NLOS	Non Line Of Sight
NR	New Radio
ns-3	Network Simulator 3
NW-TT	Network-Side TSN Translator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++
OPC UA FX	Open Platform Communications United Architecture Field eXchange

PCF	Policy Control Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical
PROFINET	Process Field Network
PROFINET RT	Process Field Network Real Time
QI	Quality Index
QOS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
REST	Representational State Transfer
RLC	Radio-Link Control
RRC	Radio Resource Control
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCS	Subcarrier Spacing
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDAP	Service Data Adaption Protocol
SDR	Rádio Definido por Software
SERCOS III	Serial real-time communication system III
SH	Sparse Clutter, High BS
SINR	Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise ratio
SL	Sparse Clutter, Low BS
SMF	Session Management Function
SSPs	Small Scale Parameters
SU-MIMO	Single User Mimo
TB	Transport Block
TBCC	Tail-Biting Convolutional Code
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time-Division Multiple Access
TM	Transparent Mode
TR	Technical Release
TSN	Time-Sensitive Networking
TSN AF	Access Function

TTI	Transmission Time Interval
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UM	Unacknowledged Mode
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communication
V2X	Vehicle-to-everything
Wi-Fi	Wireless Fidelity

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	PROBLEMÁTICA.....	19
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.2.1	Objetivos Específicos	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	5G.....	22
2.1.1	Core	24
2.1.2	Rádio	27
2.1.2.1	<i>Beamforming</i>	31
2.1.2.2	<i>Massive MIMO</i>	32
2.1.2.3	<i>Espaçamento da subportadora e numerologia</i>	33
2.1.3	Suporte a baixas latências	35
2.1.4	Slicing	36
2.2	AUTOMAÇÃO E INDÚSTRIA 4.0.....	37
2.3	TIME SENSITIVE NETWORKING.....	38
2.4	SIMULADORES.....	41
2.4.1	5G-LENA	43
2.4.2	Modelos de Propagação	44
3	TRABALHOS RELACIONADOS	46
4	SIMULAÇÃO DE UM AMBIENTE INDUSTRIAL COM 5G	53
4.1	METODOLOGIA.....	53
4.1.1	Avaliação da SNR sob diferentes cenários industriais	55
4.1.2	Avaliação da latência e <i>jitter</i> (fim-a-fim) sob diferentes cenários industriais e distâncias	56
4.1.3	Avaliação da latência e <i>jitter</i> (fim-a-fim) sob diferentes frequências e numerologias	58
4.1.4	Avaliação da latência (fim-a-fim) sob diferentes frequências, numerologias e tamanhos de pacotes	59
4.2	RESULTADOS.....	60
4.2.1	Avaliação da SNR sob diferentes cenários industriais	60

4.2.2	Avaliação da latência e <i>jitter</i> (fim-a-fim) sob diferentes cenários industriais e distâncias.....	63
4.2.3	Avaliação da latência e <i>jitter</i> (fim-a-fim) sob diferentes frequências e numerologias.....	71
4.2.4	Avaliação da latência (fim-a-fim) sob diferentes frequências, numerologias e tamanhos de pacotes	75
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Uma das classes de uso atendidas pela quinta geração de rede móvel (5G) é a URLLC (*Ultra Reliable and Low-Latency Communication*), destinada a aplicações que exijam latência de no máximo 1 ms. Tal característica é essencial para a indústria, oferecendo um modelo confiável, robusto e móvel que permita explorar recursos abrangidos pelo conceito de Indústria 4.0 de forma mais eficiente do que as arquiteturas baseadas em cabos ou em outras tecnologias de comunicação sem fio.

Em ambientes industriais que requeiram mobilidade, é indispensável a utilização de protocolos sem fio para comunicação dos equipamentos móveis, no entanto, adotar um modelo sem fio na indústria também tem outros benefícios como: flexibilidade na conexão entre dispositivos, custos reduzidos de instalação e manutenção e menor exposição humana a situações de risco (AIJAZ, 2020). Além disso, ao empregar-se o 5G como tecnologia de comunicação industrial, há ainda mais benefícios que não são encontrados nas tecnologias até então existentes, podendo-se citar: Qualidade de Serviço (QoS) para aplicações críticas; suporte a altas taxas de transferência e a um grande número de dispositivos; segurança; suporte, intrínseco, a mobilidade; melhor precisão para tarefas que necessitem de posicionamento (AIJAZ, 2020).

Um ponto chave para o suporte às aplicações industriais é a integração do 5G com recursos de redes sensíveis ao tempo, do inglês *Time-Sensitive Networking* (TSN). TSN é um padrão, definido pela *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) 802.1 Working Group* (IEEE, 2022), que permite configurar uma comunicação com baixa latência determinística e confiável. A Release 17, da *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), já padroniza a integração de um modelo TSN na arquitetura 5G.

Tendo-se em vista que as arquiteturas de TSN na rede 5G já estão mapeadas e até mesmo um modelo está padronizado pela 3GPP, necessita-se, agora, realizar pesquisas que visem estimar atrasos, eficiência, equações e demais dados empíricos que possam ser úteis para o projeto de uma rede industrial sem fio baseada em 5G. Com isso, pode-se prever os gargalos, configurações e os melhores equipamentos ou protocolos industriais (PROFINET, EtherCAT, IRT, Sercos III, etc.) a serem empregados em um ambiente real.

1.1 PROBLEMÁTICA

O 5G está se consolidando como a principal tecnologia de comunicação sem fio disponível no mercado. Muitos países já finalizaram a implementação da estrutura para utilização dos usuários comuns, normalmente voltada para o acesso de *smartphones*. Para setores como a indústria, que possuem requisitos específicos, redes 5G privadas com suporte a TSN são as soluções que começaram a ser exploradas e testadas, como em Ericsson (2020).

Poucas são as pesquisas que realizam uma avaliação de desempenho dos modelos de redes 5G industriais no que tange a protocolos, configuração, interferência, cenário, gargalos, entre outros. No Brasil, agências reguladoras iniciaram, em novembro de 2020, testes com redes 5G privadas em indústrias (OTTA; BITENCOURT, 2020) com o intuito de se analisar aspectos importantes para o estabelecimento de regulamentações para o setor.

Desenvolver estudos sobre o tema não é apenas relevante para regulamentações, mas também para otimizar o projeto e planejamento de uma infraestrutura industrial sem fio baseada em 5G. Ao dispor de resultados analíticos, pode-se indicar quais são as melhores escolhas de protocolos ou padrões para cada caso e até mesmo possibilitar o estudo de novas arquiteturas ainda não concebidas.

Assume-se que maiores frequências, bandas e numerologias devam ser capazes de diminuir latência e *jitter* e aumentar a confiabilidade, no entanto, qual é a correlação entre elas? Também, sabe-se que frequências mais altas são mais suscetíveis a interferência e se propagam por distâncias menores, logo, são aplicáveis na indústria? Se sim, qual é a influência do ambiente (altura, distância, tipo de obstáculos, etc.) na propagação e, conseqüentemente, na latência, *jitter* e confiabilidade?

Dadas essas perguntas, é necessário esclarecer quais são as configurações necessárias na arquitetura 5G para que a comunicação possa ser realizada com baixa latência e alta confiabilidade, atendendo-se, assim, aos requisitos de uma rede TSN. A influência de configurações como numerologia, frequência, largura de banda, potência de transmissão, distância entre dispositivos, altura das antenas e tamanho dos pacotes transmitidos e sua correlação com latência, *jitter* e confiabilidade devem ser compreendidas.

Outro ponto relevante é a verificação da possibilidade de se utilizar simuladores de redes 5G para a realização de testes envolvendo diversos parâmetros, uma vez que conduzir experimentos em ambientes industriais reais é uma tarefa complexa, arriscada e de alto custo financeiro.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é demonstrar a influência, de forma quantitativa, de parâmetros como frequência, largura de banda, numerologia, tamanho dos pacotes e cenário (altura, distância, obstáculos, etc.) em características como latência, *jitter* e confiabilidade da transmissão de rádio 5G.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são listados a seguir:

- integrar cenários de propagação industriais no simulador de rede 5G;
- definir e configurar um modelo de simulação de uma arquitetura 5G industrial no simulador de rede 5G;
- realizar simulações para medição do nível do sinal sob diferentes cenários industriais, potências de transmissão e frequências;
- simular e medir latência, *jitter* e confiabilidade sob diferentes cenários industriais, frequências e distâncias;
- conduzir simulações para medição de latência, *jitter* e confiabilidade sob diferentes frequências, larguras de bandas e numerologias;
- medir latência sob diferentes frequências, larguras de banda, numerologias e tamanhos de pacotes através de simulações;
- obter gráficos e tabelas dos dados quantitativos das simulações;
- analisar a influência de cada um dos parâmetros na latência, *jitter* e confiabilidade da rede 5G;
- mapear possíveis gargalos ou pontos que possam ser explorados futuramente.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido da seguinte forma: no Capítulo 1 foi realizado uma breve descrição do contexto do trabalho, bem como levantamento de problemas existentes. No Capítulo 2, Fundamentação Teórica, é realizada uma pesquisa em referências bibliográficas de modo a criar um arcabouço teórico que serviu de base para os estudos realizados. Já no Capítulo 3, Trabalhos Relacionados, elenca-se alguns trabalhos acadêmicos existentes, cujo tema se articulou com o presente estudo. A descrição da proposta de simulação de um ambiente 5G industrial é realizada no Capítulo 4, sendo que a Seção 4.1 aborda a metodologia adotada e na Seção 4.2 é apresentada uma discussão sobre os resultados obtidos. Finalmente, conclusões são tecidas no Capítulo 5, propostas de melhoria a serem desenvolvidas no *software* simulador são elencadas e, ainda, são mapeados futuros experimentos.

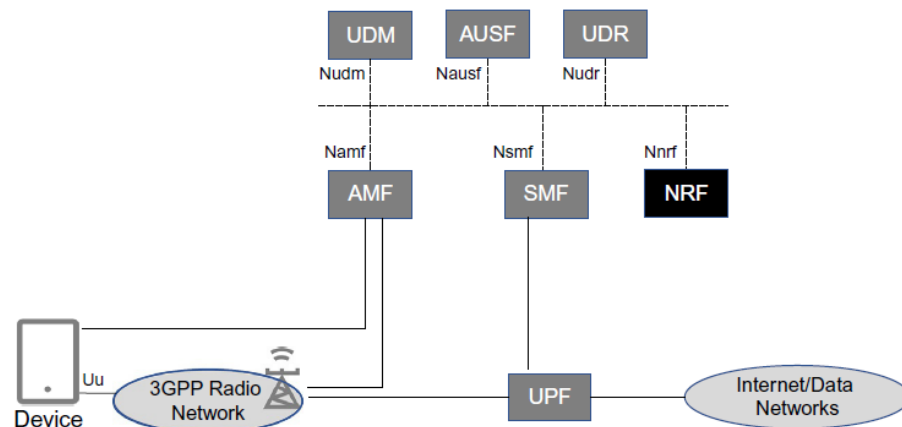
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma fundamentação teórica acerca dos termos envolvidos neste trabalho foi conduzida e as seções seguintes abordam cada tópico estudado.

2.1 5G

A quinta geração de rede móvel (5G) é composta pelo acesso e pelo Core, conforme ilustrado na Figura 1. Sua concepção leva em conta tecnologias como micro serviços, *containers*, virtualização de funções de rede (NFV), rádio definido por *software* (SDR), automação e *Cloud Nativity* (3GPP, 2022d).

Figura 1 – Elementos de uma rede 5G

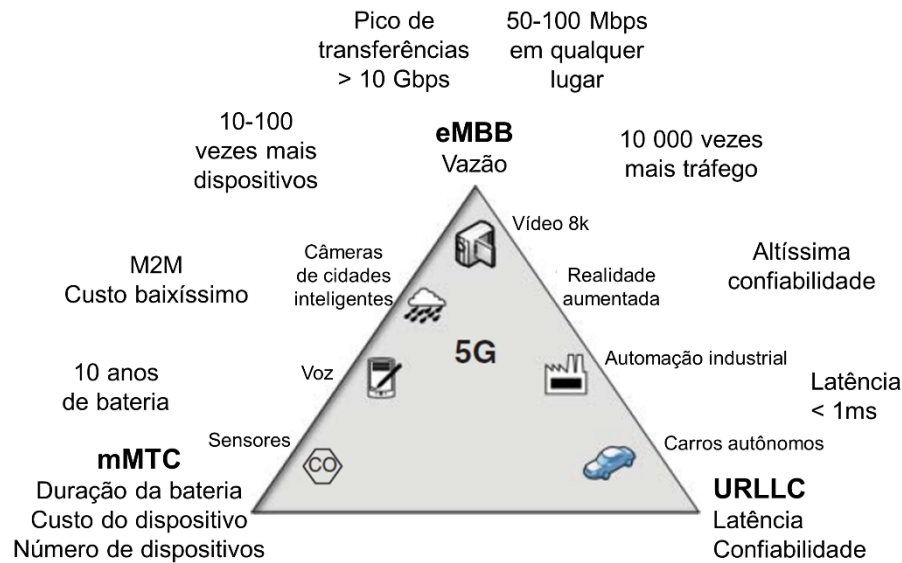


Fonte: Rommer *et al.* (2019)

De forma geral, são três as classes de uso atendidas pelo 5G: *enhanced mobile broadband* (eMBB), *massive machine-type communication* (mMTC) e *ultra-reliable and low-latency communication* (URLLC). A primeira engloba a capacidade de se atingir altas taxas de transferência, a segunda representa o suporte a um número muito grande de dispositivos comunicando entre si na rede e, finalmente, a terceira aborda os casos em que a comunicação deve ser em tempo real, com latência de, no máximo, 1 ms (3GPP, 2022d). A Figura 2 possui uma ilustração dessas três classes de uso e alguns exemplos de aplicações e requisitos.

Na Figura 2, o canto da esquerda representa mMTC, o de cima representa eMBB e o da direita representa URLLC.

Figura 2 – Classes de uso do 5G



Fonte: Chandramouli, Liebhart e Pirskanen (2019). Traduzido e adaptado pelo autor

A 3GPP define índices de qualidade de serviço (5QI) padrões e os limites que devem ser cumpridos pelo sistema a fim de atender um segmento de aplicação específico. O Quadro 1 contém alguns desses índices que são mais relevantes para aplicações de menor latência. Ressalta-se que, caso a aplicação requeira características diferentes, é possível utilizar índices customizáveis, desde que não coincidam com os já definidos.

Quadro 1 – Características de QoS referente a 5QI padrões de baixa latência

Valor 5QI	Tipo de Recurso	Nível de Prioridade Padrão	Packet Delay Budget	Taxa de Erro nos Pacotes	Volume Máximo Padrão de Burst de Dados	Janela média padrão	Exemplo de serviço
80	Non-GBR (<i>Guaranteed Bit Rate</i>)	68	10ms	10^{-6}	N/A	N/A	Aplicações eMBB de baixa latência; realidade aumentada
82	<i>Delay Critical GBR</i>	19	10ms	10^{-4}	255 bytes	2000ms	Automação Discreta
83		22	10ms	10^{-4}	1354 bytes	2000ms	Automação Discreta; mensagens <i>Vehicle-to-Everything</i> (V2X)

84		24	30ms	10^{-5}	1354 bytes	2000ms	Sistemas de transporte inteligentes
85		21	5ms	10^{-5}	255 bytes	2000ms	Distribuição de energia – alta voltagem; mensagens V2X
86		18	5ms	10^{-4}	1354 bytes	2000ms	Mensagens V2X
87		25	5ms	10^{-3}	500 bytes	2000ms	Serviço interativo – dados de rastreamento de movimento
88		25	10ms	10^{-3}	1125 bytes	2000ms	Serviço interativo – dados de rastreamento de movimento
89		25	15ms	10^{-4}	17000 bytes	2000ms	Conteúdo visual para renderização em nuvem/borda
90		25	20ms	10^{-4}	63000 bytes	2000ms	Conteúdo visual para renderização em nuvem/borda

Fonte: 3GPP (2022d). Traduzido pelo autor

2.1.1 Core

O Core do 5G é composto por várias funções de rede (NFs) responsáveis, cada uma, por um papel específico na administração da rede como controle da mobilidade, autenticação, sessão, políticas, QoS, roteamento e outras. Algumas NFs de maior importância são: AMF (*Access and Mobility Management Function*), UPF (*User Plane Function*), PCF (*Policy Control Function*) e SMF (*Session Management Function*) (3GPP, 2022d).

O modelo de NFs para o Core do 5G é baseado em micro serviços e possibilita que as funções de redes sejam facilmente gerenciadas por meio de um orquestrador, conferindo, assim, escalabilidade e flexibilidade à rede. Uma vantagem da arquitetura de micro serviços é a possibilidade de distribuição das funções de redes em ambientes físicos diferentes e separados, tornando viável o

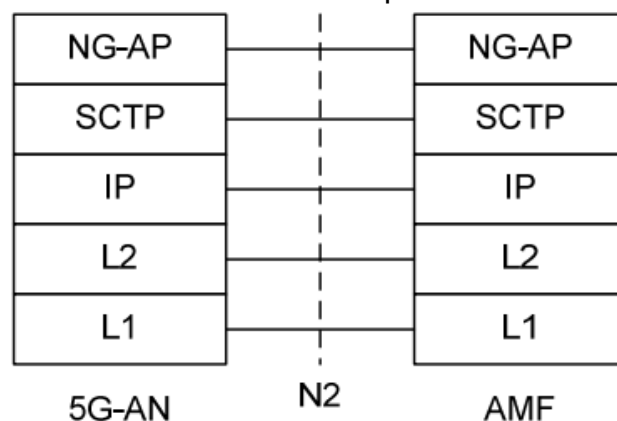
instanciamento de funções de rede na borda (*edge*) para redução do tempo de latência e da carga na infraestrutura central. Por exemplo, a AMF e UPF poderiam ser instanciadas junto ao acesso (RAN) enquanto que as demais funções de rede do Core ficariam em uma nuvem central afastada do acesso.

A conectividade entre as NFs do Core, o acesso e a *Data Network* (DN) é realizada por meio de *links* físicos dedicados para que a segurança e confiabilidade da comunicação sejam garantidas.

O protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) e o modelo REST (*Representational state transfer*) são utilizados pelas NFs do Core para interação entre si. No entanto, para comunicação entre as NFs do Core, acesso e dispositivos de usuário (UE), outros protocolos são utilizados para os dados de controle e de usuário.

A pilha de protocolos utilizada para troca de dados de controle entre o acesso e o AMF está ilustrada na Figura 3. O protocolo de transporte é o *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP) que é otimizado para aplicações de telecomunicações no que tange a segurança e garantia de entrega de mensagens (ROMMER *et al.*, 2019). O SCTP é padronizado pela *Internet Engineering Task Force* (IETF). Acima do SCTP está o protocolo *New Generation Application Protocol* (NG-AP) que é o protocolo de controle.

Figura 3 – Protocolos entre RAN e AMF para troca de dados de controle

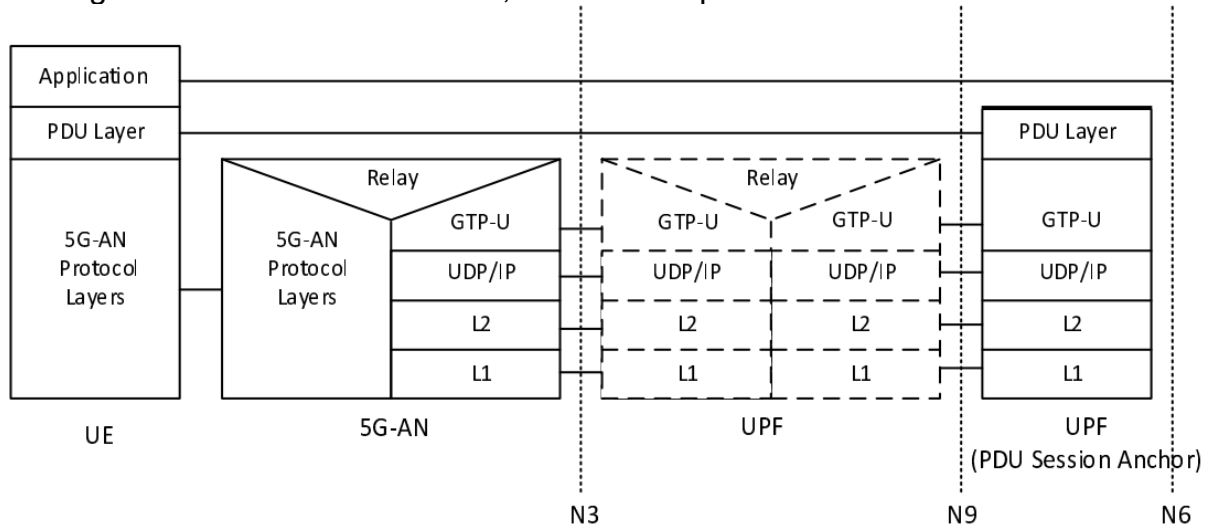


Fonte: 3GPP (2022d)

Para a troca de dados de usuário (*user plane*), a pilha ilustrada na Figura 4 é utilizada. Quando a informação enviada pelo dispositivo de usuário chega ao acesso pela interface de rádio, os pacotes recebidos são encapsulados através de um túnel

GTP-U (*General Packet Radio Service Tunneling Protocol for the User Plane*) e enviados para o UPF sobre a pilha UDP (*User Datagram Protocol*)/IP (*Internet Protocol*).

Figura 4 – Protocolos entre UE, RAN e AMF para troca de dados de usuário



Fonte: 3GPP (2022d)

Ressalta-se que a sessão PDU (*Protocol Data Unit*) da conexão estabelecida entre o UE e o Core pode ser de três tipos: IPv4/IPv6, Ethernet e *unstructured* (3GPP, 2022d). Isso significa que os dados de usuário podem ser enviados para a DN através de uma pilha IPv4/IPv6, através do protocolo Ethernet ou através de um protocolo diferente que pode ser desenvolvido especificamente para uma determinada aplicação.

Para o caso de uso industrial, a sessão PDU Ethernet seria a mais eficiente uma vez que a maioria dos protocolos industriais suporta Ethernet e não haveria protocolos desnecessários nas camadas superiores como UDP/IP. No entanto, é difícil de encontrar implementações de Core e acesso que suportem esse tipo de sessão PDU, já que sua utilização é menos comum do que a da sessão PDU IPv4/IPv6. Em vista disso, têm-se proposto a utilização de um túnel de nível dois (L2TP) para encapsulamento de *frames* Ethernet sobre UDP/IP, sendo possível assim a utilização da sessão PDU IPv4/IPv6 para transmissão de dados de uma rede industrial por meio de 5G.

2.1.2 Rádio

O rádio do 5G, também conhecido como *New Radio* (NR), evoluiu de forma a atingir menor latência, maior velocidade e maior confiabilidade. Algumas das inovações suportadas pelo rádio 5G são: altas frequências centrais, bandas de frequência mais largas, *beamforming*, *massive Multiple Input Multiple Output* (mMIMO) e frequências mais elevadas para o espaçamento da sub-portadora. Além disso, o sistema NR segue um design *ultra-lean* que visa reduzir interferência e aumentar a eficiência energética (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020).

O design *ultra-lean* consiste em um modelo que reduz a necessidade de transmissões constantes de sinais de *broadcast*, de detecção de estações rádio base, de rastreamento, de medições de mobilidade e de estimação de canal (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020). Esses sinais são chamados de sinais *always-on* e causam problemas de interferência e de desempenho energético em redes muito densas, já que sua transmissão é constante e independente do tráfego de dados, ou seja, em cenários com muitos dispositivos de Internet das Coisas, por exemplo, os sinais *always-on* correspondem a uma carga significativa comparada a transferência de dados de usuário (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020).

O Quadro 2 possui um comparativo entre as características do rádio 5G e do rádio 4G.

Quadro 2 – Comparativo de algumas diferenças entre o rádio 4G e 5G

Característica	4G LTE	5G NR
Codificação do canal de dados	Turbo	LDPC (<i>Low-density Parity-check</i>)
Codificação do canal de controle	TBCC (<i>Tail-Biting Convolutional Code</i>)	Polar
Esquema de modulação para o <i>uplink</i>	SC-FDMA (<i>Single-carrier frequency-division multiplexing</i>)	DFT-S-OFDM (<i>discrete Fourier transform spread orthogonal frequency division multiplexing</i>); OFDM (opcional)
Esquema de modulação para o <i>downlink</i>	OFDM	OFDM

Largura de banda (MHz)	1,4; 3; 5; 10; 15; 20	5, ..., 100 (sub 6 GHz); 50, ...,400 (above 6 GHz)
Espaçamento da subportadora (kHz)	15 (<i>unicast, Multimedia Broadcast Multicast Service [MBMS]</i>); 7,5/1,25 (portadora MBMS dedicada)	30, 60, 120; 240 (não para dados); 480, 960
Máxima agregação de portadora (CC)	32	16
Máximo de portas de antena MIMO	8 (SU-MIMO); 2 (SU-MIMO)	8 (SU-MIMO); 16 (SU-MIMO)
HARQ transmissão/retransmissão	TB (<i>Transport Block</i>)	TB, <i>Code block group</i>

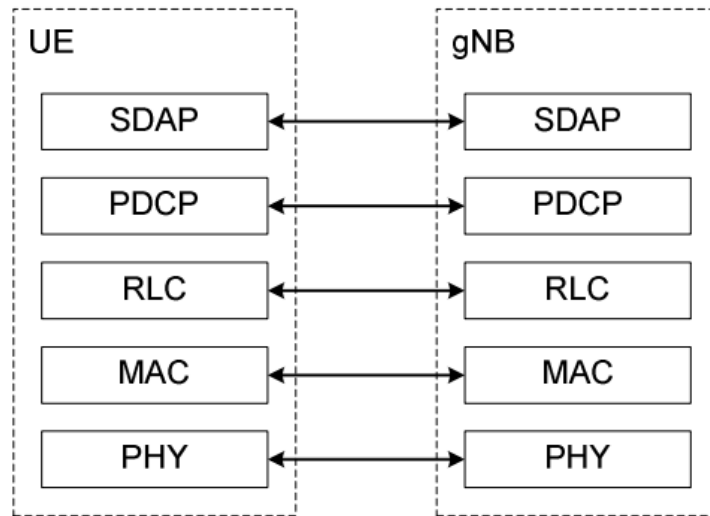
Fonte: Penttinen (2019). Traduzido e adaptado pelo autor

Dois faixas de frequência são suportadas pelo NR: *Frequency Range 1* (FR1) e *Frequency Range 2* (FR2). As frequências da primeira também são conhecidas como *sub 6 GHz bands* e correspondem a faixa de 450 MHz até 6 GHz. Já as frequências da segunda são conhecidas como *above 6 GHz bands* ou *mmWave* (comprimento de onda milimétrico) e variam da faixa de 24,250 GHz até 52,600 GHz (ROMMER *et al.*, 2019; CHANDRAMOULI; LIEBHART; PIRSKANEN, 2019).

O suporte a frequências mais altas (FR2) é uma das novidades do 5G e permite a transferência de grandes quantidades de dados com menor latência, uma vez que larguras de bandas de até 400 MHz podem ser utilizadas. Apesar disso, há uma desvantagem na utilização de altas frequências que é o menor alcance da onda eletromagnética e a maior suscetibilidade a perdas causadas por barreiras como paredes, portas, janelas e até de pessoas na trajetória da transmissão. Esse problema pode ser atenuado através da utilização de técnicas de *beamforming* e *mMIMO* (ROMMER *et al.*, 2019).

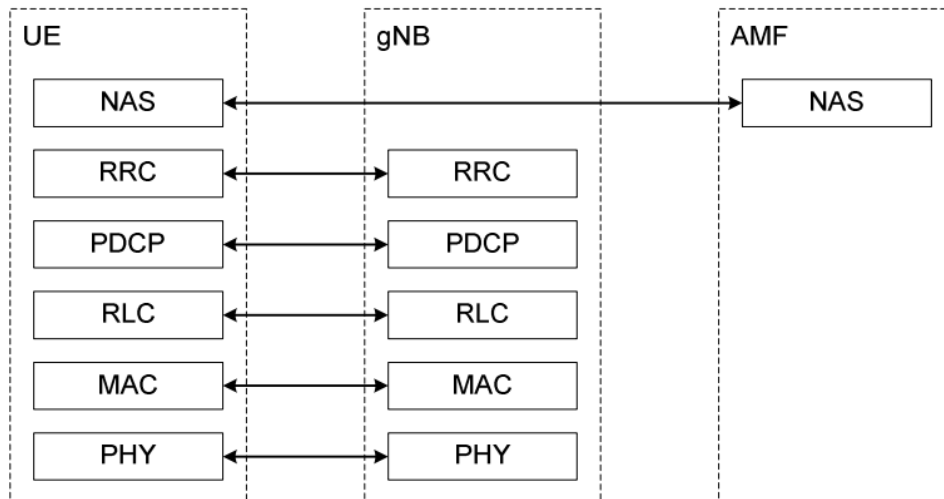
O acesso, *Radio Access Network* (RAN), do 5G é denominado de gNB e sua comunicação com o UE se dá através da pilha de protocolos ilustrada na Figura 5 e Figura 6 para dados de usuário e controle, respectivamente.

Figura 5 – Protocolos entre gNB e UE para troca de dados de usuário



Fonte: 3GPP (2022b)

Figura 6 – Protocolos entre gNB e UE para troca de dados de controle



Fonte: 3GPP (2022b)

Tanto para transferência de dados de controle quanto para transferência de dados de usuário há a utilização das camadas e protocolos PHY (física), MAC (*Medium Access Control*), RLC (*Radio-link control*) e PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*).

A camada PHY corresponde a parte da geração das ondas de rádio, realizando modulação/demodulação, mapeamento de múltiplas antenas, dentre outras tarefas (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020). Sua funcionalidade básica é prover o transporte de *bits* entre os dispositivos de usuário e os acessos (ROMMER

et al., 2019). Tal serviço de transporte é utilizado pela camada MAC (ROMMER *et al.*, 2019).

A camada MAC é responsável pelo mapeamento de canais lógicos em canais físicos, multiplexação desses canais lógicos, retransmissões *hybrid-ARQ* (*hybrid automatic repeat request*), escalonamento e tarefas relacionadas ao escalonamento (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020). No 5G, a estrutura do *header* do MAC foi modificada a fim de otimizar o processamento para transferências de baixa latência (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020).

A camada RLC gerencia a segmentação e retransmissão, oferecendo serviços ao PDCP na forma de canais RLC (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020). As transferências de sinais de controle e dados de usuário podem assumir as seguintes formas:

- a) Modo transparente, *Transparent Mode* (TM), que não possui resposta sobre o recebimento dos pacotes e apresenta apenas armazenamento de pacotes em um *buffer* de envio (ROMMER *et al.*, 2019).
- b) Modo sem confirmação, *Unacknowledged Mode* (UM), que é semelhante ao TM, porém permite segmentar os pacotes antes da transmissão e juntá-los novamente no lado do receptor (ROMMER *et al.*, 2019);
- c) Modo com confirmação, *Acknowledged Mode* (AM), apresenta o suporte à confirmação do correto, ou incorreto, recebimento do pacote, desencadeando a retransmissão quando necessário (ROMMER *et al.*, 2019);

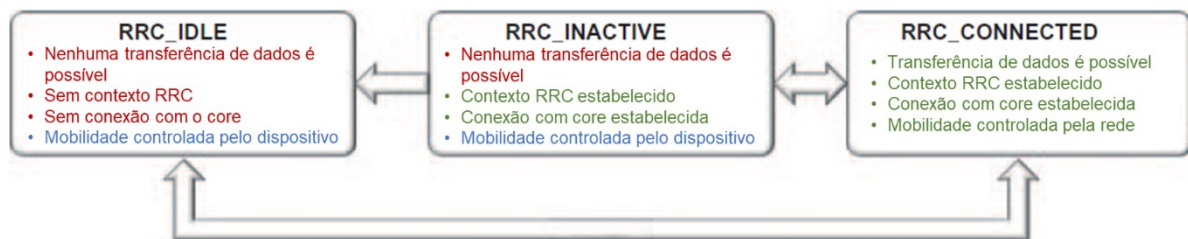
PDCP é a camada que realiza a compressão dos *headers* dos dados de usuário, a encriptação e a integridade dos dados de usuário e controle, o gerenciamento da reordenação dos pacotes que são recebidos fora de ordem e a remoção de pacotes duplicados no caso de *handover* (ROMMER *et al.*, 2019; DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020).

No plano de dados, o protocolo SDAP (*Service Data Adaption Protocol*) é utilizado para mapear os pacotes de *downlink* marcados com diferentes requisitos de QoS para a respectiva portadora de rádio (*radio bearer*). No *uplink*, o SDAP garante a marcação correta da QoS dos pacotes recebidos dos UEs antes de transmiti-los para o Core da rede (ROMMER *et al.*, 2019).

No plano de controle, a camada RRC (*Radio Resource Control*), suporta funcionalidades como *broadcasting* de informações de sistema, entrega de chaves

de encriptação, sinalização de mobilidade, gerenciamento de portadoras de rádio e *paging* de dispositivos em modo *idle* (ROMMER *et al.*, 2019). Também, a camada RRC transporta as mensagens de sinal NAS (*Non-access stratum*) entre os UEs e o Core da rede, que são utilizadas em procedimentos de autenticação, segurança, *paging* e outros, além de ser responsável por atribuir os IPs aos dispositivos. A Figura 7 ilustra os estados RRC que um dispositivo pode assumir.

Figura 7 – Máquina de estados RRC



Fonte: Dahlman, Parkvall e Skold (2020). Traduzido pelo autor

2.1.2.1 *Beamforming*

Ao invés de propagar o sinal em todas as direções, é possível direcionar os feixes de transmissão para os receptores de modo a aumentar o sinal, reduzir a interferência e melhorar a vazão (ROMMER *et al.*, 2019). Esse direcionamento de transmissão é chamado de *beamforming* e pode ser classificado de duas formas: *single beam*, quando a transferência é realizada em um único feixe direcionado, ou *multi beam*, quando múltiplos feixes são emitidos em várias direções (ROMMER *et al.*, 2019). A Figura 8 contém uma ilustração do *single beam* e *multi beam*.

Figura 8 – *Single beam*, na esquerda, e *multi beam*, na direita



Fonte: Rommer *et al.* (2019)

Uma das características que é melhorada com a utilização de *beamforming* é a razão sinal-interferência-mais-ruído, do inglês *signal-to-interference-plus-noise ratio* (SINR), que impacta em uma maior taxa de transmissão (ROMMER *et al.*, 2019).

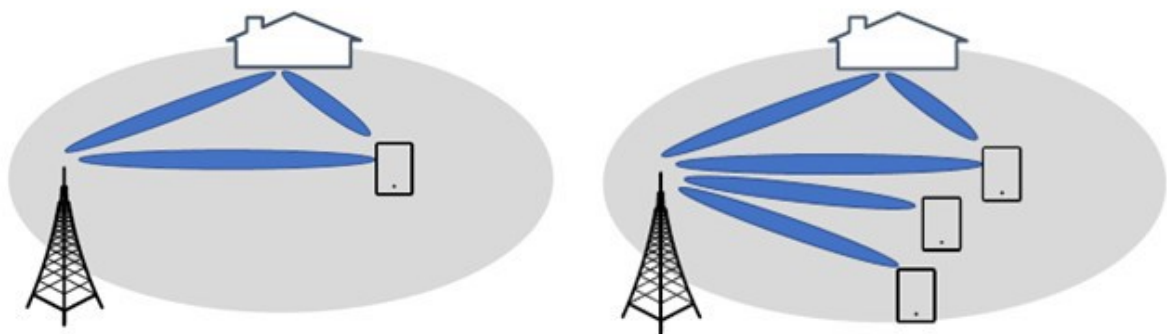
2.1.2.2 Massive MIMO

Multiple Input Multiple Output (MIMO) é um método que explora a utilização de múltiplas antenas para emissão ou recepção de um sinal em diferentes caminhos e canais. Quando a transmissão de uma informação é realizada em múltiplos caminhos, a chance de que o receptor receba os pacotes é maior, logo, perdas são reduzidas (ROMMER *et al.*, 2019; CHANDRAMOULI; LIEBHART; PIRSKANEN, 2019). Também, diferentes informações podem ser transmitidas em diferentes caminhos para que o receptor possa juntar esses pacotes e ter uma taxa de transferência mais elevada.

No 5G, um grande número de antenas pode ser utilizado simultaneamente, o que confere o nome de *massive MIMO* a essa técnica (ROMMER *et al.*, 2019).

MIMO pode ser classificado em dois tipos: *Single User MIMO* (SU-MIMO) e *Multi User MIMO* (MU-MIMO). O primeiro é caracterizado pela transmissão de várias cópias de uma informação em diferentes caminhos e mesma frequência para um único dispositivo, enquanto que o segundo é caracterizado pela transmissão, em mesma frequência, de informações para múltiplos dispositivos simultaneamente (ROMMER *et al.*, 2019; CHANDRAMOULI; LIEBHART; PIRSKANEN, 2019). Um comparativo entre ambos os tipos está ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – SU-MIMO, na esquerda, e UM-MIMO, na direita



Fonte: Rommer *et al.* (2019)

2.1.2.3 Espaçamento da subportadora e numerologia

Conforme a 3GPP (2022b), transmissões de *downlink* e *uplink* possuem *frames* de rádio de duração de 10 ms que, por sua vez, são compostos por *subframes* de 1 ms de duração. Esses *subframes* são constituídos de *slots* que possuem 14 símbolos de duração em Períodos Cíclicos, *Cyclic Periods* (CP), normais e 12 símbolos em CPs estendidos (3GPP, 2022b). O tempo de cada *slot* é inversamente proporcional ao espaçamento Δf entre as frequências das subportadoras, *subcarrier spacing* (SCS), ou seja, quanto maior o valor de Δf , menor é o tempo de duração de cada *slot*, uma vez que os *slots* possuem um número fixo de símbolos (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020).

No 4G, Δf é definido, estaticamente, em 15 kHz. Já no 5G, para que seja possível suportar uma ampla gama de casos de uso, novos valores de Δf foram integrados ao padrão através de um parâmetro chamado de numerologia.

Para obter-se Δf a partir da numerologia, o seguinte cálculo é realizado: $\Delta f = 2^\mu \cdot 15[\text{kHz}]$ sendo μ a numerologia desejada (3GPP, 2022b). A cada incremento na numerologia, o tempo de comprimento do *slot* é reduzido pela metade, seguindo-se a fórmula $t_{slot} = \left(\frac{1}{2}\right)^\mu [ms]$. Analogamente, quanto maior a numerologia, maior é o número de *slots* em um *subframe* de rádio. Na Release 17 da 3GPP, estão padronizados os valores de numerologias 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 6, conforme pode-se visualizar no Quadro 3.

Quadro 3 – Numerologias suportadas no 5G

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15[\text{kHz}]$	CP	Suporte para dados	Suporte para sincronização
0	15	Normal	Sim	Sim
1	30	Normal	Sim	Sim
2	60	Normal, Estendido	Sim	Não
3	120	Normal	Sim	Sim
4	240	Normal	Não	Sim
5	480	Normal	Sim	Sim
6	960	Normal	Sim	Sim

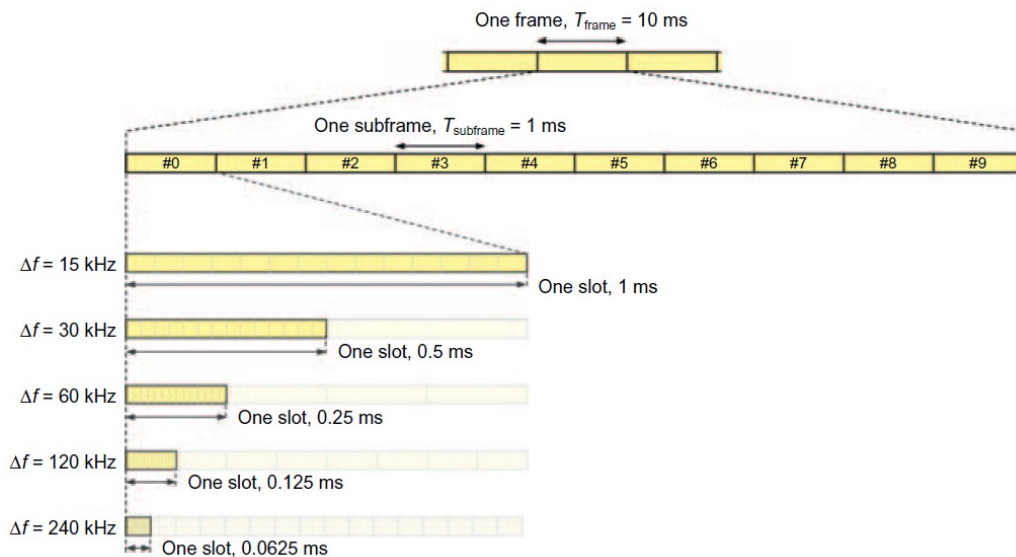
Fonte: 3GPP (2022b). Traduzido pelo autor

Slots menores diminuem o tempo de latência, porém não são aplicáveis em todos os tipos de cenários, uma vez que frequências e bandas diferentes

apresentam diferentes dinâmicas de propagação, ruído e efeito *Doppler* (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020). Por exemplo, frequências FR1 são usadas em células de grande cobertura e necessitam de uma frequência de espaçamento de subportadora menor para acomodar um atraso de propagação (*spread delay*) maior, enquanto que frequências centrais mais elevadas (FR2) são usadas em células de cobertura mais curta, pois possuem maior dificuldade de propagação e estão sujeitas a maior ruído de fase, portanto uma numerologia mais alta é adequada (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020).

Na Figura 10 visualiza-se o impacto do espaçamento da subportadora na quantidade de *slots* de um *subframe* de rádio do 5G. Já a Tabela 1 contém a lista de numerologias aplicáveis para cada faixa de frequência e bandas.

Figura 10 – Estrutura de um frame



Fonte: Dahlman, Parkvall e Skold (2020)

Tabela 1 – Numerologias suportadas no 5G

Faixa de Frequência	SCS (kHz)	Faixa de bandas suportadas pelo SCS (MHz)
FR1	15	5-50
	30	5-100
	60	10-100
FR2	60	50-200
	120	50-400
	240	100-400
	480	400-1600
	960	400-2000

Fonte: Dahlman, Parkvall e Skold (2020) e 3GPP (2022a)

2.1.3 Suporte a baixas latências

Além de valores mais elevados de Δf , outras características do 5G contribuem para diminuição do tempo de latência. O Quadro 4 contém um resumo dessas tecnologias.

Quadro 4 – Tecnologias do 5G que reduzem a latência

Tecnologia	Resumo
Tamanho máximo da rajada de dados (<i>data burst</i>)	A quantidade de dados máxima que o acesso 5G deve transmitir dentro de um período do <i>Packet Delay Budget</i> do acesso 5G.
Estrutura de <i>frame</i> com <i>slots</i> bi-direcionais	Ao introduzir um ou vários pontos de comutação dentro de um <i>slot</i> , é possível a multiplexação por divisão de tempo de símbolos de controle DL/UL e símbolos de dados em um <i>slot</i> , permitindo um processamento do conjunto de etapas de controle e dados rápido e energeticamente eficiente no receptor.
Política de escalonamento	Escalonamento não baseado em <i>slot</i> : a unidade mínima de escalonamento não está no nível do <i>slot</i> , mas no nível de símbolo (nível de mini <i>slot</i>). Preempção de Escalonamento: escalonamento priorizado de pacotes de dados com restrições de baixa latência para minimizar atrasos de fila no acesso (gNB). Preempção de tráfego eMBB para transmissões de pacotes de dados URLLC.
Transmissão de UL sem requisição de recursos (<i>grant-free</i>)	O esquema de transmissão UL sem requisição de recursos (<i>grant-free UL transmission</i>) evita atrasos regulares de <i>handshake</i> entre UE e acesso (gNB), incluindo, pelo menos, a solicitação de escalonamento e de alocação de recursos do UL e, além disso, relaxa os requisitos rigorosos na concessão de recursos confiáveis.
Tempo de processamento no UE e acesso (gNB)	Tempo reduzido de processamento no UE e acesso (gNB) para garantir a criação rápida de blocos de transporte para transmissão, bem como processamento rápido no receptor para transmissão de <i>feedback</i> .

Fonte: Chandramouli, Liebhart e Pirskanen (2019). Traduzido pelo autor

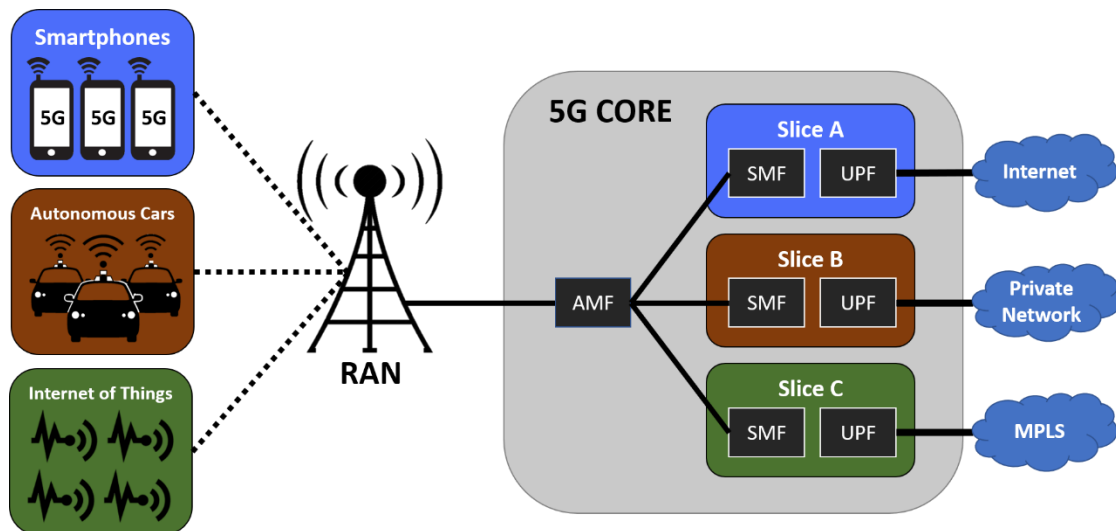
2.1.4 Slicing

Slicing de rede, ou fatiamento de rede, é uma tecnologia incorporada pelo padrão 5G que consiste em dividir uma rede física em *slices* (fatias) lógicas separadas, provendo isolamento e maior controle de QoS para cada uma delas.

Aplicações que exigem baixa latência (URLLC), por exemplo, poderiam ocupar *slices* diferentes de aplicações que exigem maior banda (eMBB), desse modo as operadoras podem gerenciar os requisitos e QoS para cada classe de uso de forma específica. Além disso, por estarem separadas logicamente, caso uma *slice* tenha sua segurança comprometida, isso não irá afetar as outras, trazendo maior segurança para as aplicações.

Na Figura 11 está exposto um exemplo de utilização de *slicing* em um cenário com dispositivos de cada uma das três classes de uso do 5G (URLLC, eMBB e mMTC). No exemplo, a *slice B* deverá ser ajustada para menor latência e maior confiabilidade, tendo prioridade sobre os recursos das outras *slices*.

Figura 11 – Exemplo de *slicing* no 5G



Fonte: Mailer (2020)

2.2 AUTOMAÇÃO E INDÚSTRIA 4.0

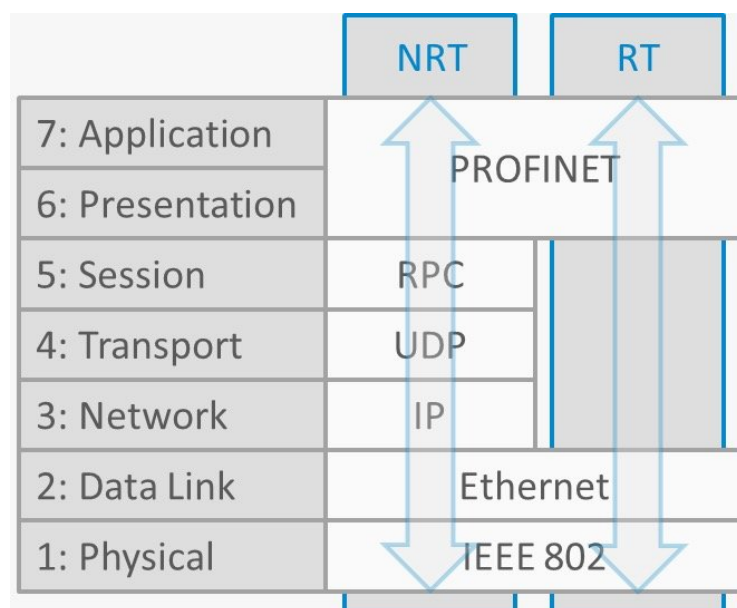
A classe de uso coberta pelo 5G de maior importância para Indústria 4.0 é a URLLC, que torna possível a integração de sensores, atuadores e CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) sem o emprego de redes totalmente cabeadas.

Indústrias que necessitam de comunicação em tempo real utilizam redes baseadas em protocolos específicos como PROFINET RT, que possuem uma pilha de protocolos enxuta comparados aos protocolos industriais tradicionais.

A interconexão física entre os componentes de uma rede industrial é normalmente realizada por meio de cabeamento Ethernet. Também, existem soluções sem fio como o *WirelessHart*, *Zigbee* e *Bluetooth*, no entanto não são uma opção universal e sofrem com problemas que não são vistos no 5G, podendo-se citar: confiabilidade, latência, segurança, robustez, entre outros.

A maioria dos padrões de redes industriais apresenta suporte ao envio de informações pelo protocolo Ethernet (camada 2), como o PROFINET e o OPC UA FX (*Open Platform Communications United Architecture Field eXchange*). Na Figura 12 está exposta a pilha de protocolos PROFINET NRT e RT, sendo que a versão RT é específica para redes de baixíssima latência.

Figura 12 – Pilha de protocolos do padrão PROFINET NRT e RT



Fonte: Urbina *et al.* (2016)

2.3 TIME SENSITIVE NETWORKING

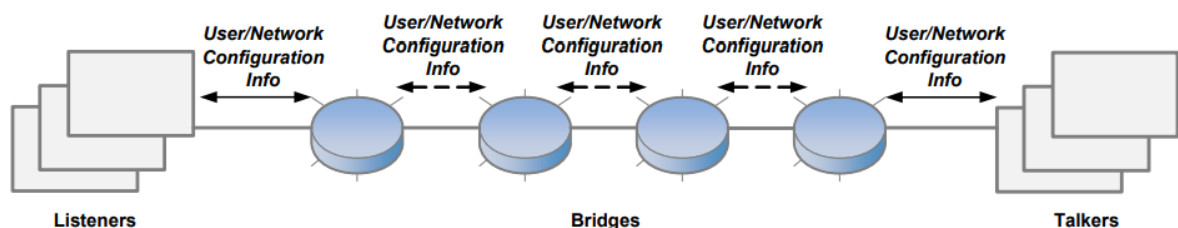
Time-Sensitive Networking (TSN) é uma coleção de padrões, parte do *IEEE 802.1 Working Group* (IEEE, 2022), que estendem as funcionalidades da camada de enlace das redes Ethernet tradicionais para prover uma comunicação em tempo real, sendo muito útil para o setor de Controle e Automação.

Baixa latência e determinismo são pontos chaves dessa comunicação, logo, os padrões incluem sistemas de escalonamento e preempção a fim de tornar a rede sincronizada.

O padrão IEEE 802.1Qcc (IEEE, 2018), pertencente a coleção TSN, propõe três arquiteturas de gerenciamento desse tipo de rede: *Fully distributed model*, *Centralized network/distributed user model* e *Fully centralized model*.

No modelo inteiramente distribuído (*Fully distributed model*), não há uma entidade de configuração de rede central e os usuários, chamados de *Talkers* e *Listeners*, comunicam os requisitos de usuário diretamente através do protocolo TSN (IEEE, 2018). O gerenciamento dos recursos das *Bridges* é realizado de forma local, uma vez que os requisitos de usuário são propagados de *Bridge* em *Bridge*, o que acarreta em um gerenciamento limitado pelas informações que a *Bridge* tem sem incluir, necessariamente, o conhecimento de toda a rede (IEEE, 2018). A Figura 13 possui uma ilustração desse modelo.

Figura 13 – Modelo inteiramente distribuído para TSN

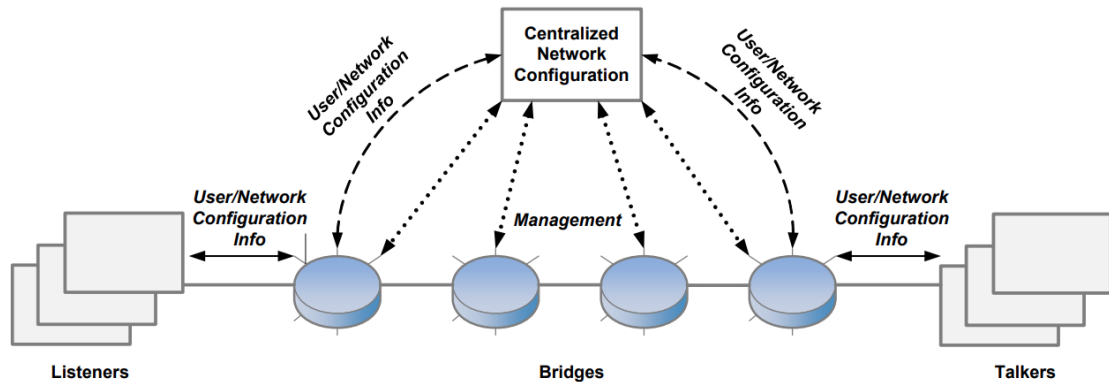


Fonte: IEEE (2018)

Já o modelo rede centralizada/usuário distribuído (*Centralized network/distributed user model*) prevê a centralização do gerenciamento da configuração da rede em um elemento chamado de *Centralized Network Configuration* (CNC) que, por sua vez, realiza a configuração de cada *Bridge* através de um protocolo de gerenciamento remoto de rede (IEEE, 2018). A vantagem desse

modelo é que o CNC possui uma visão da arquitetura da rede como um todo, centralizando o gasto computacional e a decisão de rotas (IEEE, 2018). Esse modelo pode ser visualizado na Figura 14.

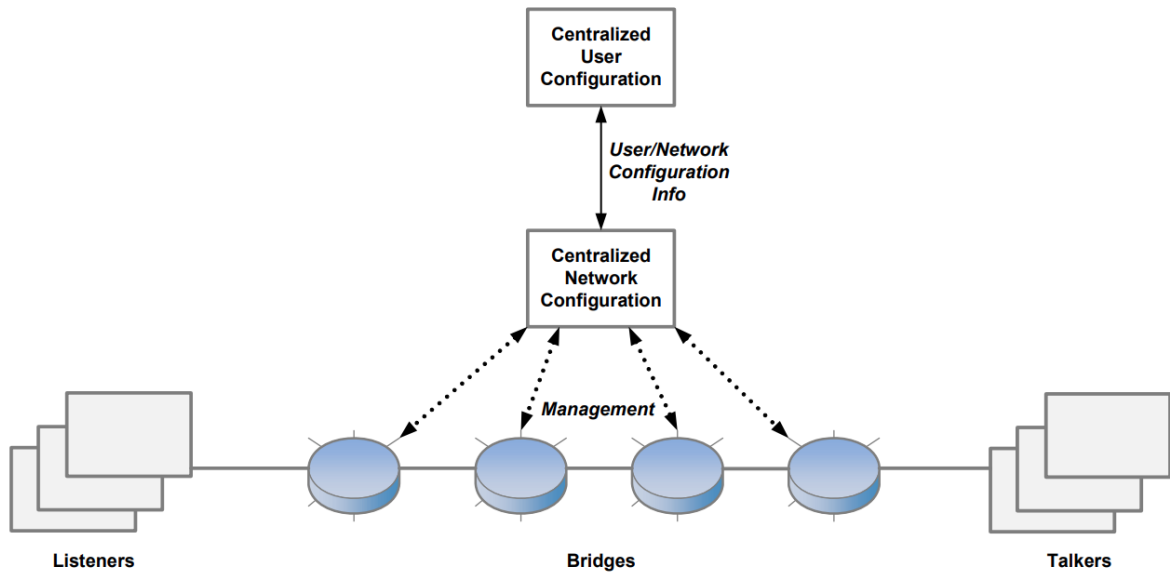
Figura 14 – Modelo rede centralizada/usuário distribuído para TSN



Fonte: IEEE (2018)

Por fim, o modelo inteiramente centralizado (*Fully centralized model*) é vantajoso em casos em que os requisitos do usuário são determinados pelo ambiente da aplicação em si, como no caso do controle industrial, em que o tempo de entrada e saída (I/O) é dependente do cenário físico sob controle (IEEE, 2018). Esse tempo de (I/O) da aplicação é utilizado para calcular os requisitos de tempo dos fluxos de informações da rede TSN e pode ser computacionalmente caro de se calcular, exigindo-se amplo conhecimento do *software* e do *hardware* em cada estação (IEEE, 2018). Sendo assim, esse modelo centraliza a configuração da rede e a configuração do usuário em entidades chamadas de *Centralized Network Configuration* (CNC) e *Centralized User Configuration* (CUC), respectivamente (IEEE, 2018). A entidade CUC é responsável por descobrir as estações na ponta da rede, obter as capacidades delas, obter os requisitos de usuário e configurar os recursos de TSN nessas estações (IEEE, 2018). A diferença principal entre o modelo inteiramente centralizado e o modelo rede centralizada/usuário distribuído é que todos os requisitos de usuários são trocados entre CNC e CUC (IEEE, 2018). Na Figura 15, está exposto o modelo inteiramente centralizado, no entanto, a troca de informações entre o CUC e as estações na ponta foi ocultada, pois, seu protocolo varia de usuário para usuário e não está padronizada pelo 802.1Qcc.

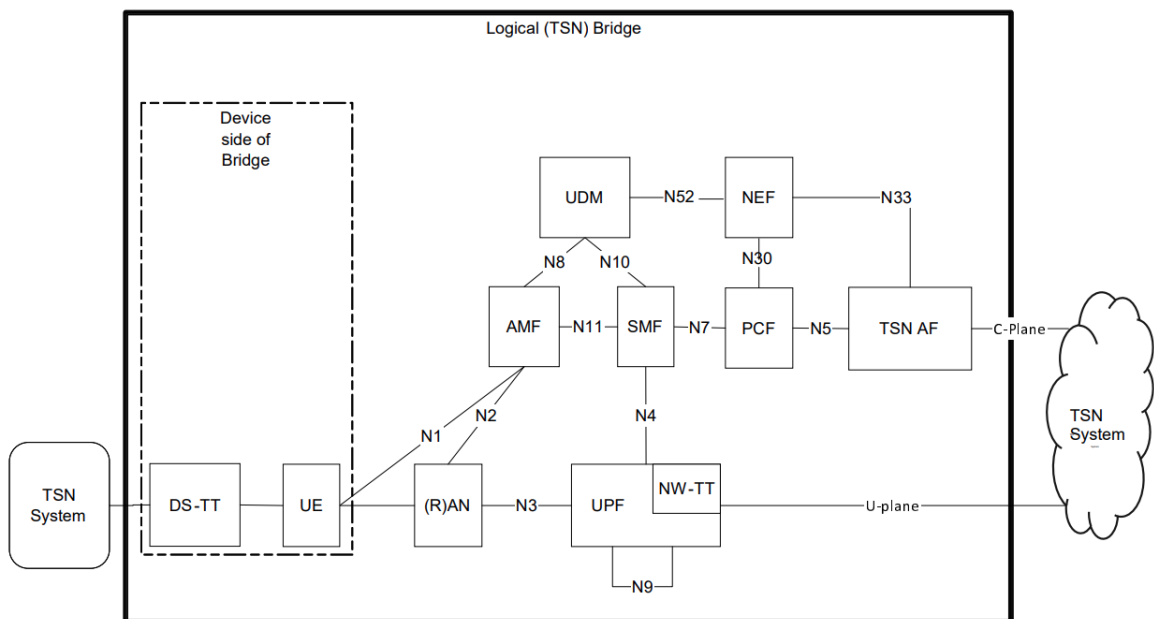
Figura 15 – Modelo inteiramente centralizado para TSN



Fonte: IEEE (2018)

A *Release 17*, da 3GPP, prevê a integração do modelo inteiramente centralizado à arquitetura 5G (Figura 16) como forma de oferecer baixa latência, baixo *jitter*, alta confiabilidade e determinismo para redes industriais sem fio.

Figura 16 – Arquitetura em que uma rede 5G atua como uma ponte (*Bridge*) TSN



Fonte: 3GPP (2022d)

Na Figura 16, há a presença de tradutores TSN para integrar esse suporte ao sistema 5G. No lado do UE, pode-se visualizar o *Device-side TSN translator* (DS-TT) e, no lado do Core, visualiza-se o *Network-side TSN translator* (NW-TT).

Uma função de rede do Core, chamada de TSN AF (*Access Function*), realiza a tradução dos sinais de controle entre o sistema 5G e a rede TSN, como, por exemplo, a interação com a entidade CNC (3GPP, 2022d).

O DS-TT e o NW-TT oferecem suporte, opcionalmente, a de-jitterização através de métodos de espera e encaminhamento, além de filtros e políticas por fluxo (*stream*) (3GPP, 2022d). Também, o NW-TT suporta a descoberta de dispositivos Ethernet conectados nele, enquanto que o DS-TT possui suporte opcional a detecção de dispositivos Ethernet. Caso o DS-TT não suporte essa detecção, ela será realizada pelo NW-TT, que irá detectar dispositivos Ethernet conectados ao DS-TT (3GPP, 2022d).

2.4 SIMULADORES

A melhor forma de se avaliar sistemas para entender a influência de cada conjunto de configurações nos índices de desempenho finais é por meio de simulações.

Alguns exemplos de simuladores de redes utilizados na academia são o ns-3 e o OMNeT++. Ambos possuem bibliotecas com suporte a simulação de redes móveis e são muito versáteis, possuindo um grande leque de configurações disponíveis. Além disso, oferecem suporte à integração de recursos físicos e interfaces de redes do sistema operacional, permitindo a interação entre diferentes *softwares* e *hardwares*, como por exemplo: UE e interface de rádio simulada interagindo com um Core 5G e uma rede de dados real.

Também, *softwares* como o MATLAB são bastante utilizados para simulações de nível de enlace, pois possuem uma vasta biblioteca de funcionalidades para estudos de sistemas de controle, sinais e modulações, permitindo o desenvolvimento de códigos em linguagem própria que facilitam o acesso a tais recursos.

O Quadro 5 ilustra uma lista de simuladores de código aberto para sistemas 5G e uma breve descrição de cada um.

Quadro 5 – Simuladores de 5G de código aberto

Simulador	Características principais
OpenAirInterface (KALTENBERGER <i>et al.</i> , 2019)	Pode ser utilizado com <i>hardware</i> SDR para testes reais controlando o acesso ou o UE. Possui também um simulador para simular a parte de rádio do 5G, porém não permite configurações avançadas como distância, <i>beamforming</i> , obstáculos, velocidade, entre outros.
NYUSIM (SUN; MACCARTNEY; RAPPAPORT, 2017)	Simulador de nível de enlace (<i>link</i>) para modelagem estatística de canal, código de simulação com interface fácil de usar e frequências de portadora de 2 a 73 GHz. Escrito para MATLAB.
Vienna 5G Simulators (MÜLLER <i>et al.</i> , 2018)	Simuladores de nível de enlace e de sistema para simulações em grande escala (incluindo centenas de nós) e suporte à paralelização. Escrito para MATLAB.
WiSE (JAO <i>et al.</i> , 2018)	Simulador de nível de sistema para orientações multicamadas.
GTEC 5G Simulator (DOMINGUEZ-BOLANO <i>et al.</i> , 2016)	Simulador de nível de enlace. Para MATLAB.
5G Toolbox by Matlab (MATHWORKS, 2022)	Simulador de nível de enlace, focado em modelagem de canal e geração de sinal. Para MATLAB.
Simu5G (NARDINI <i>et al.</i> , 2020)	Simulador de ponta a ponta em nível de sistema baseado em OMNeT++.
5G-air-simulator (MARTIRADONNA <i>et al.</i> , 2020)	Simulador em nível de sistema, de ponta a ponta, para modelar a interface de ar (<i>air</i>) 5G.
ns-3 mmWave (MEZZAVILLA <i>et al.</i> , 2018)	Simulador em nível de sistema de ponta a ponta com pilha de protocolos completa para simular bandas de ondas milimétricas do rádio 5G (NR). Para ns-3.
5G-LENA (PATRICIELLO <i>et al.</i> , 2019)	Simulador em nível de sistema de ponta a ponta com pilha de protocolos completa para simular bandas de 0,5 até 100 GHz do rádio 5G (NR). Para ns-3.

Fonte: Koutlia *et al.* (2022). Traduzido e adaptado pelo autor

2.4.1 5G-LENA

O simulador 5G-LENA, com código aberto, é um simulador de ponta a ponta, a nível de sistema, que é oferecido como um módulo do *software* ns-3 e é mantido pela instituição CCTC (*Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya*), localizada na Espanha, possuindo licença GPLv2.

Seu desenvolvimento se deu a partir de um *fork* do simulador ns-3 mmWave (MEZZAVILLA *et al.*, 2018), que, por sua vez, foi baseado no simulador LENA (para 4G) que havia sido desenvolvido pelo CCTC (PATRICIELLO *et al.*, 2019).

Já que o simulador funciona sobre o ns-3, é possível utilizar outros módulos de simulação como Ethernet, Wi-Fi, LTE, entre outros, juntamente ao 5G-LENA, sendo possível conduzir simulações com interoperabilidade de tecnologias, o que aumenta a versatilidade dos testes e a relevância dos resultados.

As camadas PHY e MAC foram implementadas seguindo-se os padrões do rádio 5G, no entanto, as camadas e protocolos RLC, PDCP, RRC, NAS e o Core são ainda os mesmos do simulador LENA (4G) (PATRICIELLO *et al.*, 2019). A camada SDAP, por não existir no 4G, também não está presente no 5G-LENA (PATRICIELLO *et al.*, 2019).

Dentre as funcionalidades do rádio 5G (NR) relevantes do simulador estão:

- configuração flexível e automática da estrutura do quadro NR através de múltiplas numerologias (PATRICIELLO *et al.*, 2019);
- acesso baseado em *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) com TTIs (*Transmission Time Interval*) variáveis (PATRICIELLO *et al.*, 2019);
- novos *schedulers* flexíveis de MAC que consideram simultaneamente recursos de domínio de tempo e frequência (blocos de recursos e símbolos) tanto para esquemas de acesso *Time-Division Multiple Access* (TDMA) quanto para esquemas de acesso baseados em OFDMA com TTI variável (PATRICIELLO *et al.*, 2019);
- tempos de processamento em acordo com o rádio 5G (PATRICIELLO *et al.*, 2019);
- novos gerenciadores de *Bandwidth Part* (BWP) e arquitetura com suporte a múltiplas BWPs (PATRICIELLO *et al.*, 2019);

- suporte a frequências *mmWave* e bandas de 400 MHz.

Algumas outras funcionalidades, não específicas do 5G, são:

- suporte a configuração de potência de transmissão;
- configuração da quantidade de antenas;
- configuração da velocidade dos nós;
- *beamforming*;
- suporte a vários modelos de propagação.

2.4.2 Modelos de Propagação

A organização 3GPP, juntamente de empresas parceiras, elencou alguns cenários comuns de aplicação de redes 5G e realizou um estudo técnico, denominado de *Technical Release* (TR) 38.901 (3GPP, 2022c), com o intuito de modelar as características físicas da transmissão nas frequências de 0,5 GHz até 100 GHz.

A modelagem de canal realizada pela 3GPP e parceiros pode ser utilizada em simulações a nível de enlace e a nível de sistema nas seguintes condições:

- Os cenários suportados em simuladores a nível de sistema são *urban microcell street canyon*, *urban macrocell*, *indoor office*, *rural macrocell* e *indoor factory* (3GPP, 2022c);
- A largura de banda suportada é de até 10% da frequência central e limitada a 2 GHz (3GPP, 2022c);
- Mobilidade é suportada nas duas pontas da conexão ou em apenas uma ponta (3GPP, 2022c);
- Para o modelo estocástico, a consistência espacial é suportada pela correlação de LSPs (*large scale parameters*) e SSPs (*small scale parameters*) e também do estado LOS (*Line Of Sight*)/NLOS (*Non Line Of Sight*) (3GPP, 2022c);
- O suporte a grandes vetores é baseado na suposição de campo distante e canal estacionário sobre o tamanho do vetor (3GPP, 2022c).

Os cenários urbanos levam em conta aspectos como a presença de prédios e ruídos e uma *ISD (Inter site distance)* de 200 m até 500 m para micro e macro célula, respectivamente, em formato hexagonal (3GPP, 2022c).

Já o cenário rural é focado em uma cobertura mais ampla com frequência de até 7 GHz e ruídos limitados, suportando alta velocidade de mobilidade dos UEs. A *ISD* pode ser de 1732 m ou de 5000 m (3GPP, 2022c).

O cenário *indoor office*, por sua vez, foi dividido em *open* e *mixed*, sendo que o primeiro corresponde a um ambiente interno com menos obstáculos do que o segundo. As antenas se localizam a aproximadamente 3 m do chão com *ISD* de 20 m (3GPP, 2022c).

Finalmente, o cenário *indoor factory (InF)* é o cenário que considera as aplicações em ambientes fabris com a presença de diversos tipos de máquinas. Esse cenário foi dividido em *SL (sparse clutter, low BS)*, *DL (dense clutter, low BS)*, *SH (sparse clutter, high BS)*, *DH (dense clutter, high BS)* e *HH (high Tx, high Rx)* (3GPP, 2022c). O Quadro 6 contém as características de cada um dos cenários fabris.

Por padrão, dos cenários descritos, o simulador ns-3 suporta *urban microcell, urban macrocell, rural macrocell* e *indoor office*. No entanto, há trabalhos na academia, como o de Ramos *et al.* (2022), que focaram na inclusão dos cenários *indoor factory* ao ns-3 e 5G-LENA. O código fonte desses trabalhos está disponível na Internet.

Quadro 6 – Características dos diferentes cenários fabris

Parâmetros	InF					
	SL	DL	SH	DH	HH	
Tipo de parede e teto externo	Paredes e teto de concreto ou metal com janelas revestidas de metal					
Tipo dos obstáculos	Grandes máquinas compostas por superfícies metálicas regulares. Por exemplo: várias áreas de produção mista com espaços abertos e áreas de armazenamento/comissionamento	Máquinas e objetos metálicos de pequeno e médio porte com estrutura irregular. Por exemplo: linhas de montagem e produção cercadas por maquinários mistos de pequeno porte.	Grandes máquinas compostas por superfícies metálicas regulares. Por exemplo: várias áreas de produção mista com espaços abertos e áreas de armazenamento/comissionamento	Máquinas e objetos metálicos de pequeno e médio porte com estrutura irregular. Por exemplo: linhas de montagem e produção cercadas por maquinários mistos de pequeno porte.	Qualquer	
Tamanho típico do obstáculo	10 m	2 m	10 m	2 m	Qualquer	
Densidade de ocupação dos obstáculos	Baixa densidade (<40%)	Alta densidade (>= 40%)	Baixa densidade (<40%)	Alta densidade (>= 40%)	Qualquer	
Altura da antena de acesso	Abaixo da altura média dos obstáculos			Acima dos obstáculos		
Localização do UE	LOS/NLOS	LOS e NLOS				100% LOS
	Altura	Abaixo da altura média dos obstáculos				Acima dos obstáculos

Fonte: 3GPP (2022c). Traduzido e adaptado pelo autor

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Primeiramente, realizou-se uma busca na plataforma Google Scholar, que indexa os artigos científicos das principais revistas e repositórios escolares, utilizando-se algumas palavras chaves relacionadas ao tema desse trabalho. A busca foi filtrada para exibir resultados publicados a partir de 2010 até 2022 e excluindo-se resultados de patentes. A relação entre a quantidade de resultados para cada palavra chave ou conjunto de palavras chave foi exposta na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade de resultados encontrados para cada busca

Palavra Chave	Quantidade de trabalhos localizados
industry	2.340.000
5G	792.000
URLLC	15.100
time-sensitive networking	3.430
5G, industry	126.000
5G, URLLC	14.800
5G, numerology	3.350
5G, TSN	3.290
5G, time-sensitive networking	1.500
5G, TSN, industry	1.530
5G, numerology, URLLC	1.480
5G, numerology, industry	1.330
5G, TSN, URLLC	649
5G, TSN, numerology	101
5G, numerology, URLLC, industry	757
5G, TSN, URLLC, industry	500
5G, TSN, numerology, URLLC	85
5G, TSN, numerology, industry	80
5G, TSN, numerology, URLLC, industry	73

Fonte: elaborado pelo autor

Nota-se que, em 13 anos, não há um número expressivo de trabalhos que abordam o tema central da presente dissertação. Ao navegar pelos resultados, encontram-se muitos artigos propondo a utilização de TSN incorporado ao 5G e artigos realizando algumas prospecções das características desejadas para tal arquitetura. No entanto, poucos são os trabalhos que exploram simulações, avaliação quantitativa e análise matemática, começando a ser publicados somente em meados de 2019. Os próximos parágrafos contêm a descrição dos trabalhos relacionados que são mais relevantes aos pontos explorados nessa dissertação.

No artigo de Patriciello *et al.* (2019), em que os desenvolvedores do simulador 5G-LENA o apresentam, uma simulação de demonstração é realizada para medir latência e vazão (*throughput*) em função da numerologia. O cenário virtual, que os autores se referem como uma escola de última geração, é constituído por 25 *smartphones*, seis sensores e quatro câmeras IP distribuídos aleatoriamente em uma área de 30 m de diâmetro. Os sensores transmitem uma *payload* de 500 bytes a cada 2,5 ms (1,5 Mb/s), enquanto que as câmeras transmitem 10 Mb/s de dados continuamente, ambos utilizando a pilha UDP/IP. Já os *smartphones* utilizam a pilha TCP/IP e realizam o *download* de arquivos de 5 MB (por 5 vezes) e *upload* de um arquivo, somente, de 15 MB. A frequência testada foi 28 GHz com banda de 100 MHz e o modelo de propagação utilizado foi o *Urban Macrocell*, não havendo nenhum obstáculo entre os dispositivos e a antena. Quatro diferentes tempos de codificação foram utilizados: 0 ms; 0,1 ms; 0,5 ms; tempo variável igual a duas vezes o tamanho do *slot*. Apenas a numerologia 4 apresentou tempos de latência menores que 1 ms. O trabalho não avaliou outras frequências e bandas e não foi focado em aplicações de redes 5G na indústria, logo não buscou atingir tempos de até 1 ms de latência e não avaliou medidas de *jitter*. Também, não se mediu a correlação entre o tamanho da *payload* e a latência nas diferentes numerologias.

No trabalho de Segura *et al.* (2021), os autores utilizaram o simulador 5G-LENA para conduzir testes de uma rede 5G aplicada a um ambiente industrial. O cenário simulado conta com um AGV (*Automated Guided Vehicle*) em movimento e cinco UEs fixos que recebem tráfego UDP em uma taxa de 750 Mb/s, aumentando, assim, a carga de dados da célula. Os pacotes enviados ao AGV seguem uma periodicidade de 100 ms com um tamanho fixo de 64 e 1000 bytes. O AGV, em certos momentos de sua trajetória, passa por salas de concreto com janelas, o que acarreta em um cenário com periódicas propagações NLOS (*Non-line-of-sight*). A

frequência de 28 GHz com banda de 200 MHz foi utilizada e as numerologias de 0 a 4 foram testadas. Para pacotes de 64 bytes em condições LOS (*Line-of-sight*), as numerologias 2, 3 e 4 acarretaram em medianas de latências menores do que 1 ms, no entanto, em certos momentos da trajetória do AGV, a latência com numerologia 4 chegou a valores acima de 10 ms. Em condições NLOS, com pacotes de 64 bytes, o tempo da latência aumentou, porém não é possível avaliar a diferença numérica no artigo, uma vez que o gráfico é graduado de 5 em 5 ms e não há menção dos valores no texto do artigo por parte dos autores. Já para pacotes de 1000 bytes, apesar de a mediana da latência se manter próxima da dos pacotes de 64 bytes para LOS, o número de ocorrências de pacotes chegando em tempos acima de 10 ms aumentou significativamente para numerologias 3 e 4. Na condição NLOS para os pacotes de 1000 bytes, a mediana da latência aumenta de forma expressiva para todas as numerologias, sendo que a numerologia 2 apresenta a menor mediana (um pouco acima de 5 ms), enquanto que as numerologias 3 e 4 apresentam valores próximos de 15 ms. O trabalho não analisou frequências inferiores a 6 GHz e bandas diferentes de 200 MHz. Também, *jitter* não foi numericamente considerado e não se traçou a correlação do impacto do tamanho da *payload* na latência para valores intermediários a 64 e 1000 bytes.

No trabalho de Ramos *et al.* (2022), os autores realizaram a inclusão do modelo de canal dos cenários fabris SL, DL, SH e DH no simulador ns-3 e 5G-LENA. O trabalho foi baseado nos resultados da TR 38.901 (3GPP, 2022c). Para validar a eficácia da implementação, testes de desempenho foram realizados a fim de comparar os resultados dos autores com os disponibilizados pela 3GPP (2019). Gráficos da Função de Distribuição Acumulada (FDA) de parâmetros como atraso de propagação, perda de conexão, geometria com ruído e geometria sem ruído foram apresentados e mostraram uma dinâmica muito semelhante comparada aos resultados da 3GPP, portanto, comprovando a eficácia da implementação. Os autores não realizaram testes comparativos de latência e *jitter* em cenários industriais para avaliação da transmissão de dados industriais.

No artigo de Larrañaga *et al.* (2020), foi realizado um levantamento do progresso atual que envolve a integração de TSN a redes 5G. Após descreverem todos os conceitos e as características importantes para o tema, os autores consideraram um cenário industrial e levantaram alguns pontos a serem explorados, como o atraso na *bridge* TSN-5G, abordado em seguida. Os cálculos dos

parâmetros envolvidos foram minuciosamente descritos e, ao final, os autores concluíram que a implementação de um Core 5G local otimizado é essencial para que se alcance um atraso viável e que, para suportar o tráfego periódico, deve-se utilizar um escalonamento semi-persistente no *Down Link* (DL) ou um escalonamento configurado com recursos periódicos. O trabalho não realizou nenhum tipo de simulação e não abordou fatores relacionados ao ambiente de aplicação da arquitetura (por exemplo, distância e cenário).

Khoshnevisan *et al.* (2019) descrevem os requisitos, que incluem frequência, arquitetura e protocolo, para a classe de uso URLLC em uma rede 5G voltada ao ambiente industrial. Como solução às possíveis interferências de rádio que, segundo os autores, podem ocorrer em uma aplicação na indústria, é proposta a utilização do método de transmissão *Coordinated Multipoint* (CoMP), que não exigiria retransmissão de pacotes. Diversas técnicas de CoMP são testadas, através de simulações, a fim de se obter uma análise gráfica de suas vantagens. Ainda, os autores analisam mais características da integração de uma rede TSN ao 5G, como o ganho percentual da compressão de *headers* Ethernet, procedimento de encapsulamento de uma PDU (*Protocol Data Unit*) Ethernet em uma rede 5G e propostas de soluções a erros de sincronização na comunicação. Finalmente, um protótipo foi montado com motores, Controlador Lógico Programável (CLP) e um emulador de rádio 5G para análise da latência ao utilizar-se o protocolo PROFINET RT. A simulação foi realizada levando-se em conta fatores de frequência e dados numéricos de atraso foram coletados, comprovando a eficácia do experimento. Trabalhos futuros incluem melhora das latências atingidas e testes em ambiente industriais reais. O experimento considerou apenas uma frequência central (3 GHz) e uma largura de banda (100 MHz) e não avaliou a variação de desempenho em função do tamanho do pacote e da numerologia. Também, o foco da avaliação foi o modelo CoMP.

Martenvormfelde *et al.* (2020) desenvolveram um modelo em código aberto para simulações de TSN em redes 5G baseado no software OMNeT++ e na biblioteca NeSTiNg (para TSN). Várias outras ferramentas existentes foram citadas, porém nenhuma se encaixou às necessidades dos autores. Também, considerou-se estender a biblioteca SimuLTE, no entanto a opção foi descartada, mais tarde, por ser de maior complexidade. Uma malha fechada de controle foi testada no simulador desenvolvido e dados de atraso foram coletados variando-se parâmetros como

estrutura de *frame* (do rádio 5G) e espaçamento da subportadora para pacotes de 64 e 256 bytes. Os autores concluíram que, para aplicações industriais reais, intervalos de *slots* diferentes e decisões fracas de escalonamento podem influenciar a QoS significativamente e elevar o atraso e *jitter*. Em trabalhos futuros, os autores pretendem refinar o modelo e melhorar a compatibilidade com as normas da 3GPP. O artigo não levou em conta fatores ambientais, como a distância entre os dispositivos, altura e cenário. Também não foi realizada a avaliação das frequências, bandas e do impacto de diferentes tamanhos de pacotes na latência.

No artigo de Ginthör *et al.* (2019), os autores descrevem, detalhadamente, as características exigidas para uma rede industrial e os fatores relevantes para integração de TSN a uma rede 5G. Também, propõem um modelo de simulação baseado na biblioteca NeSTiNg e no *framework* SimuLTE, realizando as adaptações necessárias para o 5G. Após alguns testes com frequência de 3,7 GHz (banda de 40 MHz) e numerologia 1, os autores desenharam um gráfico para o padrão de tráfego, um para a latência fim-a-fim (pior caso) em função do número de dispositivos de usuário (UE), um para a vazão em função do número de UEs e um do impacto na latência relativo ao tráfego de melhor esforço. Analisando-se os dados quantitativos, os autores concluíram que para os requisitos industriais, além de se integrar TSN a redes 5G, é necessário um escalonamento fim-a-fim que leve em consideração fatores como configurações na aplicação e de tempo de chegada dos *frames* das *streams* envolvidas, pontos que serão explorados pelos autores em trabalhos futuros. Não foram analisadas frequências acima de 6 GHz, bandas diferentes de 40 MHz e não se levou em conta o posicionamento dos UEs e RAN. Valores de *jitter* não foram exibidos e não se considerou a variação da latência em função do tamanho dos pacotes e numerologia.

No trabalho de Karamyshev *et al.* (2020), são propostos dois modelos analíticos de estimação de capacidade para redes URLLC, sendo um com elevada precisão e outro com menor custo computacional, porém com uma pequena margem de erro. Os autores discorrem sobre o passo-a-passo da dedução do primeiro modelo (de maior precisão), explicando o equacionamento probabilístico utilizado que se baseia em processo de Poisson. Tal modelo é avaliado, posteriormente, através de comparações com simulações no software ns-3, demonstrando-se eficaz para algumas faixas de parâmetros. Também, utilizando-se o modelo obtido, os autores realizaram algumas análises para medir a influência de parâmetros de

sistema e de nível de QoS na capacidade da rede. Como forma de melhorar a adaptabilidade da rede móvel 5G para atender aplicações de URLLC, os autores sugeriram a utilização do modelo no gNB de modo *online*, no entanto, para que isso fosse possível de forma eficiente, um modelo aproximado que requer menor gasto computacional foi proposto. Esse modelo foi comparado com o primeiro e os autores atingiram um erro máximo de 12%. De acordo com o artigo, futuros trabalhos irão avaliar cenários com requerimentos de QoS heterogêneos e o desenvolvimento de algoritmos de controle de admissão eficientes. Os autores não avaliaram a variação da latência e *jitter*. A simulação não utilizou uma biblioteca que implementasse os protocolos de comunicação, sendo os parâmetros todos baseados em modelos estatísticos.

O Quadro 7 contém um resumo das características de cada trabalho e os pontos que ficaram em aberto e que são cobertos por essa dissertação.

Quadro 7 – Comparação dos trabalhos relacionados

Trabalho	Características
Patriciello <i>et al.</i> (2019)	Foram medidas a latência e vazão em função das numerologias de 0 a 4 na frequência de 28 GHz (banda de 100 MHz) no cenário <i>Urban Macrocell</i> para múltiplos nós no simulador 5G-LENA. Focado em eMBB. Não se levou em conta cenários industriais e outras frequências e bandas, bem como não se avaliou o <i>jitter</i> e a influência do tamanho da <i>payload</i> na latência.
Segura <i>et al.</i> (2021)	Avaliou-se o impacto da numerologia na latência para um ambiente <i>indoor</i> simulado no 5G-LENA. Considerou-se um UE móvel (AGV) e propagações LOS e NLOS na frequência de 28 GHz (banda de 200 MHz) para numerologias de 0 a 4. Pacotes de 64 e 1000 bytes foram testados. Não se levou em conta outras frequências e bandas e não foi apresentado o modelo de propagação utilizado (<i>Urban, Rural, Office, Factory, etc.</i>). Também, não se mediu o <i>jitter</i> numericamente e a correlação entre a latência e tamanhos de pacotes diferentes de 64 e 1000 bytes.
Ramos <i>et al.</i> (2022)	Os autores integraram os cenários fabris SL, DL, SH e DH ao simulador 5G-LENA e testaram sua eficácia através de simulações e comparações com os resultados da TR 38.901. Não foram realizados testes comparativos de latência e <i>jitter</i> .
Larrañaga <i>et al.</i> (2020)	Foram realizados alguns cálculos que envolvem a integração de TSN a redes 5G e conclusões acerca dos requisitos necessários para que essa integração seja possível. Nenhuma simulação foi realizada e aspectos

	como distância, interferência, cenário, frequência e numerologia não foram levados em conta.
Khoshnevisan <i>et al.</i> (2019)	Os autores citam o modelo CoMP como uma solução robusta para aplicações industriais e realizam simulações relacionadas a tal modelo. Um protótipo físico foi montado para avaliação da latência de equipamentos industriais se comunicando por meio de 5G. Frequências diferentes de 3 GHz (banda de 100 MHz) e aspectos como tamanho do pacote e numerologia não foram considerados.
Martenvormfelde <i>et al.</i> (2020)	Um simulador de redes TSN em 5G foi desenvolvido e os autores avaliaram a transmissão de pacotes de 256 bytes e 64 bytes para diferentes estruturas de <i>frames</i> e espaçamento da subportadora. Não se avaliou distância, cenário, frequência, banda e influência do tamanho da <i>payload</i> na latência e <i>jitter</i> .
Ginthör <i>et al.</i> (2019)	Os autores desenvolveram um simulador de TSN para redes 5G e realizaram simulações levando-se em conta a influência da quantidade de UEs na latência e na vazão para frequência de 3,7 GHz (banda de 40 MHz) e numerologia 1. Também avaliaram o impacto do tráfego de melhor esforço na latência. Não foram avaliadas outras frequências, bandas e numerologias e não se levou em consideração o cenário da aplicação. Também não foram realizadas medições dos valores de <i>jitter</i> .
Karamyshev <i>et al.</i> (2020)	Foram propostos dois modelos analíticos de estimação de capacidade para redes URLLC sendo que o segundo é um modelo heurístico que requer menor gasto computacional para simulações, porém com maior erro. Os modelos são comparados com simulações no <i>software</i> ns-3 e análises foram realizadas para medição da influência de parâmetros de sistemas e de nível de QoS na capacidade da rede. Variação de latência e <i>jitter</i> não foi avaliada e os modelos foram todos baseados em modelos estatísticos.

Fonte: elaborado pelo autor

4 SIMULAÇÃO DE UM AMBIENTE INDUSTRIAL COM 5G

Na integração de redes TSN ao 5G, um dos principais pontos é a configuração dos recursos de rádio com o objetivo de tornar a comunicação ultrarrápida, confiável e determinística. Dentre as configurações que precisam ter seu impacto testado estão a frequência (incluindo banda), numerologia e os diferentes tamanhos de pacotes.

As subseções seguintes descrevem os testes realizados e os resultados coletados.

4.1 METODOLOGIA

Para a realização de testes, o simulador 5G-LENA foi empregado. Sua escolha se deu por possuir um nível de desenvolvimento e teste mais avançado na parte de rádio, estando as camadas PHY, MAC e RLC implementadas conforme as especificações da 3GPP para o rádio 5G (NR). As camadas superiores, bem como o Core, ainda são baseadas na geração LTE, porém não são primordiais para as simulações deste trabalho uma vez que suas funcionalidades são muito semelhantes entre os padrões LTE e 5G. Além disso, o 5G-LENA é uma extensão do simulador ns-3, o qual é muito utilizado na academia e suporta vários outros tipos de protocolos e configurações.

Por padrão, o simulador ns-3 não possui um modelo de propagação para cenários industriais, no entanto, Ramos *et al.* (2022), que realizaram a implementação dos modelos industriais no ns-3, disponibilizaram o código fonte de sua implementação (RAMOS, 2022). Uma vez que os autores obtiveram resultados muito semelhantes aos valores de comparação disponibilizados pela 3GPP, optou-se por utilizar tal implementação nos testes deste trabalho.

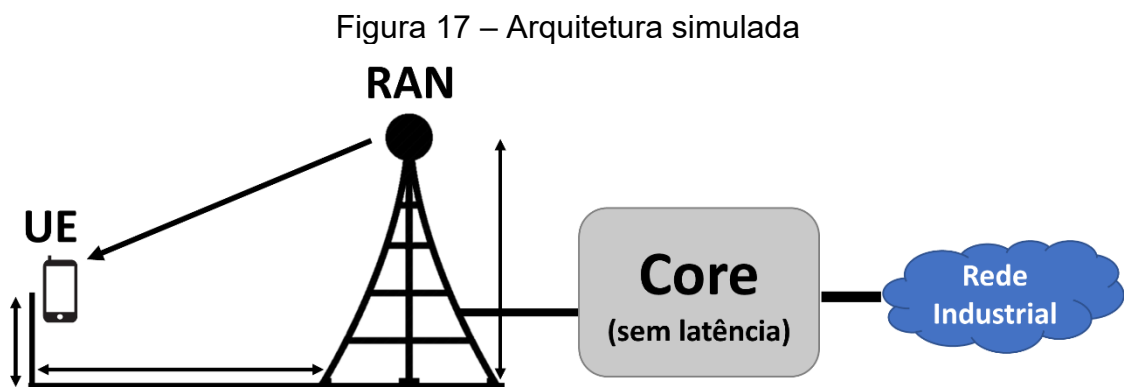
Nos experimentos, assumiu-se que a rede 5G a ser testada é uma rede privada e que funcionará apenas dentro do ambiente fabril, ou seja, a antena do acesso estará instalada dentro da estrutura da indústria, sendo, portanto, um cenário *indoor*.

Os testes foram divididos em quatro partes, sendo que a primeira foi destinada a avaliação da SNR do sinal sob diferentes cenários fabris e frequências. A segunda foi destinada a avaliação da latência e *jitter* dos pacotes para todos os

cenários com variação da distância entre o acesso e o UE. A terceira foi focada na avaliação da influência da frequência, largura de banda e numerologia na latência e *jitter*. Por fim, na quarta parte mediu-se a latência para alguns valores de numerologias e frequências levando-se em consideração a variação do tamanho dos pacotes.

Em todos os testes optou-se por utilizar um Core e *Data Network* ideais, i.e., sem latência, uma vez que a latência do Core, comparada a da transmissão sem fio, é baixa e dependente de fatores como capacidade computacional. Além disso, o objetivo deste estudo é avaliar a parte de transmissão via rádio. Também, este estudo restringiu-se em simular somente o *downlink* (envio do acesso para UE), pois assumiu-se que a influência dos parâmetros testados seria a mesma para o *uplink*.

A Figura 17 ilustra a arquitetura de rede simulada. Obstáculos, distâncias e demais UEs não estão representados.



Fonte: elaborado pelo autor

Utilizou-se qualidade de serviço 5G (5QI) número 80, que é específica para aplicações de baixa latência. Também poderiam ser utilizados outros níveis mais específicos para automação, mas o simulador trata os níveis de forma semelhante, logo, preferiu-se por reduzir a necessidade de configurações e utilizar um modo que seria adequado para todas as simulações.

A pilha de protocolos testada foi de pacotes UDP/IP, que, em um caso real, poderia ser utilizada para encapsular pacotes Ethernet de uma rede industrial. Como as estatísticas são baseadas no envio e recebimento dos pacotes na camada de aplicação, as perdas de pacote não foram computadas já que a pilha de protocolos de rádio é responsável pela garantia da entrega e reenvio de informações.

O tempo de simulação foi limitado em 1 segundo tendo-se em vista que se deseja medir valores na ordem de alguns milissegundos, portanto, o tempo de simulação é 1000 vezes superior a média que se deseja obter.

As subseções seguintes detalham cada experimento realizado e os resultados das simulações estão expostos na Seção 4.2 Resultados.

4.1.1 Avaliação da SNR sob diferentes cenários industriais

Para cada cenário industrial, diferentes configurações do ambiente foram realizadas conforme Quadro 8. Essas configurações são semelhantes as realizadas pela 3GPP (2022c) em seus testes de calibração. As frequências de 28 GHz e 3,5 GHz, com banda de 100 MHz, e potências de transmissão, no acesso, de 10 dBm e 25 dBm foram testadas para todos os cenários.

A distribuição dos UEs e a posição da antena de acesso estão ilustrados na Figura 18.

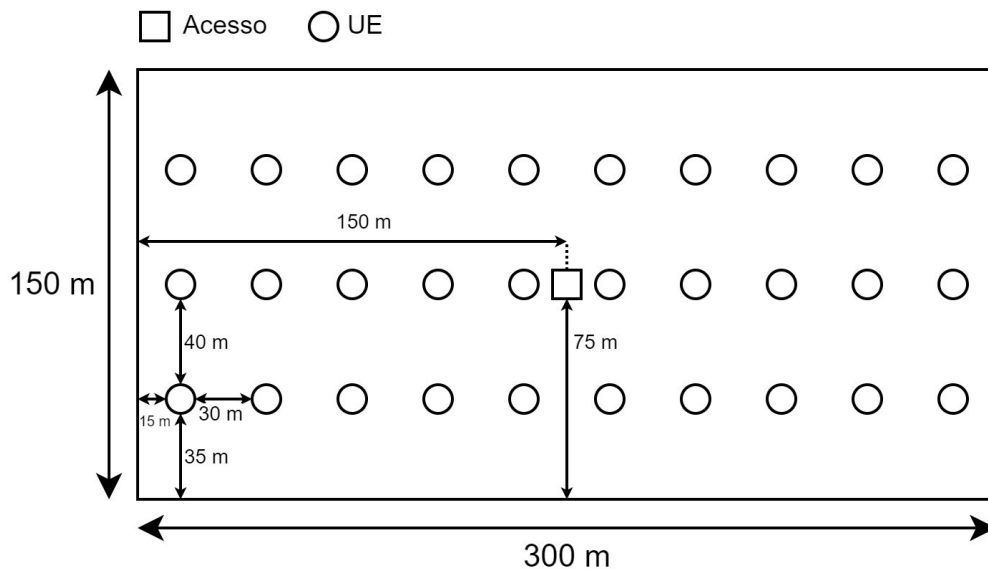
Quadro 8 – Configurações de ambiente para cada um dos cenários testados

Parâmetro	SL	DL	SH	DH	HH
Tamanho do ambiente	300x150 m				
Altura do teto	10 m				
Altura da antena de acesso	1,5 m		8 m		
Altura da antena do UE	1,5 m				7 m
Altura dos obstáculos	2 m	6 m	2 m	6 m	6 m
Tamanho dos obstáculos	10 m	2 m	10 m	2 m	2 m
Densidade dos obstáculos	20%	60%	20%	60%	60%
Frequências centrais	3,5 GHz e 28 GHz				
Banda	100 MHz				
Potência do sinal do acesso	10 dBm e 25 dBm				

Potência do sinal do UE	5 dBm
Configuração da antena do acesso	1 elemento com ganho isotrópico
Configuração da antena do UE	1 elemento com ganho isotrópico
Quantidade de UEs	30
Figura de ruído dos UEs	9 dB

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 18 – Posição do acesso e dos UEs nos ambientes industriais simulados



Fonte: elaborado pelo autor

4.1.2 Avaliação da latência e *jitter* (fim-a-fim) sob diferentes cenários industriais e distâncias

Nesse conjunto de testes foram avaliados os valores de *jitter* e latência (fim-a-fim) na camada de aplicação para cada um dos cenários industriais com o objetivo de se analisar a influência dos fatores ambientais na qualidade da conexão.

As simulações seguiram as mesmas configurações do Quadro 8, no entanto, apenas a potência de 25 dBm foi utilizada. As demais configurações podem ser visualizadas no Quadro 9.

As posições do acesso e do UE avaliados estão ilustradas na Figura 19. A avaliação foi realizada para diferentes distâncias entre o acesso e o UE: 45m, 75m, 105m e 135m. Os demais UEs no cenário foram inseridos com o intuito de se gerar ruído na rede.

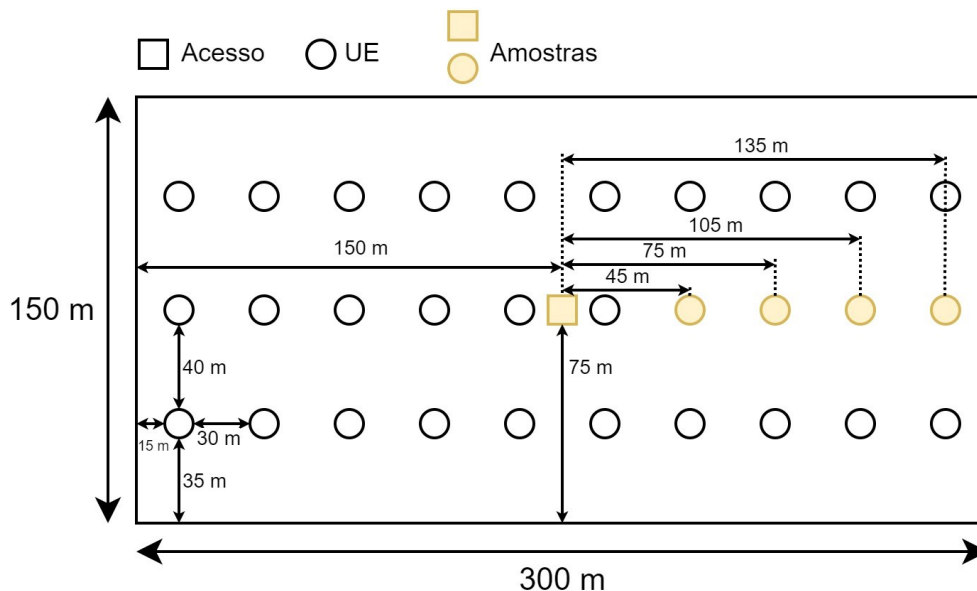
Tabelas com os valores de latência e *jitter* para cada condição testada foram montadas e, para melhor visualização da distribuição dos valores de latência, são apresentados gráficos da Função de Distribuição Acumulada (FDA). Ressalta-se que o *seed* da simulação não foi alterado entre cada medição pois desejou-se manter as mesmas condições ao longo dos testes, o que acarreta em valores de latência e *jitter* iguais sob cenários semelhantes.

Quadro 9 – Configurações adicionais para os testes de latência e *jitter*

Parâmetro	Valor
Numerologia	2
Tamanho do pacote	100 bytes
Vazão	2000 pacotes por segundo

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 19 – Posição das amostras avaliadas nos ambientes industriais simulados



Fonte: elaborado pelo autor

4.1.3 Avaliação da latência e *jitter* (fim-a-fim) sob diferentes frequências e numerologias

Nesse teste utilizou-se somente o cenário *Indoor Factory High-High* uma vez que o teste anterior já foi destinado à avaliação da influência do cenário na latência (fim-a-fim) e *jitter*, sendo assim, o cenário *High-High* demonstra-se mais adequado para medir-se a influência de outros fatores como frequência, largura de banda, numerologia e tamanho dos pacotes na latência e *jitter*.

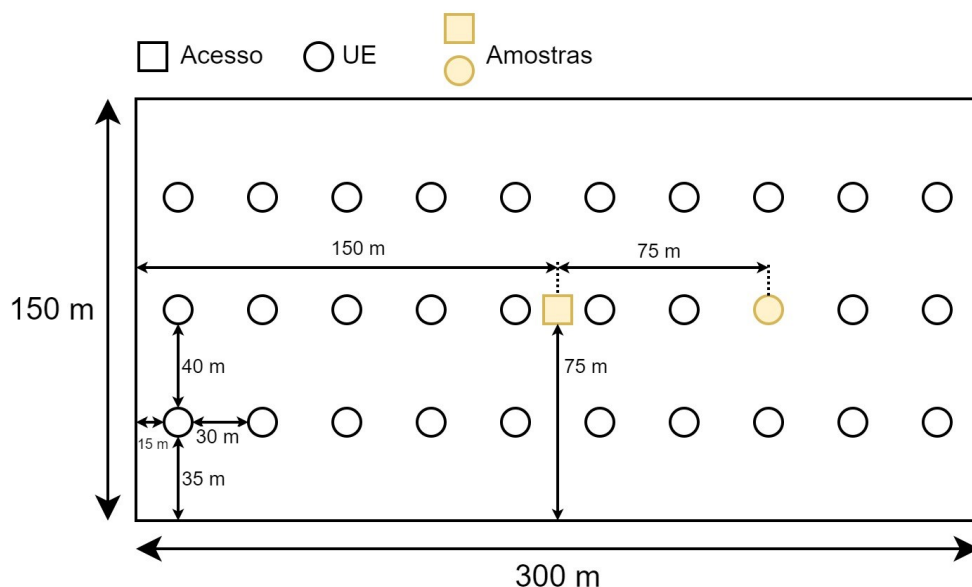
As configurações do ambiente foram as mesmas do Quadro 8, coluna HH, com exceção das configurações de frequência e de potência do UE. O Quadro 10 contém os parâmetros específicos desse experimento e a Figura 20 ilustra a posição do acesso e UE testados no cenário.

Quadro 10 – Configurações adicionais para os testes de latência e *jitter*

Parâmetro	Valor
Numerologias	0, 1, 2, 3, 4 e 5
Tamanho do pacote	100 bytes
Vazão	2000 pacotes por segundo
Frequências centrais e bandas	3,5 GHz (50 e 100 MHz) e 28 GHz (100 e 400 MHz)
Potência do sinal do acesso	25 dBm

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 20 – Arquitetura simulada



Fonte: elaborado pelo autor

Foram testadas as numerologias de 0 a 5 (15 kHz a 480 kHz) para as frequências de 3,5 GHz (bandas de 50 MHz e 100 MHz) e de 26 GHz (bandas de 200 MHz e 400 MHz). A numerologia 6, apesar de presente no padrão especificado pela 3GPP, não foi testada pois não há suporte no simulador.

Nem todas as numerologias são aplicáveis as frequências e bandas que serão testadas, no entanto, objetiva-se criar um comparativo para avaliação da influência da numerologia na latência e *jitter*.

Tabelas para a média dos valores de latência e *jitter* fim-a-fim foram obtidas e gráficos da FDA dos valores de latência foram obtidos.

4.1.4 Avaliação da latência (fim-a-fim) sob diferentes frequências, numerologias e tamanhos de pacotes

Esse teste é semelhante ao anterior, porém avaliou-se, também, o impacto do tamanho dos pacotes na latência (fim-a-fim). A *payload* teve seu comprimento variado de 50 bytes a 1450 bytes com passos de 100 bytes.

As mesmas frequências do conjunto anterior foram testadas, no entanto, somente as numerologias 3 (120 kHz) e 5 (480 kHz) foram utilizadas. Essa escolha se deu, pois, a numerologia 4 não é destinada ao envio de pacotes de dados. Apesar de as numerologias 3 e 5 não serem aplicáveis a FR1, ainda assim optou-se por utilizá-las para gerar um comparativo da influência da largura de banda e numerologia na latência para cada tamanho de pacote.

4.2 RESULTADOS

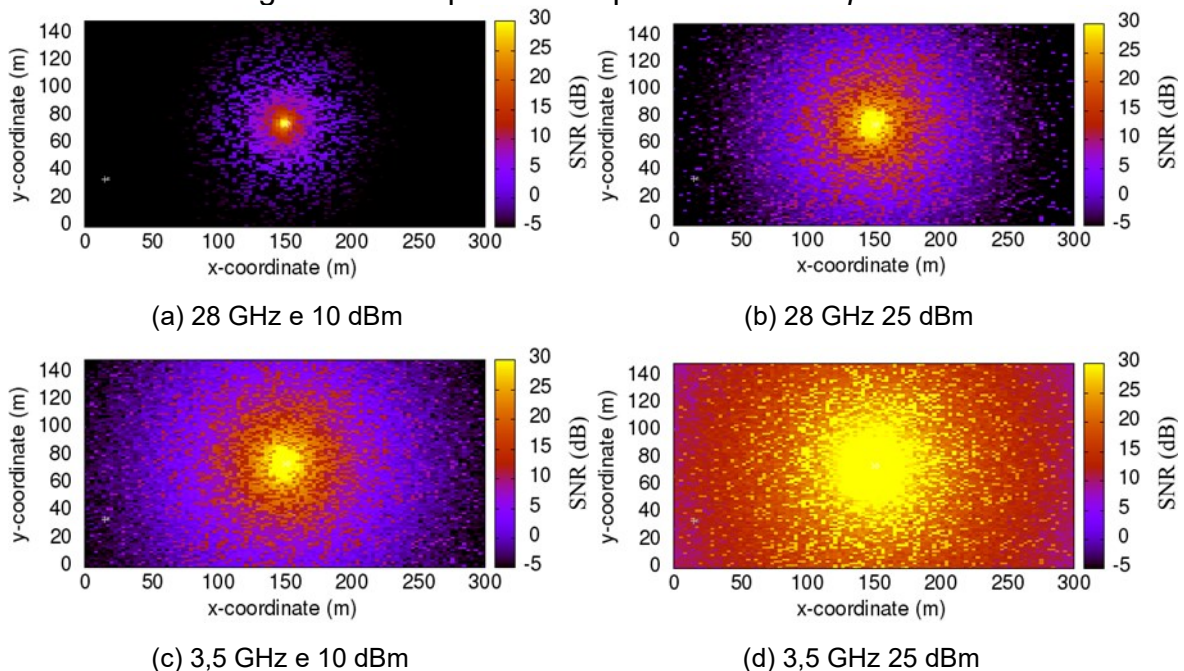
Os resultados para cada um dos conjuntos simulados estão expostos nas seguintes subseções.

4.2.1 Avaliação da SNR sob diferentes cenários industriais

Esse conjunto de testes teve como resultado um mapa do pior caso dos valores de SNR para o ambiente simulado.

Na Figura 21 é possível visualizar o nível de SNR para o cenário *Sparse Low* para as frequências de 3,5 GHz e 28 GHz e potências de 10 dBm e 25 dBm. Nota-se que os mapas de SNR confirmam as leis da física no que tange a correlação entre a frequência e o alcance do sinal, já que a frequência de 3,5 GHz apresentou níveis mais altos do que a de 28 GHz para o mesmo valor de potência.

Figura 21 – Mapa de SNR para o cenário *Sparse Low*

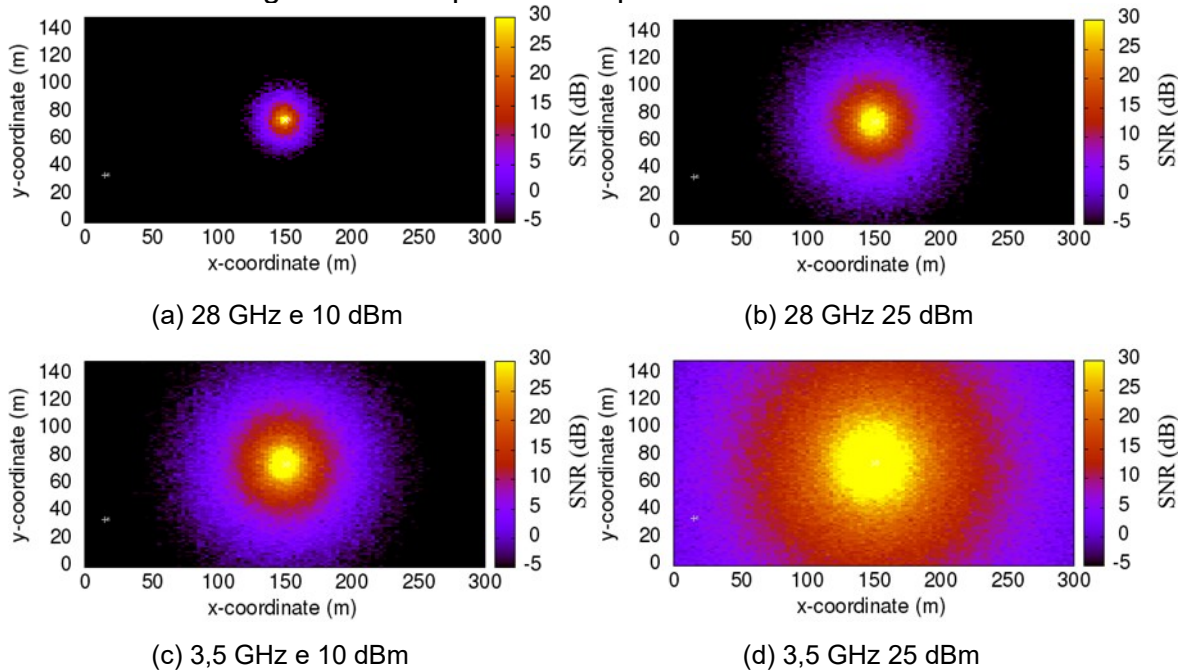


Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 22, por sua vez, contém a SNR para o cenário *Dense Low*. Em comparação com a Figura 21, nota-se que o cenário *Dense Low* provoca maior decaimento do nível de SNR em função da distância. Esse comportamento é

esperado, uma vez que os obstáculos são mais altos e estão posicionados de forma mais concentrada.

Figura 22 – Mapa de SNR para o cenário *Dense Low*



Fonte: elaborado pelo autor

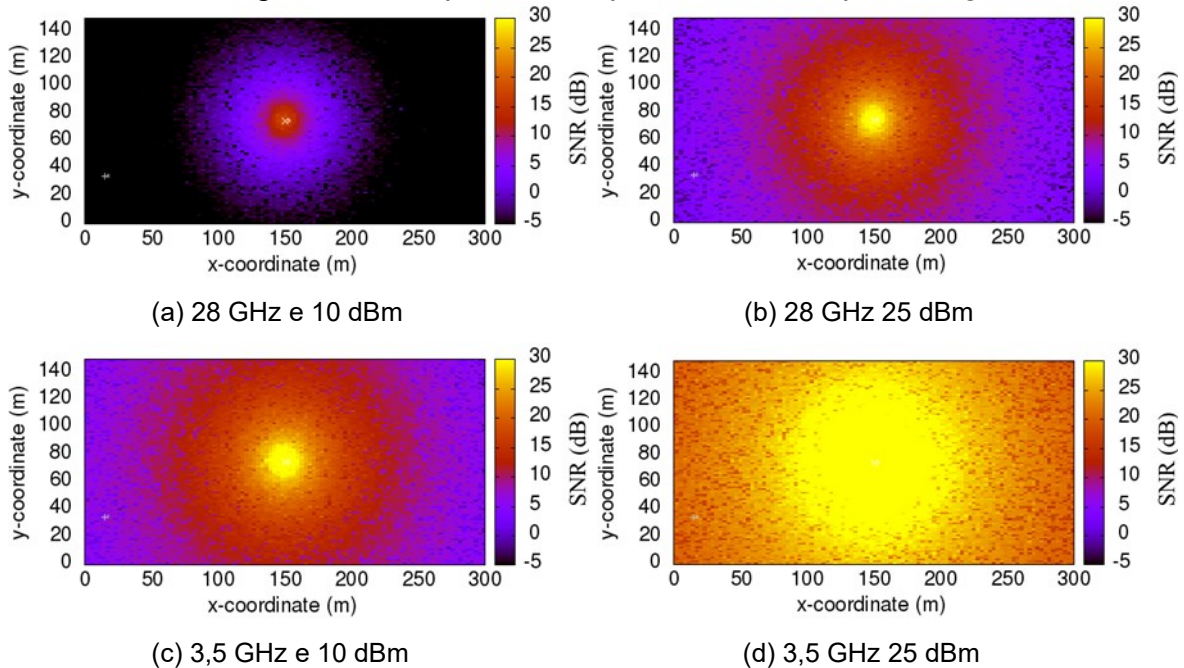
Já na Figura 23, com a representação da SNR para o cenário *Sparse High*, percebe-se que a altura em que a antena de acesso é posicionada influencia fortemente na propagação do sinal. Esse fato também é esperado, uma vez que há menos obstáculos na trajetória entre o acesso e o UE, apesar de que a distância é maior devido ao ângulo entre os dois elementos. Em comparação com o cenário *Sparse Low*, afere-se que o sinal do cenário *Sparse High* possui maior consistência em sua propagação, isso é, possui menor suscetibilidade a interferências, fato corroborado pela menor presença de pontos pretos no sinal da Figura 23.

A Figura 24, com o sinal do cenário *Dense High*, também contrasta com o sinal do cenário *Dense Low*, provando mais uma vez que a altura superior do acesso acarreta em níveis de sinal muito melhores do que na altura inferior.

Finalmente, na Figura 25, que ilustra a propagação da SNR no cenário *High High*, nota-se que se a antena do UE também for posicionada em uma altura acima dos obstáculos, o nível de sinal melhora ainda mais comparado aos outros cenários *High*. No entanto, tal melhora não é tão exacerbada quanto a melhora provocada pelo aumento da antena do acesso entre os cenários *Low* e *High*. O maior contraste,

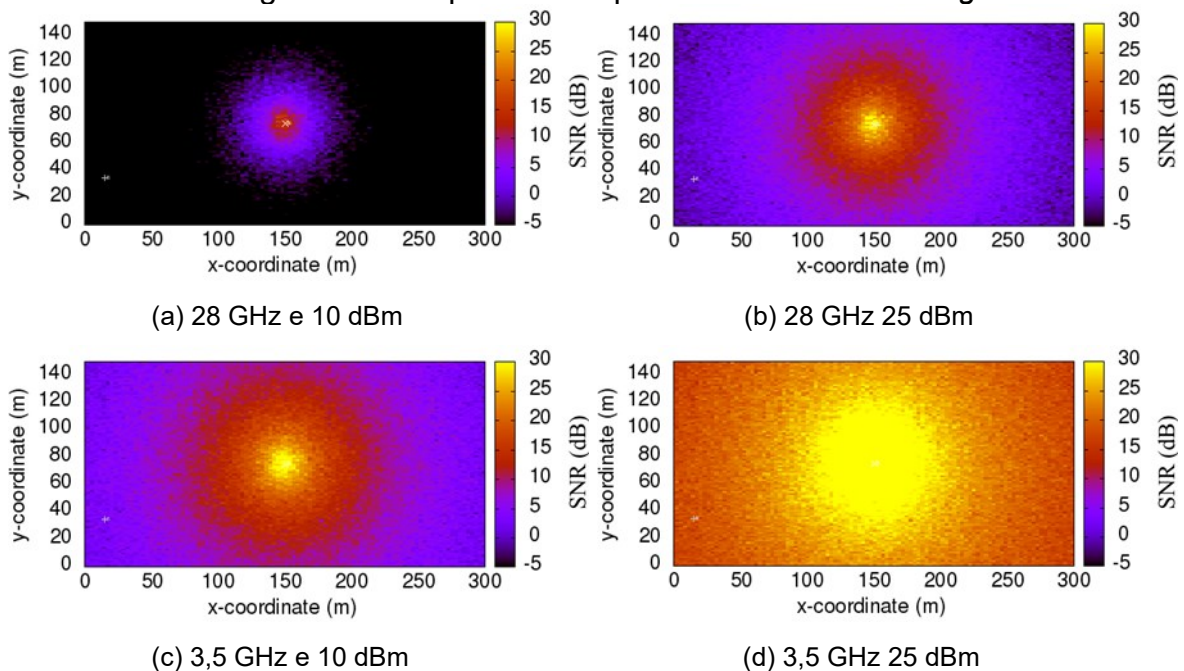
face aos cenários *Sparse High* e *Dense High*, está na comparação entre *Dense High* e *High High*, fato explicado devido ao fato de o UE estar acima dos densos obstáculos. Já na comparação entre *Sparse High* e *High High*, não é possível notar um grande ganho de nível de sinal, o que é explicado pela altura mais baixa dos obstáculos nos cenários *Sparse*.

Figura 23 – Mapa de SNR para o cenário *Sparse High*

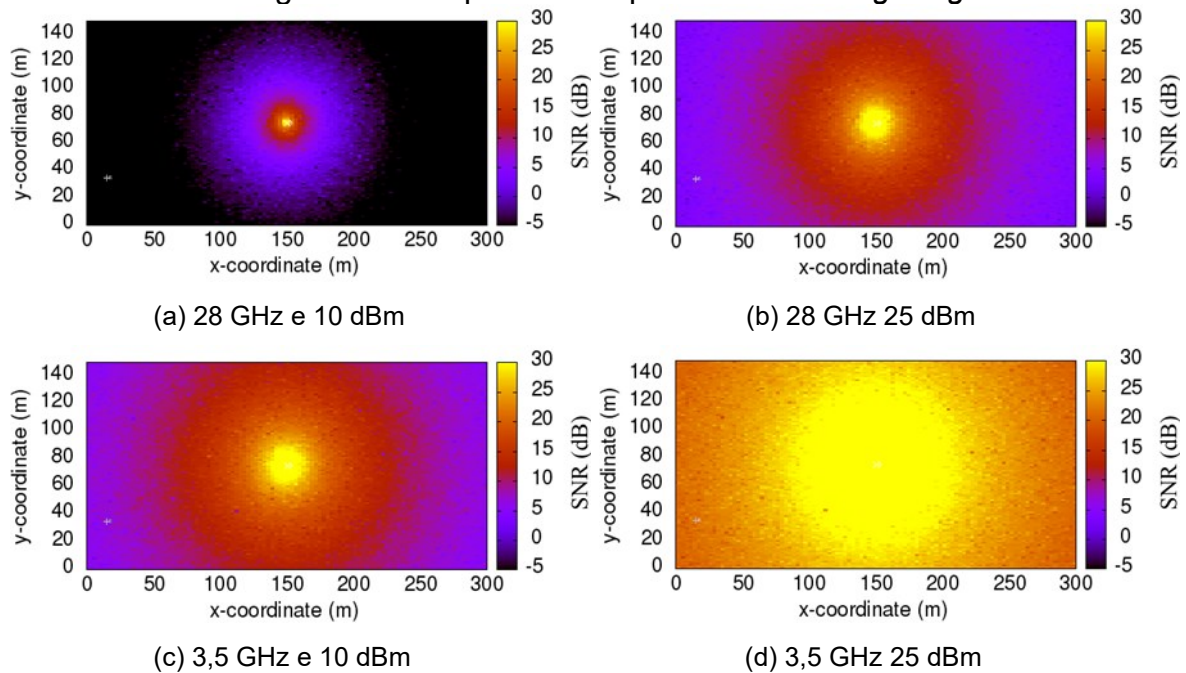


Fonte: elaborado pelo autor

Figura 24 – Mapa de SNR para o cenário *Dense High*



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 25 – Mapa de SNR para o cenário *High High*

Fonte: elaborado pelo autor

A partir das diferenças no nível de propagação da SNR nos diferentes cenários industriais, conclui-se que a frequência de 3,5 GHz é mais resistente aos obstáculos presentes no meio, sendo indicada caso ela seja capaz de atender a latência e confiabilidade desejadas. Com exceção do cenário *Dense Low*, que requer potência de 25 dBm para alcançar o ambiente inteiro, a potência de 10 dBm seria o suficiente para ser utilizada com frequências sub-6.

Caso seja necessário utilizar-se a frequência de 28 GHz, é requerido que se posicione o acesso em uma altura mais elevada do que os obstáculos, para que se possa aumentar o alcance do sinal, e que se utilize potência de 25 dBm ou mais.

4.2.2 Avaliação da latência e *jitter* (fim-a-fim) sob diferentes cenários industriais e distâncias

A Tabela 3 contém todos os valores médios de latência fim-a-fim obtidos e a Tabela 4 contém os valores médios de *jitter* obtidos. Reitera-se que, como os *seeds* das simulações não foram alterados, há resultados iguais para condições semelhantes. Isso acontece pois o simulador repete os mesmos valores em funções que dependem de aleatoriedade ou probabilidade.

Para a frequência de 3,5 GHz, com exceção da distância de 135m no cenário *Dense High*, todos os valores de média de latência ficaram próximos, variando apenas 3,5% entre as maiores e menores médias de cada cenário. No caso da distância de 135m e cenário *Dense High*, a diferença de 20% pode ser explicada devido aos valores aleatórios que regem a probabilidade de *Line of Sight* e posicionamento dos obstáculos que afetaram especificamente esse teste.

Para a frequência de 28 GHz, nota-se que, nos cenários *Low*, o valor médio de latência aumentou continuamente de acordo com o aumento de distância. Para os cenários *High*, esse aumento não foi constatado, uma vez que a propagação do sinal não foi tão afetada pelos obstáculos, já que o acesso está em uma altura maior. Em ambos os casos, os valores médios de latência estão de acordo com o mapa de SNR, levando-se em conta que quanto menor a SNR maior é a dificuldade de se transmitir uma informação e maiores perdas acontecem nas camadas de rádio.

Tabela 3 – Latência média, em ms, para cada cenário, frequência e distância

Cenário	Frequência (GHz)	Distância entre acesso e UE (m)			
		45	75	105	135
<i>Sparse Low</i>	3,5	0,885820	0,890025	0,894284	0,885820
	28	0,885820	0,903650	0,935311	1,002882
<i>Dense Low</i>	3,5	0,885820	0,885820	0,885820	0,903650
	28	0,903650	0,939311	2,324997	6,307310
<i>Sparse High</i>	3,5	0,885820	0,916918	0,885820	0,889999
	28	0,885820	0,907481	0,885820	0,903650
<i>Dense High</i>	3,5	0,885820	0,885820	0,885820	1,057222
	28	0,888659	0,885820	0,885820	0,903650
<i>High High</i>	3,5	0,885820	0,885820	0,885820	0,885820
	28	0,885820	0,885820	0,885820	0,885820

Fonte: elaborado pelo autor

A partir dos valores médios de *jitter*, expostos na Tabela 4, nota-se, novamente, que para a frequência de 3,5 GHz os valores foram muito semelhantes e pequenos (menos de 4% do valor de latência) com exceção do cenário *Dense High*

e distância 135m, o que era esperado uma vez que a latência desse teste também foi mais elevada.

Os valores de *jitter* para frequência de 28 GHz nos cenários *Low* apresentaram uma alta contínua, assim como os valores de latência. No entanto, com exceção do *jitter* de 0,67 ms encontrado na distância de 135m e cenário *Dense Low*, todos os valores são aceitáveis para manter o determinismo da rede.

Tabela 4 – *Jitter* médio, em ms, para cada cenário, frequência e distância

Cenário	Frequência (GHz)	Distância entre acesso e UE (m)			
		45	75	105	135
<i>Sparse Low</i>	3,5	0,000036	0,004339	0,008679	0,000036
	28	0,000036	0,000027	0,031848	0,044821
<i>Dense Low</i>	3,5	0,000036	0,000036	0,000036	0,000027
	28	0,000027	0,000009	0,008920	0,670900
<i>Sparse High</i>	3,5	0,000036	0,031768	0,000036	0,004321
	28	0,000036	0,021893	0,000036	0,000027
<i>Dense High</i>	3,5	0,000036	0,000036	0,000036	0,160393
	28	0,002929	0,000036	0,000036	0,000027
<i>High High</i>	3,5	0,000036	0,000036	0,000036	0,000036
	28	0,000036	0,000036	0,000036	0,000036

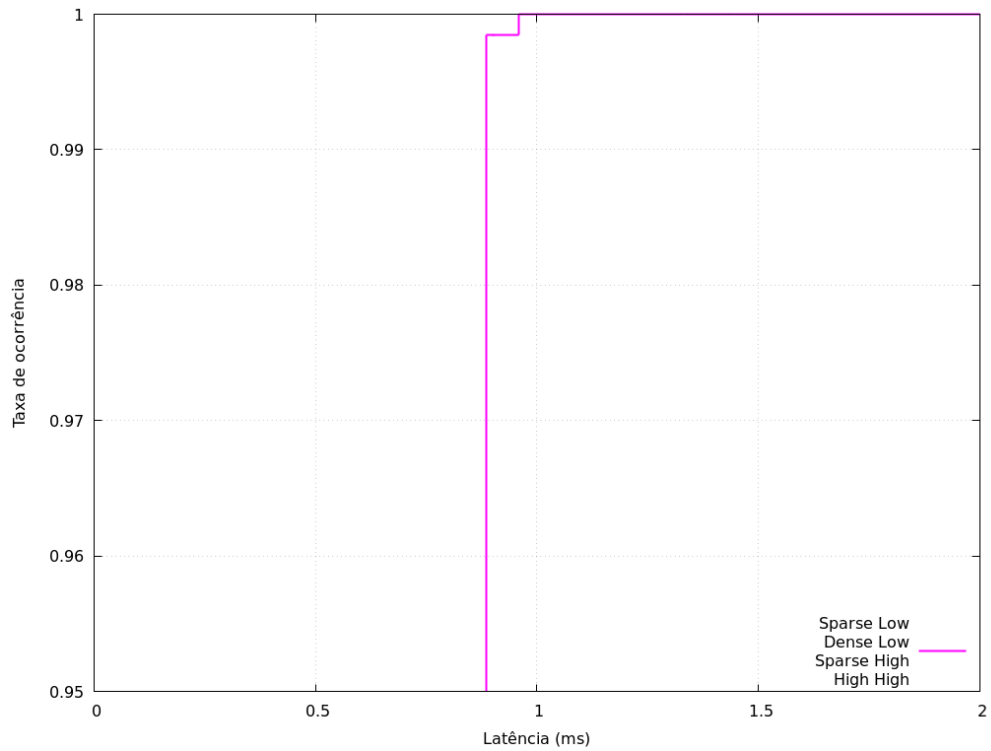
Fonte: elaborado pelo autor

Apesar de os valores médios de latência serem uma boa base para análise do impacto da distância e do cenário na latência, eles não mostram a distribuição das amostras medidas. Sendo assim, obtiveram-se os gráficos das Funções de Distribuição Acumulada para cada teste.

Na Figura 26 é apresentado o gráfico da FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 45m. Como pode-se visualizar, todas as amostras tiveram a mesma dinâmica e ficaram abaixo de 1ms.

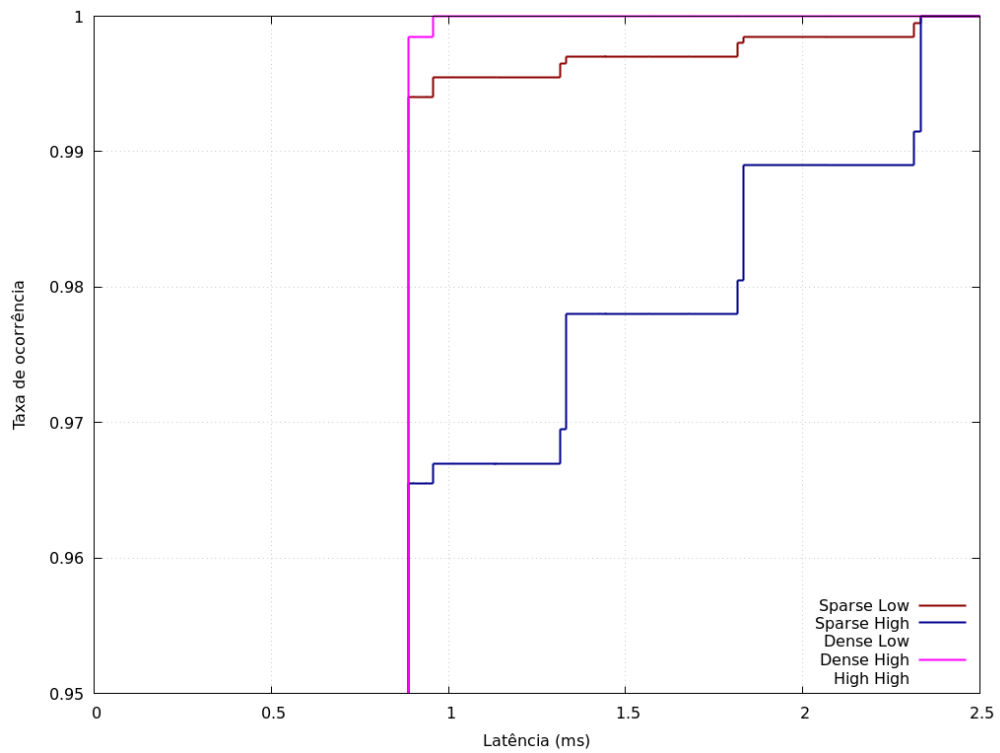
A FDA da frequência de 3,5 GHz e distância de 75m é apresentada na Figura 27. O cenário *Sparse Low* apresentou 99,55% das amostras abaixo de 1ms e o cenário *Sparse High* apresentou 96,7% das amostras abaixo de 1ms. Os outros cenários apresentaram mesma dinâmica e 100% das amostras abaixo de 1ms.

Figura 26 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 45m



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 27 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 75m

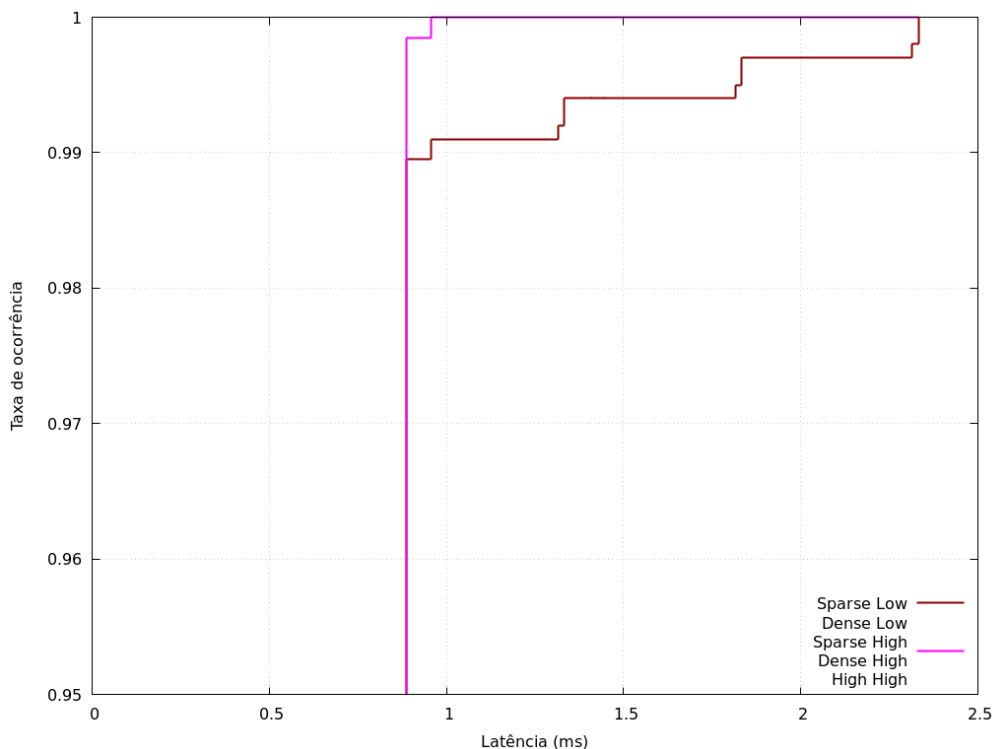


Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 28, em que é apresentada a FDA da frequência de 3,5 GHz e distância de 105m, nota-se dinâmica semelhante para o cenário *Sparse Low*, em que 99,1% das amostras ficaram abaixo de 1ms, no entanto, todos os outros cenários apresentaram mesma dinâmica e 100% das amostras abaixo de 1ms, em contraste com o cenário *Sparse High* da Figura 27. Essa mudança pode ser explicada por diferenças nas computações de alguns valores que dependem da distância, altura dos obstáculos, altura do acesso, dentre outros que afetam esses cenários especificamente.

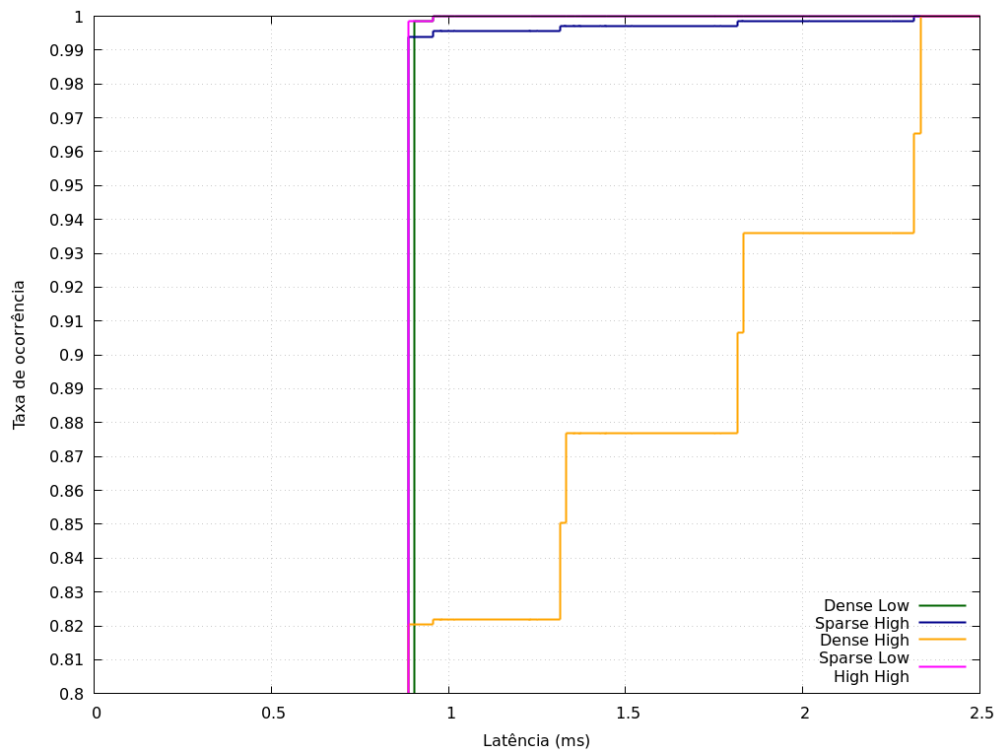
A última FDA da frequência de 3,5 GHz está exposta na Figura 29 e corresponde a distância de 135m. Dessa vez, os cenários que apresentaram amostras acima de 1ms foram *Dense High*, em que apenas 82,2% das amostras ficaram abaixo de 1ms, e *Sparse High*, em que 99,55% das amostras ficaram abaixo de 1ms. Para o caso do cenário *Dense High*, essa variação já era esperada uma vez que a média da latência foi superior às outras médias de latência das outras distâncias. O cenário *Sparse High* voltou a apresentar variações na distribuição das amostras, o que confirma que condições específicas de cada teste influenciam levemente nos resultados obtidos.

Figura 28 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 105m



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 29 – FDA para frequência de 3,5 GHz e distância de 135m



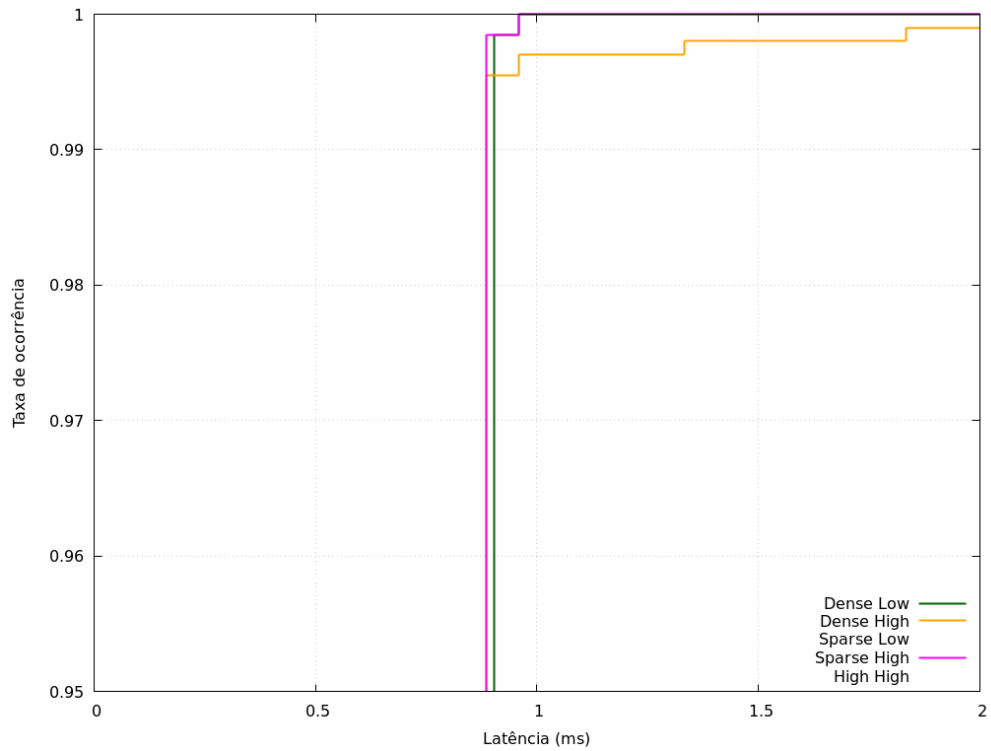
Fonte: elaborado pelo autor

Em todas as FDAs da frequência de 3,5 GHz, foi possível notar alguma oscilação nas amostras obtidas para cada cenário, com exceção do cenário *High High*, que apresentou a mesma dinâmica ao longo de todos os testes em diferentes distâncias. Sendo assim, o cenário *High High* demonstrou-se o mais robusto de todos os cenários.

Na Figura 30, a FDA da frequência de 28 GHz e distância de 45m foi obtida. O cenário *Dense High* apresentou 99,7% das amostras abaixo de 1 ms e o cenário *Dense Low* apresentou maior média de latência, porém com 100% de suas amostras abaixo de 1ms.

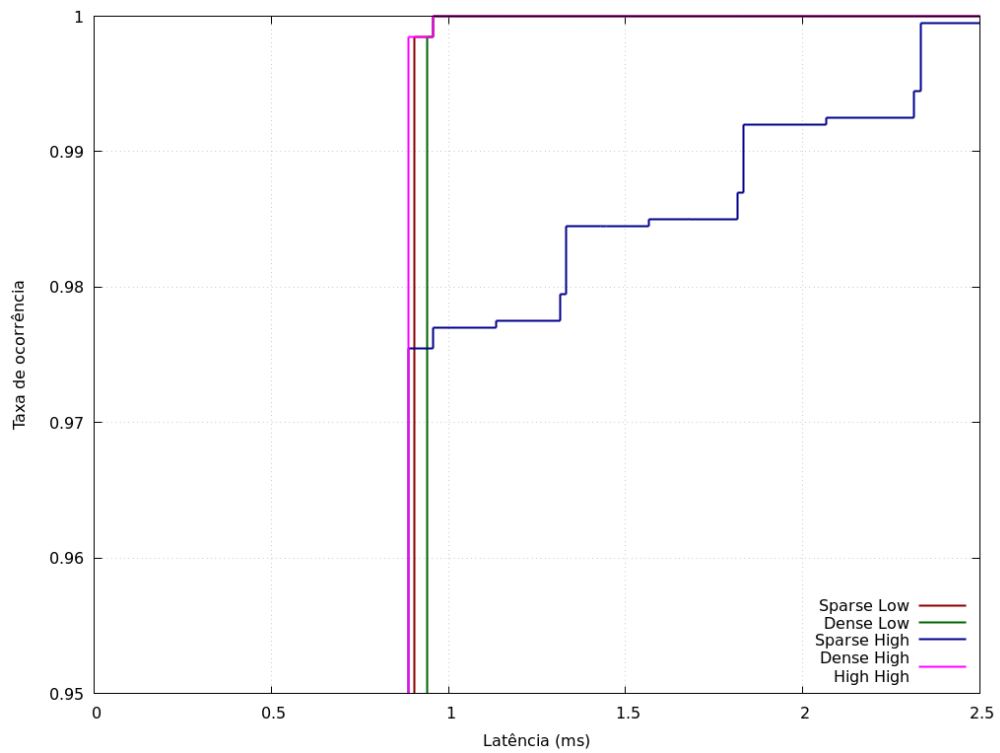
A Figura 31 contém a FDA da frequência de 28 GHz e distância de 75m. Nesse caso, o cenário *Sparse High* apresentou 97,70% das amostras abaixo de 1ms. Todos os outros cenários apresentaram 100% das amostras abaixo de 1ms, no entanto é possível notar, também, o aumento dos tempos de latência para os cenários *Low*.

Figura 30 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 45m



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 31 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 75m



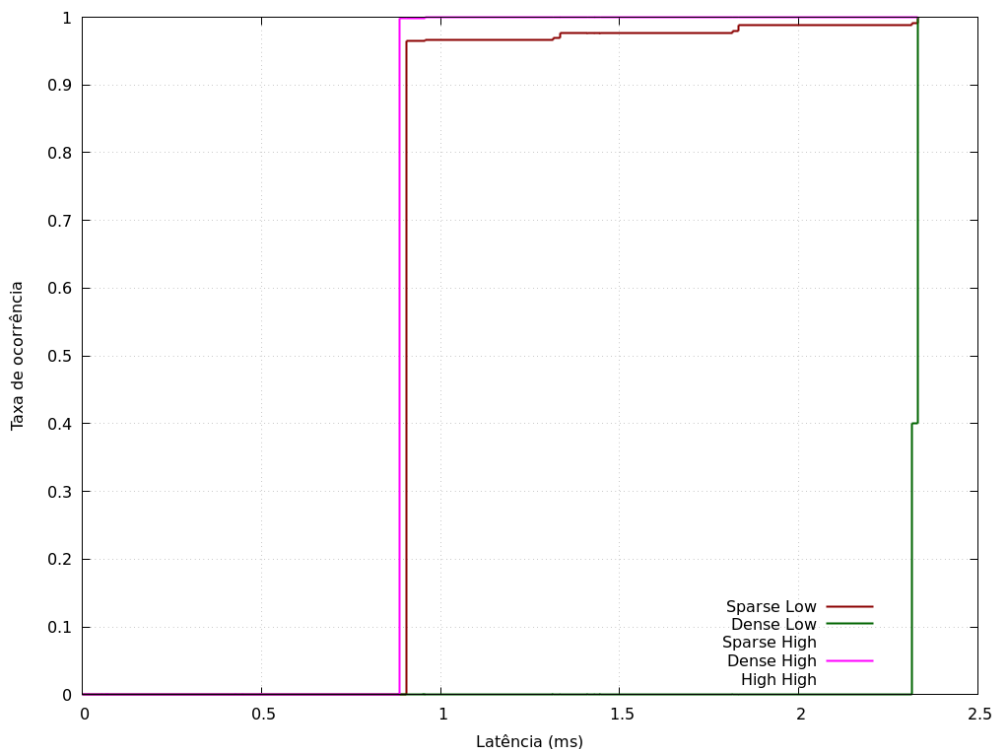
Fonte: elaborado pelo autor

Já na Figura 32, onde está representada a frequência de 28 GHz e distância de 105m, é possível perceber o expressivo aumento da latência no cenário *Dense Low*, sendo que 100% de suas amostras ficaram acima de 1ms. A latência do cenário *Sparse Low* também apresentou alta e apenas 96,60% de suas amostras ficaram abaixo de 1ms. Todos os outros cenários apresentaram mesma dinâmica e 100% das amostras abaixo de 1ms.

Finalmente, a FDA da frequência de 28 GHz e distância de 135m está na Figura 33. Novamente o cenário *Dense Low* apresentou um expressivo aumento no tempo da latência com 100% das amostras acima de 3,5ms, o que era esperado, dado que a SNR nessa distância é baixíssima e há mais perdas e retransmissões na comunicação. O cenário *Sparse Low* repetiu a tendência da distância de 105m e apresentou apenas 94,85% das amostras abaixo de 1ms. Os outros cenários apresentaram 100% das amostras abaixo de 1ms.

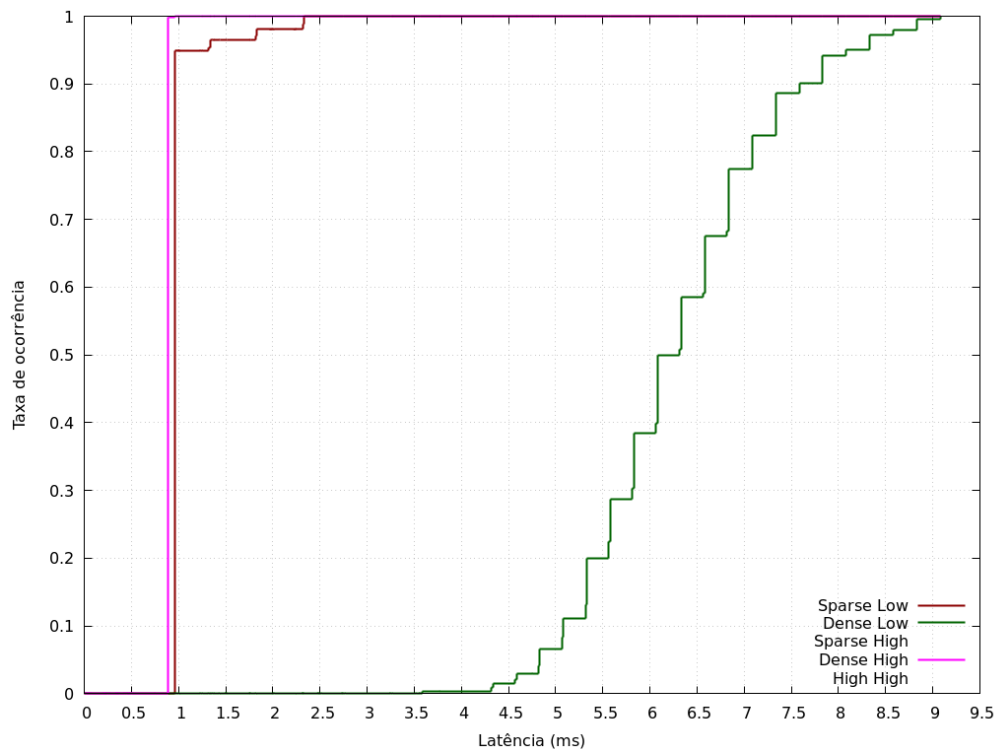
Assim como na frequência de 3,5 GHz, todos os cenários, com exceção do *High High*, apresentaram alguma oscilação ao longo dos testes na frequência de 28 GHz. Em vista disso, prova-se que a FDA é útil para determinação da confiabilidade da comunicação em determinados cenários e configurações de rádio.

Figura 32 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 105m



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 33 – FDA para frequência de 28 GHz e distância de 135m



Fonte: elaborado pelo autor

4.2.3 Avaliação da latência e *jitter* (fim-a-fim) sob diferentes frequências e numerologias

Os dados nesse conjunto de testes foram divididos em duas tabelas: Tabela 5, para a média dos dados de latência fim-a-fim, e Tabela 6, para a média dos dados de *jitter* fim-a-fim.

Segundo a Tabela 5, nota-se que a frequência e a banda, para *payload* de 100 bytes, não influenciou na média da latência, havendo apenas pequenas variações. A numerologia, por sua vez, teve um grande impacto na redução da latência em todos os testes.

A redução da latência para cada incremento de numerologia ficou entre 44% e 47% comparada a latência anterior para as numerologias 0, 1, 2 e 3. Para as numerologias 4 e 5, a redução ficou entre 32% e 39%.

Já para os valores de *jitter*, conforme Tabela 6, apesar de a numerologia 1 ter um forte impacto na redução do *jitter* comparado a numerologia 0, todas as outras numerologias não tiveram impacto expressivo na sua variação. Da numerologia 1 a 5, o que impactou na redução do *jitter* foi o aumento da largura de

banda, sendo que na banda de 400 MHz os valores foram muito próximos de 0. Apesar disso, todos os valores de *jitter*, tirando-se os obtidos com numerologia 0, foram bastante baixos a ponto de não influenciar no determinismo da rede.

Tabela 5 – Latência média (ms) para cada frequência e numerologia μ

Freq. e Banda	$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=2$	$\mu=3$	$\mu=4$	$\mu=5$
3,5 GHz (50 MHz)	2,994569	1,671856	0,885954	0,493109	0,301020	0,202770
3,5 GHz (100 MHz)	2,993712	1,671641	0,885820	0,492935	0,296492	0,200510
28 GHz (100 MHz)	2,993712	1,671641	0,885820	0,492935	0,300953	0,202741
28 GHz (400 MHz)	2,992855	1,671427	0,885740	0,492873	0,296436	0,200454

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 6 – *Jitter* médio (ms) para cada frequência e numerologia μ

Freq. e Banda	$\mu=0$	$\mu=1$	$\mu=2$	$\mu=3$	$\mu=4$	$\mu=5$
3,5 GHz (50 MHz)	0,499607	0,000071	0,000080	0,000129	0,000129	0,000093
3,5 GHz (100 MHz)	0,499679	0,000036	0,000036	0,000040	0,000065	0,000065
28 GHz (100 MHz)	0,499679	0,000036	0,000036	0,000040	0,000062	0,000064
28 GHz (400 MHz)	0,499750	0,000000	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009

Fonte: elaborado pelo autor

Analisando-se a Tabela 5, já é possível determinar que as numerologias 0 e 1 não são adequadas para aplicações que requerem latência máxima de 1ms. Ainda, ressalta-se que a latência exposta está em seu valor médio, logo, ela não indica, necessariamente, que a latência sempre ficou abaixo de 1ms.

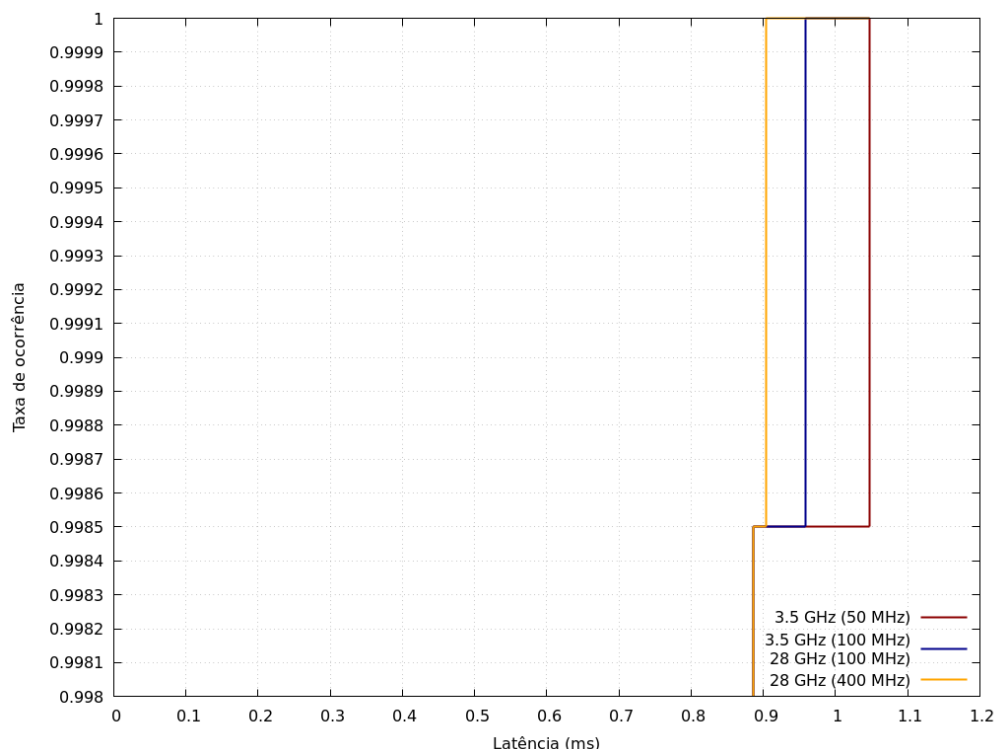
A Figura 34 contém a FDA da latência para todas as frequências com numerologia 2. A frequência de 3,5 GHz com banda de 50 MHz apresentou 0,15% das amostras superior a 1ms, atingindo, aproximadamente, 1,05ms. Em todos os

outros casos, 100% das amostras ficaram abaixo de 1ms, porém com uma média de 0,88ms. Destaca-se que o ambiente pode sofrer com interferências, variação no número de nodos e distâncias maiores entre o UE e o acesso, o que acarretaria em uma latência superior, logo, deve-se ter esse fator em vista ao escolher-se a numerologia e frequência.

A FDA da numerologia 3 está na Figura 35. Nessa numerologia, todas as amostras ficaram inferiores a 1ms de latência e, menor ainda, foram as latências máximas das bandas iguais e superiores a 100 MHz, que não passaram de 0,58ms. Para a frequência de 3,5 GHz e banda de 50 MHz, a latência máxima foi de 0,76ms.

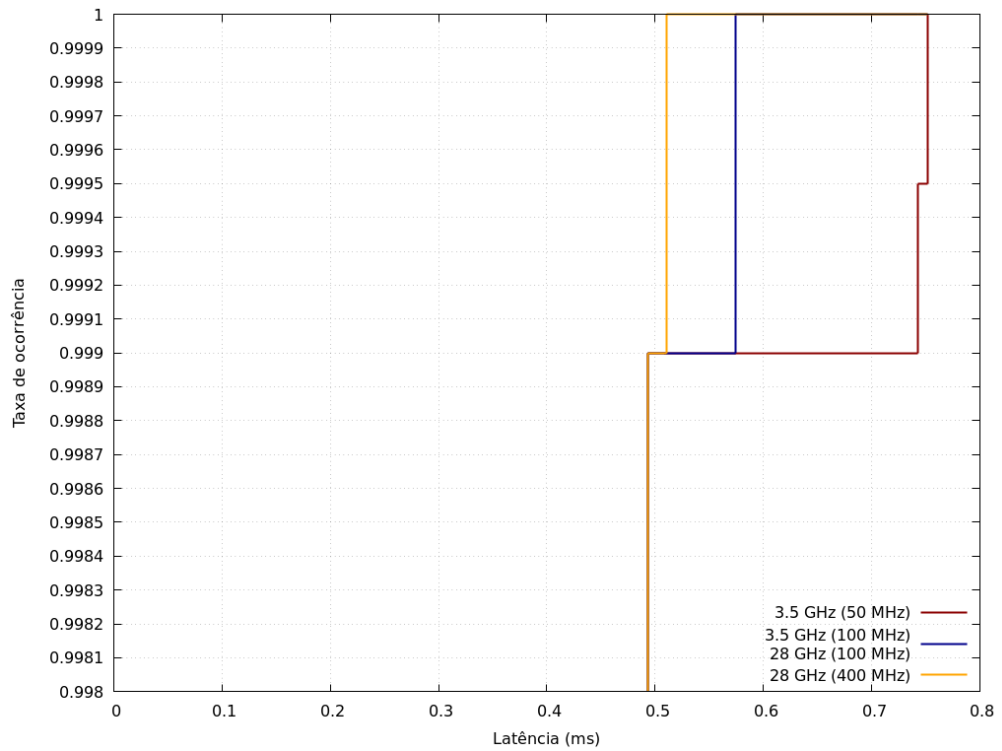
Na Figura 36, onde está exposta a FDA para numerologia 4, visualiza-se que os valores máximos de latência das amostras foram menores ainda. Na frequência de 3,5 GHz e banda de 50 MHz, 0,05% das amostras atingiram o valor máximo de 0,56ms. Para todas as outras frequências, os valores máximos ficaram abaixo de 0,43ms, sendo que para a banda de 400 MHz a latência máxima foi de 0,32ms.

Figura 34 – FDA para numerologia 2



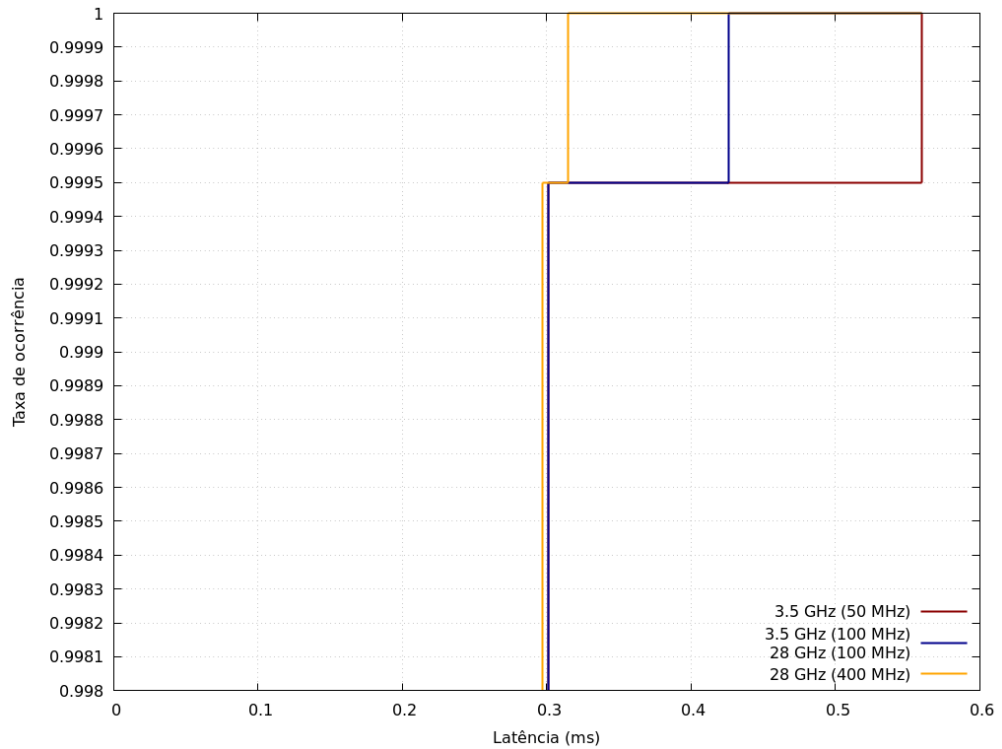
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 35 – FDA para numerologia 3



Fonte: elaborado pelo autor

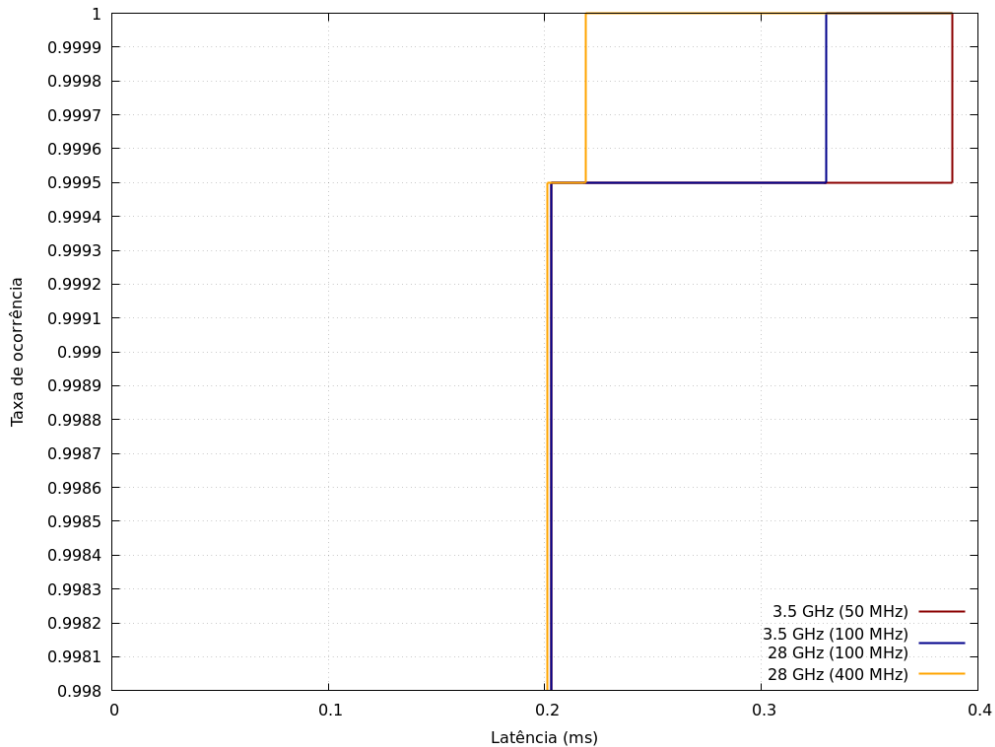
Figura 36 – FDA para numerologia 4



Fonte: elaborado pelo autor

Por fim, para numerologia 5, cujos valores de latência estão expostos na Figura 37, os valores máximos de latência foram os menores de todas as numerologias, atingindo 0,39ms em 0,05% das amostras da frequência de 3,5 GHz e banda de 50 MHz. Para as bandas de 100 MHz, a latência máxima foi de 0,33ms e para a banda de 400 MHz o valor máximo foi de 0,22ms.

Figura 37 – FDA para numerologia 5

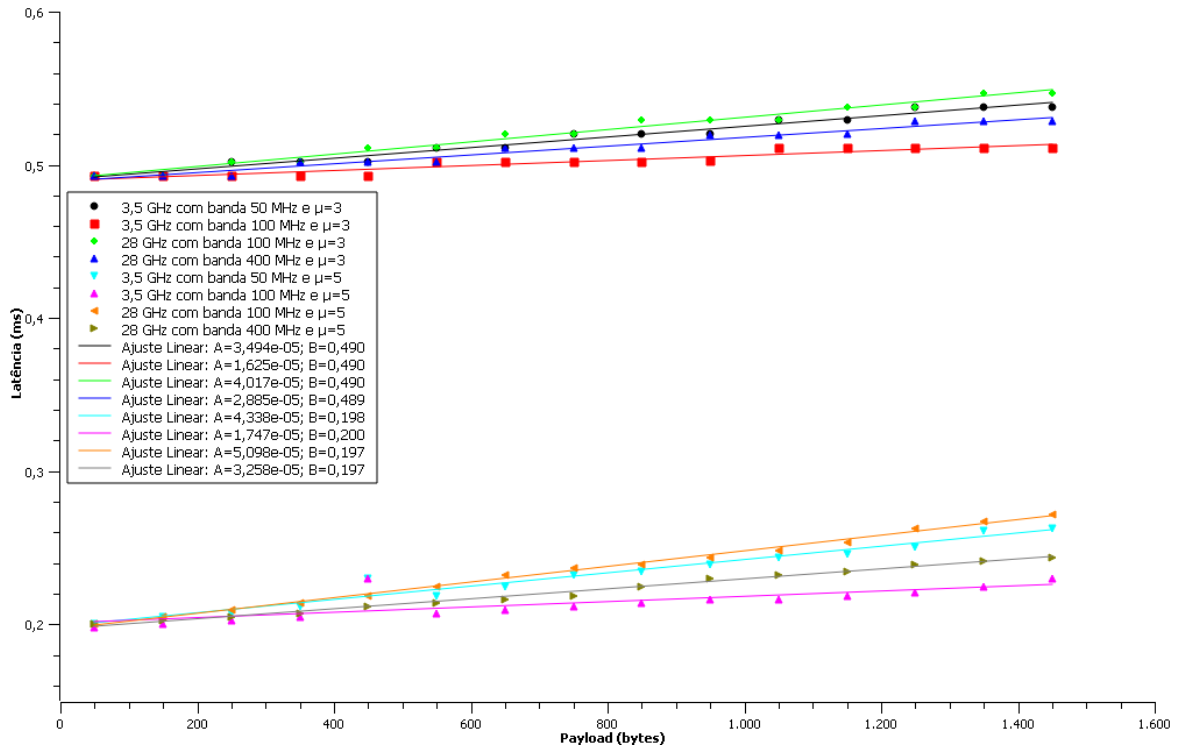


Fonte: elaborado pelo autor

4.2.4 Avaliação da latência (fim-a-fim) sob diferentes frequências, numerologias e tamanhos de pacotes

A Figura 38 mostra o gráfico da média de latência fim-a-fim atingida em função de cada tamanho de *payload* testado, bem como seus ajustes lineares que seguem a equação $y(x) = Ax + B$.

Conforme o gráfico, os coeficientes lineares (B) de todos os ajustes para uma dada numerologia foram semelhantes, ou seja, para pacotes pequenos (até 250 *bytes*) os valores de latência são muito próximos para todas as frequências e bandas, fato corroborado pelos valores de latência obtidos na Tabela 5.

Figura 38 – Média de latência em função do tamanho da *payload*

Fonte: elaborado pelo autor

Um dado interessante do gráfico na Figura 38 é o coeficiente angular dos ajustes lineares da frequência de 3,5 GHz e banda de 100 MHz em ambas as numerologias, que foi o menor dentre todos os outros coeficientes angulares. Isso significa que a latência dessa frequência e banda é menos suscetível a aumentos quando a *payload* é aumentada. Esse fato poderia ser explicado devido essa frequência atingir níveis de SNR maiores, diminuindo as perdas na camada de rádio.

Outro ponto interessante é o coeficiente angular da frequência de 3,5 GHz e banda de 50 MHz que ficou menor do que o coeficiente angular da frequência de 28 GHz e banda de 100 MHz, ou seja, os valores de latência da primeira frequência foram menores para *payloads* mais altas comparados aos valores da segunda.

O valor da latência para maiores *payloads* foi menor para maior largura de banda de uma mesma frequência nas duas numerologias, fato corroborado pela redução do coeficiente angular. Por exemplo, para frequência de 3,5 GHz, a banda de 100 MHz apresentou redução de 54% no coeficiente angular na numerologia 3 comparado a banda de 50 MHz e, para numerologia 5, essa redução foi de 60%. Já para a frequência de 28 GHz, a redução no coeficiente angular da banda de 400

MHz comparada a banda de 100 MHz, para numerologia 3, foi de 28% e, para numerologia 5, foi de 36%.

Em ambas as numerologias, percebe-se que não houve grande impacto do tamanho da *payload* na latência, o que possibilitaria a utilização das frequências testadas para transmissão de pacotes de até 1500 *bytes*, no entanto, as frequências abaixo de 3,5 GHz não suportam numerologias iguais ou superiores a 3. Também, a numerologia 5 não foi padronizada para ser utilizada em bandas menores do que 400 MHz. Sendo assim, para seguir-se a padronização, somente a frequência de 28 GHz (bandas de 100 e 400 MHz) com numerologia 3 e frequência de 28 GHz (banda de 400 MHz) com numerologia 5 poderiam ser utilizadas.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Em vista dos resultados obtidos, conclui-se que o simulador 5G-LENA é uma poderosa ferramenta para avaliação de redes 5G em diferentes tipos de cenários, permitindo extrair dados importantes acerca da influência de determinados parâmetros na qualidade do sinal e na eficiência da comunicação.

Testes em cenários industriais são difíceis de serem realizados fisicamente, uma vez que são ambientes muito movimentados e que requerem cuidados redobrados para garantir a segurança de todos os envolvidos. Além disso, montar um ambiente 5G real é uma tarefa custosa financeiramente e os testes estariam limitados ao orçamento do projeto.

A utilização de simuladores possibilita que cenários complexos sejam avaliados de forma muito mais simples, barata e rápida comparada aos testes físicos. É claro que os dados extraídos podem não ser 100% compatíveis com os dados que seriam extraídos de um ambiente real, no entanto, eles ainda são muito úteis para avaliação de tendências e correlações.

O emprego de cenários industriais simulados previstos nas padronizações da 3GPP conferem ainda mais fidedignidade às simulações realizadas, uma vez que são baseados em calibrações e medições de ambientes reais, ou seja, o simulador é calibrado com o intuito de tornar a propagação, interferência, perdas e demais variáveis o mais próximo possível dos cenários reais. Ainda, longas discussões envolvendo diversas instituições e agências relevantes ocorreram com o objetivo de se elencar os parâmetros dos ambientes padronizados.

No que tange aos resultados, o primeiro conjunto de testes, que avaliou a SNR para todos os cenários industriais, demonstrou que a frequência milimétrica de 28 GHz têm maior perda de sinal na propagação, sendo necessário o aumento da potência de 10 dBm para 25 dBm para que o sinal pudesse atingir distâncias mais longas.

Os testes de SNR também demonstraram a superioridade dos cenários *High* face aos cenários *Low*, o que, de certa forma, já era esperado dado que há menos objetos no caminho do sinal entre acesso e o UE. Semelhantemente, os cenários *Sparse* tiveram maior propagação de sinal do que os cenários *Dense* para uma mesma altura, fator explicado pela menor concentração e altura dos obstáculos.

Ao se analisar os mapas de SNR, outra observação interessante é que há duas formas de se aumentar a SNR no ambiente fabril: a primeira seria a utilização de mais acessos e a segunda seria o aumento da potência de transmissão, no entanto, caso ambas sejam utilizadas ao mesmo tempo, o nível de SINR seria afetado com mais interferência, então deve-se dosar o nível de sinal conforme a quantidade de acessos no meio. Além disso, fatores que não foram avaliados e que também impactariam no nível do sinal seria o emprego de *beamforming* e um número maior de elementos de antenas de acesso.

O segundo conjunto de testes, que avaliou a variação da latência e *jitter* em função de diferentes distâncias e tipos de cenários industriais, mostrou que a frequência de 3,5 GHz é mais robusta às interferências e perdas presentes no meio, porém, as FDAs provaram que alguns pacotes podem ter latências muito superiores à média em cenários em que há a presença de obstáculos no caminho das ondas.

Nas médias de latência das frequências de 28 GHz no segundo conjunto, notou-se que nos cenários *Low*, em que a propagação foi mais limitada, houve um aumento contínuo da latência em função da distância, isso é explicado devido as perdas e retransmissões de uma comunicação com baixa SNR. Já as FDAs demonstraram que a confiabilidade da latência variou de acordo com o tipo de cenário e a distância, assim como na frequência de 3,5 GHz.

Um ponto que se deve reiterar acerca do segundo experimento é que o cenário *High High* apresentou melhor confiabilidade de latência, sendo que suas dinâmicas nas FDAs foram bastante estáveis. Isso se dá, pois, esse cenário não possui obstáculos na trajetória da transmissão entre o acesso e o UE. Logo, o posicionamento da antena do UE e do acesso devem estar acima dos obstáculos para que seja possível aumentar a confiabilidade da comunicação. Caso não seja possível posicioná-las em altura mais elevada, outros parâmetros precisam ser modificados, como a numerologia ou a potência do sinal.

Já sobre o terceiro conjunto de testes, provou-se que a frequência e banda não influenciou nas médias de latências, sendo a numerologia o fator determinante para abaixá-las. No entanto, para as médias de valores de *jitter*, maiores larguras de banda provocaram redução nos valores de *jitter* nas numerologias de 1 a 5, enquanto que alterações nas numerologias provocaram oscilações nas variações das médias de *jitter*, com exceção do aumento da numerologia de 0 para 1, que provocou uma grande queda na média. A variação nos valores de *jitter* provocada

pelas variações de numerologias de 1 a 5 são difíceis de serem correlacionadas, ocorrendo provavelmente em razão de fatores ambientais.

A partir das médias de latência do terceiro experimento, afere-se que numerologias 0 e 1 não são capazes de atender aplicações que exijam 1ms de atraso máximo. No caso da numerologia 2, as suas médias de latência ficaram dentro do limite de 1ms, porém sua FDA demonstrou que, para frequência de 3,5 GHz e banda de 50 MHz, 0,15% dos pacotes chegaram em tempo superior a 1ms, ou seja, a banda de 50 MHz apresentou menor confiabilidade na numerologia 2. Todas as numerologias iguais a 3 ou superior apresentaram confiabilidade de 100% para pacotes abaixo de 1ms.

A numerologia 4 não foi padronizada para o envio de dados de usuário, as numerologias de 3 a 5 não foram padronizadas de modo a suportar as frequências FR1, a numerologia 2 não suporta bandas acima de 200 MHz e a numerologia 5 não suporta bandas abaixo de 400 MHz. Logo, na prática, as frequências e numerologias que poderiam ser utilizadas para atingir latência inferior a 1ms no cenário testado seriam de 3,5 GHz (100 MHz) e 28 GHz (100 MHz) para numerologia 2, de 28 GHz (100 MHz e 400 MHz) para numerologia 3 e 28 GHz (400 MHz) para numerologia 5.

Finalmente, no quarto e último experimento, focado na medição da influência da frequência, banda, numerologia e tamanho do pacote na média de latência, todas as dinâmicas apresentaram tendência linear, em que a média de latência aumentava de acordo com o tamanho do pacote. Porém, para pacotes de até 250 *bytes*, essa variação foi mínima, uma vez que todos os coeficientes angulares são muito pequenos e os coeficiente lineares são parecidos. Ainda no quarto experimento, as reduções no coeficiente angular provocadas pelo aumento da largura de banda para uma mesma numerologia e frequência central, provam que em maiores bandas o tamanho dos pacotes não influencia na média da latência tanto quanto nas bandas menores. Isso pode ser explicado devido ao fato de bandas maiores serem capazes de transportarem mais dados na transmissão, equalizando-se, assim, a latência de pacotes maiores comparada a de pacotes menores.

Nem todos os conjuntos de frequências, bandas e numerologias do quarto experimento podem ser utilizados na prática de acordo com o padrão da 3GPP. Logo, somente a frequência de 28 GHz (100 MHz e 400 MHz) poderia ser utilizada com a numerologia 3 e a frequência de 28 GHz (400 MHz) poderia ser utilizada com a numerologia 5.

Os dados obtidos são de grande importância para o projeto de uma rede industrial 5G, oferecendo modelos de atuação para os elementos da rede e as consequências de uma determinada escolha de parâmetros. O experimento fornece uma referência de quais ferramentas estão disponíveis para esse tipo de simulação e os métodos que podem ser utilizados para trabalhos relacionados. Além disso, é possível elencar alguns pontos que devem ser desenvolvidos no simulador para melhor precisão dos resultados, que são: adaptação das camadas superiores de rádio para atender completamente a padronização 5G NR; modelo de Core 5G próprio (sem depender de elementos da geração LTE); e melhoria dos modelos de 5QI para melhor gerenciamento do tráfego de automação críticos.

Futuros trabalhos podem ser realizados objetivando a análise do tráfego no *Uplink* de forma isolada e de forma simultânea com o *Downlink*. Outros protocolos também podem ser testados, como Ethernet por meio da sessão PDU Ethernet, comparando-se a eficiência com a pilha UDP/IP. Além disso, a influência da taxa de envio de pacotes na latência poderia ser avaliada com o intuito de analisar a melhor configuração para a *TSN-Bridge*, complementando os resultados encontrados sobre o tamanho da *payload*. Análises na camada MAC para medições das perdas e retransmissões também são relevantes para correlacionar esses dados com os valores de latência e *jitter*. Referente ao cenário, características como o número de UEs e gNBs poderiam ser alteradas de modo a medir o impacto na transmissão.

REFERÊNCIAS

- 3GPP. *5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception*. TS 38.104, version 17.6.0, Release 17, Ago. 2022a. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/17.06.00_60/ts_138104v170600p.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.
- 3GPP. *5G; NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2*. TS 38.300, version 17.1.0, Release 17, Ago. 2022b. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/17.01.00_60/ts_138300v170100p.pdf. Acesso em: 02 out. 2022.
- 3GPP. *5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. TR 38.901, version 17.0.0, Release 17, Abr. 2022c. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/17.00.00_60/tr_138901v170000p.pdf. Acesso em: 20 out. 2022.
- 3GPP. *5G; System architecture for the 5G System (5GS)*. TS 23.501, version 17.6.0, Release 17, Set. 2022d. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123500_123599/123501/17.06.00_60/ts_123501v170600p.pdf. Acesso em: 02 out. 2022.
- 3GPP. *Tdoc R1-1909704: Indoor Industrial Channel Model Calibration Results*. TSG-RAN WG1 Meeting #97, 2019. Disponível em: https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_98/Docs/R1-1909704.zip. Acesso em: 20 out. 2022.
- AIJAZ, A. Private 5G: The Future of Industrial Wireless. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 136-145, Dez. 2020, doi: 10.1109/MIE.2020.3004975.
- CHANDRAMOULI, D.; LIEBHART, R.; PIRSKANEN, J. *5G for the Connected World*. [S.l.]: Wiley, 2019.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2020.
- DOMINGUEZ-BOLANO, T. *et al.* The GTEC 5G link-level simulator. *1st International Workshop on Link- and System Level Simulations (IWSLS)*. 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWSLS.2016.7801585.
- ERICSSON. *5G URLLC from Ericsson to accelerate automation at Audi factory*. 18 fev. 2020. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/news/2020/2/5g-for-factory-automation>. Acesso em: 30 ago. 2022.
- GINTHÖR, D. *et al.* Analysis of Multi-user Scheduling in a TSN-enabled 5G System for Industrial Applications. *2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)*, Orlando, FL, USA, 2019, pp. 190-199, doi: 10.1109/ICII.2019.00044.

IEEE. *IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group*. Disponível em: <https://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>. Acesso em: 30 ago. 2022.

IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Bridges and Bridged Networks -- Amendment 31: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements. *IEEE Std 802.1Qcc-2018 (Amendment to IEEE Std 802.1Q-2018 as amended by IEEE Std 802.1Qcp-2018)*, pp. 1-208, 31 Out. 2018, doi: 10.1109/IEEEESTD.2018.8514112.

JAO, C. -K. *et al.* WiSE: A System-Level Simulator for 5G Mobile Networks. *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 4-7, Abr. 2018, doi: 10.1109/MWC.2018.8352614.

KALTENBERGER, F. *et al.* The OpenAirInterface 5G New Radio Implementation: Current Status and Roadmap. *WSA 2019; 23rd International ITG Workshop on Smart Antennas*, pp. 1-5, 2019.

KARAMYSHEV, A. *et al.* Fast and accurate analytical tools to estimate network capacity for URLLC in 5G systems. *Computer Networks*, vol. 178, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107331.

KHOSHNEVISAN, M. *et al.* 5G Industrial Networks With CoMP for URLLC and Time Sensitive Network Architecture. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 4, pp. 947-959, Abr. 2019, doi: 10.1109/JSAC.2019.2898744.

KOUTLIA, K. *et al.* Calibration of the 5G-LENA System Level Simulator in 3GPP reference scenarios. *Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT)*, vol. 119, n. 102580, Maio 2022, doi: 10.1016/j.simpat.2022.102580.

LARRAÑAGA, A. *et al.* Analysis of 5G-TSN Integration to Support Industry 4.0. *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, 2020, pp. 1111-1114, doi: 10.1109/ETFA46521.2020.9212141.

MAILER, C. *Plataforma de CORE 5G em nuvem para disponibilização de funções de rede como serviço*. 2020. 54 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Controle e Automação, Departamento de Engenharia de Controle, Automação e Computação, Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Blumenau, Blumenau, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/209624>. Acesso em: 15 abr. 2022.

MARTENVORMFELDE, L. *et al.* A Simulation Model for Integrating 5G into Time Sensitive Networking as a Transparent Bridge. *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, 2020, pp. 1103-1106, doi: 10.1109/ETFA46521.2020.9211877.

MARTIRADONNA, S. *et al.* 5G-Air-simulator: An open-source tool modeling the 5G air interface. *Computer Networks*, vol. 173, n. 107151, Maio 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107151.

MATHWORKS. 5G Toolbox, 2021. Simulate, analyze and tests 5G communications Systems. *Math works*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/5g.html>. Acesso em: 07 nov. 2022.

MEZZAVILLA, M. *et al.* End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2237-2263, Abr. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2828880.

MÜLLER, M. *et al.* Flexible multi-node simulation of cellular mobile communications: the Vienna 5G System Level Simulator. *Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2018, n. 227, Set. 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1238-7.

NARDINI, G. *et al.* Simu5G: A System-level Simulator for 5G Networks. *Proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pp. 68-80, 2020, doi: 10.5220/0009826400680080.

OTTA, L. A.; BITENCOURT, R. Tecnologia 5G vai ser testada na WEG. *Valor Econômico*, Brasília, 12 nov. 2020. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2020/11/12/tecnologia-5g-vai-ser-testada-na-weg.ghtml>. Acesso em: 30 ago. 2022.

PATRICIELLO, N. *et al.* An E2E Simulator for 5G NR Networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 96, n. 101933, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.simpat.2019.101933.

PENTTINEN, J. *5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications*. 1. ed. Hoboken, NJ, EUA: Wiley, 2019.

RAMOS, A. *NS-3 InF Channel Modelling*. Disponível em: <https://gitlab.com/andre.ramos/ns-3-inf-channel-modeling>. Acesso em: 07 out. 2022.

RAMOS, A. *et al.* Implementation and Calibration of the 3GPP Industrial Channel Model for ns-3. *Proceedings of the 2022 Workshop on ns-3 (WNS3 '22)*. Association for Computing Machinery. New York, USA, pp. 10–16, 2022, doi: 10.1145/3532577.3532596.

ROMMER, S. *et al.* *5G Core Networks: Powering Digitalization*. [S.l.]: Academic Press, 2019.

SEGURA, D. *et al.* 5G Numerologies Assessment for URLLC in Industrial Communications. *Sensors*, vol. 21, n. 7: 2489, Abr. 2021, doi: 10.3390/s21072489.

SUN, S.; MACCARTNEY, G. R.; RAPPAPORT, T. S. A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-7, Jul. 2017, doi: 10.1109/ICC.2017.7996792.

URBINA, D. I. *et al.* Limiting the impact of stealthy attacks on industrial control systems. *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, pp. 1092–1105, Oct. 2016, doi: 10.1145/2976749.2978388.