

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

MARISE SANTOS GALVÃO

**UM ESTUDO DE CASO DA TECNOLOGIA 5G NA UFU
CAMPUS PATOS DE MINAS**

Patos de Minas – MG

2024

MARISE SANTOS GALVÃO

**UM ESTUDO DE CASO DA TECNOLOGIA 5G NA UFU
CAMPUS PATOS DE MINAS**

Projeto Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Karine Barbosa Carbonaro

Patos de Minas – MG

2024

UM ESTUDO DE CASO DA TECNOLOGIA 5G NA UFU

CAMPUS PATOS DE MINAS

Projeto Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Karine Barbosa Carbonaro

Patos de Minas, 22 de novembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Karine Barbosa Carbonaro – FEELT/UFU (Orientadora)

Prof. Dr. Júlio César Coelho – FEELT/UFU

Prof. Dr. Rafael Augusto da Silva – FEELT/UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha orientadora Professora Dr^a. Karine, pela sua sábia orientação, apoio e amizade ao longo deste processo. Sua dedicação e ajuda foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. A todos os professores da UFU que ao longo da graduação me proporcionaram a construção do conhecimento.

Agradeço aos meus pais, irmãos e sobrinhos pelo apoio e encorajamento que foram fundamentais nos momentos desafiadores. Em especial ao meu pai (*in memoria*), que desde sempre apoiou nos estudos e nunca mediu esforços para esta realização.

Aos meus amigos e colegas de curso, que compartilharam comigo não apenas os desafios acadêmicos, mas também momentos de alegria e descontração, agradeço por estarem ao meu lado durante esta jornada.

Por último, mas não menos importante, gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos os funcionários da instituição, cujo comprometimento com a excelência acadêmica proporcionou um ambiente propício para meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

A evolução das redes móveis, desde a introdução da Primeira Geração (1G) até geração atual, Quinta Geração (5G), trouxe melhorias significativas na velocidade de comunicação, capacidade de conexão e funcionalidades, impactando diversos setores da sociedade. O 5G oferece velocidade de conexão muito superior às das gerações anteriores, além de permitir a integração com a Internet das Coisas (IoT) e o suporte a tecnologias emergentes, como carros autônomos e realidade virtual. Neste trabalho é apresentado um estudo de caso, baseado em simulação, da rede 5G em comparação a 4G LTE nos prédios da Universidade Federal de Uberlândia na cidade de Patos de Minas. São avaliadas algumas métricas como latência e vazão. Os resultados obtidos no simulador *Vienna 5G System Level Simulator* comprovam os valores de referência citados na literatura e demonstram o desempenho superior da quinta geração de redes móveis.

Palavras-chave: 5G, 4G LTE, vazão, latência, *Vienna 5G System Level Simulator*.

ABSTRACT

The evolution of mobile networks, from the introduction of 1G to the current 5G, has brought significant improvements in communication speed, connection capacity, and functionalities, impacting various sectors of society. 5G offers much higher connection speeds than previous generations and enables integration with the Internet of Things and supports emerging technologies, such as autonomous vehicles and virtual reality. This paper presents a case study, based on simulation, of the 5G network compared to 4G LTE across Universidade Federal de Uberlândia buildings in the city of Patos de Minas. The metrics such as latency and throughput are evaluated. The results obtained using the Vienna 5G System Level Simulator confirm the reference values cited in the literature and demonstrate the superior performance of the fifth generation of mobile networks.

Keywords: 5G, 4G LTE, throughput, latency, *Vienna 5G System Level Simulator*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição do sinal 5G na cidade de Patos de Minas.....	15
Figura 2.1 – Gerações de telefonia celular	17
Figura 2.2 – Evolução do 2G para 3G.....	18
Figura 2.3 – Modos <i>Non Standalone</i> e <i>Standalone</i>	20
Figura 2.4 – Compartilhamento Dinâmico de Espectro.....	21
Figura 2.5 – Composição da rede móvel 5G.....	21
Figura 2.6 – Exemplos de equipamentos de usuários.....	22
Figura 2.7 – Componentes da rede 5G.....	23
Figura 3.1 – Delimitação da área no município de Patos de Minas	25
Figura 3.2 – Localização dos blocos da UFU campus de Patos de Minas	26
Figura 3.3 –Modelo de tráfego de taa constante.....	30
Figura 3.4 – Gráfico de PSD	32
Figura 3.5 – SINR: (a) <i>uplink</i> (b) <i>downlink</i>	32
Figura 4.1 – Vazão de dados em Patos de Minas	35
Figura 4.2 – Latência do pacote em Patos de Minas	36
Figura 4.3 – SINR e SNR na cidade de Patos de Minas.....	36
Figura 4.4 – BLER médiana cidade de Patos de Minas	37
Figura 4.5 – Vazão de dados no bloco Alpha.....	37
Figura 4.6 – Latência do pacote no bloco Alpha.....	38
Figura 4.7 – SINR e SNR no bloco Alpha	38
Figura 4.8 – BLER médiano bloco Alpha	39
Figura 4.9 – Vazão de dados no bloco Laboratórios	39
Figura 4.10 – Latência do pacote no bloco Laboratórios	40
Figura 4.11 – SINR e SNR no bloco Laboratórios.....	40
Figura 4.12 – BLER médiano bloco Laboratórios	41
Figura 4.13 – Vazão de dados no bloco Administrativo	41
Figura 4.14 – Latência do pacote no bloco Administrativo	42
Figura 4.15 – SINR e SNR no bloco Administrativo	42
Figura 4.16 – BLER médiano bloco Administrativo.....	43

Figura 4.17 – Número e usuários LTE e 5G.....	45
Figura 4.18 –Vazão nas redes LTE e 5G, cidade de Patos de Minas	46
Figura 4.19 – Vazão nas redes LTE e 5G, bloco Alpha	46
Figura 4.20 – Vazão nas redes LTE e 5G, bloco Laboratórios	47
Figura 4.21 – Vazão nas redes LTE e 5G, bloco Administrativo	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Trecho do código com os valores de latitude e longitude dos blocos da UFU na cidade de Patos de Minas.....	28
Quadro 3.2 – Trecho do código com os limites das regiões de interesse.....	28
Quadro 3.3 – Trecho do código com as informações do ambiente urbano.....	29
Quadro 3.4 – Trecho do código com os valores de frequência central e largura de banda....	29
Quadro 3.5 – Trecho do código com a caracterização das antenas transmissoras.....	30
Quadro 3.6 – Trecho do código com as perdas de propagação.....	30
Quadro 3.7 – Trecho do código com a caracterização do tráfego dos usuários.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de latitude e longitude dos blocos da UFU	26
Tabela 3.2 – Valores de frequência e largura de banda	28
Tabela 4.1 – Valores de SINR e SNR.....	43
Tabela 4.2 – Valores de Vazão	44
Tabela 4.3 – Valores de Vazão em LTE e 5G	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CR	<i>Constant Rate</i>
CQI	<i>Channel Quality Index</i>
D2D	<i>Device-to-Device</i>
DL	<i>Downlink</i>
DSS	<i>Dynamic Spectrum Sharing</i>
ECDF	<i>Empirical Cumulative Distribution Function</i>
eNodeB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
FBMC	<i>Filter Bank Multi Carrier</i>
FER	<i>Frame Error Rate</i>
GBR	<i>Garanted Bit Rate</i>
g gNodeB	<i>Next generation NodeB</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeatre Quest</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>

MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
NACK	<i>Negative Affirmative Acknowledgement</i>
NSA	<i>Non-Standalone</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RRH	<i>Remote Radio Head</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
SA	<i>Standalone</i>
SINR	<i>Signal-to-Noise and Interference Ratio</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNR	<i>Signal Noise Ration</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UFMC	<i>Universal Filtered Multi-Carrie</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira geração
3GPP	<i>3rd Generation PartnershipProject</i>
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	14
1.1 TEMA DO PROJETO.....	15
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.4 JUSTIFICATIVA.....	16
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 EVOLUÇÃO DAS GERAÇÕES DE COMUNICAÇÃO MÓVEL.....	17
2.2 REDE MÓVEIS 5G.....	19
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1 SIMULADOR VIENNA 5G.....	24
3.2 CENÁRIOS.....	24
3.3 PARÂMETROS.....	28
3.4 MÉTRICAS DE DESEMPENHO.....	31
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1 RESULTADOS NAS FREQUÊNCIAS 2,3 GHz e 3,5 GHz.....	35
4.1.1 Cidade de Patos de Minas.....	35
4.1.2 Bloco Alpha.....	37
4.1.3 Bloco Laboratórios.....	39
4.1.4 Bloco Administrativo.....	41
4.1.5 Discussão dos resultados	43
4.2 RESULTADOS COMPARATIVOS 4G E 5G.....	45
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	49
REFERÊNCIAS.....	51

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

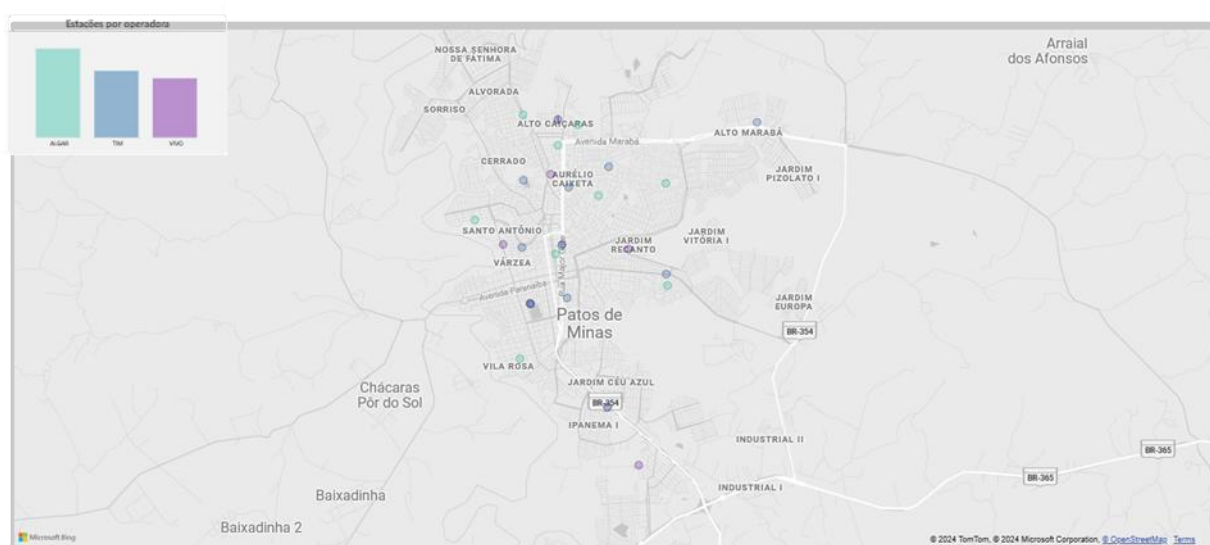
O conceito de celulares surgiu na década de 80 com a primeira geração (1G), que permitia chamadas de voz analógicas. Foi o primeiro sistema de telefonia móvel a ser comercializado. Na década de 90 surgiu a segunda geração (2G), geração que iniciou os serviços digitais e houve melhora nas chamadas de voz. A segunda geração trouxe a capacidade de enviar mensagens de texto, surgiram os primeiros celulares com SMS (*Short Message Service*). Os dispositivos se tornaram mais populares, devido ao custo mais acessível. Na transição entre o 2G e a terceira geração (3G) surgiu a tecnologia 2,5G, que se caracterizava pela melhora na transferência de dados. A tecnologia 3G foi apresentada nos anos 2000, e nela, os celulares deram lugar aos *smartphones*. Ela apresentava velocidade de conexão para as aplicações de navegação na *web* e videochamadas. Já na quarta geração (4G), a velocidade de conexão de 100 Mbps, permite aplicações como *streaming* de vídeo de alta definição e jogos online. A quinta geração (5G) é a mais recente geração de tecnologia de comunicação móvel. Ele estabelece uma rede de alta velocidade para os mais variados dispositivos inteligentes que integra a Internet das Coisas (IoT–*Internet of Things*), e fornece comunicação à distância com o mínimo de latência em tarefas que exigem alta precisão. Além disso, essa geração é considerada fundamental para impulsionar tecnologias emergentes como carros autônomos e realidade virtual. Os modos de uso destacados são (Farias, 2019). Banda Larga Móvel avançada (altas velocidades de *download* e *upload*), Controle de Missão Crítica (conexão com baixíssima latência e altíssima confiabilidade) e Internet das Coisas Massiva (grande quantidade de dispositivos IoT, com grande cobertura e baixo consumo de bateria).

Segundo a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), a tecnologia 5G começou a ser oferecida comercialmente em julho de 2020 e é estimado que até dezembro de 2029 todas as cidades do país a terão. E a previsão otimista é que o número de assinantes alcance 179 milhões até 2030. 5G completa dois anos no Brasil e deve beneficiar 84% da população até 2030 (Agência Gov, 2024). Esse número facilitará a inclusão digital e o acesso a serviços avançados, e consequentemente, estimulará o crescimento econômico sustentável e a inovação em diversos setores da economia brasileira. Entre novembro de 2023 e janeiro de 2024, a velocidade do 5G no Brasil cresceu 6,3%, essa tecnologia promete entregar de 10 a 20 Gbps, até 10 vezes mais rápido que a média do 4G atua (Lopes, 2023). Em Minas Gerais, 85 municípios já têm o sinal 5G liberado. O raio das antenas pode variar entre 1,5 km e 5 km,

dependendo da localização e das condições de instalação.

O sinal 5G da Algar Telecom cobrirá 20 bairros, abrangência superior a 80% da cidade. Os bairros da cidade são: Copacabana, Vila Garcia, Centro, Caiçaras, Lagoa Grande, Jardim Panorâmico, Ipanema, Caramuru, Vila Rosa, Rosário, Brasil, Sebastião Amorim, Cidade Nova, Alvorada, Cristo Redentor, Céu Azul, Sorriso, Jardim Paulistano, Gramado e Vila Santa Luzia (Lima, 2023). A Figura 1.1 mostra a distribuição do sinal 5G das operadoras (Algar, Tim e Vivo) no mapa da cidade de Patos de Minas nos bairros supracitados (Azevedo, 2024).

Figura 1.1 – Distribuição do sinal 5G na cidade de Patos de Minas.



Fonte: (Azevedo, 2024).

1.1 TEMA DO PROJETO

Análise do desempenho, baseada em simulação, da rede 5G nos prédios da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) na cidade de Patos de Minas.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Observou-se que há poucos artigos e estudos, em português, que utilizam algum tipo de ferramenta de modelagem de sistemas de comunicação sem fio. Algumas monografias encontradas na literatura são descritas a seguir. Na monografia intitulada “Estudo do comportamento de redes 5G e 4G LTE (*Long Term Evolution*) em diferentes localidades e frequências”, o autor apresenta um estudo das redes em diferentes cenários para maximizar a experiência do usuário. Os resultados obtidos mostraram o comportamento destas tecnologias

com uma quantidade de 100 usuários, exibindo taxa de vazão, latência de pacote, relações sinal-interferência entre outras questões de interesse (Resende, 2023). Já o autor da monografia intitulada “Redes 5G: predição e avaliação de área de cobertura *outdoor*” elabora um projeto de planejamento de redes celulares *outdoor* na cidade Florianópolis utilizando o software *Atoll* de simulação de redes móveis 5G (Constantino, 2023). E na monografia “Análise dos parâmetros de rede 5G NR através de simulação utilizando a ferramenta NR *Throughput Tool* desenvolvida pela NOKIA”, a autora utiliza os dados coletados da simulação para identificar a configuração de rede que oferece o melhor *downlink throughput* (Nascimento, 2022).

1.3 OBJETIVOS

Esse Projeto Final de Curso tem como objetivo analisar o desempenho de algumas métricas da rede 5G na localização dos prédios da UFU na cidade de Patos de Minas. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- estudo da teoria da rede 5G;
- proposta de um estudo de caso;
- simulação das regiões de interesse;
- apresentação e discussão dos resultados obtidos.

1.4 JUSTIFICATIVA

O avanço das redes de comunicação móvel traz consigo a necessidade de ferramentas eficazes para simulação e análise. A capacidade de modelar cenários complexos e avaliar o desempenho das redes é essencial para entender as dinâmicas e desafios que surgem com essa nova geração de tecnologia. Nessa monografia, o objetivo principal é explorar a implementação e os resultados obtidos por meio do *Vienna 5G System Level Simulator* (Vienna 5G, 2024) de alguns cenários específicos na cidade de Patos de Minas, Minas Gerais, utilizando parâmetros técnicos e métricas que avaliam a eficácia das comunicações móveis 4G LTE e 5G.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica das gerações de redes celulares com enfoque na quinta geração. A metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho, com ênfase no estudo de caso, é descrita no Capítulo 3. Os resultados obtidos das simulações no *Vienna 5G System Level Simulator* são apresentados e discutidos no Capítulo 4. E por fim, as conclusões gerais e as sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados e descritos os principais conceitos teóricos relacionados a rede móvel de quinta geração.

2.1 EVOLUÇÃO DAS GERAÇÕES DE COMUNICAÇÃO MÓVEL

O desenvolvimento da rede de comunicação, desde o início até a chegada da rede 5G, é um processo robusto e complexo do ponto de vista da rede de telecomunicação. As gerações que antecederam a 5G são resumidas na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Gerações de telefonia celular.

1G	2G	3G	4G
1981	1992	2001	2010
			
2 kbps	64 kbps	2 Mbps	100 Mbps
Serviço básico de voz utilizando protocolos analógicos	Serviço de voz utilizando padrão digital (TDMA, CDMA e GSM)	Primeiro <i>Broadband</i> móvel utilizando protocolo IP (WCDMA/CDMA2000)	<i>Broadband</i> móvel no padrão unificado (LTE)

Fonte: Adaptado de (Felipe, 2024).

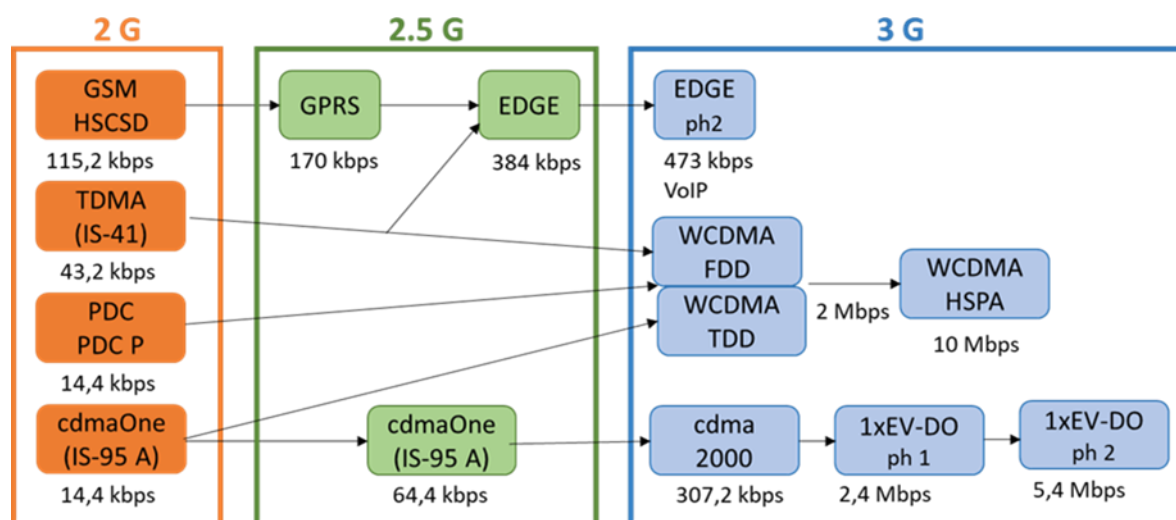
Segundo a literatura, o sistema analógico foi o primeiro a permitir, que em uma área com serviço de operador pudesse realizar uma comunicação. Na 1G com tecnologia AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), a única comunicação possível era de voz. Foi necessário então, a criação de um mecanismo que permitisse transferir uma chamada entre outra (Farias, 2019).

A primeira geração foi sucedida pelo 2G impulsionada pela necessidade de garantir estabilidade entre as ligações na faixa de frequência de MHz, para fins comerciais, políticos e

técnicos. Nessa geração, a codificação digital da voz e as técnicas de modulação digitais permitiram um aumento da eficiência espectral, que é 3 vezes maior que nas redes analógicas da 1G. Na 2G era possível o serviço de *roaming* internacional (possibilidade dos usuários efetuarem e receberem chamadas dentro de diferentes redes, com o mesmo equipamento móvel e o mesmo número) e foi disponibilizado um conjunto de serviços de voz e dados. Essa evolução tecnológica permitiu a existência de terminais móveis com portabilidade e a um custo atrativo para o usuário (Farias, 2019). Entre as tecnologias 2G mais utilizadas estão o TDMA (*Time Division Multiple Access*), o CDMA (*Code Division Multiple Access*) e o GSM (*Global System for Mobile Communications*).

As redes 3G surgiram da necessidade de melhores frequências e velocidades de transmissões superiores, conforme a Figura 2.2. O surgimento da rede 3G representou um avanço substancial nas comunicações móveis, atendendo às crescentes demandas dos consumidores por serviços de dados mais rápidos e uma experiência de comunicação móvel mais rica (Farias, 2019). Isso colocou as bases para as futuras gerações de redes móveis, como o 4G LTE e o 5G, que ajudaram a melhorar a conectividade e possibilitaram uma grande quantidade de novas aplicações.

Figura 2.2 – Evolução do 2G para 3G.



Fonte: Adaptado de (Santos, 2008).

Durante a era do 3G várias evoluções tecnológicas ocorreram para aprimorar a capacidade das redes e atender às demandas crescentes por serviços de dados mais rápidos e eficientes. HSPA foi uma das evoluções mais importantes na tecnologia 3G. Existem duas variantes principais (Farias, 2019): HSDPA (*High – Speed Downlink Packet Access*) para

melhorar as taxas de *download* e HSUPA (*High - Speed Uplink Packet Access*) para melhorar as taxas de *upload*. O HSDPA permitiu taxas de transferência de dados significativamente mais rápidas em comparação com as implementações 3G iniciais, proporcionando uma experiência mais próxima da banda larga para os usuários.

O início da rede 4G, também denominada LTE, foi uma grande revolução e possui uma arquitetura nova de rádios com padrões desenvolvidos pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Foi desenvolvido com o objetivo de obter uma velocidade de 1,5 km/h, com máxima qualidade e garante que o aparelho móvel e cada SIM *card* quando em movimento tenha suas configurações realizadas de modo remotamente para obter um melhor funcionamento.

2.2 REDE MÓVEIS 5G

A sucessora da rede 4G é a 5G que possui as seguintes principais características (Farias, 2019):

- aumento das taxas de transmissão de dados entregando maior velocidade de internet;
- maior densidade de conexões, aumento da quantidade de dispositivos conectados em uma determinada área;
- maior eficiência espectral que são o incremento da quantidade de dados transmitidos por unidade de espectro eletromagnético;
- maior eficiência energética dos equipamentos ocasionando redução do consumo de energia, e consequente aumento da sustentabilidade.

O desenvolvimento da rede 5G é baseado em QoS, com fluxos distintos denominados GBR (*Garanted Bit Rate*) e não GBR, para atender às diversas demandas de aplicativos e serviços. A arquitetura da rede 5G pode ser descrita em cinco camadas principais (Farias, 2019):

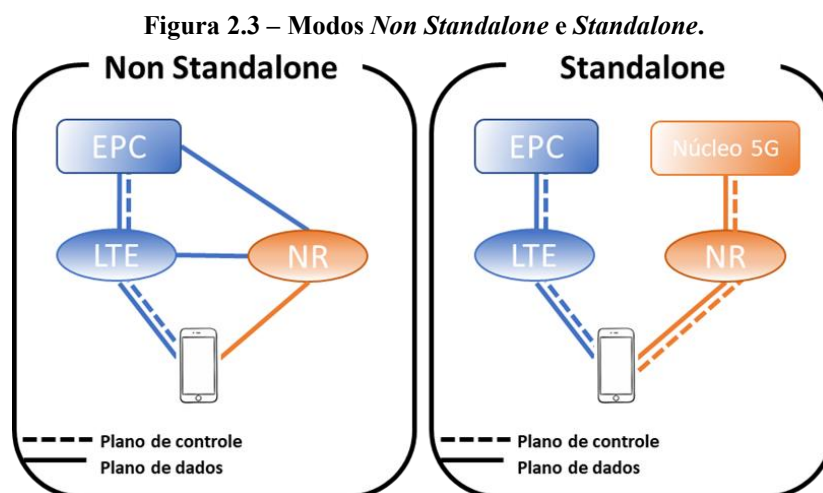
1. **Arquitetura de duas camadas:** consiste em uma macro célula na camada superior, que abrange células menores, como fento, pico, micro e macro, na camada inferior. A macrocélula é responsável por supervisionar e controlar as células menores;
2. **Arquitetura baseada em redes de rádio cognitivo:** permite uma arquitetura de múltiplas camadas reduzindo a interferência entre as células e minimizando o consumo de energia;
3. **Arquitetura de comunicação D2D (*device-to-device*):** comunicação "dispositivo para dispositivo" permite que dispositivos móveis próximos se comuniquem diretamente, sem a necessidade de envolver uma estação base;

4. **Arquitetura baseada na nuvem:** rede de acesso por rádio (RAN–*Radio Access Network*) é composta por estações que incluem antenas, unidades de rádio (RRH - *Remote Radio Head*) e unidades de processamento de banda (BBU), que podem estar localizadas a uma distância de até 40 km dos RRH;

5. **Arquitetura de energia eficiente:** visa reduzir o consumo de energia dos dispositivos e infraestrutura de rede. Isso é especialmente importante considerando o crescente número de dispositivos conectados e a necessidade de uma rede sustentável.

O 5G é dividido em duas categorias, de ondas milimétricas (mmWave) com alta velocidade, e o de frequência abaixo de 6 GHz com cobertura mais ampla (Teodoro, 2023).

A Figura 2.3 ilustra o resumo da ideia comparativa dos dois modos, NSA (*Non-Standalone*) e SA (*Standalone*) (Mainetti, 2024).



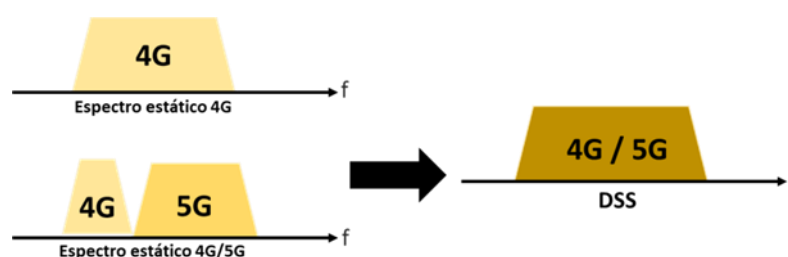
No modo *Non-Standalone*, conhecido como 5G impuro, tem-se a implementação do 5G integrada à infraestrutura existente de 4G LTE. Não é construída uma outra rede totalmente independente. Nesse modo, o 5G proporciona melhorias na capacidade e velocidade da transmissão de dados, enquanto a infraestrutura do 4G LTE é utilizada para gerenciar funções como controle de sinal, conexão e outras. Na NSA, o 5G não opera de forma totalmente autônoma e, por isso, algumas características da tecnologia, baixa latência e alta densidade de dispositivos, ficam limitadas.

No modo *Standalone*, conhecido como 5G puro, a tecnologia opera de maneira autônoma e, por isso proporciona baixa latência e alta densidade de dispositivos. Nesse modo, tanto o controle de sinal quanto o tráfego de dados são gerenciados exclusivamente pela infraestrutura 5G. O SA apresenta custos significativos e maior complexidade de

implementação porque se faz necessário a construção de uma nova infraestrutura de rede completa.

A Figura 2.4 ilustra o modo de Compartilhamento Dinâmico de Espectro (DSS - *Dynamic Spectrum Sharing*) é usado somente a infraestrutura 4G. Nesse modo, a velocidade é de aproximadamente 51,7 Mbits/s e latência de 60 milissegundos. Devido ao fato de ter o seu espectro compartilhado com outras tecnologias, o 5G DSS não entrega todo o potencial de uma rede 5G pura (Editores, 2020).

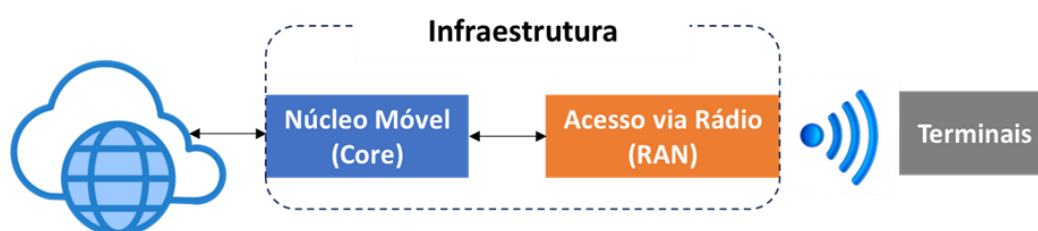
Figura 2.4 – Compartilhamento Dinâmico de Espectro.



Fonte: Adaptado de (Editores, 2020).

A Figura 2.5 ilustra a composição da rede móvel 5G que é dividida em terminais e infraestrutura. E a infraestrutura é composta pelo Núcleo Móvel (*Mobile Core*) e a Rede de Acesso Via Rádio (Peterson, Sunay, Davie, 2023), (Braga, Marques, 2023).

Figura 2.5 – Composição da rede móvel 5G.



Fonte: Adaptado de (Editores, 2020).

A. Terminais

A Figura 2.6 ilustra alguns dos equipamentos dos usuários (UE - *User Equipment*) das redes móveis. O UE é o dispositivo que o usuário final utiliza para acessar uma rede de comunicação móvel. Ele é responsável pela interação com a rede e pelo fornecimento de serviços de comunicação. O equipamento de usuário deve possuir a capacidade de se conectar e se comunicar com as estações base, gNodeB, e com a rede principal. Os equipamentos tradicionais correspondem a telefones e tablets, mas ao longo dos anos tem incluído cada vez

mais carros, drones, máquinas industriais e da agricultura, robôs, eletrodomésticos, equipamentos médicos, e outros (Peterson, Sunay, Davie, 2023).

Figura 2.6 – Exemplos de equipamentos de usuários.



Fonte: A autora.

B. Intraestrutura

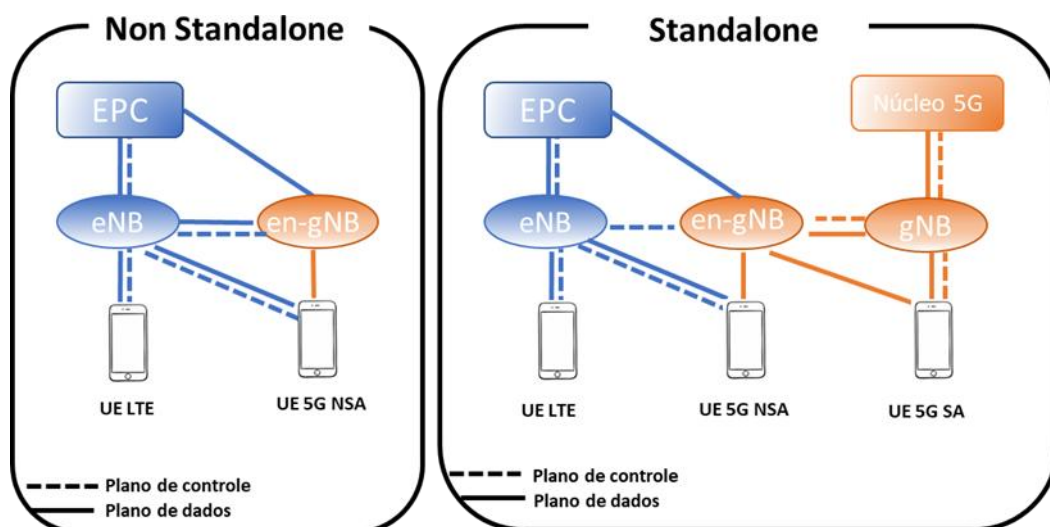
Uma das partes que compõem a infraestrutura é a RAN. Ela é composta de quatro elementos essenciais: antenas, rádios, unidades de banda base e controladores. A sua função é gerenciar o espectro de frequências para que esse seja usado de maneira eficiente e que os requisitos de qualidade de serviço de cada usuário sejam garantidos. A RAN é composta por diversas estações base distribuídas denominadas de eNodeB ou eNB (*evolved Node B*) no 4G, en-gNB no 5G NSA e g-NB (*next generation NodeB*) no 5G SA (Peterson, Sunay, Davie, 2023) como mostrado na Figura 2.7 (Mainetti, 2024).

O eNB fornece cobertura de rádio gerenciando os recursos de rádio e garante conectividade contínua e transmissão eficiente de dados aos equipamentos de usuário nas redes 4G LTE. Já o en-gNB fornece terminações dos planos de controle e dados para o dispositivo 5G, e assim, permite que os usuários se conectem à interface de rádio 4G. E o gNodeB (*next-generation Node B*) envia e recebe sinais de rádio na rede 5G SA. Ele também pode ser implementado em uma infraestrutura baseada em nuvem, o que possibilita implantações de rede mais flexíveis e escaláveis.

O núcleo de pacotes evoluído (EPC - *Evolved Packet Core*), utilizada nas redes 4G LTE, é uma estrutura que unifica voz e dados em uma arquitetura de serviços IP. Ele autentica os assinantes e determina se eles têm acesso à rede, e além disso, auxilia no gerenciamento de mobilidade e no gerenciamento de sessões. Na evolução tem-se o núcleo 5G (*5G Core*) que é

definida por *software*, nativo em nuvens e distribuído, e baseada em serviço (SBA). Uma vantagem, por exemplo, é posicionar as funções de rede em um local melhor, e assim, se pode obter eficiência máxima, maior desempenho e mínima latência.

Figura 2.7 – Componentes da rede 5G.



Fonte: Adaptado de (Mainetti,2024).

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo é feita um pequeno resumo das gerações de redes móveis. Além disso, são descritos alguns conceitos da tecnologia 5G. Esses conceitos auxiliaram no entendimento das configurações aplicadas no desenvolvimento metodológico apresentada no Capítulo 3.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do assunto será baseado na metodologia de pesquisa com objetivo exploratório e procedimento de estudo de caso. Dentre os materiais foi escolhido o simulador Vienna5G e a metodologia desenvolvida é apresentada a seguir.

3.1 SIMULADOR VIENNA 5G

O software “Vienna 5G System Level Simulator” é uma ferramenta de simulação desenvolvida para modelagem e análise de sistemas de comunicação sem fio, especialmente para redes 5G. Ele permite simular uma variedade de aspectos nas redes 5G, incluindo características de rádio, protocolos de comunicação, algoritmo de acesso ao meio, mobilidade de dispositivos, entre outros. Essa ferramenta, de código aberto, é desenvolvida e mantida pelo *Institute of Telecommunications da TU Wien (Technische Universität Wien)* em Viena, Áustria (Vienna 5G, 2024).

A simulação é a nível de enlace, desempenho da arquitetura do transceptor da camada física. Oferece grande flexibilidade, suporta diversos parâmetros de simulação para permitir a comparação e avaliação de diferentes métodos da camada física propostos para o 5G. Suporta simulações de *uplink* e *downlink*, com ajustes de parâmetros para simulações compatíveis com LTE-A e para sistemas de comunicações celulares 5G. Oferece suporte aos métodos da camada física como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), FBMC (*Filter Bank Multi Carrier*), UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*) e códigos de canal (Turbo, Polar e outros). Realiza simulações de Monte Carlo e médias sobre muitas realizações de canal aleatórias para obter o desempenho do sistema em termos de *throughput*, BER (*Bit Error Rate*) ou FER (*Frame Error Rate*), com intervalos de confiança para indicar sua confiabilidade estatística.

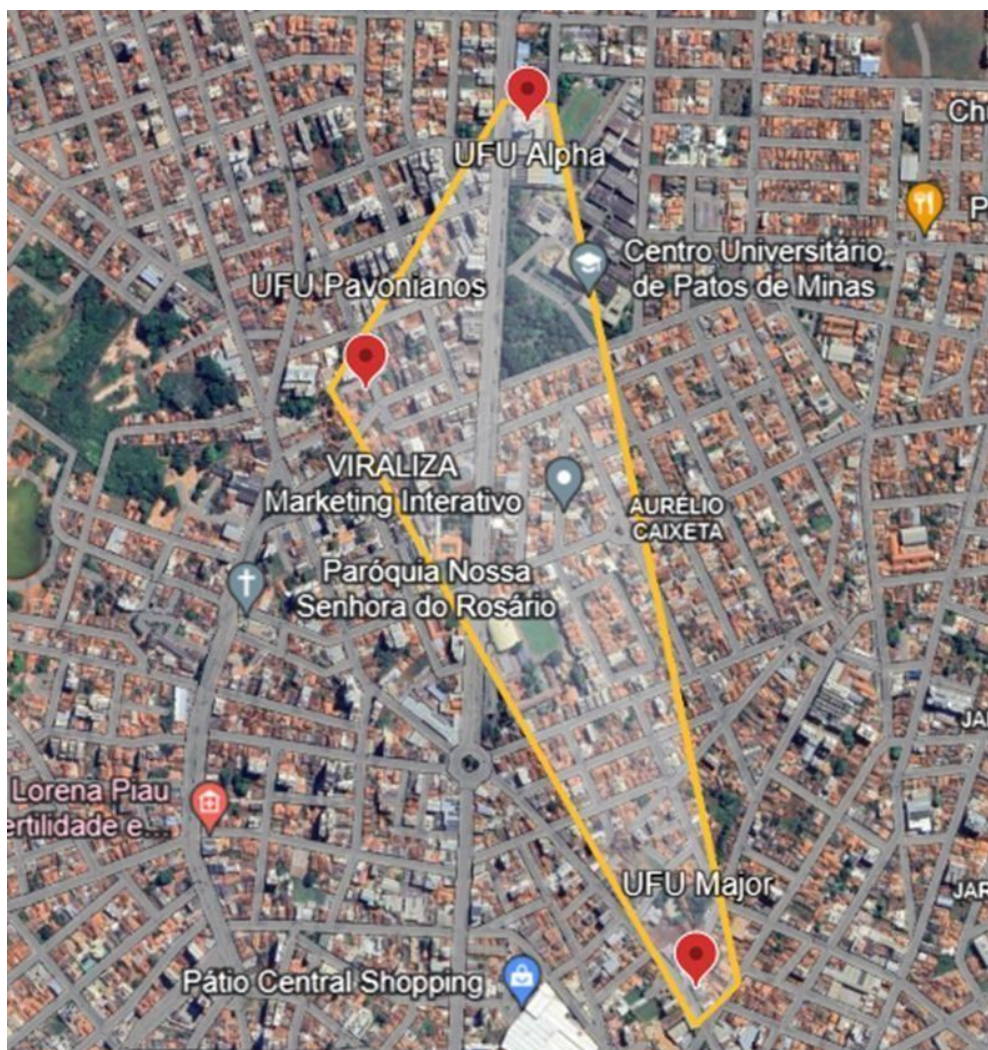
O Vienna 5G é uma excelente ferramenta para simular e avaliar o desempenho de comunicações celulares 5G em vários cenários e configurações, o que contribui para o avanço da pesquisa e desenvolvimento da área.

3.2 CENÁRIOS

Na Figura 3.1 tem-se as limitações das áreas de interesse de estudo e análise. As áreas

estão localizadas na cidade de Patos de Minas, município brasileiro localizado no estado de Minas Gerais, na região do Alto Paranaíba. A área do município é de 3.190,456 km² (IBGE, 2024). Os dados de latitude e longitude para a cidade de Patos de Minas foram obtidos do Google Maps, onde o ponto superior foi encontrado no fim da cidade no Bairro Barreiro e o ponto inferior também no fim da cidade no Bairro Distrito Industrial.

Figura 3.1 – Delimitação da área no município de Patos de Minas.



Fonte: A autora.

A Figura 3.2 ilustra os pontos onde estão localizados os três blocos da UFU *campus* Patos de Minas.

- bloco Alpha localizado na rua Vereador Chico Filgueira nº33, bairro Caiçaras;
- bloco Administrativo localizado na rua Padre Pavoni nº290, bairro Rosário;
- bloco Laboratórios localizado na rua Major Jerônimo nº566, bairro Centro.

As informações da Tabela 3.1 foram colocadas no arquivo *openStreetMap.m* na pasta *scenarios*. No código apresentado no Quadro 3.1 (Vienna 5G, 2024) são colocados os valores inferiores e superiores da latitude e longitude de cada local de análise.

Quadro 3.1 – Trecho do código com os valores de latitude e longitude dos blocos da UFU na cidade de Patos de Minas.

```
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.makeStreets = true;
openStreetMapCity.streetWidth = 5;

% Cidade de Patos de Minas
%openStreetMapCity.latitude = [-18.6491960, -18.5481351];
%openStreetMapCity.longitude = [-46.4874519, -46.5325599];

% Bloco Alpha
%openStreetMapCity.latitude = [-18.5733223, -18.5729644];
%openStreetMapCity.longitude = [-46.5141462, -46.5141420];

% Bloco Laboratórios
openStreetMapCity.latitude = [-18.5849148, -18.5847684];
openStreetMapCity.longitude = [-46.5113453, -46.5115377];

% Bloco Administrativo
%openStreetMapCity.latitude = [-18.5771597, -18.5767693];
%openStreetMapCity.longitude = [-46.5165715, -46.5165779];
```

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

Para cada região de simulação foram delimitadas as regiões de interesse (ROI - *Region Of Interest*). No código apresentado no Quadro 3.2 (Vienna 5G, 2024) tem-se 400 metros no eixo x, 300 metros no eixo y e 50 metros no eixo z. Na borda da ROI tem-se uma região de interferência que contém transmissores interferentes que imitam transmissores normais. O objetivo é que os usuários nessa localização vivenciem condições de rede comparáveis aos usuários no centro da ROI.

Quadro 3.2 – Trecho do código com os limites das regiões de interesse.

```
% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
params.regionOfInterest.zSpan = 50;
```

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

Como os cenários são urbanos considerou-se construções com altura mínima de 10 metros e máxima de 25 metros. Além disso, foi desconsiderada as perdas por reflexão nas paredes igual a 0 dB. Essas informações foram inseridas no código conforme apresentado no

Quadro 3.3 (Vienna 5G, 2024).

Quadro 3.3 – Trecho do código com as informações do ambiente urbano.

```
openStreetMapCity.minBuildingHeight    = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight    = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed    = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB           = 0;
```

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

3.3 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para a simulação do 5G, o simulador está no modo *Non-Standalone*, conhecido como 5G impuro. Os parâmetros de transmissão, *downlink*, foram definidos como frequência central, a largura de banda e a modulação conforme descrito na Tabela 3.2. Esses valores foram obtidos através da ANATEL e, são referentes aos valores de largura de banda em que a operadora Algar Telecom opera no Triângulo Mineiro.

Tabela 3.2 – Valores de frequência e largura de banda dos sistemas de transmissão.

	Frequência [GHz]	Largura de banda [MHz]	Modulação
Sistema 1	2,3	40	1024 QAM
Sistema 2	3,5	80	1024 QAM

Fonte: A autora.

É sabido que a largura de banda máxima do canal definida para a frequência 3,5 GHz é de 100 MHz e para a frequência 2,3 GHz é de 50 MHz. As informações da Tabela 3.2 foram colocadas no arquivo *openStreetMap.m* na pasta *scenarios*, conforme o trecho de código apresentado no Quadro 3.4 (Vienna 5G, 2024).

Quadro 3.4 – Trecho do código com os valores de frequência central e largura de banda.

```
% transmission parameters
%params.carrierDL.centerFrequencyGHz    = 2.3;
%params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 40e6;
params.carrierDL.centerFrequencyGHz      = 3.5;
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 80e6;
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType= parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;
```

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

Nas estações base têm-se antenas transmissoras, nos sistemas LTE e 5G. A caracterização dos sistemas, com 4 antenas transmissoras, é definida no trecho de código apresentado no Quadro 3.5 (Vienna 5G, 2024).

Quadro 3.5 – Trecho do código com a caracterização das antenas transmissoras.

```
%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX = 4;
antennaLTE.numerology = 0; % assign numerology 0
antennaLTE.technology = parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX = 4;
antenna5G.numerology = 1; % assign numerology 1
antenna5G.technology = parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE,
parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G,
parameters.precoders.LteDL);
```

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

Os parâmetros referentes as perdas de propagação (*pathloss*) são estabelecidos no trecho de código apresentado no Quadro 3.6 (Vienna 5G, 2024). Observe que o modelo utilizado é o de Ray com 3 reflexões.

Quadro 3.6 – Trecho do código com as perdas de propagação.

```
RayTracing = parameters.pathlossParameters.RayTracing;
RayTracing.maxNumReflections = 3;
RayTracing.cityMap = 'dataFiles/blockages/OSMWien.osm';
```

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

Em relação a caracterização dos usuários é utilizado o modelo de Poisson 2D com número de usuários igual a 50 e tráfego em Taxa Constante (CR – *Constant Rate*). No sistema LTE foi utilizado um modelo de tráfego de tamanho 94 com 2 slots e no 5G foi de 470 (94*5) com 2 slots (Vienna 5G, 2024). Observe essas informações são apresentadas no trecho de código apresentado no Quadro 3.7 (Vienna 5G, 2024).

Quadro 3.7 – Trecho do código com a caracterização do tráfego dos usuários.

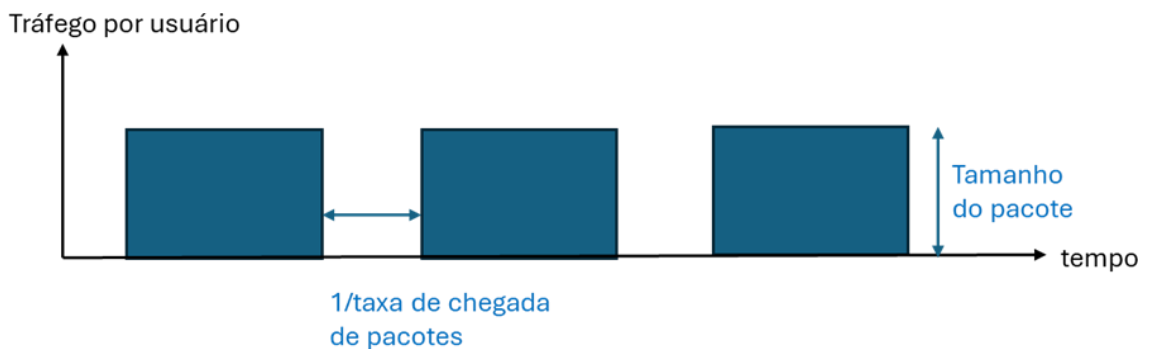
```

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements = 50;
UsersLTE.nRX = 1;
UsersLTE.channelModel = parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModel.type = parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology = 0;
UsersLTE.technology = parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;
Users5G.nElements = 50;
Users5G.nRX = 1;
Users5G.channelModel = parameters.setting.ChannelModel.PedB;
Users5G.trafficModel.type = parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;
Users5G.numerology = 1;
Users5G.technology = parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;

```

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

O modelo de tráfego de Taxa Constante, ilustrado na Figura 3.3 gera pacotes de tamanho fixo com uma determinada taxa de chegada de pacotes. O tempo inicial para a geração dos pacotes de diferentes usuários é aleatório.

Figura 3.3 – Modelo de tráfego de taxa constante.

Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

O *feedback* é usado para fornecer ao escalonador estimativas das condições do canal. Em particular, indicadores finitos e discretos, que quantificam a qualidade do canal, são reportados após um atraso fixo. Além disso, o *feedback* marca as transmissões com flags de

Reconhecimento (ACK - *acknowledgement*) ou Não Reconhecimento (NACK - *Negative Affirmative Acknowledgement*) para o mecanismo de Solicitação Automática de Repetição Híbrida (HARQ - *Hybrid Automatic Repeat Request*). No caso do escalonador *bestCQI*, o usuário com o valor de CQI mais alto, calculado a partir do *feedback*, é alocado para cada bloco de recursos. E assim, no caso do escalonador com reconhecimento de QoS, os recursos físicos são alocados aos usuários com base em seus atributos e restrições de QoS.

3.4 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Função Distribuição Acumulada Empírica (ECDF - *Empirical Cumulative Distribution Function*) é a junção da função de distribuição acumulada (CDF - *Cumulative Distribution Function*) com a regra empírica (VIENNA 5G, 2024). A CDF é uma função estatística que calcula a probabilidade de uma variável aleatória ser menor ou igual a um determinado valor. Já a regra empírica é desenhada dentro da CDF para mostrar a probabilidade dos dados estarem dentro de uma faixa da distribuição normal.

Relação Sinal Ruído (SNR – *Signal Noise Ratio*) é uma relação adimensional que compara a intensidade de um sinal desejado (sinal útil) com o nível de ruído de fundo presente em um canal de comunicação (Vienna 5G, 2024). Um valor de SNR alto garante uma transmissão estável e com baixa taxa de erros, enquanto uma SNR baixa pode resultar em perda de sinal, interferências e conexões instáveis.

E a SNR é determinada na Equação (3.1) (Vienna 5G, 2024).

$$SNR = \frac{1}{N_0} \frac{P_{Tx}}{B} \quad (3.1)$$

onde,

P_{Tx} – potência de transmissão,

N – densidade espectral de potência do ruído,

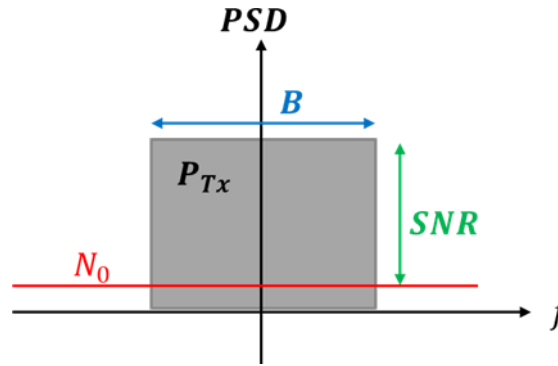
B – largura de banda de transmissão.

A potência de transmissão (P_{Tx}) é distribuída igualmente por toda a largura de banda de transmissão (B). Portanto, a Densidade Espectral de Potência (PSD– *Power Spectral Density*) é ajustada para que a P_{Tx} permaneça constante para qualquer largura de banda B . Na Figura 3.4 a área sombreada em cinza corresponde a P_{Tx} e possui uma área constante (Vienna 5G, 2024).

Relação Sinal Ruído e Interferência (SINR - *Signal-to-Noise and Interference Ratio*) é uma métrica comparativa entre a potência do sinal desejado com a potência do sinal

interferente (Vienna 5G, 2024). A interferência conduz à redução da qualidade do sinal e ela é mais severa em áreas urbanas, devido à maior presença de ruído, e ao grande número de estações-base e estações móveis existentes.

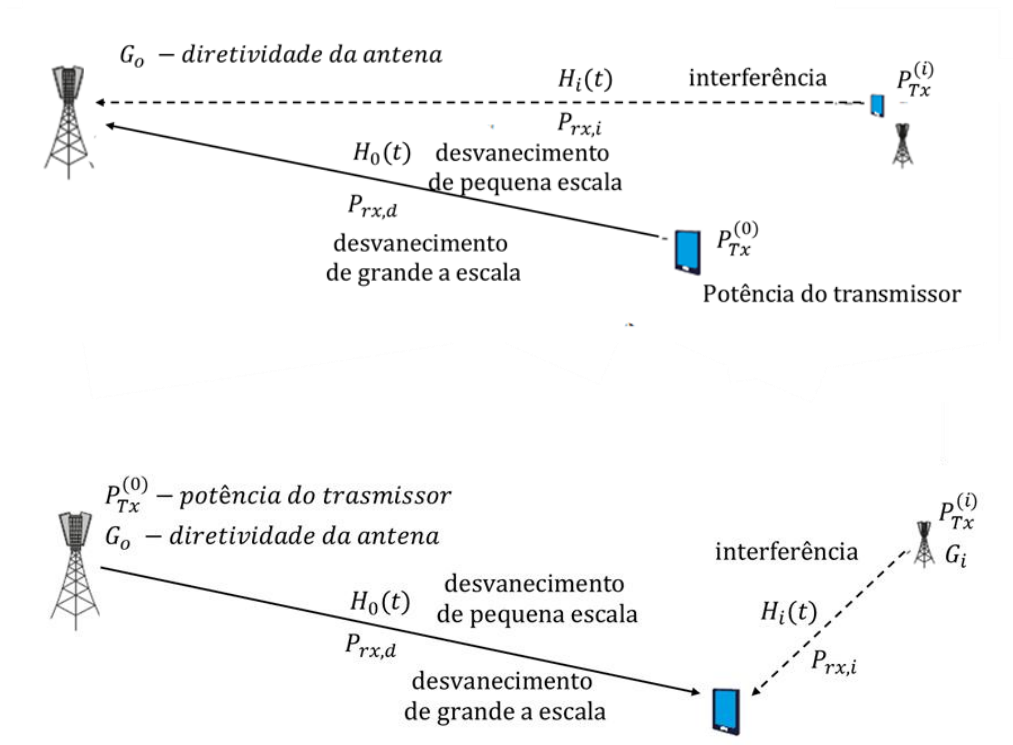
Figura 3.4 – Gráfico da PSD.



Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

A Figura 3.5 ilustra a SINR *uplink* onde se tem um usuário interferidor aleatório em todas as células interferentes. Portanto, P_{rx} é a potência recebida pela estação base desejada a partir da transmissão do usuário, desejado ou interferente.

Figura 3.5 – SINR: (a) *uplink* (b) *downlink*.



Fonte: Adaptado de (Vienna 5G, 2024).

A SINR é calculada para todos os usuários em cada intervalo, conforme a Equação (3.2) (Vienna 5G, 2024).

$$SINR = \frac{h_d P_{rx,d}}{\sum_{i=1}^{N_{int}} h_i P_{rx,i} + N} \quad (3.2)$$

onde,

N – potência do ruído acumulada na estação base,

N_{int} – número de células que geram interferência,

h – coeficiente de canal normalizado (potência média é igual a um),

P_{rx} – potência de recepção determinada de acordo com a Equação (3.3) (Vienna 5G, 2024).

$$P_{rx} = P_{Tx} \cdot G \cdot L_{percurso} \cdot L_{sombreamento} \cdot L_{parede} \quad (3.3)$$

onde,

P_{Tx} – potência de transmissão,

G – ganho da antena,

$L_{percurso}$ – perda de percurso,

$L_{sombreamento}$ – perda no sombreamento,

L_{parede} – perda devido à parede.

Vazão (Throughput) é definida como o número de bits transmitidos na rede em um determinado período de tempo, sendo expressa em bits por segundo (Vienna 5G, 2024). A **Vazão do Best CQI** é o limite superior que corresponde à taxa de transferência que ocorrerá se o escalonador optasse pelo maior índice de qualidade do canal (CQI - *Channel Quality Index*) que ainda resultasse em uma transmissão bem-sucedida.

Latência (Delay, atraso) é o tempo que um pacote leva para atravessar uma rede do remetente ao destinatário, passando pelos roteadores e enlaces intermediários, sendo expresso em termos de tempo, por exemplo segundos (Vienna 5G, 2024).

Taxa de erro de bloco (BLER – *Block Error Rate*) é calculada dividindo o número de blocos com erros pelo número total de blocos transmitidos em um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), e isso, é medido no receptor (Vienna 5G, 2024). A confiabilidade do sistema é baseada em um limite médio de BLER igual a 0,1. Esse é considerado um ponto de operação típico para sistemas de comunicação móvel.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo são apresentados o simulador, os cenários e os métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo. Além disso, são definidos os parâmetros e as métricas de desempenho da simulação. Os parâmetros aplicados ao simulador Vienna 5G fornecem os resultados que são apresentados e avaliados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

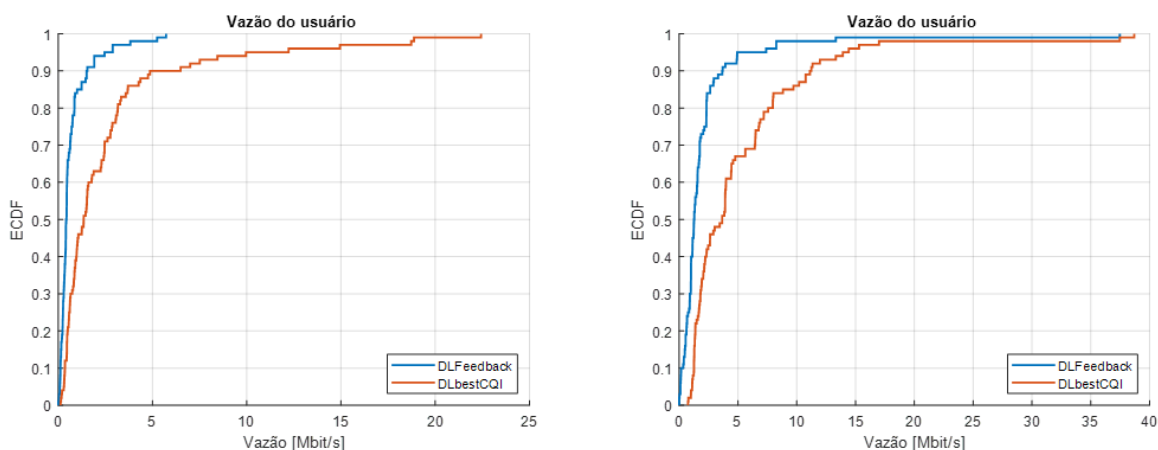
4.1 RESULTADOS NAS FREQUÊNCIAS 2,3 GHz e 3,5 GHz

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos da simulação, de acordo com a metodologia descrita no capítulo anterior, no VIENNA 5G. Os resultados são apresentados para a cidade de Patos de Minas e os blocos Alpha, Laboratórios e Administrativo.

4.1.1 Cidade de Patos de Minas

A Figura 4.1 mostra os gráficos da vazão do usuário em Mbits/s na Cidade de Patos de Minas. Os resultados da vazão são apresentados para DLFeedback e DLbestCQI. Observando os valores de vazão, para as frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz, para ECDF igual a 1, tem-se: Feedback 5,72 Mbit/s e 34,472 Mbit/s, bestCQI 22,43 Mbit/s e 38,69 Mbit/s.

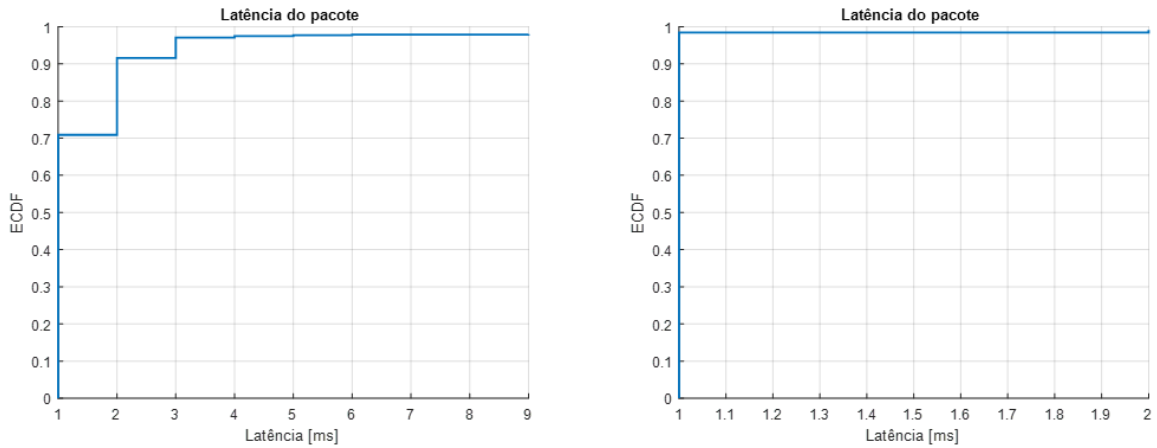
Figura 4.1 – Vazão de dados na cidade de Patos de Minas: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

A Figura 4.2 mostra os gráficos da latência do pacote na Cidade de Patos de Minas. Observe que na frequência de 2,3 GHz, a latência aumenta quando a porcentagem das amostras de ECDF aumenta e atinge o valor de 9 ms para mais de 90% de ECDF. Já na frequência de 3,5 GHz, a latência de 2 ms é constante para 90% de ECDF.

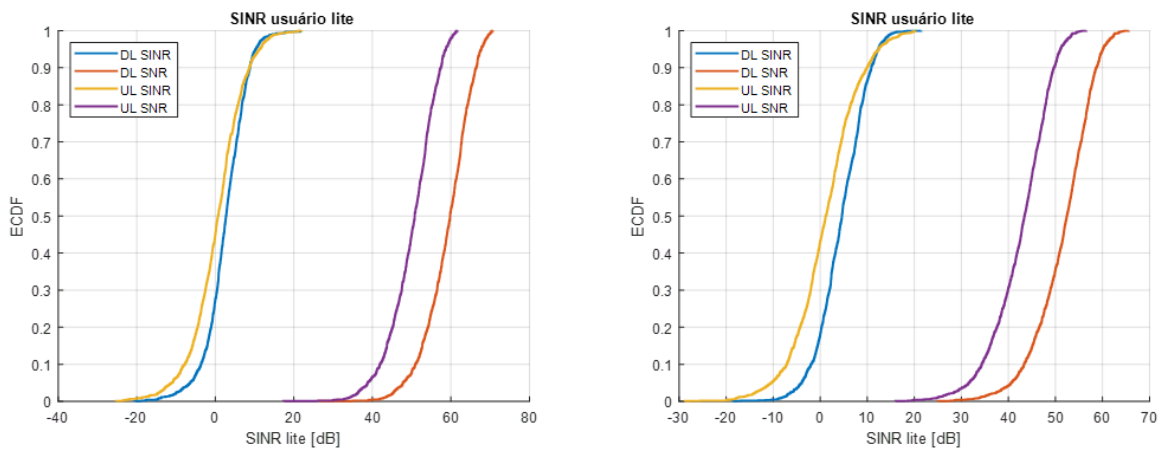
Figura 4.2 – Latência do pacote na cidade de Patos de Minas: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

A Figura 4.3 mostra dos gráficos comparativos das relações Sinal Interferência (SINR) e Sinal Ruído (SNR) para a cidade de Patos de Minas. Os resultados são apresentados nos dois sentidos, *downlink* (DL) e *uplink* (UL). Para o valor de ECDF igual a 0,5 (50%), nas frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz, os valores de SINR, em dB, são respectivamente, UL = 0,8271 e 1,3047, DL = 0,5073 e 4,6442. E os valores de SNR, em dB, são respectivamente, UL = 50,7788 e 43,4558, DL = 59,7885 e 52,4164.

Figura 4.3 – SINR e SNR na cidade de Patos de Minas: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.

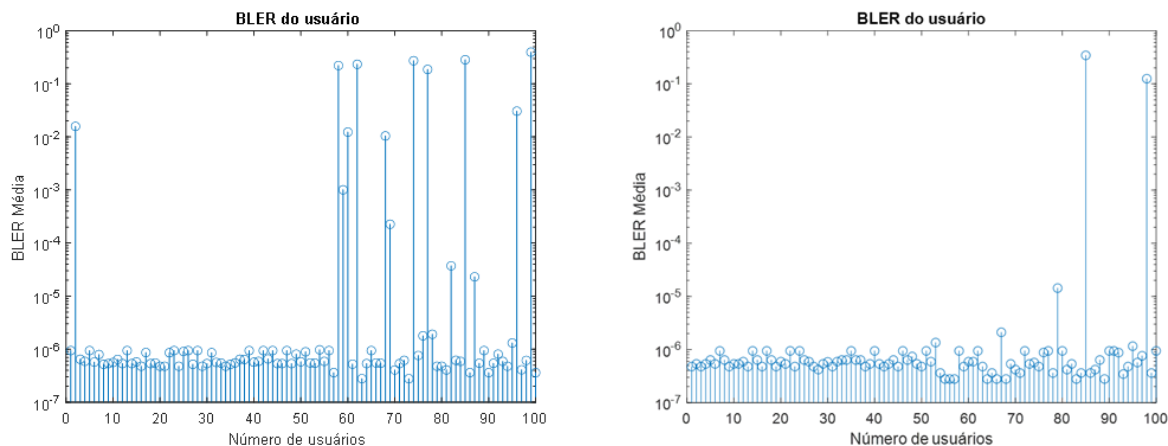


Fonte: A autora.

Na Figura 4.4 tem-se os gráficos das BLER média em função do número de usuários para a cidade de Patos de Minas. Na frequência de 2,3 GHz, o valor mais alto é 0,284363 em

85 usuários. Para o mesmo número de usuários, na frequência de 3,5 GHz, tem-se 0,34364.

Figura 4.4 – BLER média na cidade de Patos de Minas: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.

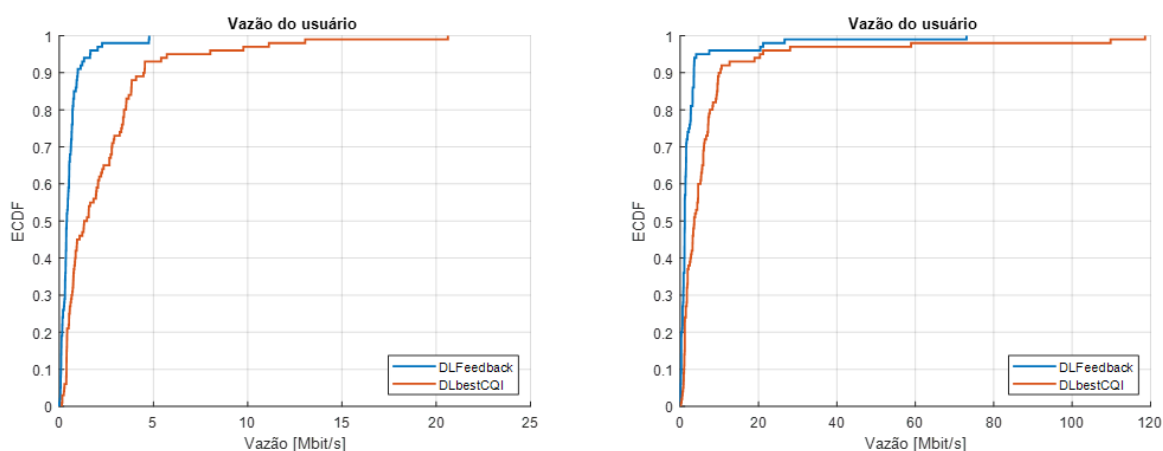


Fonte: A autora.

4.1.2 Bloco Alpha

A Figura 4.5 mostra dos gráficos da vazão do usuário em Mbits/s no bloco Alpha. Observando os valores de vazão, para as frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz, para ECDF igual a 1, tem-se: Feedback 4,75 Mbit/s e 73,06 Mbit/s, bestCQI 20,62 Mbit/s e 118,62 Mbit/s.

Figura 4.5 – Vazão de dados na cidade no bloco Alpha: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.

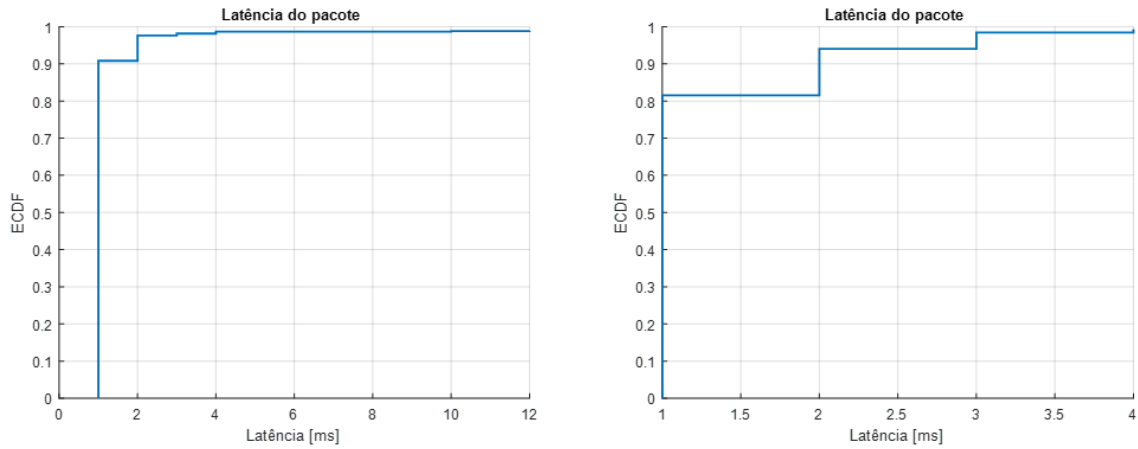


Fonte: A autora.

A Figura 4.6 mostra os gráficos da latência do pacote na área do bloco Alpha. Na frequência de 2,3 GHz, a latência de 12 ms acontece para um valor superior a 90% de ECDF.

Já na frequência de 3,5 GHz, a latência de até 2 ms para 81% das amostras.

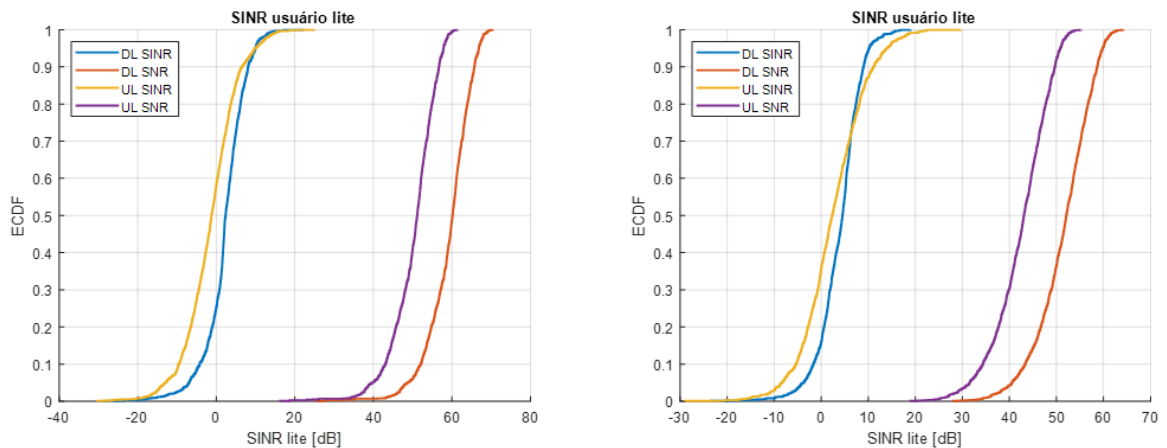
Figura 4.6 – Latência do pacote no bloco Alpha: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

A Figura 4.7 mostra dos gráficos comparativos das relações Sinal Interferência (SINR) e Sinal Ruído (SNR) no bloco Alpha. Para o valor de ECDF igual a 0,5 (50%), nas frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz, os valores de SINR, em dB, são respectivamente, UL = -1,1623 e 2,4422, DL = 2,4098 e 4,5419. E os valores de SNR, em dB, são respectivamente, UL = 51,1541 e 43,1891, DL = 60,2089 e 52,1119.

Figura 4.7 – SINR e SNR nobloco Alpha: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.

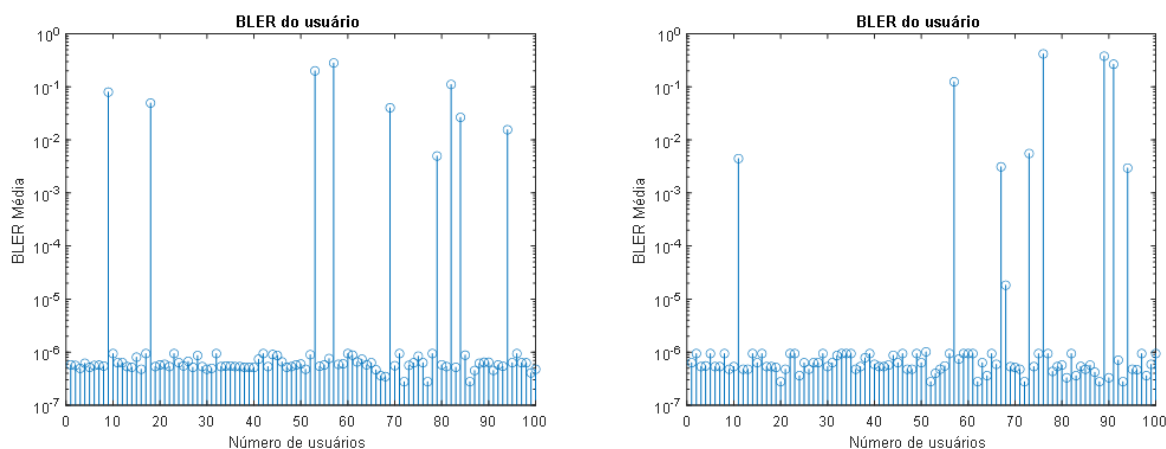


Fonte: A autora.

Na Figura 4.8 tem-se os gráficos das BLER média em função do número de usuários na

área do bloco Alpha. Na frequência de 2,3 GHz, o valor mais alto é 0,2810 em 57 usuários. Para o mesmo número de usuários, na frequência de 3,5 GHz, o valor encontrado foi 0,1246.

Figura 4.8 – BLER média no bloco Alpha: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.

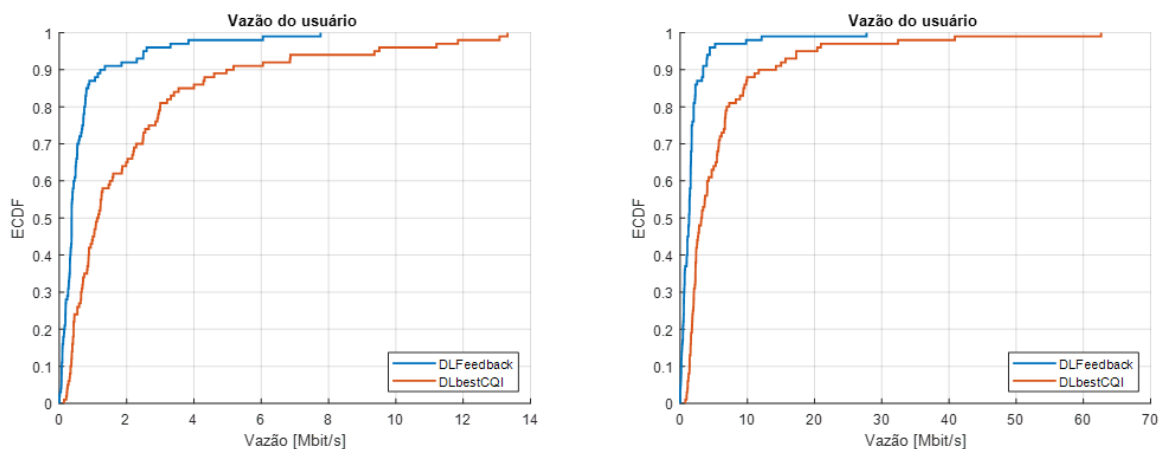


Fonte: A autora.

4.1.3 Bloco Laboratórios

A Figura 4.9 mostra os gráficos da vazão do usuário em Mbits/s no bloco de laboratórios. Observando os valores de vazão, para as frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz, para ECDF igual a 1, tem-se: Feedback 7,76 Mbit/s e 27,74 Mbit/s, bestCQI 13,32 Mbit/s e 62,64 Mbit/s.

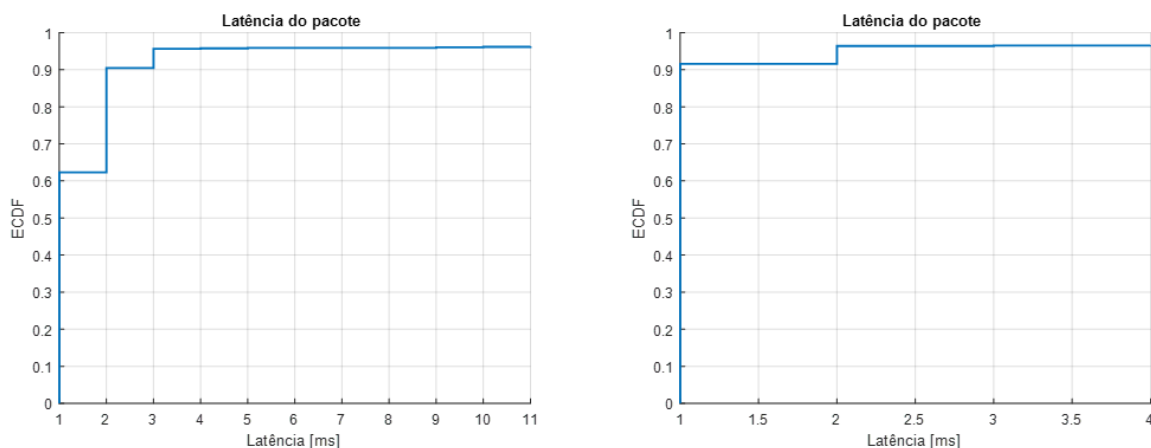
Figura 4.9 – Vazão de dados na cidade no bloco Laboratórios: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

A Figura 4.10 mostra os gráficos da latência do pacote na área do bloco Laboratórios. Observe que na frequência de 2,3 GHz, acima de 60% de ECDF os pacotes começam a ter latência na rede em torno de 90% de ECDF já apresenta latência até 11 ms. Já na frequência de 3,5 GHz, mais de 90% das amostras apresentam latência até 4 ms.

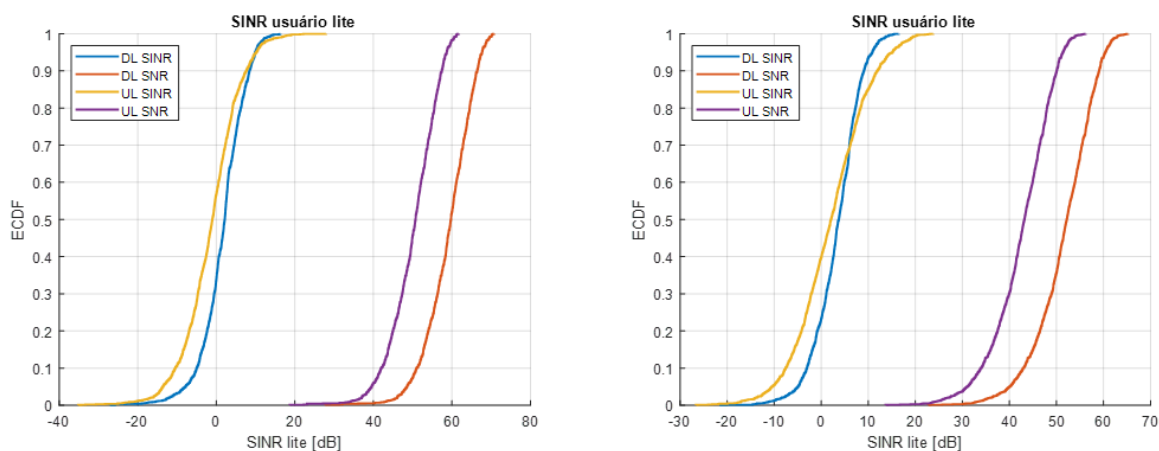
Figura 4.10 – Latência do pacote no bloco Laboratórios: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

A Figura 4.11 mostra dos gráficos comparativos das relações Sinal Interferência (SINR) e Sinal Ruído (SNR) no bloco Laboratórios. Para o valor de ECDF igual a 0,5, nas frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz, os valores de SINR, em dB, são respectivamente, UL = -0,9576 e 2,1953, DL = 2,2145 e 3,8148. E os valores de SNR, em dB, são respectivamente, UL = 50,7736 e 43,2427, DL = 59,7891 e 52,2530.

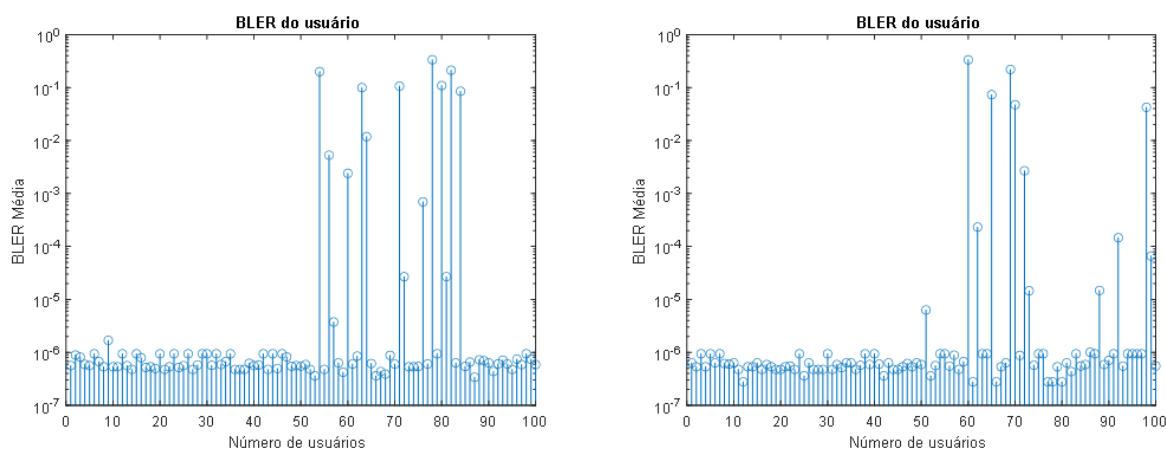
Figura 4.11– SINR e SNR na cidade no bloco Laboratórios: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

Na Figura 4.12 tem-se os gráficos das BLER média em função do número de usuários na área do bloco Laboratórios. Na frequência de 2,3 GHz, o valor mais alto é 0,3366 em 78 usuários. Para o mesmo número de usuários, na frequência de 3,5 GHz, o valor encontrado foi $2,7825 \cdot 10^{-7}$.

Figura 4.12 – BLER média no bloco Laboratórios: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.

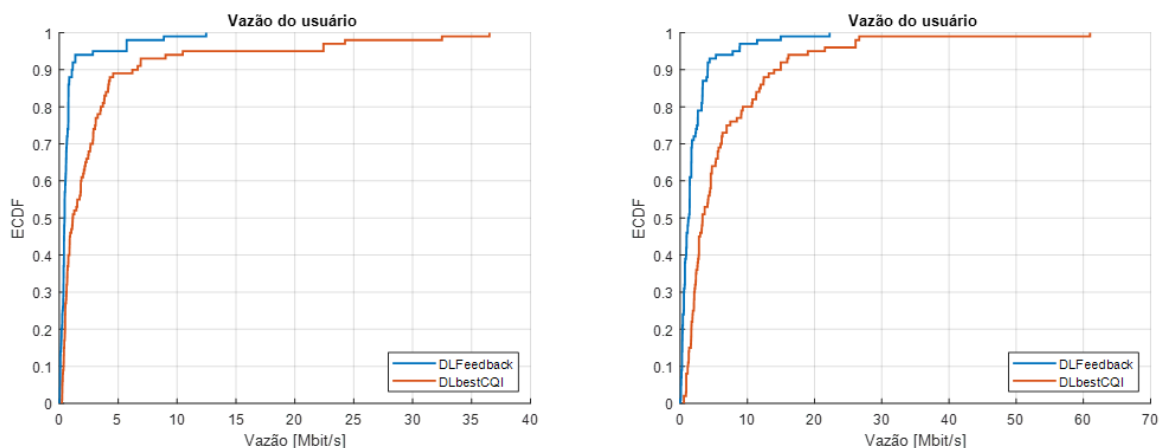


Fonte: A autora.

4.1.4 Bloco Administrativo

Observando os valores de vazão, para as frequências de 2,3 GHz e 3,5GHz, para ECDF igual a 1, tem-se: Feedback 12,46 Mbit/s e 22,25 Mbit/s, bestCQI 36,52 Mbit/s e 61,00 Mbit/s.

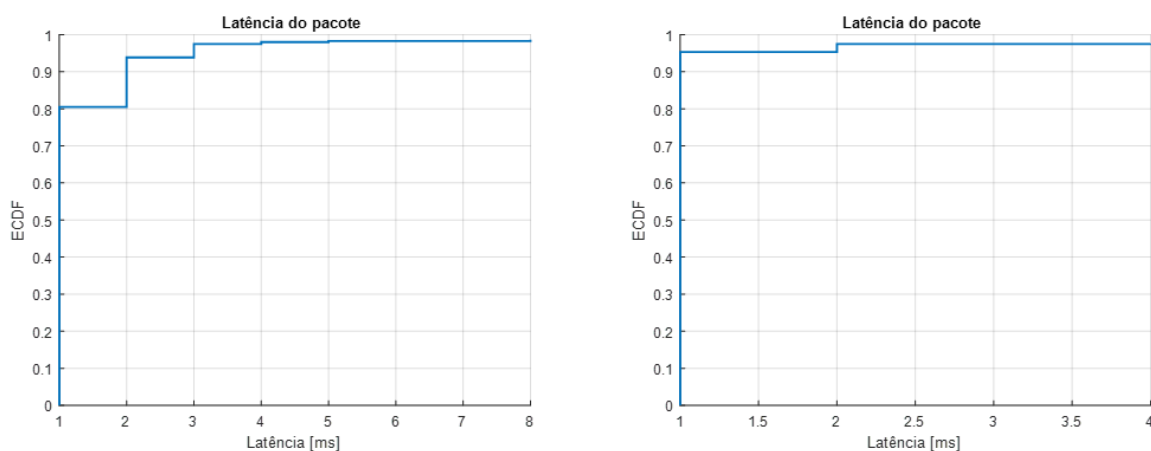
Figura 4.13 – Vazão de dados na cidade no bloco Administrativo: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

A Figura 4.14 mostra os gráficos da latência do pacote na área do bloco Administrativo. Observe que na frequência de 2,3 GHz, acima de 90% das amostras têm latência de até 8 ms. Na frequência de 3,5 GHz, acima de 90% das amostras têm latência de até 4 ms.

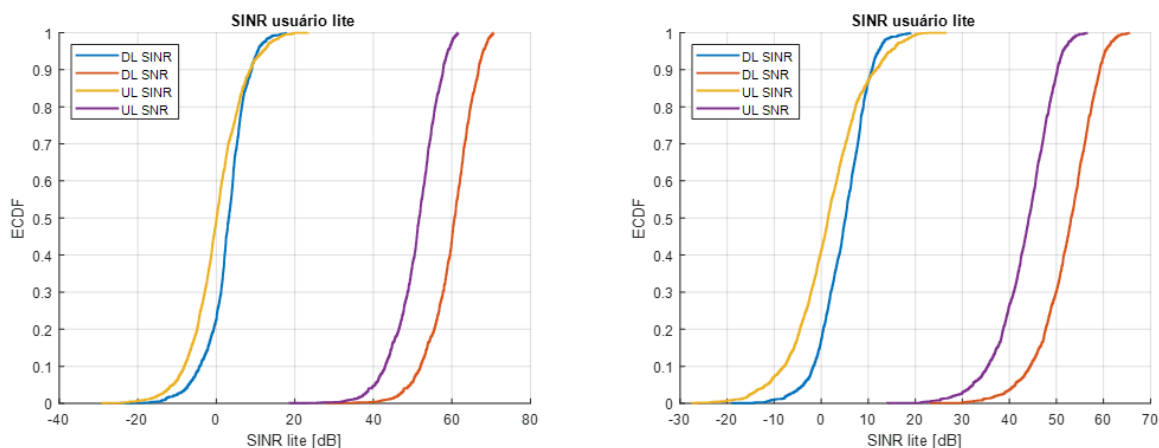
Figura 4.14 – Latência do pacote no bloco Administrativo: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

A Figura 4.15 mostra dos gráficos comparativos das relações Sinal Interferência (SINR) e Sinal Ruído (SNR) no bloco Laboratórios. Para o valor de ECDF igual a 0,5, nas frequências de 2,3 GHz e 3,5 GHz, os valores de SINR, em dB, são respectivamente, UL = -0,0909 e 1,4883, DL = 3,2370 e 5,2053. E os valores de SNR, em dB, são respectivamente, UL = 51,7691 e 44,1948, DL = 60,7658 e 53,1358.

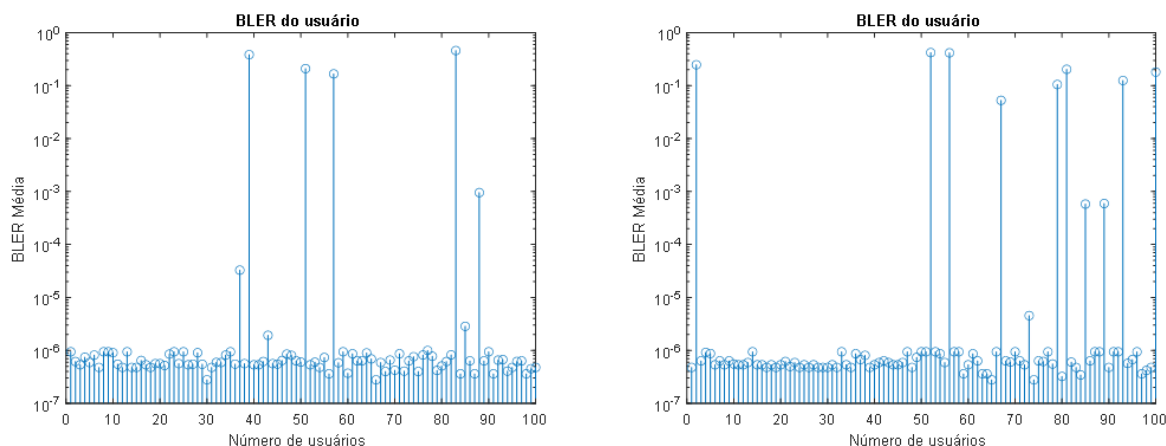
Figura 4.15 – SINR e SNR na cidade no bloco Administrativo: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

Na Figura 4.16 tem-se os gráficos das BLER média em função do número de usuários na área do bloco Administrativo. Na frequência de 2,3 GHz, o valor mais alto é 0,4599 em 83 usuários. Para o mesmo número de usuários, na frequência de 3,5 GHz, o valor mais alto é 0,1808 para 100 usuários.

Figura 4.16 – BLER média no bloco Administrativo: (a) 2,3 GHz e (b) 3,5 GHz.



Fonte: A autora.

4.1.5 Discussão dos Resultados

Os valores compilados na Tabela 4.1 são referentes as Figuras 4.3, 4.7, 4.11 e 4.15. Observou-se que em todas as áreas de interesse, cenários, a SNR em torno do valor de 50 dB para ECDF em 0,5, ou seja, para 50% das amostras. Valores de SNR mais alto permite esquemas de modulação e codificação mais eficientes, permitindo taxas de dados mais altas e maior capacidade.

Tabela 4.1 – Valores de SINR e SNR em 2,3 GHz e 3,5 GHz.

Patos de Minas		Bloco Alpha				Bloco Laboratórios		Bloco Administrativo	
		2,3 GHz	3,5 GHz	2,3 GHz	3,5 GHz	2,3 GHz	3,5 GHz	2,3 GHz	3,5 GHz
SINR	UL	0,8270	1,3047	-1,1623	2,4422	-0,9576	2,1953	0,0909	1,4883
	DL	0,5073	4,6453	2,4098	4,5419	2,2145	3,8148	3,2371	5,2053
SNR	UL	50,7788	43,4558	51,1541	43,1891	50,7736	43,2427	51,7691	44,1948
	DL	59,7885	52,4164	60,2089	52,1119	59,7891	52,2530	60,7658	53,1358

Fonte: A autora.

A métrica SINR acumula o sinal atenuado do transmissor desejado e de todos os interferentes na localização do receptor. Ela depende do nível de ruído, da constelação do usuário, da estação base e dos modelos de propagação utilizados para cada enlace. Os valores de SINR influenciam na utilização do escalonador e na vazão dos usuários. Foi observado que na 3,5 GHz, os valores de SINR foram superiores.

Nesse ponto faz-se necessário a avaliação da métrica de desempenho Vazão. Os gráficos das Figuras 4.1, 4.5, 4.9 e 4.11 são compilados na Tabela 4.2. De maneira geral, foi observado que a vazão apresenta valores maiores na frequência de 3,5 GHz.

Tabela 4.2 - Valores de Vazão em 2,3 GHz e 3,5 GHz.

Patos de Minas			Bloco Alpha		Bloco Laboratórios		Bloco Administrativo	
	2,3 GHz	3,5 GHz	2,3 GHz	3,5 GHz	2,3 GHz	3,5 GHz	2,3 GHz	3,5 GHz
Feedback	5,72	34,74	4,75	73,06	7,76	27,74	12,46	22,45
bestCQI	22,43	38,69	20,62	118,62	13,32	62,64	36,52	61,00

*Valores de Vazão (Mbit/s)

Fonte: A autora.

O *feedback* é utilizado para fornecer ao escalonador estimativas das condições do canal, e assim, quantificar a qualidade do canal. No bestCQI, o LPM calcula um limite superior que a vazão resultante no caso do escalonador decidisse pelo maior valor de CQI e ainda tivesse uma transmissão bem-sucedida.

Vale ressaltar que o escalonamento bestCQI, em todos os cenários, elevou o desempenho da rede 5G, em ambas as frequências. Na descrição da literatura, o bestCQI prioriza os usuários com os melhores canais, e por isso, maximiza o uso eficiente dos recursos de rádio, permitindo transmissões de alta taxa de dados. Esse escalonador otimiza a taxa de transmissão de dados total da célula.

Analisando as Figuras 4.2, 4.6, 4.10 e 4.14 desse estudo de caso, a rede 5G apresentou menor valor de latência na frequência de 3,5 GHz. A latência esperada para a rede 5G é de 1 a 5 milissegundos, enquanto no 4G a é de 50 a 70 milissegundos (Feitosa Jr, Silva, de Oliveira, 2022). A redução da latência é uma das características da rede 5G. De acordo com a literatura, latência de até 80 milissegundos é considerada normal. Em jogos online, a latência ideal é inferior a 30 milissegundos. Para aplicações especializadas, como a realidade virtual e veículos autônomos, pequenos atrasos podem ser significativos.

Em relação a avaliação da métrica de desempenho, BLER média, apresentada nos gráficos das Figuras 4.4, 4.8, 4.12 e 4.16. Ela foi mantida no patamar de 10^{-6} e 10^{-7} em ambas

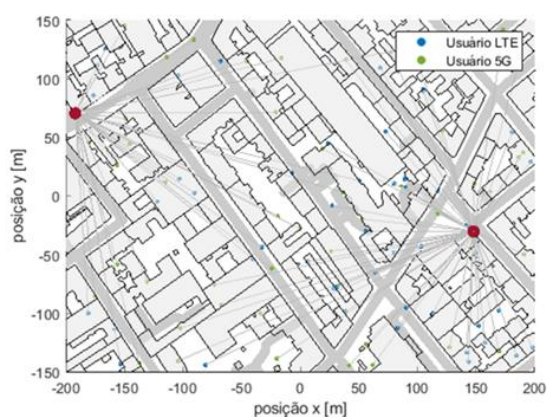
as frequências, valor esperado e considerado na literatura. Em alguns números de usuários específicos, o valor da BLER média extrapolou entre 10^0 e 10^1 , mas não foi identificado um padrão.

4.2 RESULTADOS COMPARATIVOS 4G E 5G

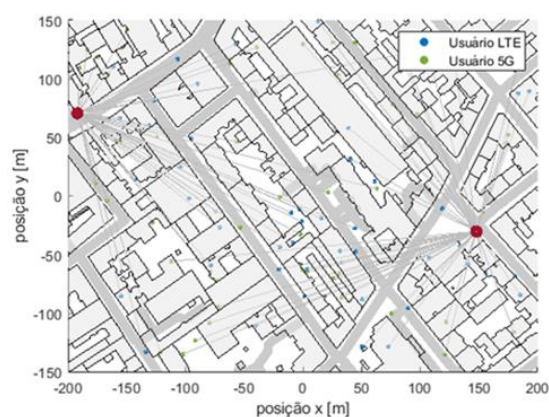
Nessa seção são apresentados e discutidos os resultados comparativos das gerações 4 e 5, e o sistema 4G é representado pelo LTE. O objetivo é mostrar que o mecanismo de escalonamento é eficiente nas duas gerações de redes móveis. A comparação é apresentada, apenas, para a frequência de 3,5 GHz.

Na Figura 4.17 é ilustrado o número de usuários LTE e 5G, frequência de 3,5 GHz, nas áreas de interesse das localidades onde há prédios da UFU *campus* Patos de Minas.

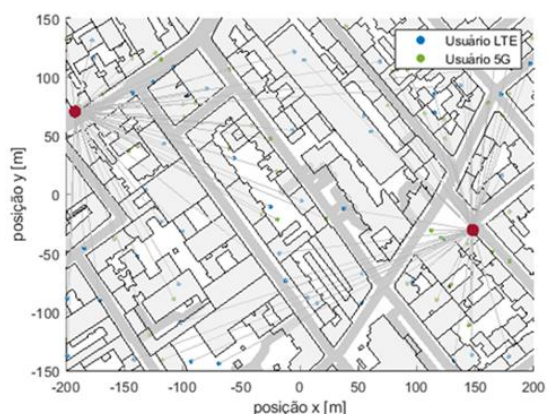
Figura 4.17 – Número de usuários LTE e 5G.



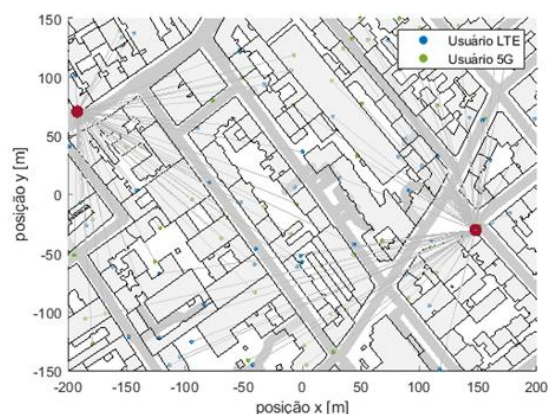
(a) Cidade de Patos de Minas



(b) Bloco Alpha



(c) Bloco Laboratórios

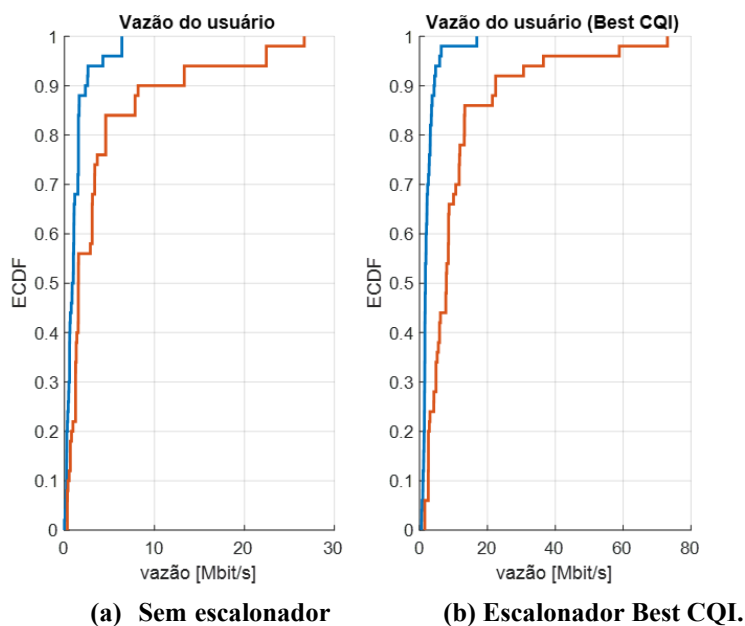


(d) Bloco Administrativo

Fonte: A autora.

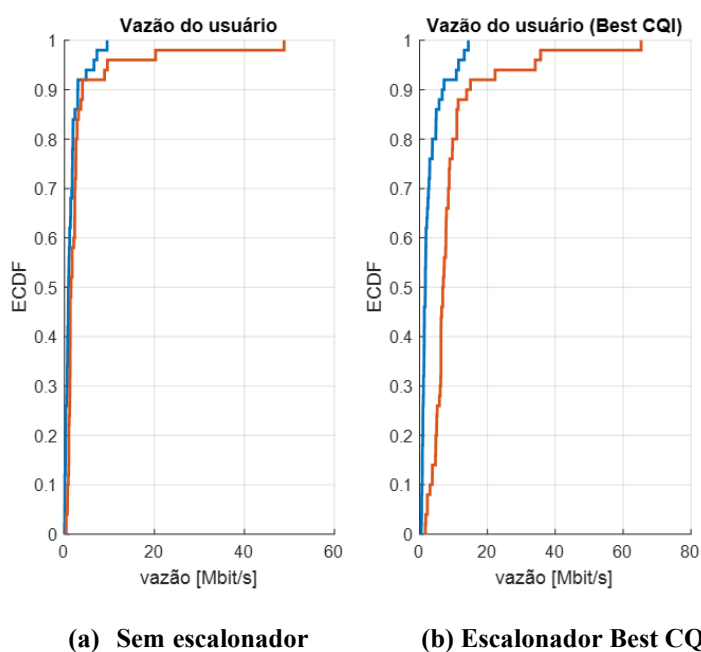
As Figuras a seguir ilustram os gráficos da métrica vazão, nos sistemas LTE e 5G: (a) sem o uso de escalonador e (b) com escalonador Best CQI. A curva azul representa o sistema LTE e a curva vermelha o sistema 5G. A Figura 4.18 ilustra os resultados da cidade de Patos de Minas. E as Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 ilustram os resultados dos blocos Alpha, Laboratório e Administrativo, respectivamente.

Figura 4.18 –Vazão nas redes LTE e 5G, cidade de Patos de Minas.



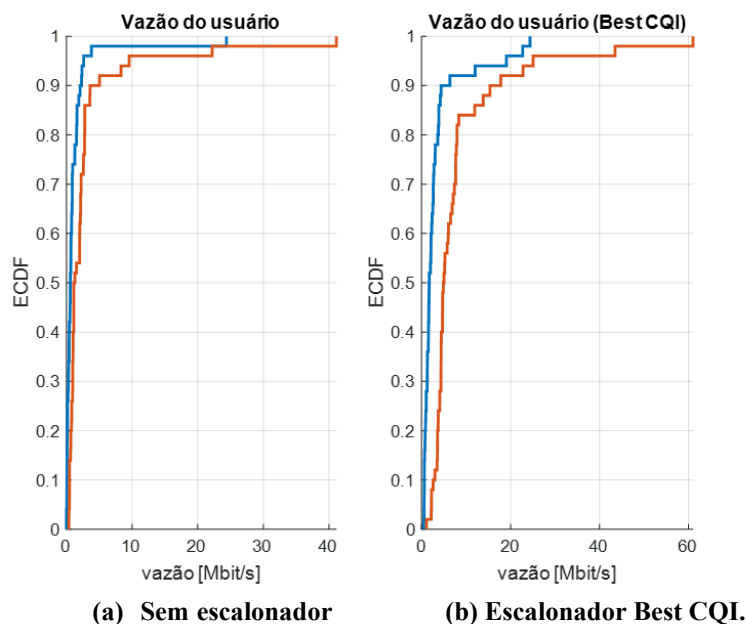
Fonte: A autora.

Figura 4.19 – Vazão nas redes LTE e 5G, bloco Alpha.



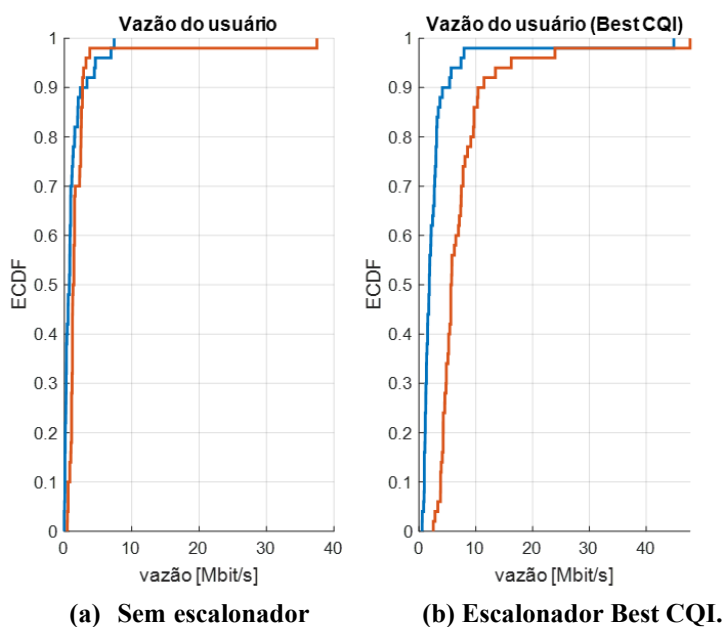
Fonte: A autora.

Figura 4.20 – Vazão nas redes LTE e 5G, bloco Laboratórios.



Fonte: A autora.

Figura 4.21 – Vazão nas redes LTE e 5G, bloco Administrativo.



Fonte: A autora.

A comparação com a tecnologia 4G revelou que, mesmo sob condições de carga semelhantes, a 5G apresenta vantagens significativas em termos de capacidade e desempenho, reforçando a importância da transição para esta nova geração de redes. Os resultados obtidos não apenas corroboram as expectativas de melhoria associadas ao 5G, mas também oferecem

uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área de telecomunicações.

Tabela 4.3 - Valores de Vazão nos sistemas LTE e 5G.

Patos de Minas	Bloco Alpha		Bloco Laboratórios		Bloco Administrativo			
	LTE	5G	LTE	5G	LTE	5G		
Feedback	6,384	16,892	9,489	14,374	24,376	24,376	7,396	44,876
bestCQI	26,648	73,056	48,816	65,333	41,135	61,000	37,472	47,734

*Valores de Vazão (Mbit/s)

Fonte: A autora.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou uma análise detalhada dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas nos prédios da UFU na cidade de Patos de Minas. Os resultados mostraram que na frequência de 3,5 GHz tem-se maior vazão e menor latência em todas as áreas analisadas. Além disso, nessa frequência, as métricas SINR e SNR confirmaram a qualidade do sinal superior. O uso do escalonamento *bestCQI* demonstrou ser uma estratégia eficaz para maximizar a taxa de transmissão de dados, priorizando os usuários com melhores condições de canal e, assim, aumentando a eficiência geral da rede.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

A contribuição deste trabalho foca na análise do desempenho da rede 5G em algumas regiões da cidade de Patos de Minas. No desenvolvimento notou-se a superioridade do 5G em comparação ao 4G, em relação a vazão de dados e latência. Além disso, a utilização de um simulador possibilitou avaliar cenários variados e identificar estratégias eficazes de escalonamento.

No capítulo 2 foi apresentado a evolução das redes de comunicação desde a 1G até a 5G. A 1G focou em comunicação de voz, a 2G introduziu a codificação digital e roaming, a 3G melhorou as taxas de dados com HSPA, e a 4G (LTE) trouxe maiores velocidades e suporte a mais dispositivos. A 5G oferece velocidades ainda mais altas, maior densidade de conexões e eficiência energética, com modos de operação que integram o 4G (NSA) ou funcionam de forma independente (SA), atendendo à crescente demanda por conectividade e possibilitando novas aplicações.

No capítulo 3 foi descrita a metodologia utilizada no desenvolvimento desse trabalho. O simulador escolhido foi o “*Vienna 5G System Level Simulator*”, ferramenta de simulação de redes 5G. Os cenários de simulação são baseados na localização dos prédios da UFU na cidade de Patos de Minas. Os parâmetros que foram variados foram frequência, largura de banda e escalonador, e o impacto deles foram medidos nas métricas de desempenho, como vazão, latência, taxa de erro de bloco, relações entre sinal interferência e sinal ruído.

Os resultados e as análises da tecnologia 5G, nas áreas dos prédios da UFU *campus* Patos de Minas são apresentados no Capítulo 4. A frequência de 3,5 GHz apresenta resultados melhores em relação as métricas de vazão de dados e latência em comparação com a frequência de 2,3 GHz. Essas métricas são fundamentais para aplicações que exigem alta capacidade de transmissão, como serviços de streaming, jogos online e Internet das Coisas. O escalonamento bestCQI otimizou o uso dos recursos de rádio, priorizando usuários em melhores condições de canal e, conseqüentemente, aumentando a eficiência da rede. Os dados coletados sobre SINR e SNR demonstram a eficácia do 5G em proporcionar um ambiente menos suscetível a interferências. Além disso, a manutenção de níveis aceitáveis de BLER média, mesmo com a adição de mais usuários, reforçou o conceito de robustez da rede, e assim, a tecnologia pode suportar a crescente demanda por conectividade. Os resultados obtidos confirmaram a teoria

que descreve o 5G com melhorias significativas em relação às tecnologias anteriores, como o 4G, oferecendo uma experiência de conectividade mais eficiente e confiável.

Para trabalhos futuros, algumas sugestões são:

- **Expansão da análise geográfica:** realizar simulações para diferentes regiões, ambientes distintos, com características urbanas e rurais.
- **Avaliação de aplicações específicas:** investigar o desempenho da rede 5G para aplicações específicas, como IoT, realidade aumentada e virtual, ou veículos autônomos.
- **Integração de inteligência artificial:** compreender o uso de algoritmos de inteligência artificial para otimizar a alocação de recursos e melhorar a gestão de rede em tempo real, especialmente em situações de alta demanda.

Essas sugestões de trabalhos futuros poderão auxiliar na compreensão mais abrangente do impacto do 5G.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA GOV, **5G completa dois anos no Brasil e deve beneficiar 84% da população até 2030.** Agência Gov, 2024. Disponível em: [https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202407/5g-completa-dois-anos-de-implantacao-no-brasil]. Acessado em: 11 de nov. de 2024.

BRAGA, Lucas. MARQUES, Ana. **O que é 5G? Saiba como funciona e as vantagens da 5ª geração de redes móveis.** Tecnoblog, 2023. Disponível em: [https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-5g/]. Acessado em: 20 de out. de 2024.

CENTURY, **4G.** Century, 2024. Disponível em: [https://centurytelecom.com.br/glossario/4g/#:~:text=O%204G%20oferece%20alta%20defini%C3%A7%C3%A3o,r%C3%A1pido%20a%20servi%C3%A7os%20de%20cloud]. Acessado em: 11 de nov. de 2024.

EDITORES, **Compartilhamento Dinâmico de Espectro (Dynamic Spectrum Sharing – DSS).** 5g descomplicado, 2020. Disponível em: [https://5gdescomplicado.com/2020/12/20/compartilhamento-dinamico-de-espectro-dynamic-spectrum-sharing-dss/]. Acessado em: 2 de out. de 2024.

FARIAS, G. F.. **5G – Redes de Comunicações Móveis de Quinta Geração: Evolução, Tecnologia, Aplicações e Mercado.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019.

FELIPE, Andriel. **Do 1G ao 5G: Entenda a Evolução Da Internet Móvel.** 24 de março de 2024. Disponível em: [https://gamesdata.com.br/1g-ao-5g-entenda-a-diferenca-entre-as-geracoes-de-rede-movel/]. Acessado em: 2 de out. de 2024.

FEITOSA JR, Alessandro. SILVA, Victor Hugo. DE OLIVEIRA, Luciana. **5G no Brasil guia explica o que vai mudar com a nova tecnologia.** O Globo, 2022. Disponível em: [https://g1.globo.com/google/amp/tecnologia/noticia/2022/07/06/5g-chega-ao-brasil-nesta-quarta-guia-explica-o-que-vai-mudar-com-a-nova-tecnologia.ghtml]. Acessado em: 25 de out. de 2024.

IBGE. IBGE, 2024 Disponível em: [https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/patos-de-minas/panoramaaaccessao em 13/10/024]. Acesso em: 10 de maio de 2024.

LIMA, Cleane. **Algar Telecom ativa o sinal 5G em 20 bairros de Patos de Minas: Além do 5G, a empresa também anunciou melhorias na qualidade do sinal 4G, com a instalação de novas torres para ampliação da cobertura.** 12 de dezembro de 2023. Disponível em: [https://www.minhaoperadora.com.br/2023/12/algar-telecom-ativa-o-sinal-5g-em-20-bairros-de-patos-de-minas.html]. Acesso em: 10 de maio de 2024.

LOPES, André. **Expansão do 5G no Brasil: 623 novos municípios recebem a conexão móvel ultrarrápida.** Exame, 2023. Disponível em: [https://exame.com/tecnologia/expansao-]

do-5g-no- brasil-623-novos-municipios-recebem-a-tecnologia/] .Acesso em:10 de fevereiro de 2024.

MAINETTI, E. **5G NSA ou SA: Quais as principais diferenças?** Mynettech, 2024. Disponível em: [https://mynettech.com.br/wireless/5g-nsa-ou-sa-quais-as-principais-diferencas/]. Acessado em: 11 de nov. de 2024.

NASCIMENTO, Geórgia Brito do. **Análise dos parâmetros de rede 5G NR através de simulação utilizando a ferramenta NR Throughput Tool desenvolvida pela NOKIA.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2022.

PETERSON, Larry. SUNAT, Oguz. DAVIE, Bruce. **Private 5G: A Systems Approach.** Janeiro de 2023. Licença: CC BY-NC-ND 4.0. Origem: <https://github.com/SystemsApproach/private5g>. Disponível em: [https://5g.smartidea.com.br/README.html]. Acessado em: 2 de out. de 2024.

RESENDE, Getúlio Martins. **Estudo do comportamento de redes 5G e LTE em diferentes localidades e frequências.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: [https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37515/1/EstudoComportamentoRedes.pdf]. Acessado em: 11 de nov. de 2024.

SANTOS, Ricardo Di Lucia. **REDES GSM, GPRS, EDGE E UMTS.** 2008. Disponível em: [https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/ricardo/1_2.html]. Acessado em: 2 de out. de 2024.

TEODORO, Luan. **Análise de Parâmetros downlink de uma Rede 5G Non- Standalone.** Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: [https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30750/3/AnáliseDeParâmetros.pdf]. Acessado em: 11 de nov. de 2024.