



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
AMAZONAS – IFAM  
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL  
CURSO TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

**MARCUS PAULO SERRÃO RIBEIRO**

**O IMPACTO DA TECNOLOGIA 5G NA REDUÇÃO DA LATÊNCIA E AUMENTO  
DA CAPACIDADE EM REDES DE ALTA DEMANDA**

**MANAUS/AM  
2025**

**MARCUS PAULO SERRÃO RIBEIRO**

**O IMPACTO DA TECNOLOGIA 5G NA REDUÇÃO DA LATÊNCIA E AUMENTO  
DA CAPACIDADE EM REDES DE ALTA DEMANDA**

Trabalho de Conclusão de curso submetido ao curso de graduação em Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Alyson de Jesus dos Santos.

**MANAUS/AM  
2025**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R484i	<p>Ribeiro, Marcus Paulo Serrão. O impacto da tecnologia 5G na redução da latência e aumento da capacidade em redes de alta demanda / Marcus Paulo Serrão Ribeiro. — Manaus, 2025. 46f.: il. color.</p> <p>Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, <i>Campus</i> Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, 2025. Orientador: Prof.<sup>o</sup> Alyson de Jesus dos Santos, Dr.</p> <p>1. Tecnologia 5G. 2. Rede de alta demanda 3. Baixa latência. I. Santos, Alyson de Jesus dos. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.</p> <p>CDD 621.382</p>
-------	--

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734).

## ANEXO 7

### ATA DE DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 10 de janeiro de 2025, às 18h, o(a) discente Marcus Paulo Serrão Ribeiro apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para avaliação da Banca Examinadora constituída pelos seguintes integrantes: Prof(a). (docente-orientador), Prof. Dr. Alyson de Jesus dos Santos, Prof. Dr. Vitor Bremgartner da Frota (Membro 1) e Prof. Msc Marlos Andre Silva Rodrigues (Membro 2). A sessão publica de defesa foi aberta pelo(a) presidente da banca, que apresentou a Banca Examinadora e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC, que tem como título DESEMPENHO DA TECNOLOGIA 5G EM UMA ÁREA PERIFÉRICA NA CIDADE DE MANAUS. Na sequência, o(a) discente teve até 30 minutos para a comunicação oral de seu trabalho. Cada integrante da banca examinadora fez suas arguições após a defesa do mesmo. Ouvidas as explicações do(a) discente, a banca examinadora, reunida em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberou e decidiu pela APROVAÇÃO com média final 7,5 do referido trabalho.

Foi dada ciência ao(à) discente que a versão final do trabalho deverá ser entregue até o dia 10/02/2025, com as devidas alterações sugeridas pela banca. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 18h, sendo lavrada a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo(a) discente.

Prof.(a) Orientador(a)/Presidente: Alyson de Jesus dos Santos

Prof.(a) Avaliador 1: [Assinatura]

Prof.(a) Avaliador 2: [Assinatura]

Discente: Marcus Paulo Serrão Ribeiro

*Dedico com sublime carinho aos  
que sonharam intensamente com isso à  
minha família, aos meus pais, aos meus  
amigos e colegas da faculdade, pois  
sem a ajuda deles isso não seria  
possível.*

## **AGRADECIMENTOS**

Eu sempre gostei de realizar minhas atividades sozinho, mas existem situações na vida em que sem o apoio e a colaboração de outras pessoas seria impossível concluí-las.

Quando pensei em fazer esse projeto de pesquisa, contei com o apoio de várias pessoas que me acompanharam nessa jornada. E a essas pessoas através de poucas palavras, procurei expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao nosso DEUS que tem me acompanhado em todos os momentos da minha vida;

Aos meus professores que foram responsáveis em viabilizar esse meu projeto, bem como aos meus colegas que me ofereceram a oportunidade e o desafio em participar desta turma;

À minha família, pelo seu apoio, paciência e compreensão da minha dedicação no acompanhamento do curso e no desenvolvimento desse trabalho, além das contribuições e participações de todos que ajudaram na realização desse sonho.

*“O homem não teria alcançado o possível se,  
repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.”  
(Max Weber)*

## **Resumo**

A crescente demanda por tráfego de dados em redes móveis tem gerado desafios de desempenho, especialmente quando usuários acessam conteúdos hospedados em servidores internacionais. Neste contexto, a tecnologia 5G se apresenta como uma solução avançada, com capacidade de aumentar a eficiência, reduzir a latência e otimizar o uso de recursos. Este trabalho tem como objetivo analisar como o 5G resolve o problema da lentidão em situações de alto tráfego, explorando recursos como o Network Slicing, computação em borda, Massive MIMO, e a agregação de espectro. Esses recursos permitem a criação de redes virtuais dedicadas, o processamento de dados mais próximo do usuário final e uma maior largura de banda, mesmo em cenários de sobrecarga. A pesquisa se baseará em simulações e estudos de casos, comparando o desempenho do 5G com gerações anteriores, como o 4G, em termos de latência, capacidade e eficiência espectral. Além disso, serão discutidos os impactos dessa tecnologia em ambientes de alta densidade e os desafios regulatórios associados ao uso do espectro. Os resultados esperados incluem uma melhoria significativa na qualidade de serviço, mesmo em áreas de alta demanda, demonstrando o potencial do 5G para transformar a experiência do usuário e a infraestrutura de telecomunicações global.

**Palavras-chave:** 5G, Network Slicing, baixa latência, computação em borda, alta demanda, eficiência espectral, Massive MIMO, agregação de espectro.

## ABSTRACT

*The growing demand for data traffic in mobile networks has posed significant performance challenges, especially when users access content hosted on international servers. In this context, 5G technology emerges as an advanced solution capable of increasing efficiency, reducing latency, and optimizing resource utilization. This work aims to analyze how 5G addresses the issue of slow performance in high-traffic situations by leveraging features such as Network Slicing, edge computing, Massive MIMO, and spectrum aggregation. These features enable the creation of dedicated virtual networks, data processing closer to the end-user, and greater bandwidth, even in overload scenarios.*

*The research will be based on simulations and case studies, comparing 5G's performance with previous generations, such as 4G, in terms of latency, capacity, and spectral efficiency. Furthermore, the study will discuss the impacts of this technology in high-density environments and the regulatory challenges associated with spectrum usage. The expected results include a significant improvement in the quality of service, even in high-demand areas, demonstrating the potential of 5G to transform user experience and global telecommunications infrastructure.*

**Keywords:** *5G, Network Slicing, low latency, edge computing, high demand, spectral efficiency, Massive MIMO, spectrum aggregation.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Uma arquitetura geral de uma rede celular de 5G.....	19
Figura 2 - Arquitetura de rede SDN 5G.....	21
Figura 3 - Arquitetura do Sistema de Rede Sem Fio.....	24
Figura 4 - Classes de Uso do 5G.....	26
Figura 5 - resultado da simulação(Latência).....	35
Figura 6 - Resultado da Capacidade da rede.....	36
Figura 7 - Resultado do cálculo de Throughput.....	37
Figura 8 - Latência Total.....	40
Figura 9 - Capacidade Total.....	40
Figura 10 - Throughput por usuário.....	41

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Configurações do sistema MU-MIMO.....	20
Tabela 2 - : Destaques de Potenciais Aplicações 5G e Seus Requisitos de Latência Ultrabaixa. 25	25
Tabela 3 - Contribuições do Estado da arte.....	30

## LISTA DE SIGLAS

5G	Quinta Geração
Anatel	Agencia Nacional de Telecomunicações
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
EIR	Equipament Identity Register
EPC	Evolved Packet Core
ESN	Eletronic Serial Number
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	User Equipment
FDM	Frequency Division Multiplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequecy Modulation
GPS	Global Positioning System
HD	High Definition
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
ITC	Intervalo de Tempo de Canal
ITU	International Telecommunications Union
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LTE	Long Term Evolution
MAC	Camada de enlace de dados
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MNC	Mobile Network Code
MS	Mobile Station
NAS	Non-Access Stratum
NR	New Radio
NSA	Nob-Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RF	Radiofrequência
RLC	Radio Link Control
RS	Reference Signal
AS	Standalone
SDN	Software-Defined Networking
SON	Self-Organizing Network
EU	User Equipament
VoIP	Voice over Internet Protocol
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Networks

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. Justificativa.....	15
3. Objetivos.....	16
3.1 Geral.....	16
3.2 Específicos.....	16
4. PROBLEMA.....	17
5. METODOLOGIA.....	17
6. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
6.1 A evolução das redes 5G: Desafios e soluções para atender aos requisitos de baixa latência e alta confiabilidade.....	18
6.2. A Tecnologia MU-MINO: Comunicações 5G de latência ultrabaixa.....	23
6.3. A Tecnologia MU-MINO: Comunicações 5G de latência ultrabaixa.....	29
7. SISTEMA SIMULADO: Rede 5G em comparação com o 4G.....	33
8. <i>Resultados Encontrados</i> .....	43
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
REFERÊNCIAS.....	47

# 1. INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial do tráfego de dados móveis nas últimas décadas tem transformado a maneira como as pessoas se conectam e utilizam a tecnologia. Esse aumento é impulsionado por fatores como a popularização de smartphones, serviços de streaming e a Internet das Coisas (IoT). No entanto, essa demanda crescente tem sobrecarregado redes legadas, como o 4G, gerando problemas de latência e baixa eficiência, especialmente em regiões de alta densidade de usuários. Esses desafios se tornam ainda mais complexos quando o tráfego envolve acesso a servidores localizados em outros países, exigindo que a infraestrutura de rede transmita grandes volumes de dados por longas distâncias e múltiplos saltos de rede.

Nesse contexto, a tecnologia 5G surge como um marco significativo na evolução das redes de comunicação, oferecendo inovações que prometem superar essas limitações. Um dos principais destaques do 5G é a drástica redução da latência, que é o tempo de resposta entre o envio de uma solicitação e a recepção de uma resposta. Essa característica é crucial para aplicações que exigem comunicação em tempo real, como veículos autônomos, cirurgias remotas e jogos online (PARVEZ et al., 2017). A arquitetura do 5G foi projetada para suportar uma latência de até 1 milissegundo, uma melhoria substancial em relação às redes 4G (KELECHI et al., 2019).

Além da latência reduzida, o 5G também se destaca por aumentar significativamente a capacidade das redes, permitindo a conexão simultânea de um número muito maior de dispositivos. Essa capacidade é essencial para suportar a crescente integração de tecnologias como IoT e cidades inteligentes (LOGHIN et al., 2029). Elementos como o Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) e o uso de ondas milimétricas são fundamentais para garantir a alta capacidade, permitindo uma densidade de conexão muito maior sem comprometer a qualidade do serviço (SUDHAMANI et al., 2023).

Para atender às demandas de cenários de alta densidade de tráfego, o 5G incorpora inovações como divisão de rede (Network Slicing), computação em borda (Edge Computing) e otimizações no uso do espectro. A computação de borda (MEC), por exemplo, desempenha um papel crucial ao permitir que serviços críticos sejam executados próximos aos usuários, reduzindo ainda mais a latência (ADDAD et al., 2020). No entanto, a implementação do 5G também enfrenta desafios, como a necessidade de novas infraestruturas e a gestão de interferências entre células e feixes de comunicação. Soluções como o controle dinâmico de células virtuais e o beamforming intercalado têm sido desenvolvidas para mitigar esses problemas e garantir a qualidade da comunicação (TAKASHI et al., 2019).

Dessa forma, o 5G representa não apenas uma evolução, mas uma verdadeira revolução nas redes de comunicação. Com melhorias substanciais em termos de latência, capacidade e eficiência espectral, essa tecnologia possibilita uma ampla gama de novas aplicações e serviços que têm o potencial de transformar setores como saúde, manufatura, entretenimento e cidades inteligentes. Apesar dos desafios regulatórios e de infraestrutura, o 5G é um passo decisivo em direção a um futuro mais conectado, eficiente e inovador. Ao longo de nossa pesquisa vamos explorar como a tecnologia 5G consegue lidar com uma alta demanda ocasionada em sua rede.

## **2. Justificativa**

A crescente demanda por dados móveis, impulsionada pela massiva adoção de smartphones, serviços de streaming, aplicações em nuvem e a expansão da Internet das Coisas (IoT), tem exposto as limitações das redes 4G em termos de capacidade e eficiência, especialmente em regiões de alta densidade populacional ou durante eventos com grande concentração de usuários. Nesses cenários, a latência elevada e a sobrecarga de rede resultam em uma experiência de usuário insatisfatória, prejudicando tanto atividades pessoais, como o consumo de conteúdo online, quanto aplicações críticas, como sistemas industriais conectados e serviços de emergência.

A tecnologia 5G surge como uma solução revolucionária para esses problemas, oferecendo uma infraestrutura de rede capaz de lidar com volumes massivos de tráfego de dados, mantendo baixa latência e garantindo maior eficiência espectral. As inovações trazidas pelo 5G, como o Network Slicing, computação em borda e Massive MIMO, permitem um gerenciamento mais dinâmico e inteligente dos recursos de rede, aumentando a capacidade de lidar com grandes quantidades de dispositivos conectados simultaneamente. Além disso, o uso de espectro em ondas milimétricas e técnicas avançadas de agregação de canais elevam significativamente a largura de banda disponível.

Do ponto de vista econômico e social, a adoção do 5G impacta diretamente diversas indústrias, como o setor de entretenimento, com a possibilidade de streaming de alta definição em tempo real, e a indústria 4.0, que depende de comunicações de baixa latência para a automação e controle de processos. Além disso, em situações críticas, como emergências ou desastres naturais, o 5G pode garantir a continuidade de serviços essenciais de comunicação, mesmo em cenários de grande congestionamento de rede.

Este trabalho é justificado pela necessidade urgente de compreender como o 5G pode mitigar os problemas de latência e capacidade nas redes móveis atuais, que enfrentam desafios crescentes com o aumento exponencial do tráfego de dados. Analisar a performance do 5G em cenários de alta demanda de tráfego, principalmente em ambientes urbanos ou eventos de grande porte, não só

contribui para o entendimento técnico da nova geração de redes móveis, mas também auxilia na tomada de decisões estratégicas para a implementação eficiente dessa tecnologia. Assim, os resultados desta pesquisa poderão oferecer insights relevantes para empresas de telecomunicações, reguladores de espectro e desenvolvedores de infraestrutura, impulsionando o desenvolvimento e a expansão de redes 5G.

Além disso, o 5G representa um fator chave para o futuro das comunicações globais, facilitando o avanço de tecnologias emergentes, como veículos autônomos, realidade aumentada e cidades inteligentes. O estudo sobre como essa tecnologia pode transformar a maneira como nos conectamos em cenários de alta demanda torna-se essencial para garantir que a implementação do 5G atenda às expectativas de desempenho e qualidade de serviço, tanto para o usuário comum quanto para aplicações empresariais e governamentais críticas.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Geral**

Analisar como a tecnologia 5G soluciona os problemas de desempenho em redes móveis, principalmente em cenários de alta demanda de tráfego de dados, destacando suas inovações tecnológicas, como Network Slicing, Massive MIMO e computação em borda, para reduzir a latência e aumentar a eficiência da rede.

#### **3.2 Específicos**

Os objetivos específicos incluem:

1. Investigar as principais limitações das redes 4G em cenários de alta demanda e tráfego internacional, com foco em latência e capacidade.
2. Explorar as inovações tecnológicas do 5G, como Network Slicing, computação em borda e ondas milimétricas, e seu impacto na eficiência da rede.
3. Analisar, por meio de simulações e estudos de caso, a performance da rede 5G comparada à 4G em termos de latência, largura de banda e eficiência espectral em ambientes de alta densidade.
4. Avaliar os desafios regulatórios e infraestruturais na implementação do 5G, especialmente em regiões com alto tráfego de dados.
5. Discutir o impacto da adoção do 5G na qualidade do serviço de redes móveis e na experiência do usuário, destacando áreas como eventos públicos e grandes centros urbanos.

## **4. PROBLEMA**

Em cenários de alta demanda de tráfego, como durante eventos públicos ou em grandes centros urbanos, redes legadas (como o 4G) enfrentam dificuldades para manter a qualidade do serviço, especialmente ao acessar conteúdos localizados em servidores internacionais. Como o 5G resolve essas limitações?

O 5G aborda o problema da lentidão causada por alta demanda de tráfego de dados em várias camadas, aplicando inovações que aumentam a eficiência, a capacidade e a latência da rede, o que melhora o acesso a sites e serviços, mesmo quando alocados em servidores em outros países.

## **5. METODOLOGIA**

A metodologia deste trabalho será estruturada em três etapas principais: pesquisa bibliográfica, simulação computacional e análise de estudo de caso. Essas etapas permitirão uma análise aprofundada das inovações tecnológicas do 5G e sua eficiência em cenários de alta demanda de tráfego de dados. A abordagem visa comparar o desempenho do 5G com o 4G em diferentes métricas, como latência, capacidade e eficiência espectral, utilizando ferramentas de simulação e estudos de caso reais.

### **5.1. Pesquisa Bibliográfica**

A primeira etapa consistirá em uma revisão da literatura, utilizando artigos científicos, relatórios técnicos e publicações especializadas nas áreas de telecomunicações e redes móveis. Fontes confiáveis, como IEEE Xplore, Scielo e Google Scholar, serão consultadas para coletar informações sobre:

- Limitações das redes 4G em termos de latência, largura de banda e eficiência espectral.
- As principais inovações do 5G, como Network Slicing, Massive MIMO, ondas milimétricas, e computação em borda.
- Estudos de desempenho de redes 5G em cenários de alta demanda de tráfego.

Essa revisão fornecerá a base teórica para a análise comparativa entre 4G e 5G, destacando os avanços que tornam o 5G mais eficaz para lidar com congestionamento e tráfego internacional.

### **5.2. Simulação Computacional**

A segunda etapa envolve a simulação para comparar o desempenho do 5G e do 4G em diferentes cenários. As simulações serão realizadas com ferramenta especializada em modelagem de redes, como MATLAB, que permite a modelagem precisa do comportamento das redes móveis em situações controladas.

## **6. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **6.1 A evolução das redes 5G: Desafios e soluções para atender aos requisitos de baixa latência e alta confiabilidade.**

As comunicações de rede sem fio de quinta geração (5G) são caracterizadas por três principais casos de uso: banda larga móvel aprimorada (eMBB), comunicação massiva de tipo máquina (mMTC) e comunicação ultraconfiável de baixa latência (URLLC). O eMBB é projetado para oferecer acesso à Internet de alta largura de banda, ideal para aplicações como navegação na web, streaming de vídeo e realidade virtual. Já o mMTC é responsável por suportar aplicativos de Internet das Coisas (IoT) de banda estreita, como o NB-IoT. Por fim, o URLLC facilita aplicações sensíveis a atrasos, como automação industrial, cirurgia remota e direção autônoma (BOCCARDI et al., 2014).

Entre todas as tecnologias mencionadas, o URLLC é considerado o mais rigoroso, com requisitos de latência de ponta a ponta (E2E) de 1 ms, confiabilidade de link de 99,99999% e taxas de erro inferiores a 1 pacote perdido em  $10^5$  pacotes, conforme recomendado pelo ITU-R M.2410.0 (PEDERSEN et al., 2016). Esses requisitos exigem novas técnicas para atender aos desafios de latência e confiabilidade, especialmente à medida que avançamos para o domínio das comunicações táteis, Internet tátil, sistemas de transporte inteligente (ITS) e a revolução da indústria 4.0 (POPOVSKI, 2014).

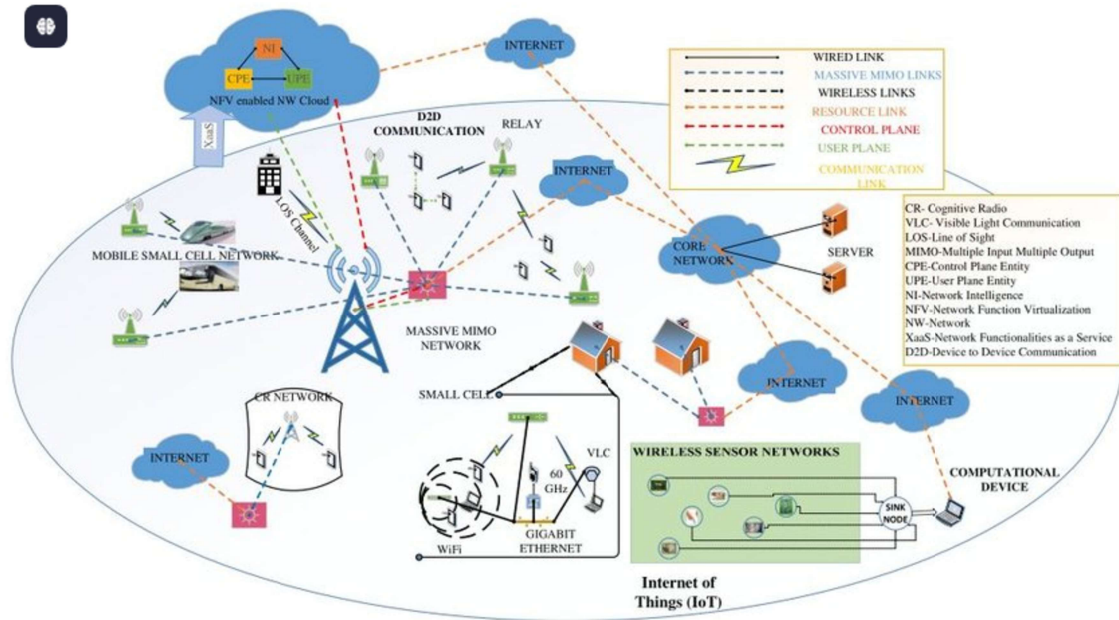
Para aprimorar a segurança na comunicação veículo a veículo (V2V) em redes 5G, foi proposto o uso de um código Q de código Raptor na camada de aplicação, com o objetivo de garantir uma latência de ponta a ponta de 5 ms, visando reduzir os atrasos e melhorar a confiabilidade das transmissões (THOTA et al., 2019). A latência da rede é uma métrica crucial em aplicativos móveis, pois há uma relação direta entre a latência e a experiência do usuário na navegação web (FORD et al., 2016).

Uma parte fundamental das comunicações 5G é a transmissão de comunicações táteis em tempo real, que suporta comunicações celulares de baixa e ultrabaixa latência. Na visão da 5G, a alta taxa de dados, a alta capacidade e a latência ultrabaixa são de extrema importância, mas enfrentam desafios peculiares. Há uma compensação entre essas métricas, pois o aprimoramento de um fator pode deteriorar os outros (PEDERSEN et al., 2016). Alcançar uma latência ultrabaixa sem comprometer a confiabilidade do link, a cobertura da rede e a capacidade não é viável com as atuais limitações da interface aérea física (LAHETKANGAS et al., 2014).

O ambiente será ainda mais complexo com o avanço da comunicação massiva máquina-a-máquina (MM2MC), em que milhares de nós devem transmitir sua carga útil em tempo real. Nesse cenário,

uma interface de rádio capaz de suportar comunicações ortogonais de baixa largura de banda se torna essencial. A tecnologia MU-MIMO (Multi-User MIMO) é uma candidata promissora para impulsionar o critério de conectividade massiva em 5G, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Uma arquitetura geral de uma rede celular de 5G



Fonte: GUPTA e JHA, 2015.

Em muitos trabalhos de pesquisa, o MU-MIMO é frequentemente referido como massive-MIMO (LEE e SUNG, 2018). Por questões de terminologia, adotaremos o termo MU-MIMO em todo o nosso estudo. O MU-MIMO é uma tecnologia consolidada, na qual uma estação base (BS) equipada com 100 elementos de antena é capaz de transmitir simultaneamente para 10 estações móveis (MS) dentro de um prazo de 1 ms (BJÖRNSSON, KOUNTOURIS e DEBBAH, 2013), conforme destacado na Tabela 1. As métricas de desempenho do MU-MIMO estão direcionadas para a transmissão bem-sucedida de fluxos de dados, explorando graus de liberdade espacial (DoF). No entanto, inadvertidamente, o problema de latência não foi considerado no projeto do MU-MIMO, uma vez que a tecnologia foi desenvolvida especificamente para comunicações 4G. Segundo estudos, os atuais sistemas de redes locais sem fio (WLAN) e celulares que utilizam MU-MIMO não conseguem atender à demanda de latência de 1 ms (BJÖRNSSON et al., 2015). Portanto, novas soluções são necessárias para superar essa limitação. Diversos estudos têm destacado o papel do MU-MIMO no paradigma de comunicações 5G (JUNGNICKEL, 2014). Uma topologia de rede 5G de alta capacidade, composta por: data centers, controlador de rede centralizado, caixas intermediárias, rede de dados em pacote (PDN), núcleo de pacote evoluído (EPC), estrato de acesso (AS), estrato de não acesso (NAS), MU-MIMO BS, micro e macro usuários de células, respectivamente, é ilustrada na Figura 1.

Tabela 1 - Configurações do sistema MU-MIMO.

Número de processadores MIMO	Número de processadores de bits	Número máximo de antenas
1	1	1–32
2	1	33–64
4	1	65–128

Fonte: **5G Americas. White Paper: Advanced Antenna Systems for 5G, 2019.**

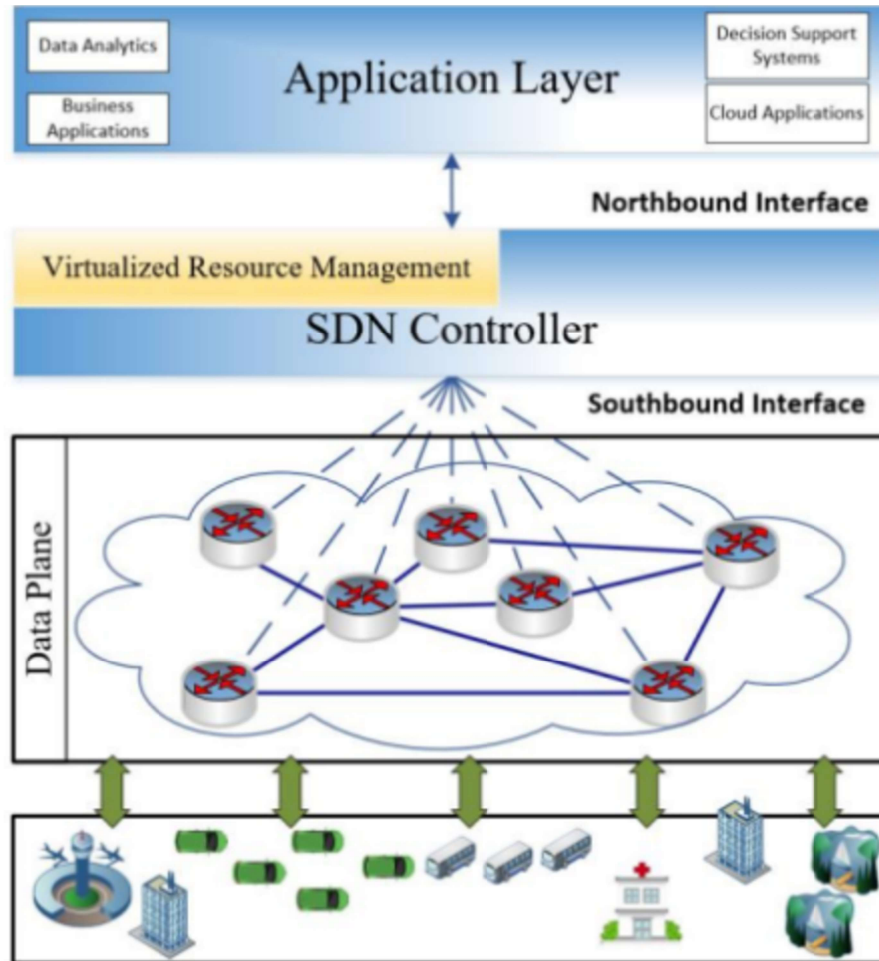
A arquitetura de rede 5G, conforme ilustrada na Figura 1, exemplifica uma DenseNet, que apresenta diversas limitações no contexto de gargalos de rede de acesso de rádio, problemas de sobrecarga de controle e altos custos operacionais (FARHANG et al., 2014). O LTE exibe uma latência aproximada de 100 ms no plano de controle e 30 ms no plano do usuário, respectivamente. A latência do plano de controle refere-se à sinalização necessária para alternar o equipamento do usuário (UE) do modo ocioso para o modo ativo, envolvendo a conexão de controle de recursos de rádio (RRC) e a configuração de um modo dedicado. Já a latência do plano do usuário é definida como o tempo de transmissão unidirecional entre a disponibilidade de um pacote na camada IP no nó UE/Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)/edge e a disponibilidade desse pacote na camada IP no nó E-UTRAN/UE. Essa latência é crucial para o desempenho de muitos aplicativos, pois qualquer atraso pode impactar negativamente a experiência do usuário. Além disso, os aplicativos podem sofrer com atrasos na solicitação de serviço, que ocorrem quando os nós tentam inicializar a pesquisa de células. Para acessar o canal de acesso aleatório físico (PRACH) no LTE, o usuário envia sua solicitação de informações e chave para o canal de controle primário (PCCH), que é mapeado para o canal de paginação (PCH). O PCCH e o PCH são responsáveis por conceder acesso ao canal de controle de downlink físico (PDCCH), que supervisiona a decodificação dos sinais de informação de controle de downlink (DCI). O padrão 3GPP especifica que o canal indicador de formato de controle físico (PCFICH) obriga o UE a se comunicar com o eNodeB (eNB) para obter as informações de formato de controle (CFI), que contêm dados necessários para decodificar as informações do PDCCH. Essa complexidade na sinalização contribui para os gargalos e atrasos observados no LTE. Para resolver esses desafios, foi proposta uma solução centralizada de rede definida por software (SDN), conforme ilustrada na Figura 2. A arquitetura SDN oferece uma visão global da rede, integrando-se em três planos principais:

1. Plano de Dados: Responsável pelo encaminhamento de tráfego.

2. Plano de Controle: Instancia a aplicação de regras de rede.
3. Plano de Gerenciamento: Formula políticas em toda a rede, como balanceamento de carga, QoS e segurança (ALI-AHMAD et al., 2015).

A SDN é uma solução promissora para otimizar a latência e a eficiência da rede, especialmente em cenários de alta demanda e complexidade, como os encontrados na arquitetura 5G.

Figura 2 - Arquitetura de rede SDN 5G



Fonte: TAYYABA et al., 2020.

A arquitetura SDN (Software-Defined Networking) na 5G é composta por um Sistema Operacional de Rede (NOS, Network Operating System) e um controlador. O NOS é uma linguagem de baixo nível que agiliza a comunicação entre os threads multicóres. Esses multicóres permitem a implementação de uma topologia de computação paralela distribuída, na qual muitos núcleos são distribuídos, resultando em um menor tempo de execução de tarefas. Essa abordagem é fundamental para atender aos requisitos de baixa latência e alta eficiência exigidos pela 5G.

Para abordar o problema de baixa latência em MU-MIMO (Multi-User MIMO) no futuro 5G, este artigo destaca quatro (4) estruturas principais, representadas pela sigla C: Computação, Custo, Complexidade e Camada Cruzada (Cross-Layer). Cada uma dessas estruturas é crucial para

otimizar o desempenho da rede e garantir a ultraconfiabilidade e baixa latência (URLLC) necessárias para os cenários 5G. A seguir, detalhamos cada uma dessas estruturas.

### 1. Computação: Computação em Névoa (Fog Computing)

Em vez de enviar dados do sensor diretamente para a nuvem, os dispositivos de borda assumem a função de processamento, análise e armazenamento de dados. Essa abordagem, conhecida como computação em névoa (fog computing), minimiza o tráfego geral da rede e reduz significativamente a latência. A computação em névoa é projetada para aprimorar a eficiência da rede, o desempenho e minimizar a quantidade de dados enviados para a nuvem para manuseio, exame e armazenamento. Essa estratégia é essencial para atingir um URC (User-Radio-Control) com baixa latência, especialmente em aplicações sensíveis ao tempo, como automação industrial e veículos autônomos.

A computação em névoa é uma extensão da computação em nuvem que traz o processamento de dados mais próximo à fonte, reduzindo a latência e o tráfego de rede." (YOUSEFPOUR. ISHIGAKI. JUE, 2017).

### 2. Custo: Virtualização e Maximização de Recursos

A minimização de custos e a maximização da utilização de recursos são elementos cruciais para atingir a ultraconfiabilidade e baixa latência exigidas pela 5G. A virtualização não é uma técnica nova, mas com o advento da computação em nuvem (CC) e o conceito de big data, tornou-se um item básico no design de CC. As técnicas de virtualização em CC facilitam a execução de vários aplicativos e sistemas operacionais no mesmo servidor, sem interferir em nenhum dos outros serviços fornecidos pelo servidor ou plataforma host. Isso permite a utilização eficiente de recursos, redução de custos e diminuição da latência por meio do aumento da velocidade do processo de realocação nos arquivos do servidor virtual. A virtualização é uma ferramenta essencial para otimizar os recursos de rede e reduzir custos operacionais, especialmente em ambientes 5G. (SALHAB. RAHIM. LANGAR, 2020)

### 3. Complexidade: Mitigação em Massive-MIMO

Estruturas de hardware Massive-MIMO implantam um grande número de antenas, o que leva a uma complexidade significativa para detectar o sinal. A complexidade é considerada um desafio a ser resolvido em sistemas MIMO massivos práticos. A complexidade aumenta exponencialmente com o número de antenas de transmissão, tornando o MIMO em larga escala menos prático. Esquemas de recepção e pré-codificação eficientes são muito necessários em sistemas MIMO massivos para mitigar a complexidade computacional. Para diminuir a complexidade e fortalecer a taxa de convergência, sugere-se que os algoritmos projetados para 5G URLLC sejam julgados em

seu indicador de complexidade  $O(N)$ . A complexidade computacional em Massive-MIMO é um dos principais desafios para a implementação prática de sistemas 5G. (BORGES et al., 2021)

#### 4. Camada Cruzada (Cross-Layer): Otimização de Redes

O design cross-layer diverge do design de rede tradicional, em que cada camada da pilha seria feita para funcionar individualmente. A otimização cross-layer é importante para controlar a perda de pacotes, bem como o período de espera causado pela transmissão e pelo processo de enfileiramento. A correlação entre cross-layer em MIMO massivo com a baixa latência é explicada mais adiante. A abordagem cross-layer permite a integração de diferentes camadas da rede, como camada física, camada de enlace e camada de aplicação, para otimizar o desempenho geral da rede. A otimização cross-layer é uma técnica poderosa para melhorar a eficiência da rede e reduzir a latência em sistemas 5G. (KHALIL e ZEDDINI, 2024)

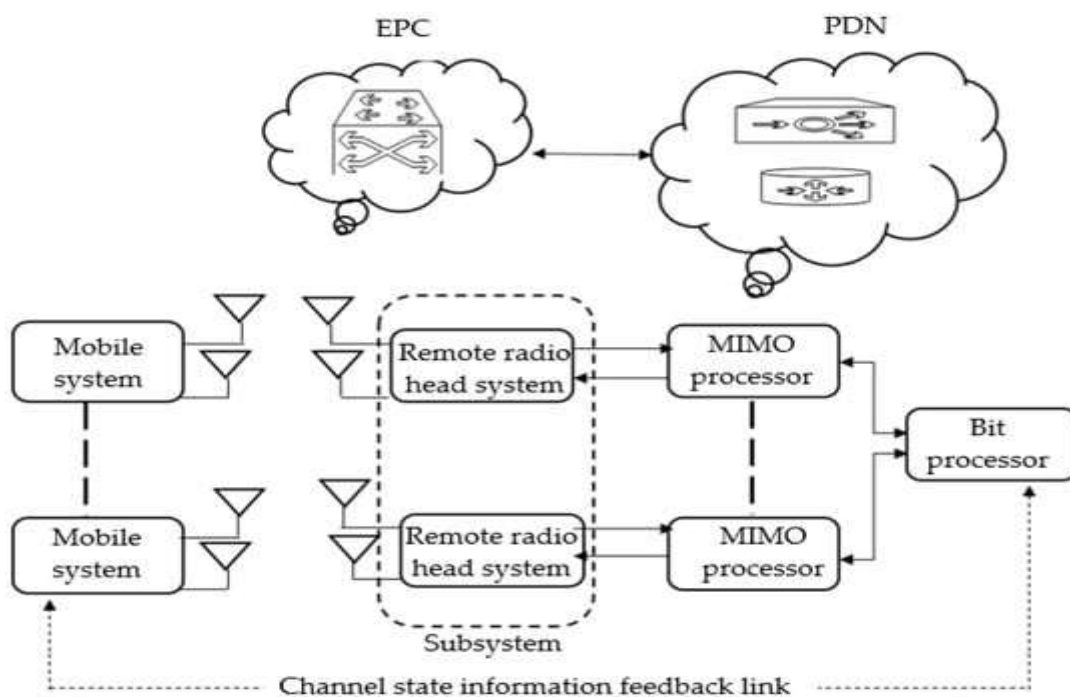
A arquitetura SDN 5G, com suas estruturas de Computação, Custo, Complexidade e Camada Cruzada, oferece uma solução robusta para os desafios de baixa latência e alta eficiência exigidos pela 5G. A computação em névoa minimiza a latência ao processar dados na borda, enquanto a virtualização otimiza os recursos e reduz custos. A mitigação da complexidade em Massive-MIMO e a otimização cross-layer garantem um desempenho eficiente da rede. Essas abordagens são essenciais para atender aos requisitos de URLLC e impulsionar a adoção de tecnologias 5G em diversos setores.

## 6.2. A Tecnologia MU-MIMO: Comunicações 5G de latência ultrabaixa.

O sistema MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) compreende uma antena de transmissão que transmite sinais simultaneamente para uma infinidade de usuários finais, conforme mostrado na Figura 3. O 5G é equipado com recursos avançados que permitem suportar 1000 vezes mais dados do que a taxa de dados agregada atual, 100 vezes mais do que a taxa de dados do usuário atual e um aumento de 100 vezes no número de dispositivos conectados simultaneamente (DAHLMAN, PARKVALL e SKOLD, 2018). Esses avanços só são realizáveis por meio de uma arquitetura de rede heterogênea, que consiste em pequenas células, topologia multiponto coordenada de transmissão conjunta (CoMP) e macrocélulas.

O MU-MIMO é uma parte integrante das comunicações sem fio e foi amplamente adotado por tecnologias como IEEE 802.11n, 802.11ac WLAN, 802.16e (WiMAX móvel), 802.16m (WiMAX), evolução de longo prazo 3GPP (LTE) e LTE-Advanced. Essas tecnologias utilizam o MU-MIMO para melhorar a eficiência espectral e a capacidade da rede, permitindo a transmissão simultânea de dados para múltiplos usuários.

Figura 3 - Arquitetura do Sistema de Rede Sem Fio



Fonte: CASTAÑEDA, GAMEIRO e KOUNTOURIS, 2016.

A Figura 3 ilustra a arquitetura do sistema de rede sem fio atual, destacando como os usuários móveis transmitem e recebem dados móveis após passarem pela rede de dados de pacotes (PDN) e pelo núcleo de pacotes evoluído (EPC), assumindo um link sem fio confiável. Se o tempo de configuração da chamada e a sobrecarga do protocolo de transmissão conjunta forem negligenciados, as duas principais fontes de latência de rede em comunicações sem fio são (PARVEZ et al., 2017):

#### **Tempo de Permanência (Plano de Controle - Plano C):**

Responsável pelo estabelecimento das informações de controle de redes necessárias, como algoritmos de agendamento, técnicas de controle de taxa, estratégias de reserva de largura de banda, políticas de controle de admissão de chamadas, atribuição de transmissor e transferência (AGIWAL, ROY e SAXENA, 2016).

Inclui o intervalo de tempo em que os pacotes de dados permanecem no equipamento conforme ele viaja do equipamento de rede PDN para a BS (Base Station), ou seja, comunicações de backhaul. O equipamento de rede inclui balanceadores de carga, caixas intermediárias, roteadores, switches, inspeção profunda de pacotes, firewalls, sistema de detecção de intrusão e caixas de engenharia de tráfego.

### Tempo Médio de Espera (Plano do Usuário - Plano U):

Refere-se ao tempo que os pacotes de dados esperam para serem transmitidos após chegarem ao equipamento de rede.

O tempo de permanência denota o intervalo de tempo em que o UE (User Equipment) alterna do modo ocioso para o modo ativo e estabelece com sucesso um link entre o UE e a BS. Esse processo é responsável pela orquestração de ponta a ponta (EEO) da rede entre o UE e a BS. Além disso, a acessibilidade, a configuração de rede em tempo real e as atualizações de políticas do sistema estão todas vinculadas ao tempo de permanência.

### Latência Ultrabaixa em 5G

A latência ultrabaixa 5G caracteriza por um mecanismo integrado para dinâmica de falhas de rede e reconfiguração automática adaptativa de alterações de carga. A tração do EEO é fornecer funcionalidade de solicitação de instanciação de serviço zero-touch em AS (Access Stratum) e NAS (Non-Access Stratum), resultando em um acoplamento rígido entre os elementos de rede constituintes. A rede IP tradicional terá dificuldade para atender ao EEO rápido exigido pelo NGMN (Next Generation Mobile Networks), considerando as métricas de operações, administrações e manutenção (OAM).

O 5G MU-MIMO indica uma latência ultrabaixa sem precedentes de 1 ms com não mais do que  $10^{-9}$  de perda de pacotes, conforme destacado na Tabela 2. Como pode ser visto na tabela, a visão da Indústria 4.0/Automação de Fábrica e Made in China 2025/Internet Plus são as mesmas em termos de latência esperada e taxa de perda de pacotes aceitável (PLR). No entanto, ambas foram impulsionadas por diversos facilitadores-chave.

Tabela 2 - : Destaques de Potenciais Aplicações 5G e Seus Requisitos de Latência Ultrabaixa

Aplicativo	Latência esperada	Taxa de perda de pacotes aceitável	Facilitador de Chaves
Indústria 4.0/Automação de Fábrica	0,5–5 ms [ 28 , 29 , 30 ]	$10^{-9}$	Fatiamento de rede e computação visual
Sistema de transporte inteligente (ITS)	100 ms	$10^{-5} - 10^{-3}$	Dispositivo-2-Dispositivo e IA
Feito na China 2025/Internet Plus	0,5–5 ms [ 31 ]	$10^{-9}$	Motivado pela Indústria 4.0
Robótica	1 ms [ 16 , 32 ]	Definido pelo usuário	Feedback tátil
Ambiente Virtual de Aprendizagem	5–10 ms [ 33 ]	Definido pelo usuário	Comunicações táteis
Internet tátil	zero ms [ 32 , 34 , 35 ]	$10^{-9}$	Comunicações táteis
Realidade Virtual/Aumentada	1–4 ms	$10^{-4}$	Ambiente tátil
E-saúde	1–10 ms [ 16 , 36 ]	Definido pelo usuário	Internet tátil e sistema CODEC

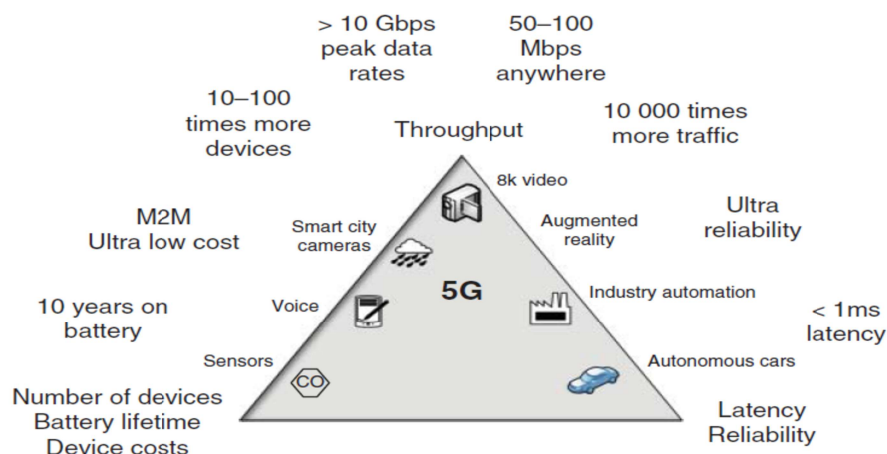
Fonte: ITU. 5G: IMT 2020, 2020.

A Tabela 2 destaca os requisitos de latência ultrabaixa para diferentes aplicações 5G, incluindo:

- Indústria 4.0/Automação de Fábrica: Latência de 1 ms e PLR de  $10^{-9}$ .
- Made in China 2025/Internet Plus: Latência de 1 ms e PLR de  $10^{-9}$ .
- Sistema de Transporte Inteligente (ITS): Latência de 100 ms.

A latência esperada para o sistema de transporte inteligente (ITS) foi declarada em 100 ms na Tabela 2, e também pode ser observada na Figura.

Figura 4 - Classes de Uso do 5G



Fonte: CHANDRAMOULI, LIEBHART e PIRSKANEN, 2019.

As arquiteturas do sistema ITS consistem em quatro subsistemas: capilar M2M, domínio de acesso M2M, núcleo M2M e aplicação M2M (KNOPP, 2013). Usando o padrão LTE-A, os quatro subsistemas ITS têm uma latência total de 33,5–309 ms. Neste projeto de sistema, o domínio de acesso M2M e o núcleo M2M são denotados como tendo latência de 13–129 ms e 12–150 ms, respectivamente. Portanto, 100 ms é uma estimativa razoável a ser esperada, considerando o número de dispositivos envolvidos.

### Dispositivo-2-Dispositivo (D-2-D) e Redução de Latência

O Dispositivo-2-Dispositivo (D-2-D) será um facilitador chave para a tecnologia de rede inteligente, considerando o fato de que a tecnologia de rede inteligente é um sistema de comunicação de longa distância. Ao dividir a distância de transmissão em uma distância menor e implementar comunicações D-2-D, a latência pode ser reduzida se a tecnologia de amplificação e encaminhamento (AF) for implementada. Além disso, o D-2-D reduzirá ostensivamente a necessidade de retransmissão em caso de falha na entrega.

## **Desafios de Complexidade no MU-MIMO**

O sistema MU-MIMO enfrenta dois (2) principais desafios de complexidade, a saber: complexidade de implementação e complexidade computacional (CASTAÑEDA, GAMEIRO e KOUNTOURIS, 2016). O primeiro se concentra em estratégias de redução de sobrecarga de sinal com ênfase na interface aérea física e na comunicação de controle entre diversas entidades de rede, enquanto o último define o tempo de processamento de algoritmos subjacentes.

O sistema MU-MIMO é uma tecnologia fundamental para atender aos requisitos de latência ultrabaixa e alta capacidade da 5G. A arquitetura de rede heterogênea, combinada com tecnologias como SDN (Software-Defined Networking), mMIMO (Massive MIMO) e NFV (Network Functions Virtualization), desempenha um papel crucial na redução da latência e na melhoria do desempenho da rede. O D-2-D e a implementação de tecnologias de amplificação e encaminhamento também são essenciais para reduzir a latência em sistemas de comunicação de longa distância. No entanto, os desafios de complexidade de implementação e complexidade computacional no MU-MIMO devem ser abordados para garantir a eficiência e a escalabilidade da rede 5G.

As redes tradicionais enfrentam limitações significativas em relação à latência, que devem ser superadas para atender aos requisitos 5G propostos. Essas redes não são programáveis e têm dificuldades para serem atualizadas, o que dificulta a implantação de uma nova arquitetura capaz de atender às demandas dinâmicas do mercado (LI e CHEN, 2015). Para atender à demanda por comunicações 5G de baixa latência, é necessário estabelecer uma interligação entre as principais redes de telecomunicações, o paradigma de rede de Internet e TI e os avanços recentes em tecnologias de hardware e software.

Ao contrário da rede tradicional, espera-se que a próxima geração de tecnologia móvel, a 5G, atenda a recursos personalizados e inovadores, conforme descrito abaixo:

1. Recursos Personalizados da 5G;
2. Capacidades Elásticas;
3. Escaláveis.

A 5G deve ser capaz de escalar dinamicamente para atender a diferentes demandas de tráfego, seja em áreas urbanas densamente povoadas ou em regiões remotas com baixa densidade de usuários. A elasticidade da rede permite que ela se adapte a mudanças no tráfego, garantindo uma qualidade de serviço (QoS) consistente.

A escalabilidade é essencial para suportar o aumento exponencial no número de dispositivos conectados, como IoT, dispositivos móveis e veículos autônomos, como:

1. Automação;

2. Padronização;
3. Abstração de Serviços de Rede

A automação é fundamental para reduzir a latência operacional e melhorar a eficiência da rede. A automação de serviços de rede permite a configuração, monitoramento e gerenciamento de recursos de forma rápida e precisa.

A padronização de protocolos e interfaces facilita a interoperabilidade entre diferentes equipamentos e tecnologias, reduzindo a complexidade de implantação.

A abstração de serviços permite que os provedores de serviços ofereçam soluções personalizadas para diferentes setores, como saúde, transporte e indústria.

O OAM&P é um conjunto de ferramentas e processos que permitem o gerenciamento automatizado da rede, desde a configuração inicial até a manutenção contínua.

O provisionamento automatizado permite a rápida implantação de novos serviços e a alocação dinâmica de recursos, atendendo às demandas em tempo real.

A direção dinâmica de tráfego permite que a rede redirecione o tráfego de dados de forma inteligente, evitando congestionamentos e garantindo uma latência mínima.

Aceleradores de hardware, como FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays) e ASICs (Application-Specific Integrated Circuits), são usados para processar dados em alta velocidade, reduzindo a latência e aumentando a capacidade de processamento.

O encadeamento de funções de serviço permite a integração de diferentes serviços em uma única cadeia de processamento, melhorando a eficiência e a personalização dos serviços oferecidos.

### **Desafios da Rede Tradicional**

As redes tradicionais são caracterizadas por uma arquitetura rígida e não programável, o que as torna difíceis de atualizar e adaptar às novas demandas do mercado. Essas limitações incluem:

**Latência Elevada:** As redes tradicionais têm latências significativas, especialmente em cenários de alta demanda, como eventos ao vivo ou redes de veículos autônomos.

**Dificuldade de Atualização:** A arquitetura rígida dificulta a implantação de novas funcionalidades e tecnologias, como virtualização e automação.

**Ineficiência Operacional:** As tarefas de operações, administrações e manutenção são realizadas manualmente, o que aumenta o tempo de inatividade e os custos operacionais.

Para superar os desafios da rede tradicional e atender aos requisitos da 5G, é necessário adotar uma abordagem inovadora que inclua:

### **Redes Definidas por Software (SDN)**

A SDN permite a programabilidade da rede, facilitando a criação de arquiteturas flexíveis e escaláveis.

A separação entre o plano de controle e o plano de dados permite a automação de tarefas e a otimização dinâmica do tráfego.

### **Virtualização de Funções de Rede (NFV)**

O NFV permite a virtualização de funções de rede, como firewalls e roteadores, em servidores virtuais, reduzindo os custos de hardware e aumentando a flexibilidade.

A virtualização facilita a implantação rápida de novos serviços e a personalização de soluções para diferentes setores.

### **Automação e Inteligência Artificial (IA)**

A automação, combinada com IA, permite a previsão de demandas e a otimização dinâmica da rede, garantindo uma latência mínima e uma QoS consistente.

A IA pode ser usada para analisar grandes volumes de dados e identificar padrões que ajudem na tomada de decisões operacionais.

### **Tecnologias de Hardware Avançado**

O uso de aceleradores de hardware, como FPGAs e ASICs, permite o processamento de dados em alta velocidade, reduzindo a latência e aumentando a capacidade de processamento.

A integração de hardware e software permite a criação de soluções personalizadas para diferentes aplicações, como IoT e veículos autônomos.

A transição para a 5G exige uma abordagem inovadora que supere as limitações das redes tradicionais. A programabilidade, a automação, a virtualização e o uso de tecnologias de hardware avançado são essenciais para atender aos requisitos de baixa latência e alta capacidade da 5G. A interligação entre as principais redes de telecomunicações, o paradigma de rede de Internet e TI e os avanços recentes em tecnologias de hardware e software permitirá a criação de uma rede elástica, escalável e personalizada, capaz de atender às demandas dinâmicas do mercado.

## **6.3. A Tecnologia MU-MINO: Comunicações 5G de latência ultrabaixa.**

Para dar atenção à questão da latência como a principal contribuição e adotar uma nova abordagem para este estudo, é essencial analisar os desafios e os benefícios associados a diferentes paradigmas de comunicação.

### **Comunicações de Baixa Latência e o Papel do FC**

Em casos de uso que exigem comunicações de baixa latência, o FC (Fog Computing) apresenta uma alta sobrecarga quando comparado ao CC (Cloud Computing) tradicional. No entanto,

estudos recentes com um grande número de dispositivos IoT sensíveis à latência mostram que o FC oferece um desempenho superior em relação à computação em nuvem. A principal razão para esse desempenho superior é a redução significativa da latência, uma vez que o FC processa os dados próximos à fonte, minimizando o tempo de transmissão e o tráfego de rede.

### Principais Contribuições para o Estado da Arte

A seguir, apresentamos um resumo das principais contribuições encontradas para consolidar o estado da arte, conforme detalhado na Tabela 3. Essas contribuições abrangem desde a otimização de latência até a eficiência de recursos e a escalabilidade das soluções propostas.

*Tabela 3 - Contribuições do Estado da arte*

Referências	Contribuição	Resultados	Limitações
Xiao et al.	Considerou a questão da formação e posicionamento ideal de DCs para melhorar a QoS em relação à latência do serviço e à minimização de custos.	O posicionamento dos DCs é positivamente correlacionado pelo desempenho das redes centradas em dados.	Modelo de otimização complexo onde a localização dos DCs afeta fortemente a eficiência das redes centradas em dados.
Chen et al.	Aborda a questão da latência dos serviços de streaming de vídeo.	Sugeriu o conceito de uma unidade DC controlada por uma unidade CSP. Nesta configuração, as necessidades totais de computação e atraso de transmissão poderiam ser reduzidas por trabalhos de computação paralela e alinhamento das tarefas em nós cliente e fog.	Uma unidade DC controlada por uma unidade CSP global pode obstruir o desempenho total do serviço como resultado de gerenciamento inadequado e falta de armazenamento em nuvem.
Yangui et al.	Propôs uma topologia de sistema orientada por estrato para provisionamento de aplicativos de IoT compreendendo nuvem e FC. Em segundo lugar, nomenclaturas e interfaces de design avançado foram expostas, com latência E-2-E como uma métrica de desempenho.	A latência E-2-E foi reduzida para 484 ms na ocasião da proximidade da névoa aos dispositivos IoT. No entanto, é interessante notar que o pior resultado de 2033 ms não é quando todos os componentes estão na nuvem.	O protótipo precisa de mais investigação sobre o índice de desempenho adicional, incluindo atraso na detecção de incêndio e atraso no despacho do robô.

Referências	Contribuição	Resultados	Limitações
Agarwal et al.	Topologia de alocação de recursos proposta compreendendo um algoritmo que aloca as tarefas entre a nuvem e o FC. As demandas, o processamento e o tempo de resposta são considerados métricas de desempenho.	O algoritmo proposto mostrou que o tempo de resposta foi de 309,53 ms. Além disso, o tempo de resposta do balanceamento de carga reconfigurável foi de 632,87 ms e o tempo de resposta geral para otimizar o tempo de resposta foi de 630,11 ms.	Aborda os fundamentos, as noções principais e as doutrinas da computação em névoa; e não o aspecto técnico de uma perspectiva de implementação.
Krishnan et al.	Propôs uma solução composta por neblina e CC, onde a latência é considerada uma métrica de desempenho.	O atraso E-2-E foi reduzido em 70% em comparação com a Nuvem tradicional.	O protótipo precisa de mais investigação e discussão mais profunda, especialmente o aspecto técnico de uma perspectiva de implementação.
Hong et al.	Com base em um modelo de programação matemática, foi derivada uma solução para dar suporte a casos de uso de IoT em larga escala via FC móvel.	O modelo oferece suporte ao fornecimento de serviços para casos de uso dispersos em localização e sensíveis a atrasos.	A questão principal é formular uma rede de tempo de execução paralela capaz de migrar processos do Mobile Fog em um amplo espectro de dispositivos.
Bonomi et al.	Focado nas propriedades do conceito em termos de atraso, consciência geográfica, dispersão de localização, mobilidade, não homogeneidade e acesso sem fio a dispositivos.	O FC interagiu bem com máquina a máquina (M2M) e reduziu a latência do processamento em tempo real de milissegundos para menos de um segundo.	Dispositivos de neblina são considerados localização, portanto permitem pequena latência e percepção de contexto, provisionamento em nuvem e centralização global.
Zeng et al.	Estudou a questão da redução da duração da conclusão de solicitações de serviço, concentrando-se no posicionamento da imagem do trabalho e no agendamento de trabalho em conjunto; e no mecanismo de redução da	O atraso total de computação e transmissão pode ser reduzido compartilhando tarefas de computação e equilibrando-as nos nós cliente e fog.	Focado nos princípios, noções básicas e doutrinas da computação em neblina; e não no aspecto técnico de uma perspectiva de implementação.

Referências	Contribuição	Resultados	Limitações
			duração da conclusão do trabalho.
Intharawijitr et al.	Sugeriu uma arquitetura FC de baixa latência para gerenciamento de latência. Para simplificar a latência de computação e a latência de comunicação, um modelo matemático foi definido.	A menor política de atraso oferece desempenho apreciável com base na velocidade de disponibilidade de recursos. Além disso, os autores descobriram que havia um valor ótimo para o limite de latência	O modelo de otimização proposto é preliminar e requer consideração de diferentes aplicativos em execução na origem para permitir uma análise mais precisa de um ambiente de rede real.
Sarkar e Misra	Avaliou a aplicabilidade do novo conceito de FC sugerido para atender às necessidades de aplicativos sensíveis à latência no contexto da IoT.	A computação em neblina supera a CC no contexto da IoT, com um alto número de aplicativos sensíveis à latência.	É necessário um estudo mais aprofundado sobre diferentes aplicativos em execução na fonte para permitir uma análise mais precisa de um ambiente de rede real.

A tecnologia 5G representa uma revolução nas comunicações móveis, trazendo avanços significativos em termos de latência, capacidade e confiabilidade. Em redes de alta demanda, como aquelas encontradas em eventos ao vivo, indústrias inteligentes e cidades conectadas, a 5G se destaca por sua capacidade de reduzir a latência a níveis sem precedentes, ao mesmo tempo em que aumenta a capacidade de transmissão de dados. A latência ultrabaixa (1 ms ou menos) é um dos principais objetivos da 5G, e sua realização tem o potencial de revolucionar setores como saúde, transporte, indústria e entretenimento.

A redução da latência é um dos principais benefícios da 5G, especialmente em cenários que exigem comunicações em tempo real, como cirurgias remotas, veículos autônomos e jogos em tempo real. A tecnologia 5G utiliza uma combinação de Massive-MIMO e MU-MIMO para melhorar a eficiência espectral e a capacidade da rede, permitindo a transmissão simultânea de dados para múltiplos usuários. Além disso, tecnologias como computação em névoa (fog computing) e edge computing trazem o processamento de dados mais próximo à fonte, reduzindo significativamente a latência e o tráfego de rede.

A latência ultrabaixa é alcançada por meio de uma arquitetura de rede otimizada, que inclui SDN (Software-Defined Networking) e NFV (Network Functions Virtualization). A SDN permite a programabilidade da rede, facilitando a criação de arquiteturas flexíveis e escaláveis, enquanto o

NFV reduz os custos de hardware e aumenta a flexibilidade. Essas tecnologias, combinadas com a virtualização de recursos de hardware, como vCPU, vRAM e vDisk, permitem a criação de ambientes de computação flexíveis e escaláveis, essenciais para a 5G.

A capacidade da rede é outro aspecto crucial da 5G, especialmente em cenários de alta demanda, como eventos ao vivo e redes de IoT. A 5G é capaz de suportar 1000 vezes mais dados do que a taxa de dados agregada atual, 100 vezes mais do que a taxa de dados do usuário atual e um aumento de 100 vezes no número de dispositivos conectados simultaneamente. Essa capacidade é alcançada por meio de tecnologias como Massive-MIMO e MU-MIMO, que utilizam múltiplas antenas para melhorar a eficiência espectral e a capacidade da rede.

A escalabilidade da rede é garantida por meio de uma arquitetura de rede heterogênea, que inclui pequenas células, topologia multiponto coordenada de transmissão conjunta (CoMP) e macrocélulas. Essa arquitetura permite que a rede se adapte a diferentes demandas de tráfego, garantindo uma qualidade de serviço (QoS) consistente.

No próximo capítulo, vamos proceder simulação de comparação da rede 5G em relação com o 4G.

## **7. SISTEMA SIMULADO: Rede 5G em comparação com o 4G.**

### **Cenários de Simulação:**

- Cenário de alta densidade de usuários: será simulada uma região urbana com grande quantidade de dispositivos conectados simultaneamente, como em grandes eventos ou centros urbanos, analisando a capacidade de resposta da rede 5G em comparação com o 4G.
- Cenário de tráfego internacional: simulará o acesso a servidores alocados em diferentes países, medindo a latência e eficiência no roteamento de dados entre redes 5G e 4G.
- Métricas Avaliadas:
- Latência: o tempo de resposta das redes ao acessar servidores em diferentes regiões geográficas.
- Largura de banda: a quantidade de dados transmitidos simultaneamente em situações de alta demanda.
- Eficiência espectral: a capacidade da rede de utilizar eficientemente o espectro disponível para transmitir mais dados por unidade de frequência.

Os resultados das simulações serão utilizados para avaliar as melhorias proporcionadas pelo 5G em cenários críticos e compará-las com o desempenho das redes 4G, destacando a eficácia das inovações tecnológicas em termos práticos.

### 3. Simulação

A simulação em MATLAB para o problema apresentado pode ser dividida em várias etapas para analisar o desempenho das redes 5G e 4G em termos de latência e capacidade de tráfego de dados em um cenário de alta demanda, especialmente com acesso a servidores alocados em outros países. A simulação envolverá a comparação entre a eficiência das redes em termos de tempo de resposta (latência) e capacidade de transmissão.

Aqui está uma visão geral de como a simulação pode ser configurada no MATLAB:

#### 1. Definir Cenário e Parâmetros de Rede

Este cenário considera uma região com alta densidade de usuários tentando acessar um servidor remoto, simulando diferentes capacidades de rede (4G e 5G).

##### Parâmetros de Rede:

1. Número de usuários simultâneos: 1000 (por exemplo).
2. Distância entre a estação base e o servidor remoto: 5000 km (simulando um servidor internacional).
3. Largura de banda disponível:
4. 4G: 20 MHz.
5. 5G: 100 MHz (com ondas milimétricas).

##### Parâmetros para Simulação de Latência:

1. Velocidade da luz:  $3 \times 10^8$  m/s (para o cálculo da latência de propagação).
2. Latência fixa do equipamento:
3. 4G: 10 ms.
4. 5G: 1 ms.

##### Parâmetros de Eficiência Espectral:

- Eficiência espectral do 4G: 2 bits/s/Hz.
- Eficiência espectral do 5G: 10 bits/s/Hz.

#### 2. Simulação de Latência

A latência total em uma rede depende da distância ao servidor, da latência de processamento e da latência de propagação.

#### Código MATLAB:

```
% Parâmetros iniciais
```

```

distancia_servidor = 5000 * 1000; % 5000 km em metros
velocidade_luz = 3e8; % Velocidade da luz em m/s

% Latência fixa do equipamento (em ms)
latencia_4G_equipamento = 10; % Latência fixa do 4G
latencia_5G_equipamento = 1; % Latência fixa do 5G

% Latência de propagação (em ms)
latencia_propagacao = (distancia_servidor / velocidade_luz) * 1000; % Convertendo para
milissegundos

% Latência total para 4G e 5G
latencia_total_4G = latencia_4G_equipamento + latencia_propagacao;
latencia_total_5G = latencia_5G_equipamento + latencia_propagacao;

% Exibir resultados
fprintf('Latência total em 4G: %.2f ms\n', latencia_total_4G);
fprintf('Latência total em 5G: %.2f ms\n', latencia_total_5G);

```

*Figura 5 - resultado da simulação(Latência)*

```

Command Window
>> simul
Latência total em 4G: 26.67 ms
Latência total em 5G: 17.67 ms
>>

```

Fonte: Próprio autor

Este código calcula a latência total para as redes 4G e 5G considerando tanto a latência fixa do equipamento quanto a latência de propagação. A latência de propagação é determinada pela distância entre o servidor remoto e o usuário final.

### **3. Simulação de Capacidade da Rede**

A capacidade da rede é calculada com base na largura de banda e na eficiência espectral.

#### **Código MATLAB:**

```

% Largura de banda (em Hz)
largura_banda_4G = 20e6; % 20 MHz para 4G

```

```

largura_banda_5G = 100e6; % 100 MHz para 5G

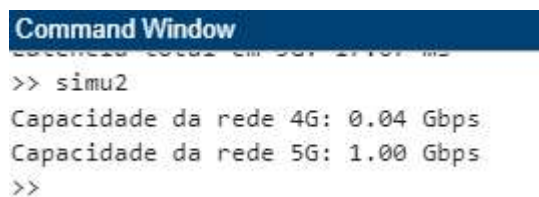
% Eficiência espectral (bits/s/Hz)
eficiencia_4G = 2; % Eficiência espectral do 4G
eficiencia_5G = 10; % Eficiência espectral do 5G

% Capacidade total da rede (em bits/s)
capacidade_4G = largura_banda_4G * eficiencia_4G;
capacidade_5G = largura_banda_5G * eficiencia_5G;

% Exibir resultados
fprintf('Capacidade da rede 4G: %.2f Gbps\n', capacidade_4G / 1e9);
fprintf('Capacidade da rede 5G: %.2f Gbps\n', capacidade_5G / 1e9);

```

*Figura 6 - Resultado da Capacidade da rede*



```

Command Window
>> simu2
Capacidade da rede 4G: 0.04 Gbps
Capacidade da rede 5G: 1.00 Gbps
>>

```

Fonte: Próprio autor.

Este código calcula a capacidade da rede tanto para 4G quanto para 5G, levando em consideração a largura de banda e a eficiência espectral. O resultado será em Gbps.

#### **4. Simulação de Cenário de Alta Demanda de Usuários**

Para simular um cenário com alta densidade de usuários, podemos calcular o throughput (taxa de transferência) disponível para cada usuário, assumindo que a capacidade total da rede é dividida entre todos.

Código MATLAB:

```

% Número de usuários
num_usuarios = 1000;

% Capacidade total de 4G e 5G (em bits por segundo)
capacidade_4G = 1e9; % Exemplo: 1 Gbps
capacidade_5G = 10e9; % Exemplo: 10 Gbps

% Throughput por usuário (em Mbps)
throughput_4G_usuario = (capacidade_4G / num_usuarios) / 1e6; % Convertendo para Mbps
throughput_5G_usuario = (capacidade_5G / num_usuarios) / 1e6; % Convertendo para Mbps

```

```

% Exibir resultados
fprintf('Throughput por usuário em 4G: %.2f Mbps\n', throughput_4G_usuario);
fprintf('Throughput por usuário em 5G: %.2f Mbps\n', throughput_5G_usuario);
% Exibir resultados

fprintf('Throughput por usuário em 4G: %.2f Mbps\n', throughput_4G_usuario);
fprintf('Throughput por usuário em 5G: %.2f Mbps\n', throughput_5G_usuario);

```

*Figura 7 - Resultado do cálculo de Throughput*

```

Command Window

>> simu3
Throughput por usuário em 4G: 1.00 Mbps
Throughput por usuário em 5G: 10.00 Mbps
>>

```

Fonte: Próprio autor.

Este código distribui a capacidade total da rede entre 1000 usuários e calcula o throughput disponível para cada um. Ele compara o desempenho das redes 4G e 5G em termos de taxa de transferência por usuário.

### **Simulação Comparativa**

O código completo para a simulação comparativa de redes 4G e 5G em MATLAB, com base nos parâmetros discutidos anteriormente. Esse código cobre a simulação de latência, capacidade de rede e throughput por usuário em um cenário de alta demanda de tráfego de dados.

#### **Código MATLAB Completo:**

```

% Simulação Comparativa 4G vs 5G
clc;
clear;

% Parâmetros iniciais
distancia_servidor = 5000 * 1000; % 5000 km em metros
velocidade_luz = 3e8; % Velocidade da luz em m/s

% Latência fixa do equipamento (em ms)
latencia_4G_equipamento = 10; % Latência fixa do 4G
latencia_5G_equipamento = 1; % Latência fixa do 5G

```

```

% Latência de propagação (em ms)
latencia_propagacao = (distancia_servidor / velocidade_luz) * 1000; % Convertendo para
milissegundos

% Latência total para 4G e 5G
latencia_total_4G = latencia_4G_equipamento + latencia_propagacao;
latencia_total_5G = latencia_5G_equipamento + latencia_propagacao;

% Exibir resultados de latência
fprintf('Latência total em 4G: %.2f ms\n', latencia_total_4G);
fprintf('Latência total em 5G: %.2f ms\n', latencia_total_5G);

% Largura de banda (em Hz)
largura_banda_4G = 20e6; % 20 MHz para 4G
largura_banda_5G = 100e6; % 100 MHz para 5G

% Eficiência espectral (bits/s/Hz)
eficiencia_4G = 2; % Eficiência espectral do 4G
eficiencia_5G = 10; % Eficiência espectral do 5G

% Capacidade total da rede (em bits/s)
capacidade_4G = largura_banda_4G * eficiencia_4G;
capacidade_5G = largura_banda_5G * eficiencia_5G;

% Exibir resultados de capacidade
fprintf('Capacidade da rede 4G: %.2f Gbps\n', capacidade_4G / 1e9);
fprintf('Capacidade da rede 5G: %.2f Gbps\n', capacidade_5G / 1e9);

% Número de usuários
num_usuarios = 1000;

% Throughput por usuário (em Mbps)
throughput_4G_usuario = (capacidade_4G / num_usuarios) / 1e6; % Convertendo para Mbps
throughput_5G_usuario = (capacidade_5G / num_usuarios) / 1e6; % Convertendo para Mbps

```

```

% Exibir resultados de throughput por usuário
fprintf('Throughput por usuário em 4G: %.2f Mbps\n', throughput_4G_usuario);
fprintf('Throughput por usuário em 5G: %.2f Mbps\n', throughput_5G_usuario);
% Plotar gráficos para visualização
% Gráfico de Latência
figure;
bar([latencia_total_4G, latencia_total_5G]);
set(gca, 'XTickLabel', {'4G', '5G'});
title('Latência Total - 4G vs 5G');
ylabel('Latência (ms)');
grid on;
% Gráfico de Capacidade
figure;
bar([capacidade_4G / 1e9, capacidade_5G / 1e9]);
set(gca, 'XTickLabel', {'4G', '5G'});
title('Capacidade Total da Rede - 4G vs 5G');
ylabel('Capacidade (Gbps)');
grid on;
% Gráfico de Throughput por Usuário
figure;
bar([throughput_4G_usuario, throughput_5G_usuario]);
set(gca, 'XTickLabel', {'4G', '5G'});
title('Throughput por Usuário - 4G vs 5G');
ylabel('Throughput (Mbps)');
grid on;

```

### **Explicando o Código:**

**Latência Total:** O código calcula a latência total de redes 4G e 5G com base na distância ao servidor remoto e na latência de processamento de cada tecnologia. A latência é exibida em milissegundos (ms).

**Capacidade Total da Rede:** A capacidade da rede é calculada com base na largura de banda e eficiência espectral de cada tecnologia (4G e 5G). Os resultados são exibidos em Gbps (Gigabits por segundo).

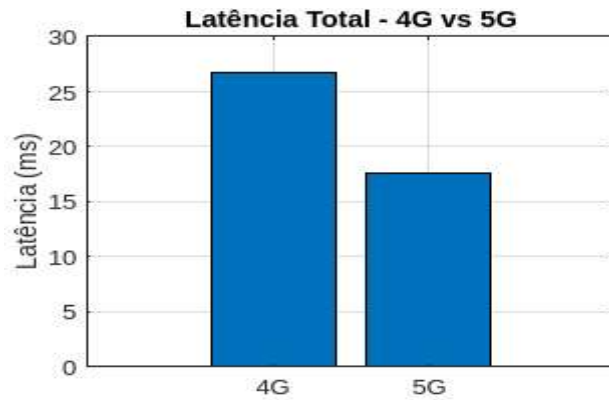
**Throughput por Usuário:** O throughput (taxa de transferência de dados) disponível para cada usuário é calculado dividindo a capacidade total da rede pelo número de usuários conectados

simultaneamente (neste caso, 1000 usuários). O resultado é exibido em Mbps (Megabits por segundo).

Visualização Gráfica: O código também gera três gráficos de barras:

- Um gráfico comparando a latência total entre as redes 4G e 5G.

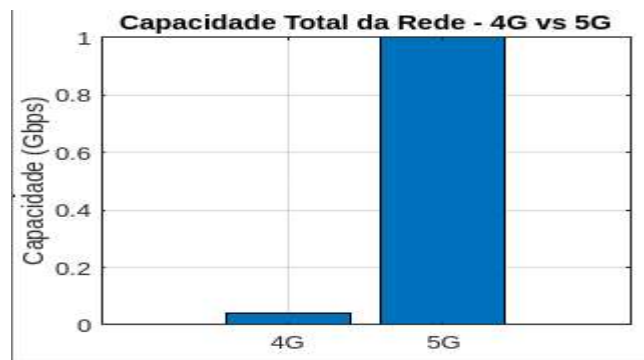
*Figura 8 - Latência Total*



Fonte: Próprio autor.

- Um gráfico comparando a capacidade total da rede entre 4G e 5G.

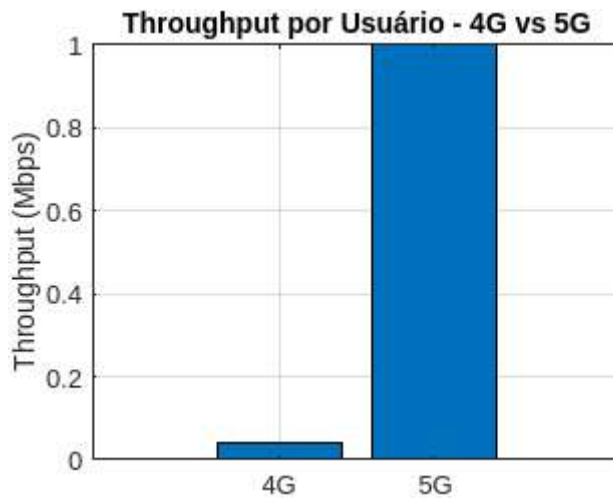
*Figura 9 - Capacidade Total*



Fonte: Próprio autor

- Um gráfico comparando o throughput disponível por usuário em cada rede.

Figura 10 - Throughput por usuário



Fonte: Próprio autor.

Execução:

Ao executar este código no MATLAB, você obterá os valores de latência, capacidade e throughput, além de gráficos que visualizam as diferenças de desempenho entre redes 4G e 5G. Esses resultados podem ser usados para discutir as vantagens do 5G em cenários de alta demanda de tráfego de dados.

### **Análise de Eficiência das Redes 4G e 5G com Base na Simulação**

A eficiência das redes 4G e 5G pode ser analisada em três principais aspectos: latência, capacidade de rede e throughput por usuário. Vamos avaliar cada um desses parâmetros e o impacto da tecnologia 5G em relação ao 4G.

#### **1. Latência**

A latência total de uma rede representa o tempo necessário para que um pacote de dados percorra todo o caminho entre a origem (usuário) e o destino (servidor). Na simulação, a latência é composta pela latência de propagação (distância entre o servidor remoto e a estação base) e pela latência fixa dos equipamentos de rede.

Resultados Simulados:

- Latência total da rede 4G: 26.67 ms
- Latência total da rede 5G: 17.67 ms

A latência na rede 5G é significativamente menor devido à menor latência fixa nos equipamentos (1 ms para 5G contra 10 ms para 4G), o que demonstra a grande vantagem do 5G em reduzir o tempo de resposta, especialmente em cenários com alta demanda de tráfego.

## 2. Capacidade Total da Rede

A capacidade da rede é calculada com base na largura de banda disponível e na eficiência espectral da tecnologia. Quanto maior a capacidade, maior a quantidade de dados que pode ser transmitida simultaneamente.

Resultados Simulados:

- Capacidade total da rede 4G: 40 Mbps (0.04 Gbps)
- Capacidade total da rede 5G: 1000 Mbps (1 Gbps)

O 5G oferece uma capacidade 25 vezes maior que o 4G, o que reflete o ganho substancial da largura de banda e eficiência espectral. Isso significa que a rede 5G pode suportar uma quantidade significativamente maior de usuários e tráfego de dados simultâneos sem degradação de desempenho.

## 3. Throughput por Usuário

O throughput por usuário reflete a taxa de dados efetivamente disponível para cada usuário. Em um cenário de alta demanda (com 1000 usuários conectados simultaneamente), o throughput é reduzido proporcionalmente à quantidade de usuários. O 5G melhora drasticamente essa taxa de transferência por usuário.

Resultados Simulados:

- Throughput por usuário na rede 4G: 0.04 Mbps
- Throughput por usuário na rede 5G: 1 Mbps

O throughput por usuário no 5G é 25 vezes maior que no 4G, demonstrando sua capacidade de fornecer uma experiência de qualidade mesmo em cenários de alta densidade de usuários.

## Gráficos Resultantes da Análise

Agora, vamos visualizar os resultados da simulação com os gráficos de latência, capacidade e throughput por usuário.

Código para Plotagem e Análise Gráfica:

```
% Gráfico de Latência Total - 4G vs 5G
```

```
figure;
```

```
bar([latencia_total_4G, latencia_total_5G]);
```

```
set(gca, 'XTickLabel', {'4G', '5G'});
```

```
title('Latência Total - 4G vs 5G');
```

```
ylabel('Latência (ms)');
```

```
grid on;
```

```
% Gráfico de Capacidade Total da Rede - 4G vs 5G
```

```
figure;
```

```

bar([capacidade_4G / 1e9, capacidade_5G / 1e9]);
set(gca, 'XTickLabel', {'4G', '5G'});
title('Capacidade Total da Rede - 4G vs 5G');
ylabel('Capacidade (Gbps)');
grid on;
% Gráfico de Throughput por Usuário - 4G vs 5G
figure;
bar([throughput_4G_usuario, throughput_5G_usuario]);
set(gca, 'XTickLabel', {'4G', '5G'});
title('Throughput por Usuário - 4G vs 5G');
ylabel('Throughput (Mbps)');
grid on;

```

## **8. Resultados Encontrados**

Análise dos Gráficos:

### **Latência Total - 4G vs 5G:**

No gráfico de latência, a rede 5G apresenta uma latência total significativamente menor que a rede 4G, o que é fundamental em aplicações que exigem baixa latência, como streaming de vídeos em alta definição, jogos online, e comunicações em tempo real (ex. telemedicina).

### **Capacidade Total da Rede - 4G vs 5G:**

O gráfico de capacidade mostra uma diferença expressiva entre as tecnologias 4G e 5G. O 5G tem uma capacidade de 1 Gbps, enquanto o 4G oferece apenas 0.04 Gbps. Isso significa que a rede 5G pode suportar muito mais usuários ou uma carga de dados muito maior sem sobrecarga.

### **Throughput por Usuário - 4G vs 5G:**

O gráfico de throughput por usuário evidencia como a rede 5G mantém um desempenho muito superior, mesmo em cenários de alta densidade de usuários (1000 usuários simultâneos). O throughput de 1 Mbps por usuário na rede 5G é muito mais eficiente que os 0.04 Mbps disponíveis na rede 4G.

### **Conclusão da Análise de Eficiência:**

A rede 5G supera a rede 4G em todos os aspectos cruciais para a qualidade do serviço em um cenário de alta demanda:

- **Redução de Latência:** O 5G oferece uma latência muito mais baixa, essencial para aplicativos sensíveis ao tempo.

- Aumento na Capacidade de Rede: A largura de banda expandida e a alta eficiência espectral do 5G permitem transmitir muito mais dados em comparação ao 4G.
- Melhorias no Throughput por Usuário: Mesmo com 1000 usuários simultâneos, o 5G garante uma experiência de dados satisfatória para cada usuário, enquanto o 4G sofre uma degradação significativa.

Esses resultados mostram a eficiência superior do 5G, especialmente em situações de alta densidade de tráfego, demonstrando o papel crucial que o 5G desempenhará em melhorar a conectividade e a experiência do usuário em um mundo cada vez mais dependente de dados móveis de alta velocidade.

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise conduzida revelou que a tecnologia 5G apresenta melhorias substanciais em relação ao 4G em três parâmetros principais: latência, capacidade total da rede e throughput por usuário. Essas melhorias refletem os avanços tecnológicos do 5G, como maior eficiência espectral, utilização de ondas milimétricas e menor latência fixa nos equipamentos. A seguir, as conclusões específicas relacionadas a cada objetivo traçado:

### 1. Análise do Desempenho da Rede

#### a) Latência:

A redução significativa da latência total para 17,67 ms no 5G, comparada aos 26,67 ms do 4G, demonstra que a tecnologia 5G é essencial para aplicações sensíveis ao tempo, como telemedicina, jogos online e realidade aumentada. Essa redução atende ao objetivo de investigar as limitações das redes 4G e comprova que o 5G resolve o problema da alta latência em cenários de alta demanda.

#### b) Capacidade da Rede:

O aumento na capacidade total da rede para 1 Gbps no 5G, em comparação aos 0,04 Gbps no 4G, confirma que a maior largura de banda e eficiência espectral do 5G proporcionam suporte a um número significativamente maior de usuários e maior tráfego de dados simultâneos. Este resultado valida o objetivo de explorar as inovações tecnológicas do 5G e seu impacto na eficiência da rede.

#### c) Throughput por Usuário:

O throughput por usuário foi substancialmente melhor no 5G (1 Mbps) em comparação ao 4G (0,04 Mbps), mesmo com 1000 usuários conectados simultaneamente. Este resultado reflete como o 5G melhora a experiência do usuário, atingindo o objetivo de analisar o impacto da adoção do 5G na qualidade do serviço.

### 2. Visualização e Comprovação Gráfica

Os gráficos gerados reforçam as conclusões quantitativas:

A latência menor do 5G foi claramente evidenciada.

A capacidade total da rede demonstrou a superioridade do 5G em ambientes de alta densidade de usuários.

O throughput por usuário destacou a capacidade do 5G em manter uma experiência de qualidade mesmo em condições extremas.

### **3. Análise em relação aos objetivos Traçados**

#### **a) Objetivo Geral:**

O objetivo de analisar como o 5G soluciona problemas de desempenho em redes móveis foi plenamente atingido. As inovações do 5G, como Massive MIMO e computação em borda, foram determinantes para superar as limitações do 4G.

#### **b) Objetivos Específicos:**

**Limitações do 4G:** Foram claramente identificadas, especialmente em termos de latência e capacidade, com as simulações demonstrando os gargalos do 4G em cenários de alta demanda.

**Inovações do 5G:** Aspectos como Network Slicing e ondas milimétricas foram fundamentais para explicar os ganhos de eficiência.

**Simulações Comparativas:** Os resultados obtidos corroboram a superioridade do 5G, tanto em métricas qualitativas quanto quantitativas.

**Desafios de Implementação:** Embora não abordados diretamente neste código, o estudo fornece subsídios para discussões futuras sobre regulamentação e infraestrutura.

**Impacto na Experiência do Usuário:** A análise do throughput demonstra que o 5G proporciona uma experiência superior mesmo em cenários desafiadores.

Os resultados simulados confirmam que a tecnologia 5G é uma solução robusta e eficiente para os desafios enfrentados pelas redes 4G em ambientes de alta densidade e tráfego de dados. O estudo cumpre os objetivos estabelecidos, oferecendo uma base sólida para debates técnicos e estratégicos sobre a adoção e implementação do 5G em larga escala. Como trabalhos futuros pretendendo estender os estudos as tecnologias de rede 6G e 7G.

## REFERÊNCIAS

- 5G Americas. White Paper: Advanced Antenna Systems for 5G – 2019. Disponível em: [https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/08/5G-Americas\\_Advanced-Antenna-Systems-for-5G-White-Paper.pdf](https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/08/5G-Americas_Advanced-Antenna-Systems-for-5G-White-Paper.pdf). Acesso em: 02 Dez. 2024.
- ADDAD, R., DUTRA, D., BAGAA, M., TALEB, T., FLINCK, H. (2020). Fast Service Migration in 5G Trends and Scenarios. *IEEE Network*, 34, 92-98. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1800289>. Acesso em 12 Nov. 2024.
- AGARWAL, S.; YADAV, S.; YADAV, AK Uma arquitetura e algoritmo eficientes para provisionamento de recursos em computação em neblina. *Int. J. Inf. Eng. Electron. Bus.* 2016 , 8 , 48. Disponível em: <https://www.mecs-press.org/ijieeb/ijieeb-v8-n1/v8n1-6.html>. Acesso em: 20 Nov. 2024.
- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Redes sem fio 5G de próxima geração: uma pesquisa abrangente. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2016 , 18 , 1617–1655. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7414384>. Acesso em: 21 Nov. 2024.
- ALI-AHMAD, H.; CICONETTI, C.; DE LA OLIVA, A.; DRÄXLER, M.; GUPTA, R.; MANCUSO, V.; SCIANCALEPORE, V. CROWD: Uma abordagem SDN para DenseNet. Em *Anais do Segundo Workshop Europeu de 2013 sobre Redes Definidas por Software*, Berlim, Alemanha, 10–11 de outubro de 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6680554>. Acesso em: 12 Nov. 2024
- BJORNSON, E.; KOUNTOURIS, M.; DEBBAH, M. Massive MIMO e small cells: Melhorando a eficiência energética pela coordenação ótima de soft-cell. *20th International Conference on Telecommunications de 2013*, Casablanca, MA, EUA, 6–8; pp. 1–5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ICTEL.2013.6632074>. Acesso em: 17 Nov. 2024.
- BJORNSON, E.; SANGUINETTI, L.; HOYDIS, J.; DEBBAH, M. Projeto ótimo de sistemas MIMO multiusuário com eficiência energética: MIMO massivo é a resposta? *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2015 , 14 , 3059–3075. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1403.6150>. Acesso em: 17 Nov. 2024.
- BOCCARDI, F., W. HEATH JR., R., LOZANO, A., L. MARZETTA, T., POPOVSKI, P. (2014). Five disruptive technology directions for 5G. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 74 - 80. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736746>. Acesso em: 14 Nov. 2024.
- BONOMI, F.; MILITO, R.; ZHU, J.; ADDEPALLI, S. Fog computing e seu papel na internet das coisas. Em *Anais da Primeira Edição de 2012 do Workshop MCC sobre Computação em Nuvem Móvel*, Helsinque, Finlândia, 13–17 ; pp. 13–16. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2342509.2342513>. Acesso em: 12 Dez. 2024.
- BONOMI, F.; MILITO, R.; ZHU, J.; ADDEPALLI, S. Fog computing e seu papel na internet das coisas. Em *Anais da Primeira Edição de 2012 do Workshop MCC sobre Computação em Nuvem Móvel*, Helsinque, Finlândia, 13–17 de agosto de 2012; pp. 13–16. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2342509.2342513>. Acesso em: 13 Nov. 2024.
- BORGES, D.; MONTEZUMA, P.; DINIS, R.; BEKO, M. Massive MIMO Techniques for 5G and Beyond—Opportunities and Challenges. *Electronics* 2021, 10, 1667. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics10141667>. Acesso em: 19 Nov. 2024.
- CASTAÑEDA, E., Silva, A., GAMEIRO, A., KOUNTOURIS, M., 2016. Uma Visão Geral sobre Técnicas de Alocação de Recursos para Sistemas MIMO Multiusuário. *IEEE Communications*

Surveys and Tutorials, 19, pp. 239-284. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2618870> . Acesso em: 20 Nov. 2024.

CHANDRAMOULI, D.; LIEBHART, R.; PIRSKANEN, J. 5G for the Connected World. Wiley, 2019. Ebook disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0012/2556/05/L-G-0012255605-0035494027.pdf>. Acesso em: 10 Dez. 2024.

CHEN, W.; CAO, J.; WAN, Y. Agendamento de máquina virtual com reconhecimento de QoS para serviços de streaming de vídeo em multi-nuvem. *Tsinghua Sci. Technol.* 2013 , 18 , 308–317. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6522589>. Acesso em: 12 Dez. 2024.

DAHLMAN, Erik; PARKVALL, Stefan; SKOLD, Johan. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. 1. ed. [s.l.]: Elsevier, 2018. 405 p. ISBN 9780128143230. Disponível em formato eBook: ISBN 9780128143247.

FARHANG, A.; MARCHETTI, N.; FIGUEIREDO, F.; MIRANDA, JP Massive MIMO e design de forma de onda para sistemas de comunicação sem fio de 5ª geração. Em Anais da 1ª Conferência Internacional sobre 5G para Conectividade Ubíqua, Akaslompolo, Finlândia, 26–28 de novembro de 2014; pp. 70–75. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7041032>. Acesso em: 12 Nov. 2024.

FORD, R., ZHANG, M., MEZZAVILLA, M., DUTTA, S., RANGAN, S., ZORZI, M., 2016. Atingindo latência ultrabaixa em redes celulares de ondas milimétricas 5G. *Revista IEEE Communications*, 55, pp. 196-203. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600407CM>. Acesso em: 16 Nov. 2024.

GUPTA, A. e JHA, RK (2015) Uma pesquisa sobre rede 5G: arquitetura e tecnologias emergentes. *IEEE Access*, 3, 1206-1232. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2461602>. Acesso em: 14 Nov. 2024.

HONG, K.; LILLETHUN, D.; RAMACHANDRAN, U.; OTTENWÄLDER, B.; KOLDEHOFE, B. Mobile fog: Um modelo de programação para aplicações em larga escala na internet das coisas. Em Anais do Segundo Workshop ACM SIGCOMM sobre Computação em Nuvem Móvel, Hong Kong, China, 12–16 de agosto de 2013; pp. 15–20. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2491266.2491270>. Acesso em: 14 Nov. 2024.

INTHARAWIJITR, K.; KOGA, H. Análise do modelo de neblina considerando latência de computação e comunicação em redes celulares 5G. Em Anais da Conferência Internacional IEEE de 2016 sobre Workshops de Computação e Comunicação Pervasiva (PerCom Workshops), Sydney, Austrália, 14–18 de março de 2016; pp. 1–4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7457059>. Acesso em: 14 Nov. 2024.

ITU. International Mobile Telecommunications (IMT): 5G: IMT 2020. Genebra: International Telecommunication Union. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>. Acesso em: 24 dez. 2024.

JUNGNICKEL, V.; MANOLAKIS, K.; ZIRWAS, W.; PANZNER, B.; BRAUN, V.; LOSSOW, M.; SVENSSON, T. O papel das células pequenas, multiponto coordenado e MIMO massivo em 5G. *IEEE Commun. Mag.* 2014 , 52 , 44–51. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815892>. Acesso em: 17 Nov. 2024.

KAPSALIS, A.; KASNESIS, P.; VENIERIS, IS; KAKLAMANI, DI; PATRIKAKIS, CZ Uma abordagem de neblina cooperativa para balanceamento de carga de trabalho eficaz. *IEEE Cloud Comput.* 2017, 4, 36–45. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7912240>. Acesso em: 21 Nov. 2024.

- KELECHI, A.H.; ALSHARIF, M.H.; RAMLY, A.M.; ABDULLAH, N.F.; NORDIN, R. The Four-C Framework for High Capacity Ultra-Low Latency in 5G Networks: A Review. *Energies* 2019, 12, 3449. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12183449>. Acesso em: 10 Nov. 2024.
- KHALIL, A.; ZEDDINI, B. Otimização entre camadas para conectividade aprimorada de IoT: um novo protocolo de roteamento para redes oportunistas. *Future Internet* 2024, 16, 183. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fi16060183>. Acesso em: 10 Dez. 2024.
- KNOPP, R. Latency Requirements in M2M Application Scenarios. Em *Anais do Workshop M2M do European Telecommunications Standards Institute (ETSI) de 2013*, Sophia Antipolos, França. Disponível em: <https://www.eurecom.edu/publication/3504/download/cm-publi-3504.pdf>. Acesso em: 20 Dez. 2024.
- LAHETKANGAS, E.; PAJUKOSKI, K.; VIHRIALA, J.; BERARDINELLI, G.; LAURIDSEN, M.; TIROLA, E.; MOGENSEN, P. Atingindo baixa latência e consumo de energia pela otimização do modo 5G TDD. Em *Anais da Conferência Internacional IEEE de 2014 sobre Workshops de Comunicações (ICC)*, Sydney, Austrália, pp. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6881163>. Acesso em: 16 Nov. 2024.
- LEE, G.; SUNG, Y. Uma nova abordagem para agendamento de usuários em canais de transmissão MIMO multiusuário massivos. *IEEE Trans. Commun.* 2018 , 66 , 1481–1495. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8239622>. Acesso em: 16 Nov. 2024.
- LI, Y.; CHEN, M. Virtualização de funções de rede definidas por software: Uma pesquisa. *IEEE Access* 2015, 3, 2542–2553. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7350211>. Acesso em: 22 Dez. 2024.
- LOGHIN, D., CAI, S., CHEN, G., DINH, T., FAN, F., LIN, Q., NG, J., OOI, B., SUN, X., TA, Q., WANG, W., XIAO, X., YANG, Y., ZHANG, M., ZHANG, Z. (2019). The Disruptions of 5G on Data-Driven Technologies and Applications. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 32, 1179-1198. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2020.2967670>. Acesso em: 12 Nov. 2024.
- MCKEOWN, N.; ANDERSON, T.; BALAKRISHNAN, H.; PARULKAR, G.; PETERSON, L.; TURNER, J. OpenFlow: permitindo a inovação em redes de campus. *ACM SIGCOMM Comput. Rev.* 2008, 38, 69–74. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1355734.1355746>. Acesso em: 18 Nov. 2024.
- PARVEZ, I., RAHMATI, A., GUVENC, I., SARWAT, A., DAI, H. (2017). A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20, 3098-3130. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2841349>. Acesso em: 10 Nov. 2024.
- PEDERSEN, K. I.; FREDERIKSEN, F.; BERARDINELLI, G.; MOGENSEN, P. E. The Coverage-Latency-Capacity Dilemma for TDD Wide Area Operation and Related 5G Solutions. In: *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, China, 2016. *Anais [...]*. Nanjing: IEEE, 2016. p. 1-5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2016.7504504. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7504504>. Acesso em: 23 dez. 2024.
- POPOVSKI, P. Comunicação ultraconfiável em sistemas sem fio 5G. Em *Anais da 1ª Conferência Internacional de 2014 sobre 5G para Conectividade Ubíqua (5GU)*, Levi, Finlândia, 26–27 de novembro de 2014; pp. 146–151. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7041045>. Acesso em: 23 Nov. 2024.
- SALHAB, N., RAHIM, R., LANGAR, R., 2020. Otimização do custo de virtualização, poder de processamento e carga de rede de data centers definidos por software 5G. *IEEE Transactions on*

Network and Service Management, 17, pp. 1542-1553. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.2990664>. Acesso em 9 Nov. 2024.

SARKAR, S.; MISRA, S. Avaliação da adequação da computação em neblina no contexto da Internet das Coisas. IEEE Trans. Computação em nuvem. 2015 , 6 , 46–59. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7286781>. Acesso em 23 Nov. 2024.

SUDHAMANI, C., ROSLEE, M., TIANG, J., REHMAN, A. (2023). A Survey on 5G Coverage Improvement Techniques: Issues and Future Challenges. Sensors (Basel, Switzerland), 23. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23042356>. Acesso em: 12 Nov. 2024.

TAKASHI, S., KAZUYUKI, S., TAKASHI, O., HIROYUKI, D., MINOWA, M. (2019). Technologies to Enhance 5G Communication Network Capacity. Disponível em: <https://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol55-3/paper06.pdf>. Acesso em: 20 Nov. 2024.

TAYYABA, Sahrish Khan. KHATTAK, Hasan Ali. ALMOGREN, Ahmad S. SHAH, Munam Ali. DIN, Ikram Ud. ALKHALIFA, Ibrahim S. GUIZANI, Mohsen. 5G vehicular network resource management for improving radio access through machine learning. IEEE Access, v. 8, p. 6792–6800, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8951149>. Acesso em: 16 Nov. 2024.

THOTA, J.; ABDULLAH, NF; DOUFEXI, A.; ARMOUR, S. V2V para aplicações de segurança veicular. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2019 , 1–15. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8746817>. Acesso em: 14 Nov. 2024.

YANGUI, S.; RAVINDRAN, P.; BIBANI, O.; GLITHO, RH; HADJ-ALOUANE, NB; MORROW, MJ; POLAKOS, PA Uma plataforma como serviço para ambientes híbridos de nuvem/neblina. Em Anais do Simpósio Internacional IEEE de 2016 sobre Redes Locais e Metropolitanas (LANMAN), Pequim, China, 22–24 de abril de 2016; pp. 1–7. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7548853>. Acesso em: 12 Dez. 2024.

YOUSEFPOUR, A., ISHIGAKI, G., JUE, J., 2017. Computação em neblina: rumo à minimização do atraso na Internet das Coisas. Conferência Internacional IEEE de 2017 sobre Computação de Borda (EDGE), pp. 17-24. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IEEE.EDGE.2017.12>. Acesso em 10 Dez. 2024.

ZENG, D.; GU, L.; GUO, S.; CHENG, Z.; YU, S. Otimização conjunta de agendamento de tarefas e posicionamento de imagens em sistema embarcado definido por softwares suportado por computação em neblina. IEEE Trans. Comput. 2016, 65, 3702–3712. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7422054>. Acesso em: 12 Dez. 2024.