

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

LUCAS GONÇALVES PEREIRA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE *THROUGHPUT* E DE
LATÊNCIA EM UMA REDE 5G *NON STAND ALONE***

Patos de Minas - MG

2019

LUCAS GONÇALVES PEREIRA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE *THROUGHPUT* E DE
LATÊNCIA EM UMA REDE 5G *NON STAND ALONE***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações na Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas, como requisito de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Orientador: Profa. Dra. Karine Barbosa Carbonaro.

Patos de Minas - MG

2019

LUCAS GONÇALVES PEREIRA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE *THROUGHPUT* E DE
LATÊNCIA EM UMA REDE 5G *NON STAND ALONE***

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Eletrônica e de Telecomunicações na
Universidade Federal de Uberlândia,
Campus Patos de Minas, como requisito
de avaliação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso 2.

Patos de Minas, 06 de dezembro de 2019

Comissão Examinadora

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

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa – FEELT/UFU (Membro 1)

Prof. Dr. Júlio César Coelho – FEELT/UFU (Membro 2)

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe Marta, meu pai Clementino, minha irmã Vanêssa e a minha avó Elza, que me apoiaram em todos os momentos e me deram razões para não desistir dos meus sonhos.

Agradeço aos professores e demais funcionários da UFU que contribuíram direta e indiretamente para a minha formação. Agradecimento em especial a minha orientadora Profa. Dra. Karine Barbosa Carbonaro, por todas as dicas, correções, direcionamentos e incentivos durante toda a minha graduação.

Agradeço aos amigos e colegas de faculdade que me acompanharam em toda trajetória acadêmica, que estudaram, aprenderam e compartilharam grande parte do conhecimento adquirido até aqui.

Agradeço a Algar Telecom pela oportunidade de trabalho com a tecnologia 5G, pelo suporte e disponibilização dos equipamentos e ambientes de testes necessários para a realização deste projeto.

Por fim, agradeço a Deus por ter me dado toda a saúde e força de vontade para superar as dificuldades da vida.

Resumo

A contínua expansão do modelo de internet das coisas, aliada a necessidade de maiores taxas e menores respostas de latência nas redes, leva a obrigação do desenvolvimento de novas tecnologias, assim como a evolução das redes móveis. Tais artifícios são importantes para garantir a utilização dos novos tipos de serviço, além de ser necessários para garantir a conectividade dos milhares de dispositivos que surgem em todo mundo em escala exponencial. Como solução para essa crescente demanda, estão surgindo novas tecnologias, como são os casos das redes 5G. Essas redes estão atraindo a atenção devido à sua capacidade de oferecer conectividade a uma grande quantidade de dispositivos, com ótimas respostas em termos de *throughput*, latência e eficiência espectral. Sendo assim, nesse trabalho é apresentado um estudo de uma rede de quinta geração de internet móvel, abordando algumas características e desempenho prático.

Palavras-chave: Comunicações Móveis, 5G, *throughput*, latência, eficiência espectral.

Abstract

The continual expansion of the IoT model, coupled with the need for higher rates and lower network latency responses, leads to the obligation to develop new technologies, as well as the evolution of mobile networks. Such gimmicks are important for ensuring the use of new types of services, and are necessary for ensuring the connectivity of the thousands of devices that emerge worldwide on an exponential scale. As a solution to this growing demand, new technologies are emerging, such as 5G networks. These networks are attracting attention because of their ability to offer connectivity to a large number of devices, with optimal responses in terms of throughput, latency and spectral efficiency. Thus, this paper presents a study of a fifth-generation mobile internet network, addressing some characteristics and practical performance.

Keywords: *Mobile Communication, 5G, throughput, latency, spectral efficiency.*

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Modelos de serviço e mercados do 5G.	18
Figura 2 - Espectro de frequência 5G.	18
Figura 3 - Técnicas TDD e FDD.	19
Figura 4 - Arquitetura básica LTE.	20
Figura 5 - Modelo do eNodeB.	21
Figura 6 - Arquitetura EPC.	22
Figura 7 - Arquitetura Non Stand Alone.	24
Figura 8 - Elementos da arquitetura NSA.	25
Figura 9 - Antena 4G e AAU.	25
Figura 10 - Arquitetura Stand Alone.	26
Figura 11 - Tecnologia Massive MIMO.	27
Figura 12 - Modulações QPSK e M-QAM.	28
Figura 13 - Esquemas QAM de ordens superiores.	29
Figura 14 - OFDM e F-OFDM.	30
Figura 15 - Localização do core e acesso de rede 5G.	32
Figura 16 - Esquema da topologia de rede utilizada no projeto.	33
Figura 17 - Servidor E9000.	34
Figura 18 - AAU modelo 5613 da Huawei e antena 4G ATR4518R13v06.	35
Figura 19 - BBU modelo 5900 da Huawei.	35
Figura 20 - <i>Smartphone</i> Huawei Mate 20 X 5G.	36
Figura 21 - Interfaces do <i>Speedtest</i>	37
Figura 22 - Suporte com UE.	37
Figura 23 - Posicionamento do setup de medições dentro do laboratório.	38
Figura 24 - Interfaces do PuTTY para medições da latência inerente a rede de transporte.	41
Figura 25 - Resultados throughput downlink (Mbps).	45
Figura 26 - Eficiência espectral throughput downlink (bits/s/Hz).	46
Figura 27 - Resultados throughput uplink (Mbps).	46
Figura 28 - Eficiência espectral throughput uplink (bits/s/Hz).	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Larguras de banda suportadas pelo NR.....	31
Tabela 2 - Resultados obtidos de downlink, uplink e latência no melhor cenário.....	40
Tabela 3 - Resultados de latência das switchs A e B e da switch A até o roteador.	42
Tabela 4 - Resultados obtidos de downlink, uplink e latência com 80 MHz.	42
Tabela 5 - Resultados obtidos de downlink, uplink e latência 60 MHz.....	43
Tabela 6 - Resultados obtidos de downlink, uplink e latência com 40 MHz.	44

Lista de Abreviaturas e Siglas

5G	Quinta geração de tecnologia de telefonia móvel
IoT	<i>Internet of Things</i>
4G	Quarta geração de tecnologia de telefonia móvel
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
CC	<i>Critical Communications</i>
URLLC	<i>Ultra Reliable and Low Latency Communications</i>
mIoT	<i>Massive Internet of Things</i>
3GPP	3rd Generation Partnership Project
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
VoLTE	Voice over LTE
CSFB	<i>Circuit Switched Fall Back</i>
2G	Segunda geração de tecnologia de telefonia móvel
3G	Terceira geração de tecnologia de telefonia móvel
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
UE	<i>User Equipment</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
GERAN	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>

UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
ERB	<i>Estações Rádio-Base</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RRU	<i>Radio Remote Unit</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PCRF	<i>Policy Charging Rule Function</i>
NSA	<i>Non Stand Alone</i>
SA	<i>Stand Alone</i>
NR	<i>New Radio</i>
AAU	<i>Active Antenna Unit</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
IMT	<i>Internet Mobile Telecommunications</i>
mMIMO	<i>Massive Multiple Input Multiple Output</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
OFDM	<i>Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais</i>
F-OFDM	<i>Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais – Filtrado</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
PoC	<i>Proof of Concept</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>

Lista de Símbolos

GHz	Giga Hertz - Unidade de frequência referente a um bilhão de Hertz.
MHz	Mega Hertz - Unidade de frequência referente a um milhão de Hertz.
KHz	Kilo Hertz - Unidade de frequência referente a mil Hertz.
Mbps	Megabit por segundo - Taxa de bits;
ms	Milissegundo - Unidade de medida de tempo.
Gbps	Gigabit por segundo - Taxa de bits.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. TEMA	15
1.2. PROBLEMATIZAÇÃO	15
1.3. OBJETIVOS	15
1.4. JUSTIFICATIVA	15
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 MODELOS DE SERVIÇOS E MERCADOS DO 5G.....	17
2.2 ESPECTRO DE FREQUÊNCIA.....	18
2.3 ARQUITETURA LTE	19
2.3.1 E-UTRAN	21
2.3.2 EPC.....	22
2.4 ARQUITETURA 5G	23
2.4.1 <i>Non Stand Alone</i>	23
2.4.2 <i>Stand Alone</i>	26
2.5 TECNOLOGIAS E TÉCNICAS UTILIZADAS	26
2.5.1 mMIMO e <i>beamforming</i>	27
2.5.2 Modulações digitais QAM	28
2.5.3. OFDM e F-OFDM	29
2.5.4. Largura de banda	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1. DISPOSIÇÃO DO <i>SETUP</i>	32
3.1.1. Núcleo de rede	34
3.1.2. Acesso de rede.....	34
3.1.3. UE	36

3.2. PARAMETRIZAÇÃO	38
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	40
4.1. RESULTADOS OBTIDOS NO MELHOR CENÁRIO	40
4.2. RESULTADOS OBTIDOS COM 80 MHZ.....	42
4.3. RESULTADOS OBTIDOS COM 60 MHZ.....	43
4.4. RESULTADOS OBTIDOS COM 40 MHZ.....	44
4.5. RESULTADOS DE EFICIÊNCIA ESPECTRAL.....	45
5. CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

Com o grande avanço tecnológico da atualidade, a inclusão digital mostra-se cada vez mais presente no dia a dia da sociedade. Observa-se um aumento da população conectada aos serviços de internet e concomitantemente um aumento na quantidade de dispositivos conectados à rede. O conceito de conectar objetos à Internet, chamado Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), em conjunto com a crescente demanda por maiores taxas e menores latências apresenta um novo modelo de telecomunicações.

No novo cenário, as novas tecnologias devem ser desenvolvidas para atender todos os casos de uso e aplicações. E assim, tem-se o surgimento da quinta geração de internet sem fio (5G), onde se tem não somente uma evolução da geração anterior (4G), mas também uma mudança de paradigmas em termos de comunicação. As aplicações que até então não eram possíveis devido às limitações em requisitos de latência, agora se tornam realidade, como é o caso de cirurgias remotas, carros autônomos e jogos processados em nuvem.

Além disso, podem-se utilizar as redes móveis em aplicações que consomem um alto poder de processamento e largura de banda, como as transmissões com resoluções de 4K e 8K e *downloads* com altíssimas taxas [1]. Além de tudo, tem-se uma ótima alternativa de conectividade para serviços IoT, pois nesse novo cenário a comunicação que até então acontecia entre pessoas, pode acontecer também entre sensores, atuadores, máquinas, e outros dispositivos que apresentem interface de comunicação e unidade de armazenamento e processamento [2].

Para tornar possível a concretização de todas as melhorias advindas desta geração de comunicações móveis, várias melhorias em termos de tecnologia são necessárias. Sendo assim, com o 5G tem-se a adoção de novas técnicas, com novas parametrizações que permitem obter ótimas melhorias de resultados com respeito à experiência do usuário [1]. Dentre algumas melhorias, destaca-se a diminuição efetiva dos valores de latência, o aumento dos resultados de *throughput downlink* e *uplink*. Esses requisitos serão medidos, analisados e discutidos neste trabalho.

1.1. TEMA

Neste trabalho de conclusão de curso apresenta-se um estudo dos resultados obtidos dos parâmetros de *throughput* e de latência de uma rede 5G do tipo *Non Stand Alone*.

1.2. PROBLEMATIZAÇÃO

O cenário tecnológico atual tem um número cada vez maior de dispositivos interligados à rede. Os requisitos dos usuários dos dispositivos são velocidade, taxa de transmissão e latência.

Diante desse cenário apresentado, esse trabalho propõe um estudo de uma tecnologia mais eficiente aplicada no desenvolvimento de um novo modelo de telecomunicações.

1.3. OBJETIVOS

Nesse trabalho realiza-se um estudo dos parâmetros de vazão e latência de uma rede de quinta geração de internet móvel. Os objetivos específicos são:

- Estudo, especificação e análise da tecnologia 5G;
- Verificação, identificação e visualização prática dos elementos que compõem a arquitetura da tecnologia de rede;
- Medição do *Throughput downlink* no melhor cenário;
- Medição do *Throughput uplink* no melhor cenário;
- Medição do *Throughput downlink* e *uplink* variando as larguras de banda;
- Medição da latência da rede;
- Cálculo da eficiência espectral do sistema.

1.4. JUSTIFICATIVA

Para promover mais qualidade de vida e modernização de processos, sejam eles voltados às atividades da indústria, do comércio ou do lazer, são demandadas novas tecnologias. Nesse trabalho, a tecnologia emergente 5G é apresentada e os

resultados obtidos nos cenários de testes são discutidos com o objetivo de se verificar se os requisitos definidos para a tecnologia são atendidos.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 descreve-se o referencial teórico sobre redes móveis de quinta geração. Os materiais e a descrição dos cenários de testes utilizados são apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos nos testes realizados. Por fim, as considerações finais são apresentadas no Capítulo 5.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

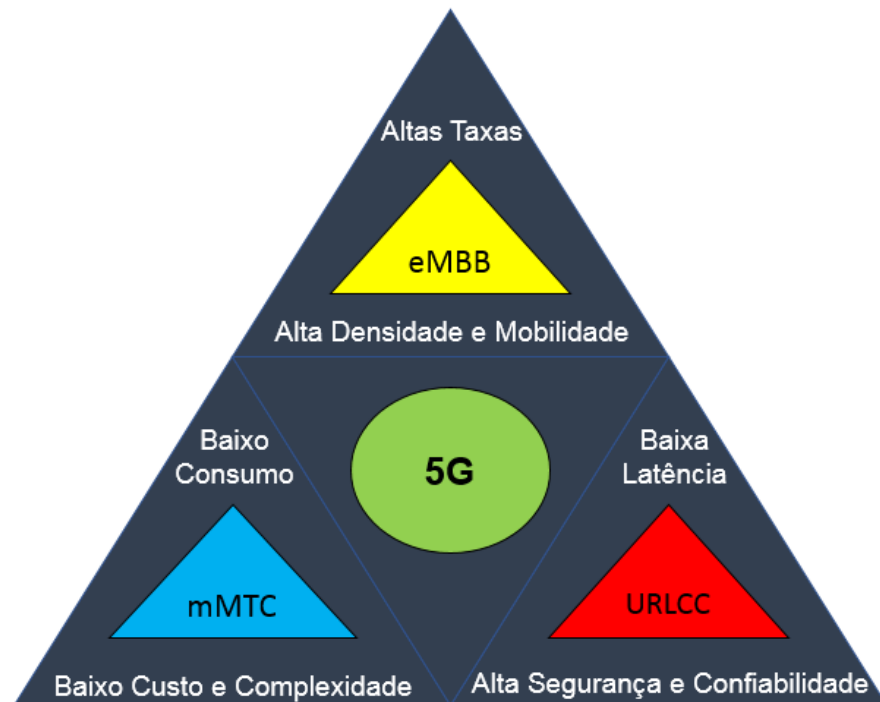
Para a compreensão e o desenvolvimento do tema proposto, nesse capítulo, apresenta-se o desenvolvimento do estado da arte dos seguintes assuntos: modelos de serviços, espectro de frequência, arquiteturas das redes LTE e 5G, mMIMO e *beamforming*, modulações digitais, OFDM e F-OFDM.

2.1 MODELOS DE SERVIÇOS E MERCADOS DO 5G

Nas últimas décadas, o mundo presenciou uma evolução das comunicações sem fio móveis resultando na ascensão das redes 5G. As características dessas redes foram definidas em relação aos novos modelos de serviços e dos mercados. Conforme representado na Figura 1 e apresentado em TR 21.915 [3], os principais requisitos são:

- *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB): aumento das taxas de dados provenientes do aprimoramento da banda larga móvel. Além disso, será possível atender de forma satisfatória os requisitos de maior densidade de tráfego e alta mobilidade dos usuários;
- *Critical Communications* (CC) e *Ultra Reliable and Low Latency Communications* (URLLC): o modelo de serviços demanda requisitos de baixa latência, alta disponibilidade e confiabilidade. Referem-se a aplicações de novos serviços, das quais muitas ainda não existem ou são pouco difundidas, como por exemplo, cirurgias remotas e veículos autônomos;
- *Massive Internet of Things* (mIoT): o modelo de serviços deve oferecer suporte a altíssimas densidades de tráfegos, tendo em vista o aumento exponencial dos dispositivos conectados às redes. O principal desafio é fornecer conectividade escalável e eficiente para todos esses dispositivos que ao contrário do modelo eMBB enviam pacotes curtos, de baixo custo e grande eficiência energética [3].

Figura 1 - Modelos de serviço e mercados do 5G.

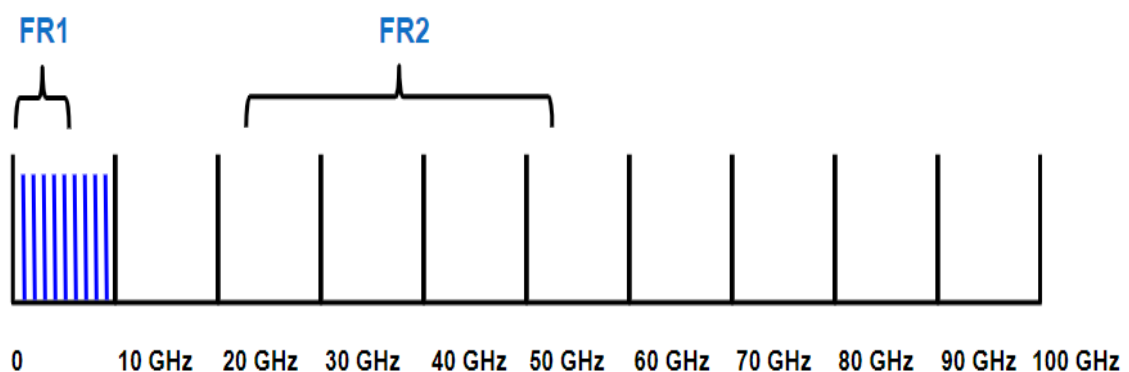


Fonte: Adaptado de [4].

2.2 ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

Conforme apresentado na especificação técnica da 3ª Geração de Projetos de Parceria (3GPP 38.101) [5], para implementação de todos os modelos de serviço das redes 5G, foram definidas duas faixas de frequência de operação, conforme apresentado na Figura 2. A primeira faixa FR1 é a faixa sub-6 GHz (450 a 6.000 MHz). Já na segunda faixa FR2, as aplicações utilizam o intervalo de onda milimétrica de 24.250 a 52.600 MHz.

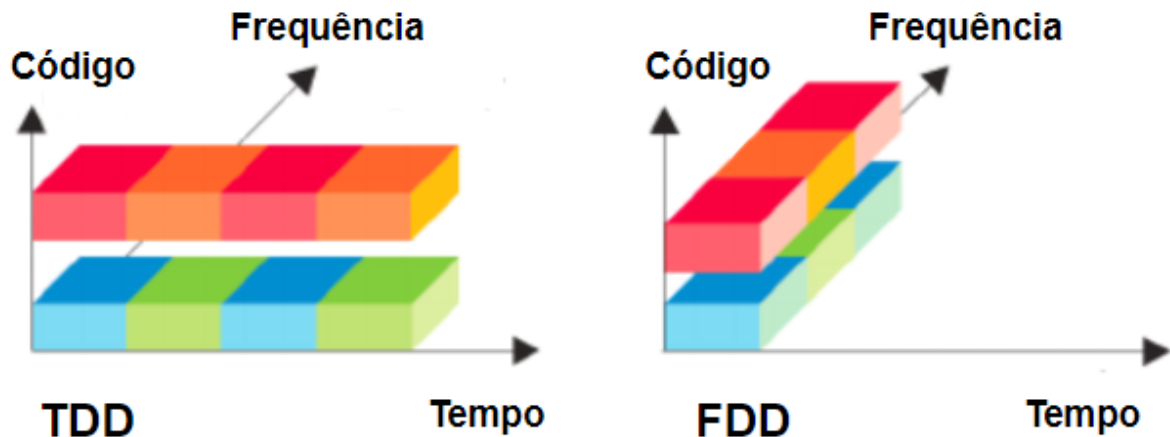
Figura 2 - Espectro de frequência 5G.



Fonte: Adaptado de [6].

Nas bandas de frequência no 5G são utilizadas as duas técnicas de uso do espectro, a divisão de frequência duplex (FDD - *Frequency Division Duplexing*) e a divisão de tempo duplex (TDD - *Time Division Duplexing*) ilustradas na Figura 3.

Figura 3 - Técnicas TDD e FDD.



Fonte: Adaptado de [7].

No modo FDD, as transmissões acontecem ao mesmo tempo e em frequências diferentes para o *uplink* e para o *downlink*. Este modo é utilizado quando ambas as taxas precisam ser simétricas. Já no modo TDD, as frequências utilizadas para *uplink* e *downlink* são as mesmas, porém ocorrem em tempos diferentes. Esta última apresenta uma maior interferência em estações base vizinhas e também é utilizado em implantações mais densas, se comparado com o FDD. Além disso, o TDD é preferível para maiores faixas de frequência, sendo utilizado no 5G como padrão nas ondas milimétricas, bem como algumas faixas de frequência importantes como a 3,5 GHz [8].

2.3 ARQUITETURA LTE

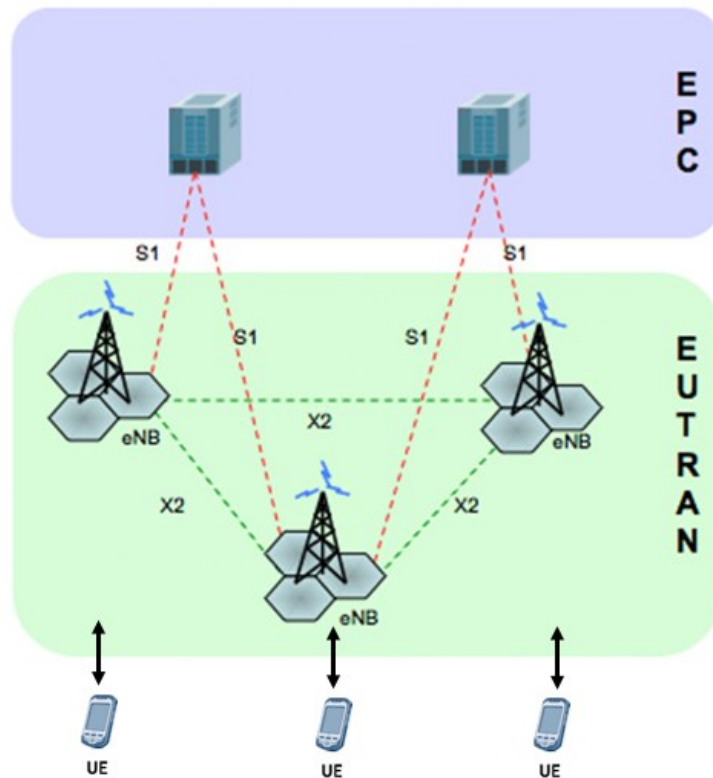
A etapa inicial da nova geração de comunicações móveis é implementada utilizando parte da estrutura 4G já existente.

Portanto, o entendimento básico de seus elementos de rede faz-se importante para a compreensão da tecnologia 5G [9].

O LTE (*Long Term Evolution*) é uma rede baseada no protocolo da internet (IP - *Internet Protocol*) formada pela E-UTRAN que representa os elementos de rede de

acesso e o EPC (*Evolved Packet Core*) que compõe os componentes de núcleo de rede [10]. Este modelo de arquitetura é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Arquitetura básica LTE.



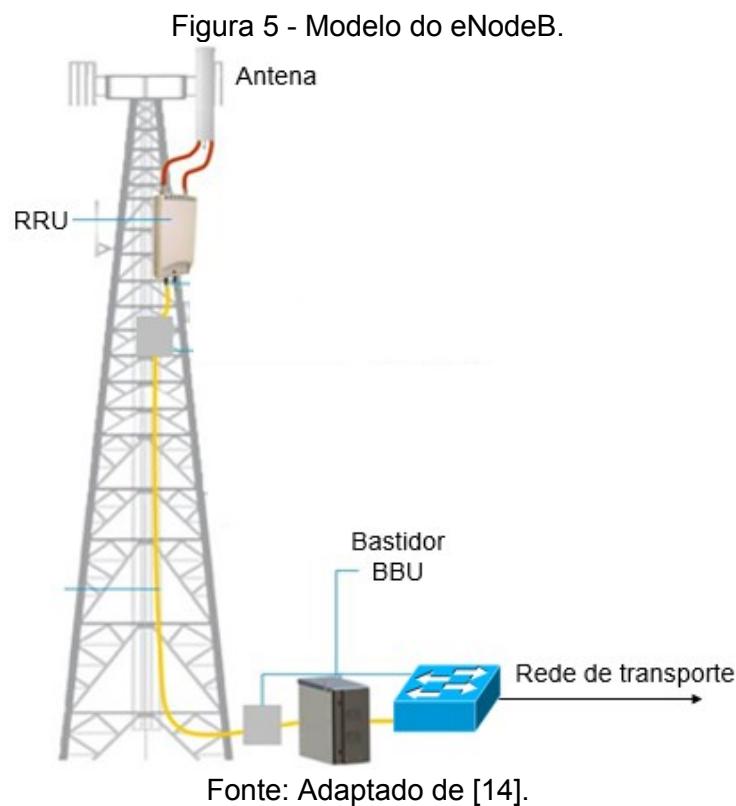
Fonte: Adaptado de [11].

O principal objetivo desta geração é o aumento de taxa de dados. Para prover os serviços de chamada de voz ou o envio de mensagens curtas (SMS - *Short Message Service*) é necessária a utilização de soluções como o VoLTE (*Voice over LTE*) que necessita de uma arquitetura IMS (*IP Multimedia Subsystem*) para garantir a entrega de serviços multimídia em IP. Uma alternativa é a utilização de CSFB (*Circuit Switched Fall Back*) onde o usuário se conecta à rede 2G ou 3G para realizar o serviço, e em seguida retorna para a conexão com o LTE [12].

Na arquitetura 4G o dispositivo móvel que se conecta a rede é denominado de equipamento do usuário (UE - *User Equipment*). Ele armazena entidades responsáveis por vários protocolos, de gestão de mobilidade, controle de recurso de rádio dentre outros necessários para o seu desempenho dentro da rede [10].

2.3.1 E-UTRAN

A E-UTRAN consiste de várias ERBs (Estações Rádio-Base) denominadas de eNodeB que são interconectadas entre si por meio da interface X2. Essa interface garante a comunicação das ERBs entre si, pois, a E-UTRAN não apenas certifica a interface final com o UE, mas ela também fornece as funções de RNC (*Radio Network Controller*) para gerenciar os recursos de rádio [13]. Uma eNodeB é composta pelos elementos ilustrados na Figura 5.



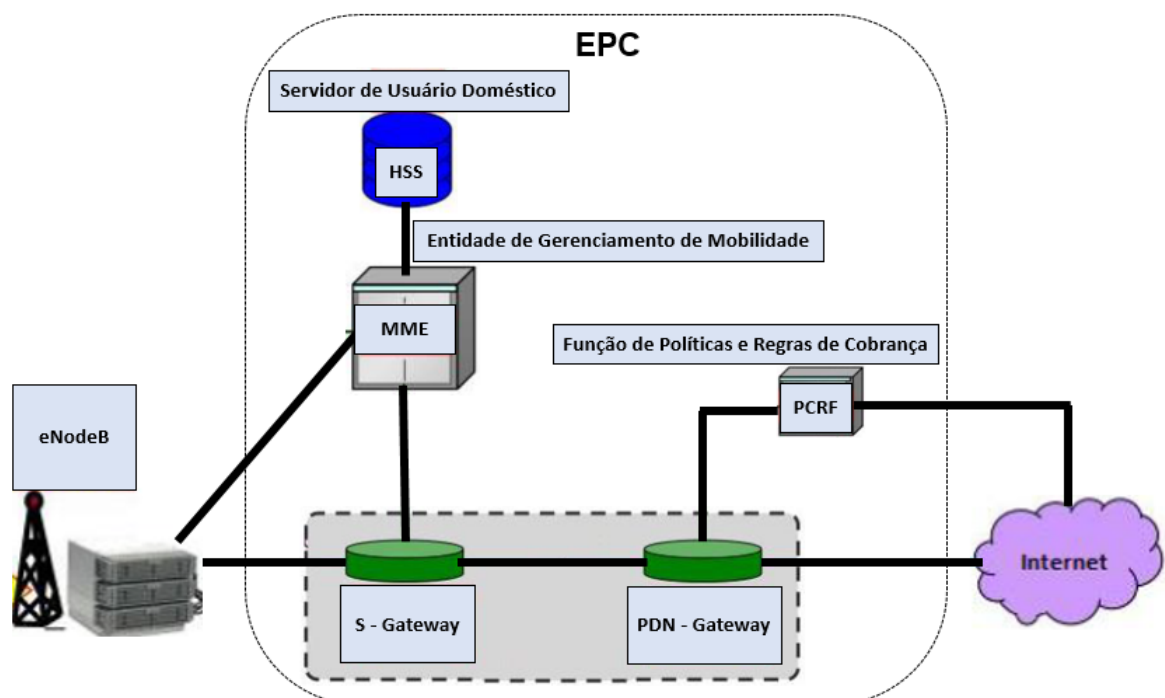
As antenas são instaladas no alto das torres ou dos prédios e trata-se de elementos passivos que apenas captam ou irradiam ondas eletromagnéticas no espaço [15]. Portanto, necessita de uma conexão com as unidades de rádio remoto (RRU - *Radio Remote Unit*) para terem o sinal digital amplificado para um nível de potência desejado na transmissão ou então, permitir uma amplificação do sinal recebido para encaminhá-lo a uma unidade de banda base (BBU - *Baseband Unit*) por meio de um enlace óptico. Todas as conversões de elétrico-óptico, de óptico-elétrico, de digital-analógico e de analógico-digital também são realizadas nesses elementos de rádio [16].

A BBU é instalada em gabinetes em ambiente *outdoor*, como ilustrado na Figura 5, ou em salas de equipamentos com outros elementos de transmissão e bancos de baterias. Elas são unidades que processam os sinais em banda base em sistemas de telecomunicações de redes móveis. São responsáveis por várias funções como: processamento de mensagens de sinalização, fornecimento de portas físicas para troca de informações entre a ERB e a rede de transporte, processamento de sinais em banda base de *uplink* e *downlink* e o gerenciamento de todo o sistema da ERB em termos de operação, manutenção e relógio do sistema [17].

2.3.2 EPC

O EPC é uma estrutura utilizada para fornecer voz e dados unificados em uma arquitetura de serviço IP. Ele oferece suporte à mobilidade em sistemas de outras gerações fundamentados pelo 3GPP, garantindo interoperabilidade entre E-UTRAN, GERAN (GSM EDGE *Radio Access Network*), UTRAN (UMTS *Terrestrial Radio Access Network*). Ademais, é permitido também que tecnologias não 3GPP, como CDMA2000 (*Code Division Multiple Access 2000*) e WiMAX interconectem o UE e o EPC [18]. A Figura 6 ilustra os elementos que compõe a arquitetura EPC.

Figura 6 - Arquitetura EPC.



Fonte: Adaptado de [19].

- **HSS** (*Home Subscriber Server*): trata-se do banco de dados que contém informações relacionadas ao assinante e ao usuário da rede. Ele fornece funções de configuração de chamadas e sessões, autenticação e autorização de acesso ao usuário.
- **MME** (*Mobility Management Entity*): gerencia os estados de sessão, autentica e rastreia um usuário na rede. Sendo assim, essa entidade lida com o plano de controle, trabalhando com a sinalização relacionada a mobilidade e segurança para acesso ao E-UTRAN.
- **Serving Gateway**: responsável por rotear os pacotes de dados de entrada e saída da rede, lidando com o plano de usuário. Portanto, esse elemento faz o transporte de tráfego de dados IP entre o UE e as redes externas.
- **PDN** (*Packet Data Network*) **Gateway**: ponto de interconexão entre redes externas e EPC. Dentre suas funções na rede estão a alocação de endereços, gerenciamento de qualidade de serviço e inspeção de pacotes.
- **PCRF** (*Policy Charging Rule Function*): suporta detecção de fluxo de dados de serviço, atuando na cobrança baseada em fluxo de tráfego [18].

2.4 ARQUITETURA 5G

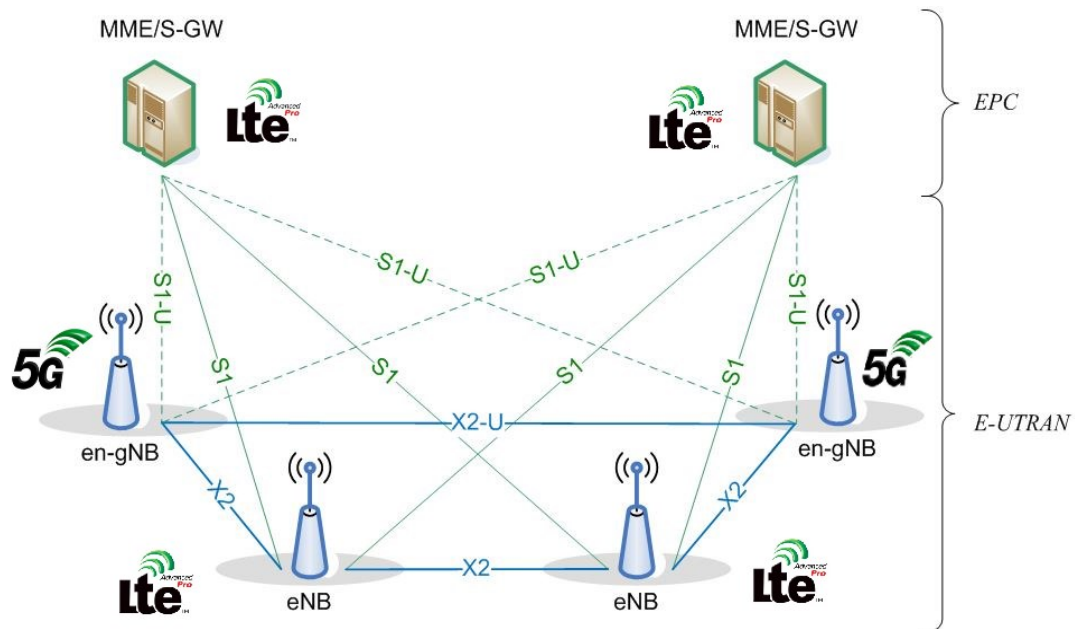
A implantação definida para o 5G consiste nas arquiteturas *Non Stand Alone* (NSA) e *Stand Alone* (SA), conhecidas respectivamente, como fases 1 e 2 da nova geração de comunicações móveis. Nas próximas seções são apresentados com maiores detalhes os dois modelos.

2.4.1 *Non Stand Alone*

No modelo de arquitetura NSA, a rede de acesso 5G é usada em conjunto com a rede de acesso LTE e EPC, conhecidos como rede de acesso e núcleo de rede de tecnologia 4G. Conforme pode ser visualizado na Figura 7, este modelo implementa a rede de acesso por rádio 5G, conhecido como *New Radio* (NR), sem necessitar de substituição dos outros elementos de rede já existentes. As padronizações para este modelo de arquitetura foram definidas na Release 15, conhecida como fase 1 do 5G

e podem ser visualizadas como uma etapa inicial para a implantação completa da tecnologia de redes móveis da nova geração [3].

Figura 7 - Arquitetura *Non Stand Alone*.



Fonte: [3].

Nessa arquitetura, os nós de estação base da nova geração (en-gNB) conectam-se entre si por meio de interfaces X2, bem como as estações base LTE (eNB), da mesma maneira como acontecia na padronização da geração anterior. A conectividade do E-UTRAN com a rede EPC de tecnologia 4G acontece por meio da interface S1 [3].

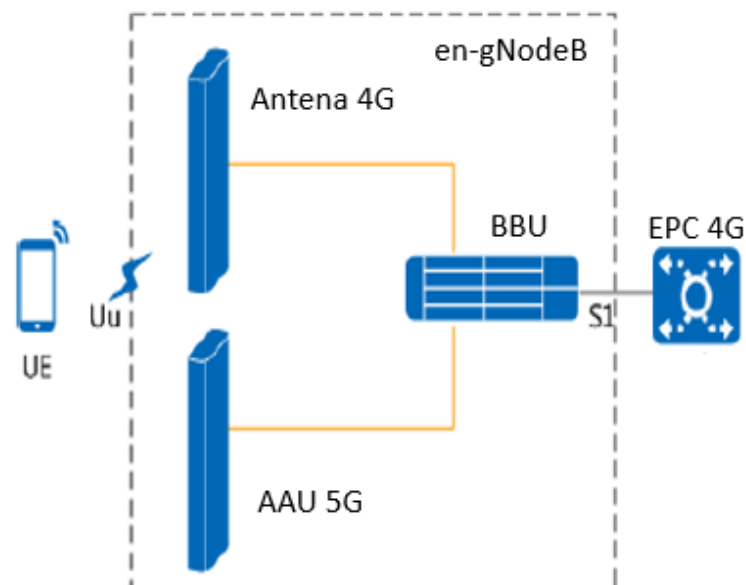
Até o momento de elaboração deste trabalho, todos os testes realizados com a tecnologia 5G no Brasil, aconteceram utilizando o modelo de arquitetura NSA. Seu sistema atua utilizando os seguintes elementos físicos representados na Figura 8.

A Figura 9 ilustra um esquema utilizado como mecanismo de transmissão e recepção a AAU (*Active Antenna Unit*) que incorpora as funções de RRU e antenas convencionais que requerem mais recursos físicos no site.

A AAU tem módulos de função que incluem a unidade de rádio e a unidade de antena, além de um módulo de energia e a unidade de processamento. A junção de elementos simplifica a rede e dispensa a utilização de jumpers e conectores utilizados na tecnologia 4G, simplificando a plataforma de instalação e permitindo uma

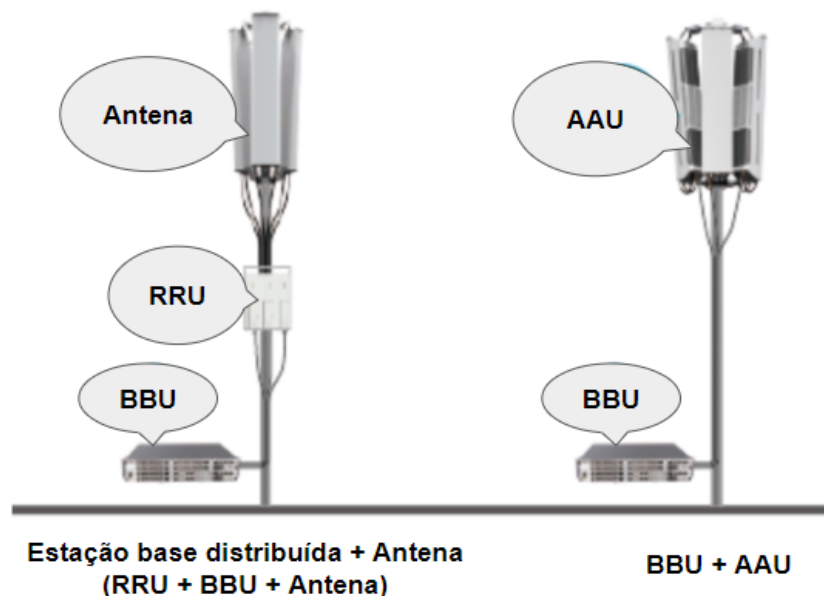
implantação mais flexível. Além de poder ocasionar uma redução de área de vento (parâmetro utilizado para determinar os valores cobrados por aluguéis em torres) [20]. Juntamente com a AAU utiliza-se uma antena 4G. Essa antena é responsável por efetivar os sinais de sinalização da rede. Estes dois elementos garantem a conectividade com um UE e são interligados a uma BBU 5G. Este último elemento está conectado a um EPC 4G.

Figura 8 - Elementos da arquitetura NSA.



Fonte: Adaptado de [18].

Figura 9 - Antena 4G e AAU.

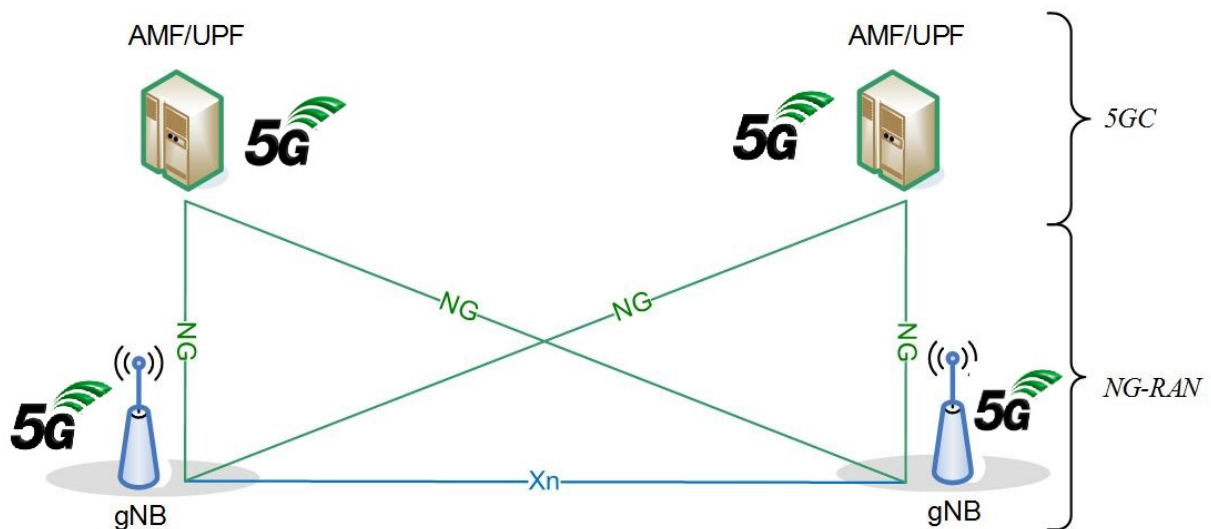


Fonte: Adaptado de [18]

2.4.2 Stand Alone

O modelo de arquitetura SA, ilustrado na Figura 10, fase 2 do 5G, terá seus modelos mais bem detalhados na Release 16 que deverá ser finalizada em junho de 2020 atendendo os requisitos da ITU (*International Telecommunication Union*) IMT-2020 (Internet Mobile Telecommunications-2020) [21].

Figura 10 - Arquitetura *Stand Alone*.



Fonte: [3].

As estações base (gNB) da nova geração são conectadas por meio da interface Xn. Essas estações conectam-se ao núcleo de rede 5GC usando a interface NG [3].

2.5 TECNOLOGIAS E TÉCNICAS UTILIZADAS

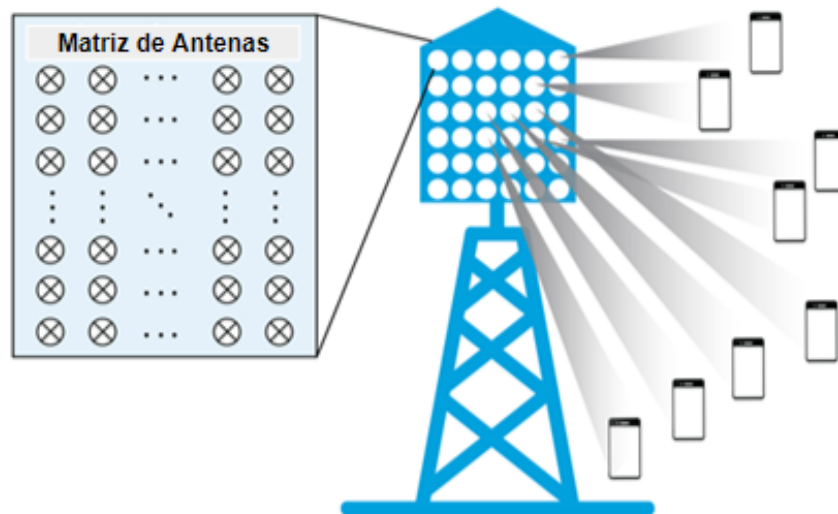
O 5G tem como expectativa atender à crescente demanda por altas taxas e baixas latências, além de promover ainda mais a difusão de dispositivos de Internet das Coisas. Para concretizar esse cenário, novas tecnologias são utilizadas em conjunto, para atingir os melhores resultados possíveis. Dentre as técnicas utilizadas estão o mMIMO (*Massive Multiple Input Multiple Output*), *beamforming*, F-OFDM, além de altas ordens de modulação digital, os quais são apresentados a seguir.

2.5.1 mMIMO e *beamforming*

Um dos objetivos buscados, para atingir melhores resultados no 5G, é a ampliação da eficiência espectral por unidade de área ou volume. Uma das técnicas utilizadas para obter essa melhoria é o método mMIMO. O *Massive MIMO* usa uma grande quantidade de canais transmissores e receptores e técnicas especiais de processamento para melhorar os aspectos de capacidade, cobertura e confiabilidade da transmissão de rádio. Portanto, a sua utilização resulta em maiores taxas e melhor experiência do usuário em relação à navegação e a conectividade [22] [23].

O MIMO é utilizado em alguns sistemas, como no LTE, com padrões de até 8x8 (8 transmissores e 8 receptores). O mMIMO é utilizado para arranjos de antenas maiores e até então não existentes nas gerações anteriores. A Figura 11 ilustra o mMIMO. Observe que há um único elemento físico e várias antenas integradas, permitindo que um único nó transmita vários fluxos para um ou mais UEs [22].

Figura 11 - Tecnologia Massive MIMO.



Fonte: Adaptado de [24].

No *beamforming* ocorre a formação de feixes com um padrão de radiação que se adapta a um determinado cenário. Com esse modelo inteligente, conforme ilustrado na Figura 9, a amplitude relativa e as mudanças de fase são utilizadas em cada um dos elementos de antena para direcionar o sinal para os usuários, ao passo que o sinal é cancelado destrutivamente em outros lugares onde não há a requisição por cobertura [25].

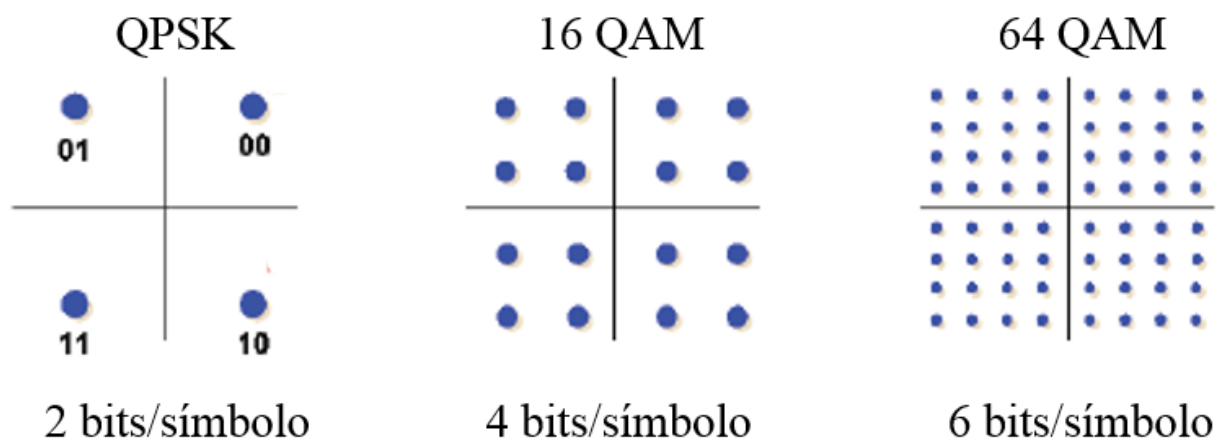
2.5.2 Modulações digitais QAM

Modulações são técnicas utilizadas para transformar um sinal em uma forma adequada para permitir sua transmissão em determinado canal. O sinal modulado transmitido ocorre em relação à frequência, à fase ou à amplitude [26].

Nas modulações digitais, a transmissão utiliza símbolos e estes são gerados por meio da codificação dos bits de informação. Para um conjunto de símbolos gerado é formada uma constelação originada conforme o esquema de modulação utilizado [26].

Nas tecnologias atuais tem-se utilizado as modulações QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Nessa modulação, os símbolos são mapeados em um diagrama de constelação variando amplitude e fase. Para o entendimento do esquema de modulação QAM observe o sistema QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Modulações QPSK e M-QAM.



Fonte: Adaptado de [25].

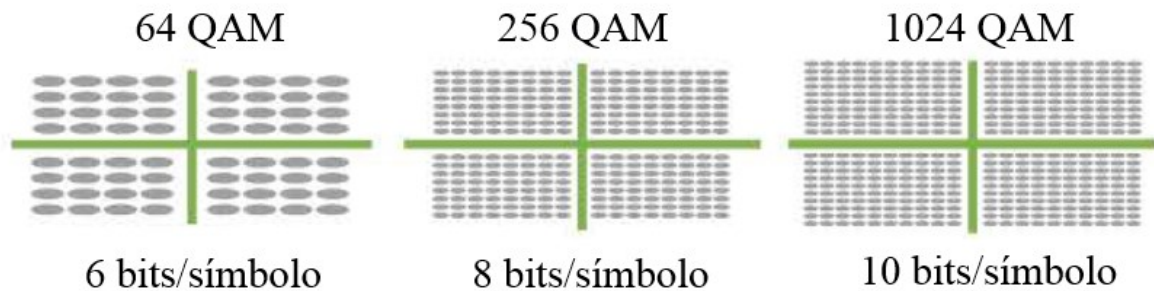
Na modulação QPSK são modulados 2 bits por símbolo variando os parâmetros de fase e de quadratura da onda portadora. Assim, é possível transmitir os símbolos formados pelos bits 00, 01, 10, 11. Neste sistema, alterando os valores de fase gera-se uma constelação com todos os símbolos originados a uma mesma distância da origem [28].

No sistema QAM, além do mapeamento em fase ocorre o mapeamento em amplitude. Na constelação, os símbolos apresentam distâncias distintas de acordo com a amplitude da modulação. No caso, quando se utiliza ordens maiores como 16-

QAM e 64-QAM transmite-se uma quantidade maior de informação, 4 e 6 bits por símbolo [28].

No sistema 5G são estabelecidas modulações de ordens superiores conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Esquemas QAM de ordens superiores.



Fonte: Adaptado de [21].

As modulações de ordens superiores oferecem melhorias espectrais nas redes de tecnologia móvel. Nas primeiras tecnologias 5G têm-se as modulações 256-QAM para *downlink* e 64-QAM para *uplink*. Para as próximas atualizações tem-se as promessas de 1024-QAM para *downlink* e 256-QAM para *uplink* [23].

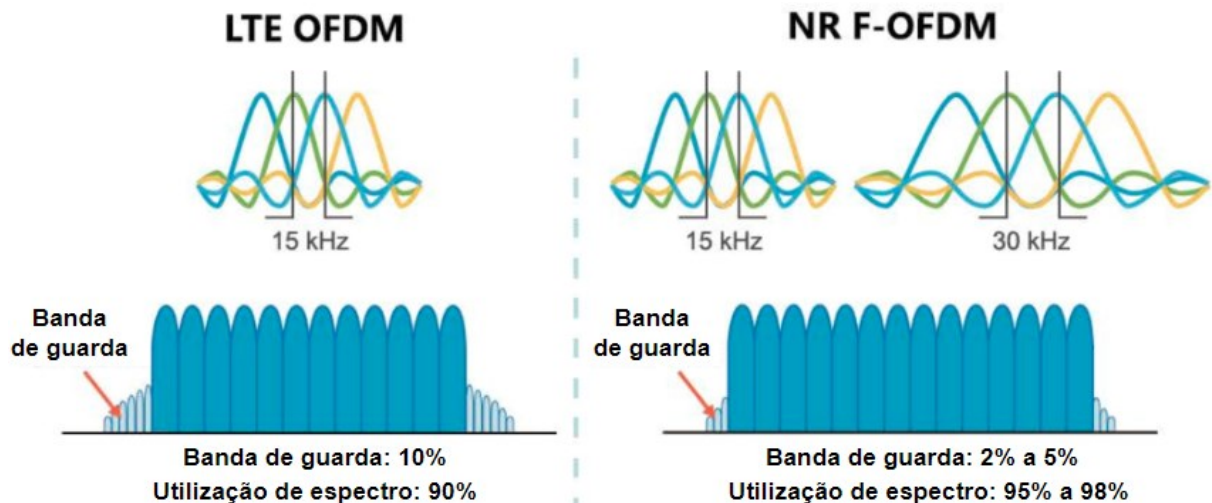
2.5.3. OFDM e F-OFDM

Multiplexação é uma técnica de agregação de vários canais de informação para transmissão em um único meio físico, sem a ocorrência de interferência dentre eles [26]. Esse processo pode ocorrer de várias formas, e assim como acontece na tecnologia LTE, no sistema 5G é utilizada uma técnica de multiplexação no domínio da frequência, conhecida como Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Contudo, nesse modelo de tecnologia da nova geração é empregado um padrão otimizado, a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais-Filtrado (F-OFDM - *Filtered Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), conforme ilustrado na Figura 14.

No OFDM ocorre a transmissão paralela de várias subportadoras moduladas com técnicas PSK ou QAM. O espaçamento entre as subportadoras é cautelosamente selecionado, de forma a existir ortogonalidade entre elas [29]. Sendo assim, essas subportadoras são matematicamente perpendiculares entre si. Quando uma

subportadora está em seu ponto de máximo, as duas subportadoras adjacentes estão passando por seus pontos de mínimo. Neste sistema, é utilizada também uma banda de guarda localizada na parte inferior e superior para reduzir interferências entre canais [23].

Figura 14 - OFDM e F-OFDM.



Fonte: Adaptado de [23].

O F-OFDM é uma tecnologia empregada no 5G para aperfeiçoar a utilização do espectro. Essa tecnologia utiliza um filtro otimizado e reduz ao mínimo as bandas de guarda, conforme ilustrado na Figura 14 [23].

Outra evolução do padrão 5G é em relação aos espaçamentos entre portadoras. Na tecnologia LTE, o espaçamento entre subportadoras é um valor fixo de 15 kHz. No 5G, conforme padronização imposta pelo 3GPP 38.211 [30], esses valores são escaláveis para 15, 30, 60 (FR1) e 120, 240 KHz (FR2). Os valores escaláveis ocasionam a abrangência de diferentes serviços com requisitos de latência, QoS (*Quality of Service*), e abrangência de várias faixas de frequência de operação.

2.5.4. Largura de banda

O aumento da largura de banda leva ao alto desempenho da tecnologia 5G, principalmente se comparado aos valores empregados nas gerações anteriores. Observando os dados informados na Tabela 1, de acordo com a padronização do

3GPP TR 21.915 [3], é possível a utilização de até 100 MHz de largura de banda em FR1 e 400 MHz em FR2 por portadora.

Tabela 1 - Larguras de banda suportadas pelo NR.

<i>Range</i>	<i>Range de frequência (MHz)</i>	<i>Largura de banda de canal suportado (MHz)</i>
FR1	410 - 7125	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100
FR2	24250 - 52600	50, 100, 200, 400

Fonte: [3].

Contudo, assim como nas últimas versões de tecnologia LTE, é realizável a utilização de agregação de portadoras para a obtenção de bandas ainda maiores. No LTE *Advanced*, há um valor máximo de agregação de 5 portadoras de 20 MHz resultando em uma banda máxima de 100 MHz [31]. Já no 5G é permitida a utilização de até 16 portadoras, originando valores de largura de banda na casa dos GHz [3].

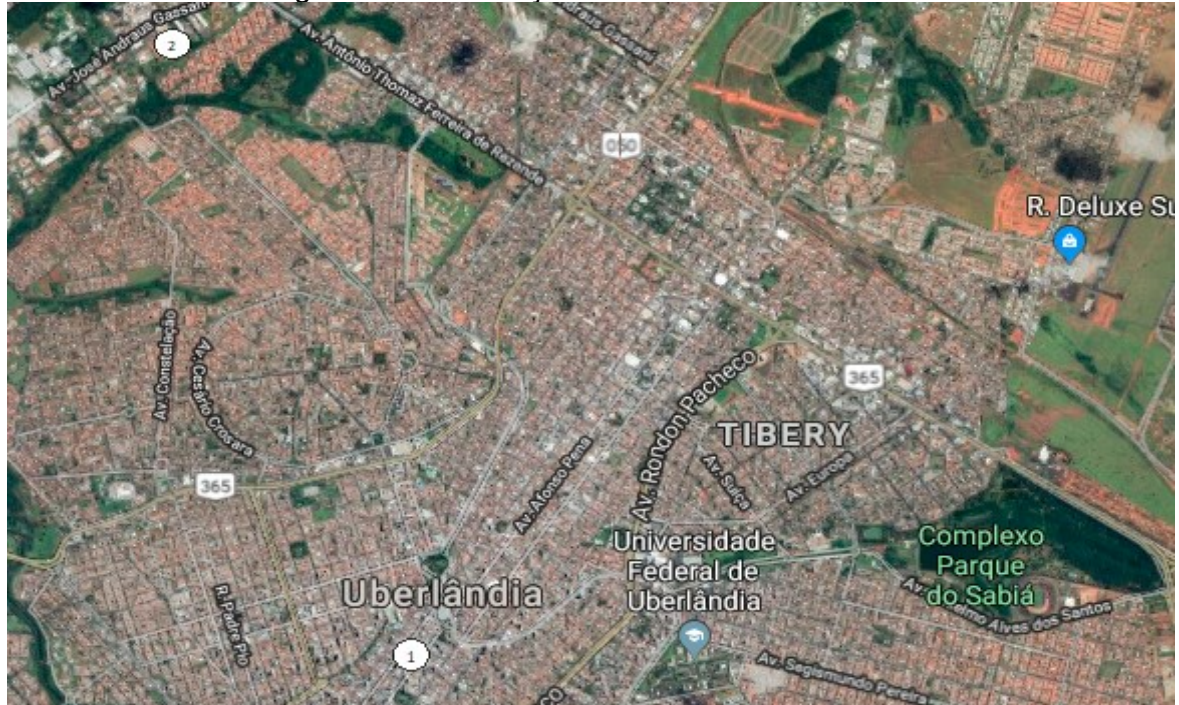
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes foram realizados nas instalações da empresa Algar Telecom localizada na cidade de Uberlândia. Como justificativa para a concretização da PoC (*Proof of Concept*) do 5G foi efetuado junto a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) a solicitação e a aprovação em caráter científico para a utilização da banda n78, referente a faixa de frequência de 3,5 GHz. Essa é uma faixa de espectro ainda não leiloadada no Brasil e, nesse intervalo de frequência concentra-se grande parte das tecnologias 5G atualmente existentes em todo o mundo.

3.1. DISPOSIÇÃO DO SETUP

A Figura 15 ilustra as posições geográficas, pontos 1 e 2, das redes de núcleo e de acesso 5G, respectivamente, utilizadas no projeto.

Figura 15 - Localização do core e acesso de rede 5G.



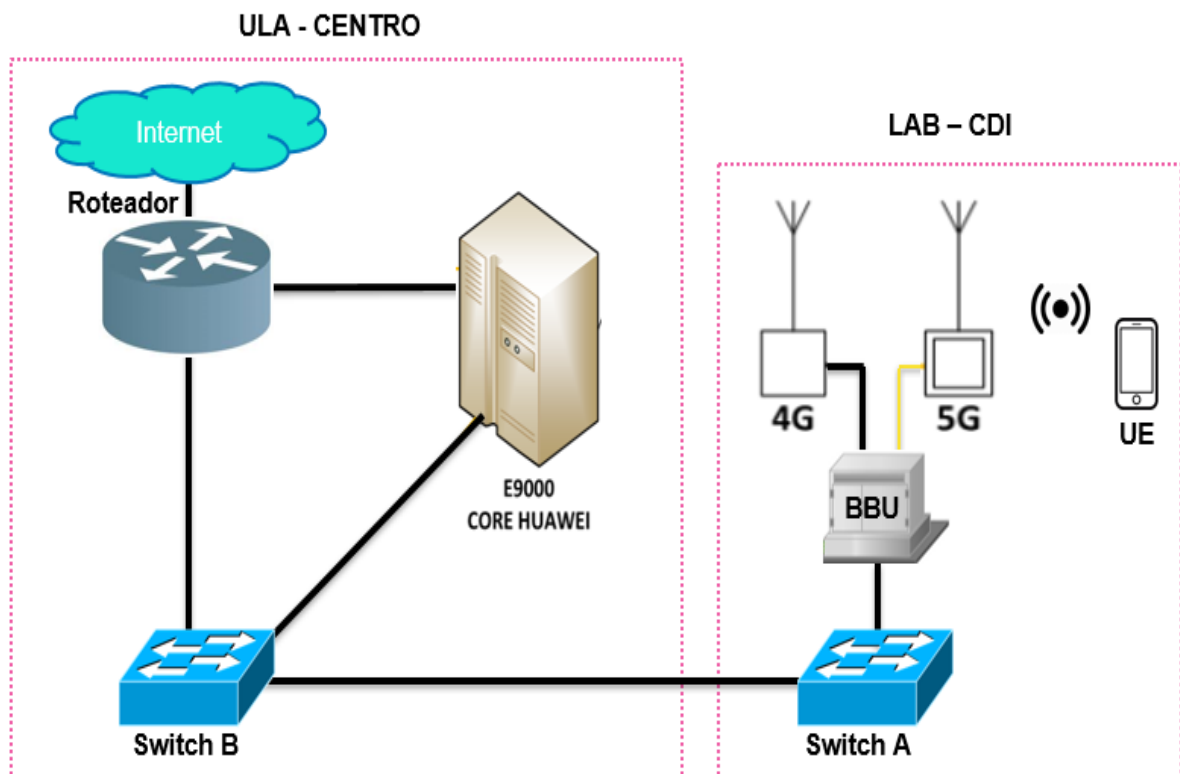
Fonte: Autoria própria.

O *setup* para a realização dos testes foi disposto da seguinte maneira: O núcleo da rede foi instalado no 6º piso de um prédio localizado no centro da cidade de Uberlândia devido a melhores condições energéticas e condicionamento dos

equipamentos. O acesso de rede 5G foi instalado dentro de um laboratório localizado no bairro Industrial da mesma cidade.

Os equipamentos utilizados são tecnologia 5G NSA 3,5 GHz e eles são ligados a um núcleo de rede de tecnologia 4G. Isto acontece porque até o momento não existem equipamentos de núcleo de rede comercial para a utilização de uma arquitetura com todos os elementos de rede da nova geração. Portanto, o dispositivo do cliente (UE) necessita de conexão ao sistema 4G para realizar todas as operações de sinalização. Diante disso, além da AAU 5G instalou-se uma antena 4G operando na faixa de frequência 1.800 MHz dentro do laboratório. O esquema de disposição dos elementos da rede é ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Esquema da topologia de rede utilizada no projeto.



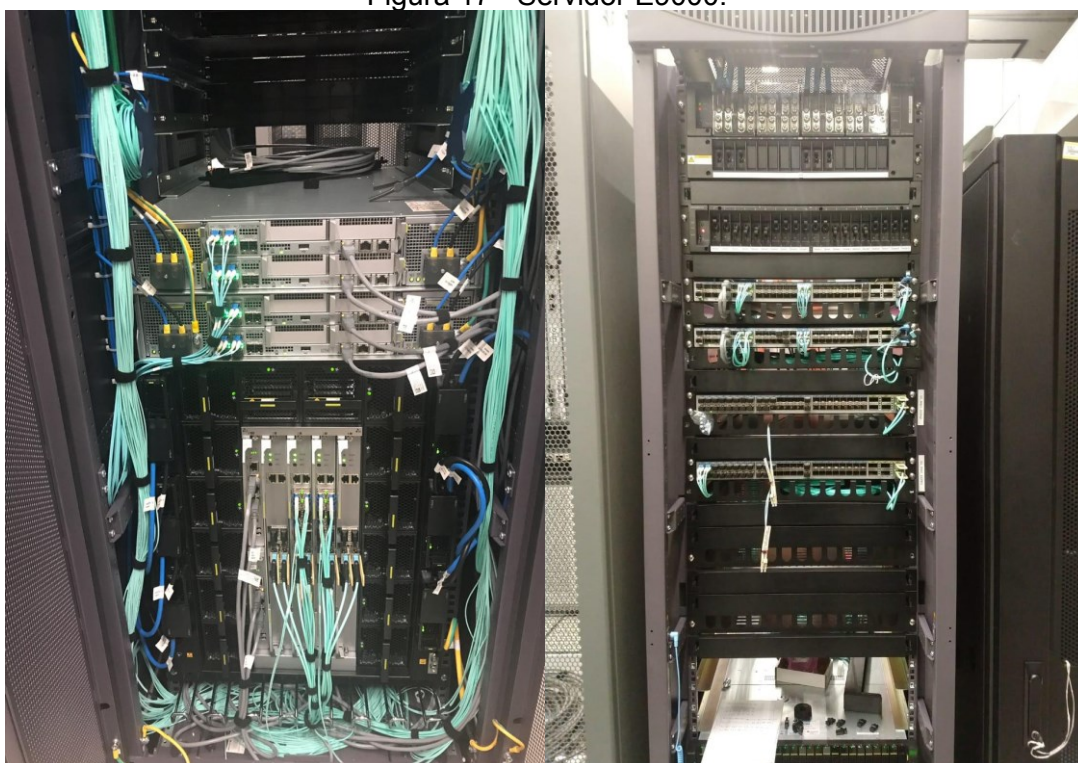
Fonte: Autoria própria.

Observe que na ULA – CENTRO encontram-se os elementos do núcleo de rede conectados a um *switch*. Esse *switch* é interconectado a outro *switch* localizado no LAB – CDI que abriga os elementos do acesso de rede. No percurso entre o *fronthaul* e o *backhaul* da rede utilizou-se em enlace de fibra óptica dedicado.

3.1.1. Núcleo de rede

Os elementos que constituem o núcleo da rede foram instalados no ponto 1 da Figura 17. Todos os elementos foram configurados dentro de um servidor *Fusion Server Blade E9000* que garante uma arquitetura convergente para armazenamento, computação, rede e gerenciamento. A Figura 15 apresenta a parte interna do servidor E9000 onde foram configurados todos os elementos do núcleo de rede e que foram apresentados na Figura 6.

Figura 17 - Servidor E9000.



Fonte: Autoria própria.

3.1.2. Acesso de rede

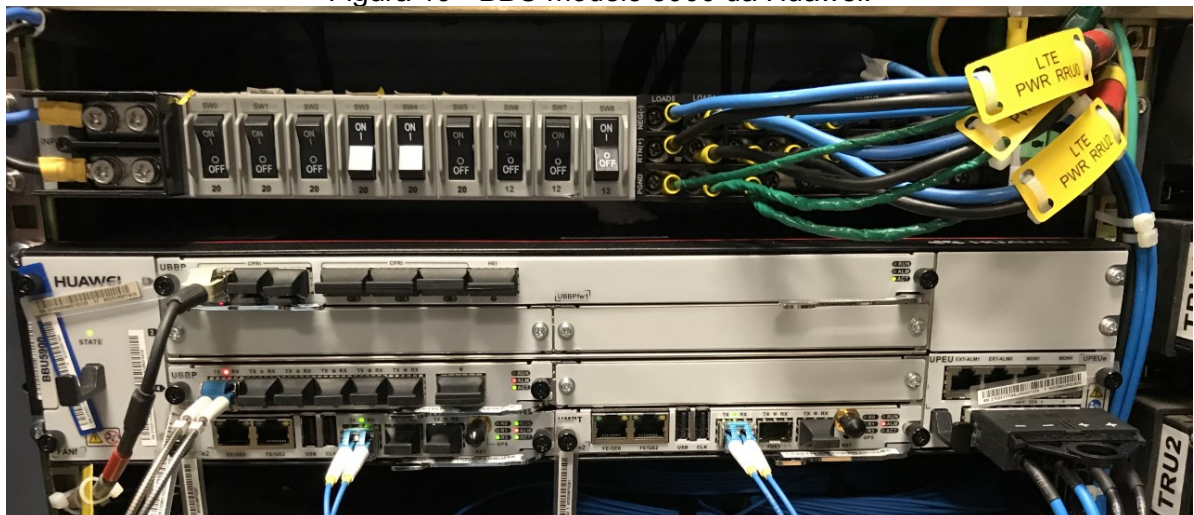
A interconexão com o usuário ocorre por meio do acesso de rede 5G composto pela AAU modelo 5613 Huawei e pela antena 4G ATR4518R13v06 Huawei, acoplada a um módulo RRU 5901. O engNodeB e enNodeB foram interligados a uma BBU modelo 5900 Huawei. Os equipamentos AAU e BBU utilizadas no projeto são apresentados nas Figuras 18 e 19 respectivamente.

Figura 18 - AAU modelo 5613 da Huawei e antena 4G ATR4518R13v06.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - BBU modelo 5900 da Huawei.



Fonte: Autoria própria.

3.1.3. UE

Nos testes realizados, utilizou-se um *smartphone* Huawei Mate 20 X 5G ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - *Smartphone* Huawei Mate 20 X 5G.

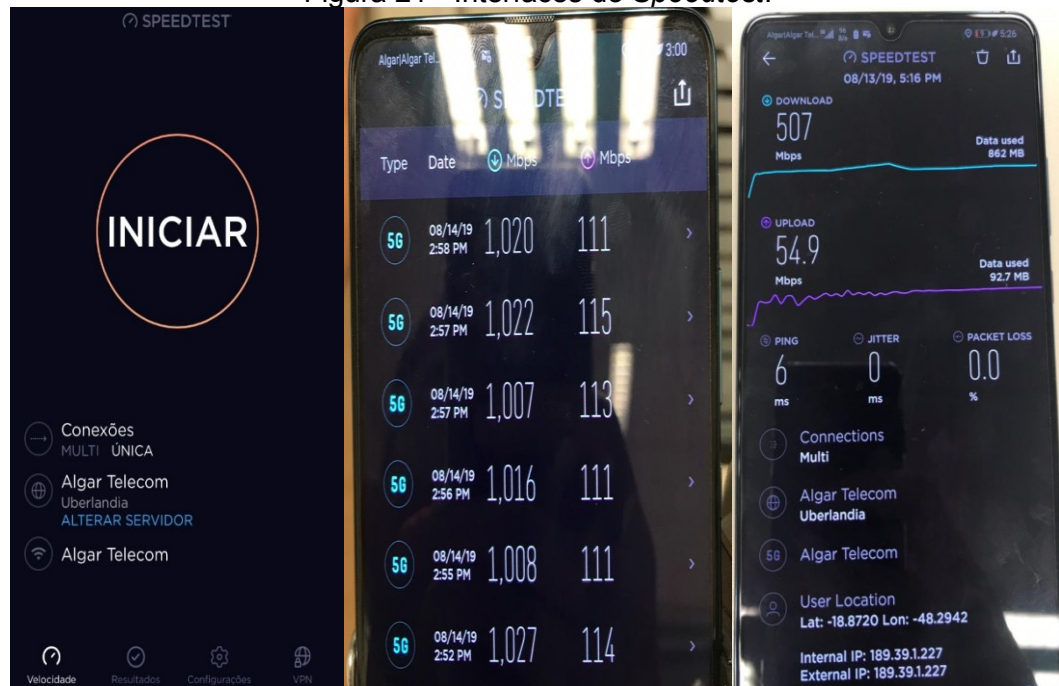


Fonte: autoria própria.

O aparelho possui conectividade 5G e para obter os resultados de *throughput downlink*, *throughput uplink* e latência de conexão foi utilizada a plataforma *Speedtest* instalada por meio de um app no próprio *smartphone*. Podem ser utilizadas outras interfaces de medição, mas a escolha do *Speedtest* foi motivada pela sua popularidade e simplicidade e, além da objetividade na apresentação dos resultados.

No aplicativo *Speedtest* é possível registrar os valores dos três parâmetros medidos, conforme visualizado na Figura 21. Para a realização dos testes selecionou-se o servidor da Algar Telecom localizado na cidade de Uberlândia. A seleção de um servidor para medição de latência localizado na mesma cidade em que foram realizados os testes influenciou os resultados porque se obteve os valores mais próximos dos resultados práticos reais de uma rede 5G.

Figura 21 - Interfaces do Speedtest.



Fonte: autoria própria.

A Figura 22 ilustra o suporte posicionado com visada direta e a uma distância de 6,00 metros da AUU. No setup proposto, o UE permaneceu a 1,60 metros de altura do solo.

Figura 22 - Suporte com UE.



Fonte: Autoria própria.

Durante a realização dos testes observou-se que a variação na posição do UE resultava em valores coletados diferentes nas medições. Portanto, para eliminar a inconsistência entre os valores coletados, e buscando uma homogeneidade de intensidade de sinal coletado em todas as medições, foi utilizado um suporte, em posição fixa, para apoio ao *smartphone*.

O posicionamento do *setup* proposto para as medições dentro do laboratório é ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Posicionamento do *setup* de medições dentro do laboratório.



Fonte: Autoria própria

3.2. PARAMETRIZAÇÃO

Em projetos de tecnologia de comunicações móveis de 5ª Geração são utilizadas algumas configurações otimizadas para atingir os melhores resultados práticos. Dentre alguns dos parâmetros de projeto utilizados no trabalho tem-se a utilização da multiplexação F-OFDM, com um espaçamento de subportadora de 30 kHz e uma modulação adaptativa de até 256 QAM. A padronização já permita o ajuste de subportadora para outros valores de espaçamento, porém os equipamentos utilizados no projeto eram limitados a esse único valor de espaçamento. Há uma

promessa de habilitação de outros valores em futuras atualizações de *software* do equipamento.

No projeto foi utilizado o valor máximo mMIMO suportado pela AAU5613 de 64x64. Os resultados foram obtidos utilizando um esquema de multiplexação de *slots* 4:1 – SS1, configuração *default* desse parâmetro. A largura de banda utilizada para o melhor cenário foi de 100 MHz, maior valor de largura permitida na faixa espectral de 3,5 GHz e, em seguida foram utilizados os valores de 80, 60 e 40 MHz e analisadas a diferença nos resultados. Embora a padronização já permita a utilização de outras larguras de banda, o *setup* utilizado no projeto era limitado a esses valores.

O foco dos testes realizados foi à obtenção dos valores de *throughput downlink*, *throughput uplink* e latência da rede 5G. Para obter um resultado de latência mais preciso foi medido o atraso de transmissão entre os pontos 1 e 2 destacados na Figura 15. O valor obtido representa o atraso da rede de transporte que interliga o núcleo ao acesso de rede. Subtraindo esse valor do valor obtido por meio do *Speedtest* determinou-se a latência da parte de acesso de rede 5G.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Empregando os materiais e métodos apresentados no Capítulo 3 foram obtidos os resultados apresentados a seguir. Serão apresentados os resultados práticos utilizando o melhor cenário e resultados práticos variando os valores de larguras de banda permitidos pelo sistema. Por fim, é calculado e analisado a eficiência espectral do sistema em questão.

É importante explicar que em todos os dados coletados há ausência de casas decimais. Na plataforma *Speedtest*, os resultados obtidos são arredondados e embora os valores sejam muito próximos aos valores reais, estes podem apresentar uma pequena divergência em relação ao valor prático efetivo.

Nos cenários avaliados existe apenas um UE conectado à rede. Isso dificilmente aconteceria em um cenário real de implantação da tecnologia para uso da população.

4.1. RESULTADOS OBTIDOS NO MELHOR CENÁRIO

O melhor cenário utiliza o *setup* apresentado anteriormente com uma conexão do *smarthphone* Huawei Mate 20 X 5G à rede 5G. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos de *throughput* e latência na plataforma do *Speedtest*.

Tabela 2 - Resultados obtidos de *downlink*, *uplink* e latência no melhor cenário.

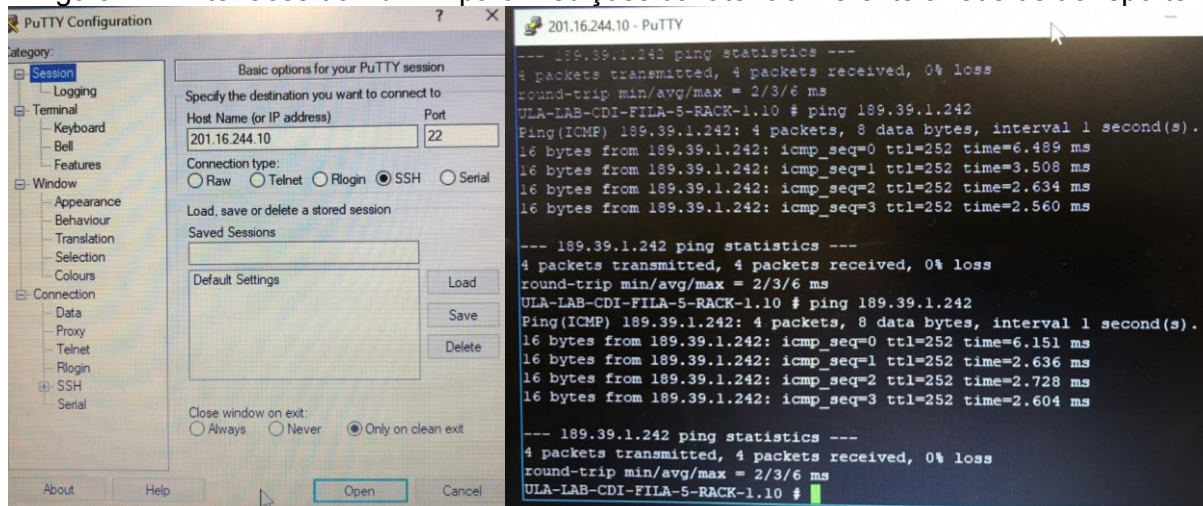
	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latência (ms)
Medição 1	1052	108	6
Medição 2	1054	113	6
Medição 3	1008	111	6
Medição 4	1054	114	6
Medição 5	1016	111	6
Medição 6	1007	113	7
Medição 7	1022	115	6
Medição 8	1020	111	6
Medição 9	1031	110	6
Medição 10	1011	112	7
Média	1027,5	111,8	6,2
Desvio-padrão	19,173	2,044	0,4216

Fonte: Autoria própria.

Nesse cenário foram realizadas 10 medições e os resultados obtidos apresentaram um valor médio de 1027,5 Mbps para *downlink*, 111,8 Mbps para *uplink* e 6,2 ms de latência. Observou-se que o primeiro parâmetro apresentou um desvio padrão maior entre todos os resultados, porém se manteve sempre próximo ao valor de 1 Gbps. Os valores de *uplink* mantiveram-se superiores, em torno de 10% dos valores correspondentes de *downlink*, variando em torno de 110 Mbps. O parâmetro latência apresentou um valor de desvio-padrão menor, maior consistência e menor variância dentre os dados obtidos.

Outro teste foi realizado para determinar o valor de latência da rede de acesso de quinta geração. O valor de latência da rede de acesso corresponde ao valor obtido pelo *Speedtest* subtraído do valor inerente a rede de transporte. Foram medidos os atrasos na transmissão da *switch* A até a *switch* B e da *switch* A até o roteador, apresentados na Figura 16. As medições de latência foram realizadas utilizando a ferramenta de *software* PuTTY, apresentada na Figura 24, a qual apresenta uma precisão de três casas decimais.

Figura 24 - Interfaces do PuTTY para medições da latência inerente a rede de transporte.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 apresenta os valores de latência, inerente a rede de transporte, de aproximadamente 2,6 ms. Portanto, pode-se concluir que a latência obtida nos testes práticos apresentou um valor de aproximadamente 3,6 ms. Para determinar um valor exato seria necessário possuir uma maior precisão nos testes realizados com a plataforma *Speedtest*.

Tabela 3 - Resultados de latência das *switchs* A e B e da *switch* A até o roteador.

	Latência até o switch B (ms)	Latência até o roteador (ms)
Medição 1	2,605	2,631
Medição 2	2,512	2,620
Medição 3	2,607	2,614
Medição 4	2,669	2,901
Medição 5	2,723	2,656
Média	2,623	2,684
Desvio-padrão	0,079	0,122

Fonte: Autoria própria.

4.2. RESULTADOS OBTIDOS COM 80 MHZ

No segundo cenário foram realizadas as medições utilizando as mesmas parametrizações anteriores. A única modificação realizada foi uma alteração da largura de banda para o valor de 80 MHz. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos de *downlink*, *uplink* e latência com 80 MHz.

	<i>Downlink</i> (Mbps)	<i>Uplink</i> (Mbps)	Latência (ms)
Medição 1	802	97,1	6
Medição 2	801	92,2	6
Medição 3	800	93,0	6
Medição 4	797	96,7	6
Medição 5	802	96,3	6
Medição 6	805	97,5	6
Medição 7	777	97,6	7
Medição 8	807	93,7	7
Medição 9	810	94,5	6
Medição 10	808	97,6	6
Média	800,9	95,62	6,2
Desvio-padrão	9,291	2,074	0,422

Fonte: Autoria própria.

Os valores médios obtidos de *throughput* foram de 800,9 Mbps e 95,62 Mbps para *downlink* e *uplink*, respectivamente. A resposta média para a latência manteve-

se nos 6,2 ms obtidos nos testes anteriores. Devido a maior consistência dentre os dados coletados, o valor de desvio-padrão para a *throughput downlink* diminuiu para aproximadamente 9 Mbps. Para os outros parâmetros práticos foi obtido um desvio semelhante. Observe que, assim como esperado, a diminuição da largura de banda impactou diretamente nos resultados obtidos.

4.3. RESULTADOS OBTIDOS COM 60 MHZ

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos no terceiro cenário onde foi feita uma alteração no valor de largura de banda para o valor de 60 MHz.

Tabela 5 - Resultados obtidos de downlink, uplink e latência 60 MHz.

	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latência (ms)
Medição 1	507	54,9	6
Medição 2	587	54,4	6
Medição 3	613	55,1	7
Medição 4	618	55,5	6
Medição 5	620	55,0	7
Medição 6	624	55,6	7
Medição 7	660	54,6	7
Medição 8	637	53,8	7
Medição 9	665	53,3	7
Medição 10	669	54,6	7
Média	620	54,68	6,7
Desvio-padrão	47,425	0,716	0,483

Fonte: Autoria própria.

Observe que houve um aumento significativo no desvio-padrão das amostras. Isso se deve ao baixo valor coletado inicialmente. Ainda assim, foi obtido um resultado concordante com a diminuição de largura de banda. Os resultados de *throughput downlink* resultaram em um valor médio de 620 Mbps. Para um *throughput uplink* obteve-se um resultado médio de 54,68 Mbps. O valor médio do parâmetro de latência foi 6,7 ms.

4.4. RESULTADOS OBTIDOS COM 40 MHZ

No quarto cenário foram realizadas as medições com a largura de banda uma alterada para 40 MHz. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados obtidos de downlink, uplink e latência com 40 MHz.

	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)	Latência (ms)
Medição 1	398	33,3	7
Medição 2	403	32,6	6
Medição 3	391	33,2	6
Medição 4	425	32,9	6
Medição 5	397	32,8	6
Medição 6	410	33,2	7
Medição 7	374	33,4	6
Medição 8	384	34,1	6
Medição 9	384	33,8	7
Medição 10	388	32,7	6
Média	395,4	33,2	6,3
Desvio-padrão	14,714	0,481	0,483

Fonte: Autoria própria.

A utilização de uma largura de banda de 40 MHz reduziu o *throughput* de *downlink* para aproximadamente 400 Mbps e *throughput* de *uplink* para 33 Mbps. Com um atraso médio encontrado de 6,3 ms.

Conforme análise dos valores teóricos, em comparação com os valores práticos obtidos, em todos os cenários teve-se um resultado conforme esperado. Em padrões 5G são prometidos valores de latência próximos a 1 ms. Tendo em vista que o tipo NSA refere-se à primeira etapa de implementação da tecnologia, é validado o valor próximo a 3 ms alcançado na topologia de acesso de rede. Ademais, é esperado uma redução deste parâmetro prático nos sistemas que virão nos próximos anos.

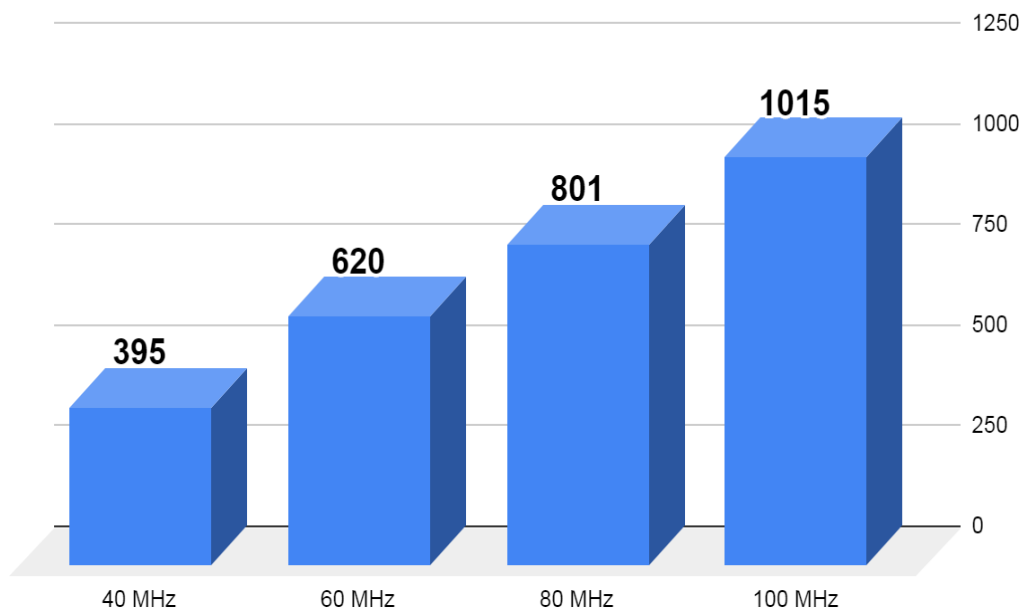
Em análises teóricas, cenários próximos dos ideais são considerados, fato que as vezes não ocorre. Portanto, conforme pressentido, os resultados práticos de *throughput* em todas as configurações utilizadas se apresentaram próximos dos esperados. Estes se mostraram um pouco inferiores aos obtidos em teoria, porém se aproximaram bastante.

4.5. RESULTADOS DE EFICIÊNCIA ESPECTRAL

Por fim, foram analisados os conjuntos de resultados médios de *throughput downlink* e *throughput uplink* da rede 5G *Non Stand Alone* em questão. O propósito da análise consiste na determinação do valor prático de eficiência espectral da tecnologia.

Para o primeiro parâmetro, conforme apresentado na Figura 25, foram obtidos os resultados de 395 Mbps, 620 Mbps, 801 Mbps e 1015 Mbps, para os valores de larguras de banda utilizadas de 40 MHz, 60 MHz, 80 MHz e 100 MHz, respectivamente.

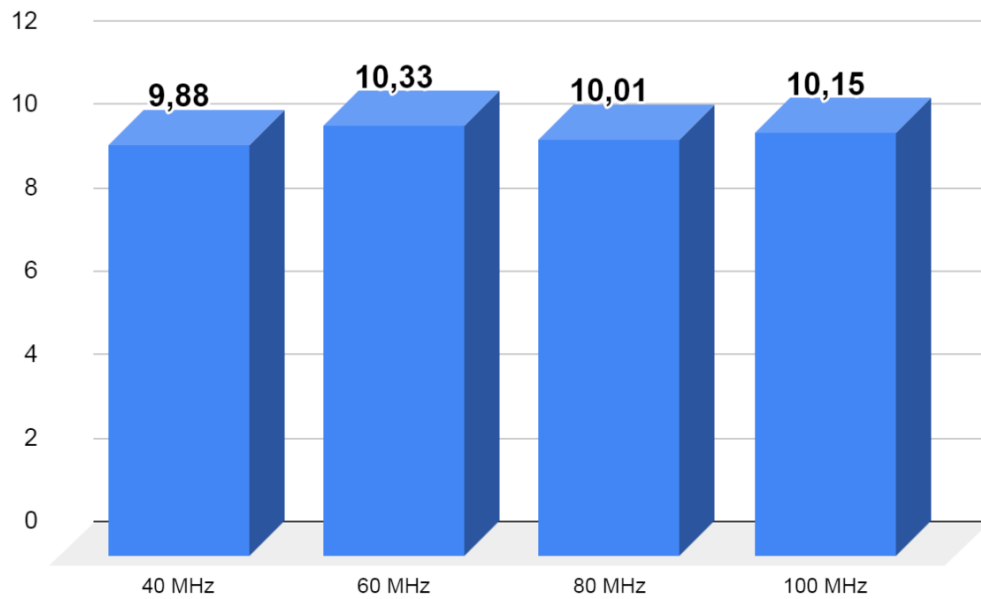
Figura 25 - Resultados *throughput downlink* (Mbps).



Fonte: Autoria própria.

Realizando o produto da taxa de transferência obtida pela largura de banda utilizada, foi então possível determinar a quantidade de eficiência do sistema de comunicação utilizando a largura da faixa de espectro designada. Logo, para o parâmetro de *throughput downlink*, foram encontrados os resultados presentes na Figura 26, com uma eficiência espectral média de 10,09 bits/s/Hz.

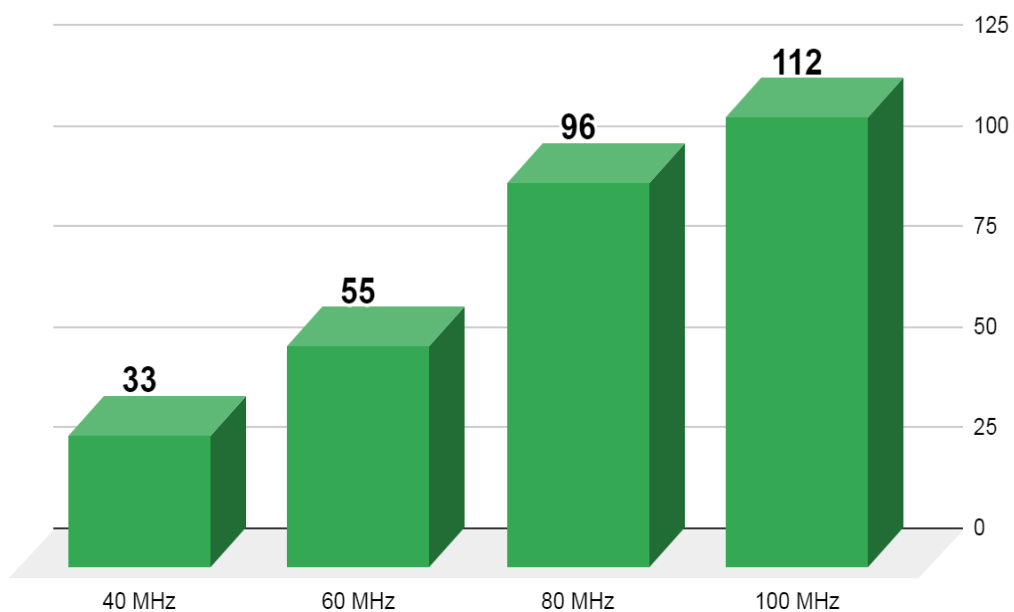
Figura 26 - Eficiência espectral *throughput downlink* (bits/s/Hz).



Fonte: Autoria própria.

Para as medições de *throughput uplink*, conforme Figura 26, foram obtidos os resultados de 33 Mbps, 55 Mbps, 96 Mbps e 112 Mbps, para os valores de largura de banda de 40 MHz, 60 MHz, 80 MHz e 100 MHz, respectivamente.

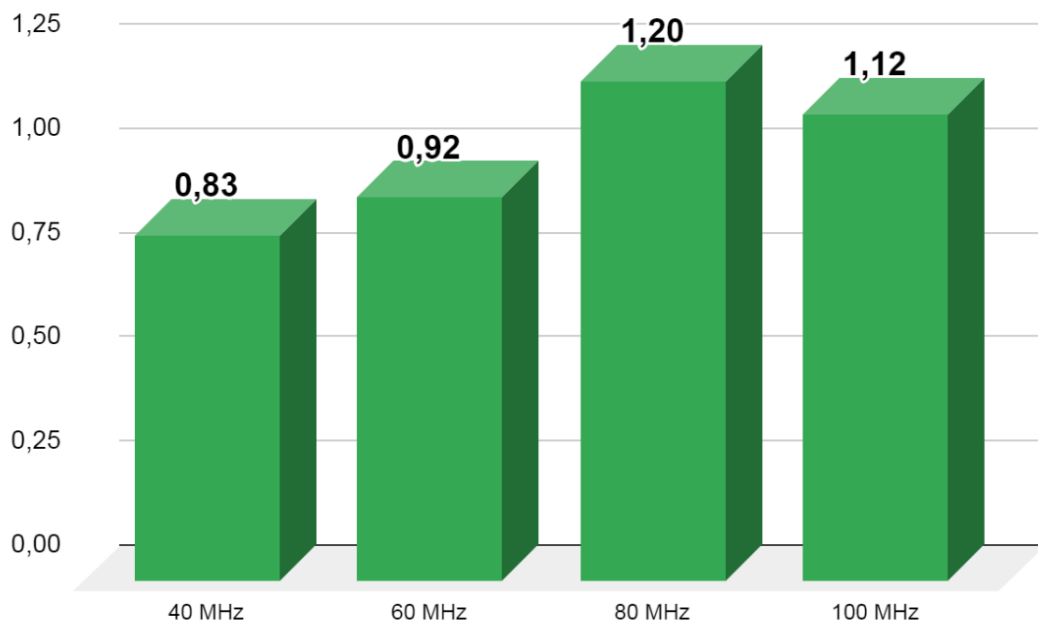
Figura 27 - Resultados throughput uplink (Mbps).



Fonte: Autoria própria.

De forma análoga, foram calculados os resultados para o parâmetro de *throughput uplink*, conforme apresentado na Figura 28, com uma eficiência espectral média de 1,02 bits/s/Hz.

Figura 28 - Eficiência espectral throughput uplink (bits/s/Hz).



Fonte: Autoria própria.

Conforme análise dos valores obtidos, de acordo com a promessa de melhoria de eficiência espectral se comparada com as tecnologias de gerações anteriores, teve-se um resultado conforme esperado. Em padrões de tecnologias 5G, com a utilização de diversas técnicas novas, é esperado que valores ainda maiores sejam alcançados. Contudo, tratando-se da etapa inicial de tecnologia, pode-se afirmar que a quinta geração de comunicações móveis apresenta uma grande evolução em termos de eficiência de utilização de espectro.

5. CONCLUSÃO

Foi proposto e avaliado experimentalmente o desempenho de uma rede 5G do padrão *Non Stand Alone*. Assim sendo, foram medidos e analisados os resultados práticos de *throughput* e latência com a conectividade à rede, utilizando-se diferentes larguras de banda.

Em todos os testes realizados, os resultados de latência se permaneceram com pouca variância. Ainda que o instrumento de medição utilizado não apresentasse precisão na casa decimal, foi possível determinar que o parâmetro prático de atraso da rede aproxima-se à 6 ms considerando a rede de transporte e 3 ms desconsiderando-a.

Nas análises de *throughput*, foi constatado a capacidade da tecnologia em atingir resultados na casa dos Gbps para *downlink* e na casa de centenas de Mbps para *uplink*. Foi observado também a importância e a melhoria resultada na utilização de grandes valores de largura de banda, bem como emprego de múltiplas portadoras. Contudo, deve ser reconhecido que os valores obtidos são referentes a um cenário com um único dispositivo conectado, fato que dificilmente ocorreria em um ambiente real com a disponibilização da rede a população.

Através dos cálculos de eficiência espectral, foi possível constatar na prática o grande aperfeiçoamento em termos de utilização de espectro, principalmente se comparado com os resultados obtidos com as tecnologias de redes móveis de gerações anteriores.

Apresentando a topologia de rede adotada, é possível verificar a possibilidade de implementação da tecnologia 5G, com o núcleo EPC 4G já existente. Logo, torna-se realizável a instalação da rede com compatibilidade aos padrões atualmente empregados.

Por tratar-se do modelo inicial de implementação, pode-se concluir que o mesmo se refere a uma grande evolução das redes móveis. Pois, para o futuro é esperado a adoção de topologias *Stand Alone*, com núcleos de rede totalmente virtualizados de nova geração, além do uso de novas técnicas e parametrizações, com a utilização de múltiplas portadoras e faixas de espectro de frequência ainda maiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Marchetti, Nicola. (2015). Towards 5th Generation Wireless Communication Systems. ZTE Communications. 13. 11-19. Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.00370.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2019.
- [2] CENTENARO, Marco et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, [s.l.], v. 23, n. 5, p.60-67, out. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mwc.2016.7721743>.
- [3] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **RELEASE 15** - TR 21.915: TR 21.915 V1.1.0 (2019-03). Valbonne: Third Generation Partnership Project, 2019. 120 p. Disponível em: <https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.915/>. Acesso em: 5 out. 2019.
- [4] WAVE COMPUTING. **5G: What is the buzz all about?** Disponível em: <<https://wavecomp.ai/blog/5g-what-is-the-buzz-all-about/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.
- [5] THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **3GPP TS 38.101-1 V16.1.0 (2019-09)**: 3GPP TS 38.101-1. Valbonne: 3gpp, 2019. 26 p. Disponível em: <https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-1/>. Acesso em: 11 out. 2019.
- [6] GHADIALY, Zahid. **5G Spectrum - Long Version**. 2019. Color. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/3G4GLtd>>. Acesso em: 17 out. 2019.
- [7] IGNACIO, Jose; DIEGO, Jose Miguel de. Power Supply Architectures for Wireless Systems with Discontinuous Consumption. **Recent Advances In Wireless Communications And Networks**, [s.l.], p.379-404, 23 ago. 2011. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/18369>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/221914998_Power_Supply_Architectures_for_Wireless_Systems_with_Discontinuous_Consumption>. Acesso em: 20 out. 2019.
- [8] WORLD, Rf Wireless. **5G FDD vs 5G TDD | difference between FDD and TDD in 5G**. Disponível em: <<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/5G-FDD-vs-5G-TDD.html>>. Acesso em: 11 out. 2019.
- [9] OPROIU, Elena-madalina; GIMIGA, Iulian; MARGHESCU, Ion. 5G Fixed Wireless Access-Mobile Operator Perspective. **2018 International Conference On Communications (comm)**, [s.l.], p.357-360, jun. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iccomm.2018.8484810>.
- [10] FUNDAÇÃO INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – FINATEL. **LTE: Preparatório para Certificação HCNA**. Santa Rita do Sapucaí: Finatel, 2019. 104 p.
- [11] FISHYHO. **LTE E-UTRAN**. 2012. Disponível em: <<https://itemobilezone.wordpress.com/2012/03/26/lte-e-utran/>>. Acesso em: 15 out. 2019.

- [12] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **TS 23.401**: 3GPP TS 23.401. V16.4.0 (2019-09) ed. 2019. 244 p. Disponível em: <https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.401/>. Acesso em: 18 out. 2019.
- [13] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **TR 25.912**: 3GPP TR 25.912 V15.0.0 (2018-06). 15 ed. Valbonne: 3gpp, 2018. 37 p. Disponível em: <https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.912/>. Acesso em: 11 out. 2019.
- [14] SOUZA, Everton. **LTE: Como garantir a qualidade da banda larga sem fio, principais desafios para os ISPs**. [s. l.]: Solution Consultant Wireless, 2016. 35 slides, color. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/11224692/>>. Acesso em: 12 out. 2019.
- [15] RIBEIRO, J.A.J. **Engenharia de antenas: fundamentos, projetos e aplicações**. 1.ed. São Paulo: Érica, 2012.
- [16] SANYUAN GROUP (Zhengzhou). **HOW IS RRU CONNECTED TO BBU ?** 2019. Disponível em: <<http://www.3yuangroup.com/news/industry-news/348.html>>. Acesso em: 13 out. 2019.
- [17] HUAWEI TECHNOLOGIES. **BBU5900 Description**. 10. ed. Shenzhen: Huawei Technologies, 2019. 95 p.
- [18] FIRMIN, Frédéric. **The Evolved Packet Core**. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>>. Acesso em: 17 out. 2019.
- [19] WORLDTECHIE. **LTE NETWORK TOPOLOGY AND ARCHITECTURE**. 2013. Disponível em: <<http://worldtechie.blogspot.com/2013/04/lte-network-topology-and-architecture.html>>. Acesso em: 16 out. 2019.
- [20] HUAWEI TECHNOLOGIES. **AAU5613 Description**. Shenzhen: Huawei Technologies, 2019. 23 p.
- [21] 3GPP. **Release 16**. 2019. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-16>>. Acesso em: 6 out. 2019.
- [22] DIERKS, Stefan et al. MIMO and massive MIMO - Analysis for a local area scenario. **2015 23rd European Signal Processing Conference (eusipco)**, Munique, p.2451-2455, ago. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/eusipco.2015.7362825>.
- [23] HUAWEI TECHNOLOGIES. **5G is on**. Shenzhen: Huawei Technologies, 2019. 75 p.
- [24] KAPILAVAI, Suma. **Best Practices to Accelerate 5G Base Station Deployment: Your RF Front-End Massive MIMO Primer DESIGN HUB Block Diagrams Design Tools Blog Brochures E-Books Technical Articles Videos White Papers DESIGN HUB MENU**. 2019. Disponível em: <<https://www.qorvo.com/design-hub/blog/best-practices-to-accelerate-5g-base-station-deployment>>. Acesso em: 22 out. 2019.
- [25] ALSABA, Yamen; RAHIM, Sharul Kamal Abdul; LEOW, Chee Yen. Beamforming in Wireless Energy Harvesting Communications Systems: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s.l.], v. 20, n. 2, p.1329-1360, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/comst.2018.2797886>.

- [26] COUCH, Leon W.. **Digital & Analog Communication Systems**. 8. ed. Gainesville: Pearson, 2012. 762 p.
- [27] MONEM, Mohamed Abdel. **Modulation and Signal Quality at LTE**. 2017. Disponível em: <<https://www.netmanias.com/en/post/blog/12441/lte/modulation-and-signal-quality-at-lte>>. Acesso em: 29 out. 2019.
- [28] HAYKIN, Simon. **Communication Systems**. 4. ed. Shenzhen: Wiley, 2004. 840 p.
- [29] PINTO, Ernesto Leite; ALBUQUERQUE, Claudio Penedo de. A Técnica de Transmissão OFDM. **Revista Científica Periódica - Telecomunicações**, [s. l.], p.1-10, jun. 2002. Disponível em: <<https://www.inatel.br/revista/downloads/junho-dezembro-2002-s727592-1/198-artigo-transmissao-ofdm-s534190-1/file>>. Acesso em: 01 nov. 2019.
- [30] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **TS 38.211: 3GPP TS 38.211 V15.7.0 (2019-09): V15.7.0** ed. Valbonne: 3gpp, 2019. 97 p. Disponível em: <https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/>. Acesso em: 01 nov. 2019.
- [31] WANNSTROM, Jeanette. **Carrier Aggregation explained**. 2019. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>>. Acesso em: 03 nov. 2019.