



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Planeamento de Rede Privada 5G para o Instituto de Saúde do Zango 8000

Epifânio António de Araújo

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientadores:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor
Catedrático, Iscte-IUL

Doutor Pedro Joaquim Amaro Sebastião, Professor Associado
com Agregação, Iscte-IUL

Outubro, 2024



TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação

Planeamento de Rede Privada 5G para o Instituto de Saúde do Zango 8000

Epifânio António de Araújo

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientadores:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor
Catedrático, Iscte-IUL

Doutor Pedro Joaquim Amaro Sebastião, Professor Associado
com Agregação, Iscte-IUL

Outubro, 2024

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, cuja orientação e força foram fontes inesgotáveis de inspiração e coragem durante toda a jornada de elaboração desta dissertação. Sem a Sua sabedoria e bênçãos, este trabalho não teria sido possível.

Aos meus pais, expresso minha eterna gratidão. Seu amor incondicional, apoio constante e incentivos ao longo de toda a minha trajetória acadêmica foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional. Agradeço por acreditarem em mim e por me proporcionarem as ferramentas necessárias para alcançar meus objetivos.

Aos meus familiares, meu sincero agradecimento pelo apoio e compreensão durante os momentos de intensa dedicação ao estudo. Suas palavras de encorajamento e paciência foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado, oferecendo conselhos valiosos, suporte moral e momentos de descontração, meu muito obrigado. Sua amizade e presença foram um alicerce de motivação e alívio nas horas de desafio.

Agradeço também aos meus orientadores e colegas acadêmicos, que contribuíram com suas orientações e discussões construtivas, enriquecendo o desenvolvimento desta dissertação.

Finalmente, agradeço a todos que, de alguma forma, participaram e apoiaram minha jornada acadêmica. Cada um de vocês teve um papel importante e especial neste percurso, e sou profundamente grato por cada contribuição.

Resumo

A evolução para redes móveis de quinta geração (5G) marca um avanço significativo, trazendo maior velocidade, capacidade de dados e novas arquiteturas. Este estudo foca nas Redes Privadas 5G, abordando suas características, vantagens, desafios e casos de uso. Redes Privadas 5G são redes dedicadas que atendem demandas específicas de empresas, oferecendo segurança, flexibilidade e alta eficiência, com redução de latência e maior throughput. A arquitetura dessas redes, que separa o acesso de rádio do núcleo, permite maior controle e personalização em comparação com redes públicas.

Esta dissertação considera o planeamento de uma rede privada 5G no cenário específico da Escola de Saúde no Zango 8000 – em Luanda, Angola. No cenário analisado, há uma estação de base exterior e três estações de base interiores distribuídas pelos três edifícios da Escola de Saúde do Zango. Todas as transmissões envolvem duas zonas com diferentes ritmos binários, em função da distância à estação de base. Os utentes que estão próximos das estações de base recebem símbolos 256QAM com uma taxa de codificação $R_c=7/8$ e com alcance máximo de 25 metros; na segunda zona recebem-se símbolos 16QAM com $R_c=3/4$ e o alcance máximo é de 50 metros. Considerou-se também a técnica de agrupamento (*clustering*) das estações de base onde foram considerados os tamanhos 1C e 3C.

Conclui-se que, apesar dos benefícios, a adoção de redes privadas 5G exige análise cuidadosa de requisitos técnicos e económicos.

Palavras-chave: 5G, Clustering, Throughput, Redes Privadas.

Abstract

The evolution toward fifth-generation (5G) mobile networks marks a significant technological leap, offering enhanced speed, data capacity, and innovative architectures. This study focuses on Private 5G Networks, examining their characteristics, benefits, challenges, and use cases. Private 5G Networks are dedicated systems designed to meet the specific demands of organizations, providing enhanced security, flexibility, and high efficiency, with reduced latency and increased throughput. Their architecture, which separates the radio access from the network core, allows for greater control and customization compared to public networks.

This dissertation considers the planning of a private 5G network in the specific scenario of the School of Health at Zango 8000 – in Luanda, Angola. In the analyzed scenario, there is an outdoor base station and three indoor base stations distributed across the three buildings of the Zango Health School. All transmissions involve two zones with different binary rates, depending on the distance from the base station. Users who are close to the base stations receive 256QAM symbols with an encoding rate $R_c=7/8$ and a maximum range of 25 meters; in the second zone, 16QAM symbols are received with $R_c=3/4$ and the maximum range is 50 meters. The technique of clustering of the base stations was also considered, where sizes 1C and 3C were considered.

In conclusion, while private 5G networks offer significant benefits, their adoption requires careful analysis of technical and economic requirements.

Keywords: 5G, Clustering, Throughput, Private Networks.

Índice

| | |
|--|------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | ii |
| Abstract..... | iii |
| Índice de Figuras | vi |
| Índice de Tabelas | viii |
| Glossário de Siglas e Abreviaturas | ix |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento e Motivação | 1 |
| 1.2. Questões de Investigação..... | 2 |
| 1.3. Objetivos..... | 3 |
| 1.4. Método de Investigação..... | 3 |
| 1.5. Estrutura e Organização da Dissertação | 4 |
| CAPÍTULO 2 | 5 |
| 2. Revisão de Literatura..... | 5 |
| 2.1. Fases das Redes Móveis | 5 |
| 2.2. Redes Móveis da Quinta Geração | 5 |
| 2.3. Limitações do 4G / Desafios Do 5G..... | 7 |
| 2.4. Necessidades e Características do 5G | 8 |
| 2.5. Arquitetura da Rede 5G | 9 |
| 2.6. Fatiamento de Rede | 10 |
| 2.7. Arquitetura de Fatiamento de Rede em 5G | 11 |
| 2.8. MIMO Massivo | 11 |
| 2.9. Desafios que Limitam um Sistema M-MIMO..... | 12 |
| 2.10. Redes Privadas 5G..... | 13 |
| 2.10.1. 5G SA (standalone)..... | 14 |
| 2.10.2. Requisitos de Redes 5G Privadas | 14 |
| 2.10.3. Principais Facilitadores de Redes 5G Privadas | 15 |
| 2.10.4. Características 3GPP para 5G privado | 15 |
| 2.10.5. Recursos Exclusivos das Redes 5G Privadas | 16 |
| 2.10.6. Arquitetura de Implantação 5G | 17 |
| 2.10.7. Segurança das redes 5G..... | 19 |

2.10.8. Redes definidas por Software e Virtualização de Funções de Rede no 5G
19

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 3 | 21 |
| 3. Simulador de Sistemas | 21 |
| 3.1. Descrição do Simulador..... | 21 |
| 3.2. Cenários de Implementação..... | 22 |
| CAPÍTULO 4 | 24 |
| 4. Resultados e Discussão..... | 24 |
| 4.1. Resultados Teóricos | 24 |
| 4.2. Resultados do <i>Throughput</i> | 24 |
| 4.3. Resultado da Cobertura | 30 |
| 4.4. Resultado do CDF do SINR | 31 |
| 4.5. Resultado do CDF do Throughput..... | 32 |
| 4.6. Resultados do Throughput e da Cobertura para $N_u=240$ | 33 |
| CAPÍTULO 5 | 38 |
| 5. Conclusões e Trabalhos Futuro | 38 |
| 5.1 Conclusões..... | 38 |
| 5.2 Trabalho Futuro | 39 |
| Referências Bibliográficas..... | 40 |
| Anexos | 42 |
| Anexo A..... | 42 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Diagrama de método de investigação..... | 4 |
| Figura 2.1 - Comparação Dos Requisitos Entre As Redes 4G E 5G..... | 7 |
| Figura 2.2 - Categorias de serviços 5G..... | 8 |
| Figura 2.3 - EPC tradicional X EPC CUPS..... | 10 |
| Figura 2.4 - Arquitetura 5G..... | 10 |
| Figura 2.5 - Modelo de arquitetura de fatia de rede..... | 11 |
| Figura 2.6 - A arquitetura do receptor do sistema MIMO MASSIVO CONVENCIONAL (M-MIMO) com equipamento de usuário de uplink (UE). Cada cadeia de RF consiste em LNA, mixer, VGA, AGC e ADC..... | 12 |
| Figura 2.7 - Ilustração de amostras de saída..... | 12 |
| Figura 2.8 - Componentes de uma Rede 5G Privada..... | 14 |
| Figura 2.9 - Características 3GPP para 5G privado..... | 16 |
| Figura 2.10 - Arquitetura do sistema 5G | 18 |
| Figura 3.1 - Relação entre os simuladores de nível de sistema e de ligação[22]..... | 22 |
| Figura 3.2 - Fases da simulação [22]..... | 22 |
| Figura 3.3 - Representação gráfica do cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 23 |
| Figura 4.1- Throughput vs. Número de Utilizadores, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda, global, indoor e outdoor..... | 25 |
| Figura 4.2 - Throughput vs. Número de Utilizadores, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda, global, indoor e outdoor..... | 25 |
| Figura 4.3 - Throughput vs. Número de Utilizadores, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda, global, indoor e outdoor..... | 26 |
| Figura 4.4 – Throughput vs. Número de Utilizadores, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda, global, indoor e outdoor..... | 26 |
| Figura 4.5 - Cobertura vs Potência cenário Escola de Saúde do Zango Luanda, cluster 1C e 3C..... | 27 |
| Figura 4.6 - Cobertura vs Potência, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda, cluster 1C e 3C..... | 28 |
| Figura 4.7 - cobertura (em %) em relação à potência (W), cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.8 - cobertura (em %) em relação à potência (W), cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 29 |
| Figura 4.9 - CDF (função de distribuição acumulada) do SINR (dB), cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 30 |
| Figura 4.10 – CDF (função de distribuição acumulada) do SINR (dB), cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 31 |
| Figura 4.11 - CDF do Throughput, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 31 |
| Figura 4.12 - CDF do Throughput, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 32 |
| Fig 4.13 - Throughput vs. Número de Usuários, cenário Escola de Saúde de Luanda..... | 32 |
| Figura 4.14 - Throughput vs. Número de Usuários, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 33 |
| Figura 4.15 - Throughput vs. Potência, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 34 |
| Figura 4.16 - Cobertura vs. Potência, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 34 |
| Figura 4.17 - CDF de SINR, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 35 |
| Figura 4.18 - CDF de Throughput, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 36 |
| Figura 4.19 - o número de usuários e a taxa de transferência (throughput) medida em Gbps, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda..... | 36 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Comparação das gerações das tecnologias móveis [2]..... | 6 |
| Tabela 2.2 - Requisitos de redes 5G privadas [8]..... | 15 |
| Tabela 2.3 - Principais facilitadores de redes 5G privadas [8]..... | 15 |
| Tabela 3.1 - Características globais do simulador..... | 21 |
| Tabela 3.2 – Parâmetros de configuração para o cenário Escola de Saúde de Luanda..... | 23 |

Glossário de Siglas e Abreviaturas

3GPP - *Third Generation Partnership Project*

ADC - *Conversor analógico-digital*

AGC - *Controlador automático de ganho*

AR - *Realidade aumentada*

CN - *Core Network*

CUPS - *Control and User Plane Separation*

DSRM - *Design Science Research Methodology*

E2E - *Ponta a ponta*

EPC - *Evolved Packet Core*

eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*

IA - *Inteligência Artificial*

IIoT - *Industrial Internet of Things ou Internet das Coisas Industrial*

IoT - *Internet of Things ou Internet das Coisas*

KPIs - *Key Performance Indicators*

LNA - *Amplificador de baixo ruído*

M-MIMO - *Massive MIMO*

MIMO - *Multiple Input Multiple Output*

ML - *Machine Learning*

mMTC - *Massive Machine Type Communications*

NFV - *Network Functions Virtualization*

NR - *New Radio*

PC - *Plano de controle*

PGW - *Packet Data Network Gateway*

PU - *Plano de usuário*

QoS - *Quality of Service*

RAN - *Radio Access Network*

RF - *Radiofrequência*

SDN - *Software-Defined Networking*

SGW - *Serving Gateway*

SLA - *Service Level Agreement*

SON - *Redes auto-organizadas (Self-Organized Networks)*

OSS - *Sistema de suporte à operação*

TSNs - *Time-Sensitive Networks*

UPF - *Funções de plano de usuário*

URLLC - *Ultra-Reliable Low-Latency Communication*

VGA - *Amplificador de ganho variável*

WWW - *World Wide Wireless Web (www)*

CAPÍTULO 1

1. Introdução

Com o avanço das tecnologias de comunicação móvel, a implantação de redes privadas 5G está se tornando uma realidade cada vez mais tangível em diversos setores. No contexto do Instituto de Saúde do Zango em Luanda, a adoção de uma rede privada 5G oferece inúmeras oportunidades e benefícios que podem revolucionar o processo educacional.

A rede privada 5G representa uma evolução significativa em relação às tecnologias de comunicação móvel anteriores, oferecendo uma combinação de alta velocidade, baixa latência e maior capacidade de conexão. Essas características proporcionam uma infraestrutura robusta e confiável para suportar uma ampla gama de aplicativos e serviços, desde a transmissão de vídeo em alta-definição até a implementação de dispositivos médicos conectados e realidade em treinamentos e simulações no processo de ensino e aprendizagem, nestes relatórios serão indicados as motivações e contexto, problema, objetivos e perguntas de investigação e metodologia de desenvolvimento da dissertação.

1.1. Enquadramento e Motivação

Redes privadas 5G são redes sem fio dedicadas e independentes que utilizam a tecnologia de quinta geração (5G) para fornecer conectividade de alta velocidade e baixa latência em ambientes específicos, como empresas, fábricas, campos universitários, instalações de saúde e outras organizações. Essas redes são construídas para atender às necessidades específicas desses ambientes, oferecendo maior controle, segurança e desempenho do que as redes públicas 5G. Aqui estão algumas características e benefícios das redes privadas 5G:

- As redes privadas 5G são construídas especificamente para atender às necessidades de uma organização ou local específico, oferecendo uma conectividade dedicada e isolada. Isso significa que a organização tem total controle sobre a infraestrutura de rede e pode personalizá-la de acordo com seus requisitos.
- O 5G oferece baixa latência e alta velocidade de transmissão de dados, o que é essencial para aplicativos sensíveis ao tempo e de alta largura de banda. As redes privadas 5G garantem uma comunicação rápida e confiável, permitindo o suporte a aplicativos críticos, como automação industrial, realidade aumentada e cirurgia remota.

- As redes privadas 5G oferecem recursos de segurança avançados, incluindo criptografia de ponta a ponta, autenticação forte e segmentação de rede. Isso garante a proteção dos dados sensíveis e a prevenção contra ameaças cibernéticas, atendendo aos requisitos de conformidade regulatória.
- As redes privadas 5G são altamente flexíveis e escaláveis, permitindo que as organizações adaptem a infraestrutura de rede conforme suas necessidades evoluem. Elas podem ser facilmente expandidas para cobrir áreas adicionais ou suportar mais dispositivos conectados, conforme necessário. As redes privadas 5G podem ser otimizadas para suportar uma ampla variedade de aplicativos específicos de cada setor, como monitoramento remoto de máquinas, comunicação entre veículos autônomos, telemedicina de alta qualidade e realidade virtual/aumentada.
- Ao fornecer conectividade confiável e de alta velocidade, as redes privadas 5G podem melhorar significativamente a eficiência operacional das organizações. Elas possibilitam a automação de processos, a coleta de dados em tempo real e a tomada de decisões mais rápidas, contribuindo para a redução de custos e o aumento da produtividade.
- As redes privadas 5G oferecem uma solução personalizada e poderosa para organizações que necessitam de conectividade confiável, segura e de alta velocidade em ambientes específicos. Elas desempenham um papel fundamental na transformação digital de setores como manufatura, saúde, transporte, energia e muitos outros.
- Por conta disto surge a necessidade do planejamento de uma rede privada 5G para uma instituição de saúde que é motivado pelo desejo de melhorar a conectividade, suportar aplicações de alta demanda de dados, garantir a segurança dos dados, facilitar o gerenciamento da rede e garantir a conformidade regulatória.

1.2. Questões de Investigação

Q1) Quais são as principais diferenças entre a tecnologia 5G e a 4G em termos de desempenho e funcionalidades?

Q2) Quais os desafios da implementação da rede 5G e como sua nova arquitetura se diferencia da utilizada na rede 4G?

Q3) De que maneira a rede 5G consegue atender a diversas necessidades de serviços simultaneamente?

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é efetuar um planejamento de uma rede privada 5G no Instituto Técnico de Saúde do Zango 8000, garantindo que a rede cubra todas as áreas necessárias para atender às demandas operacionais da organização, rede que seja capaz de suportar o número esperado de dispositivos e o volume de dados gerados, garantindo um desempenho consistente, garantir alta disponibilidade e confiabilidade, minimizando tempo de inatividade e interrupções nos serviços, que ofereça baixa latência para suportar aplicativos e serviços sensíveis ao tempo, como comunicações críticas ou controle remoto de equipamentos.

Implementar medidas de segurança adequadas para proteger os dados e a integridade da rede contra ameaças internas e externas, projetar a rede para operar de forma eficiente em termos de consumo de energia, reduzindo custos operacionais e impacto ambiental.

1.4. Método de Investigação

A metodologia de pesquisa usada para esta dissertação é a *Design Science Research Methodology* (DSRM)[1]. Centra-se em seis etapas que serviram para o desenvolvimento desta dissertação tendo em atenção o problema, o planejamento de uma rede privada 5G para a melhoria da conectividade, suporte de alta demanda de dados e a segurança dos dados.

A primeira etapa é onde se identifica o problema e a sua motivação, na segunda e na terceira definir os objetivos da solução e o design e desenvolvimento respetivamente.

As seguintes etapas quarta, quinta e sexta, consistem em demonstrar o planejamento através do software utilizado, avaliar e demonstrar os resultados obtidos, referindo-se a esta dissertação.

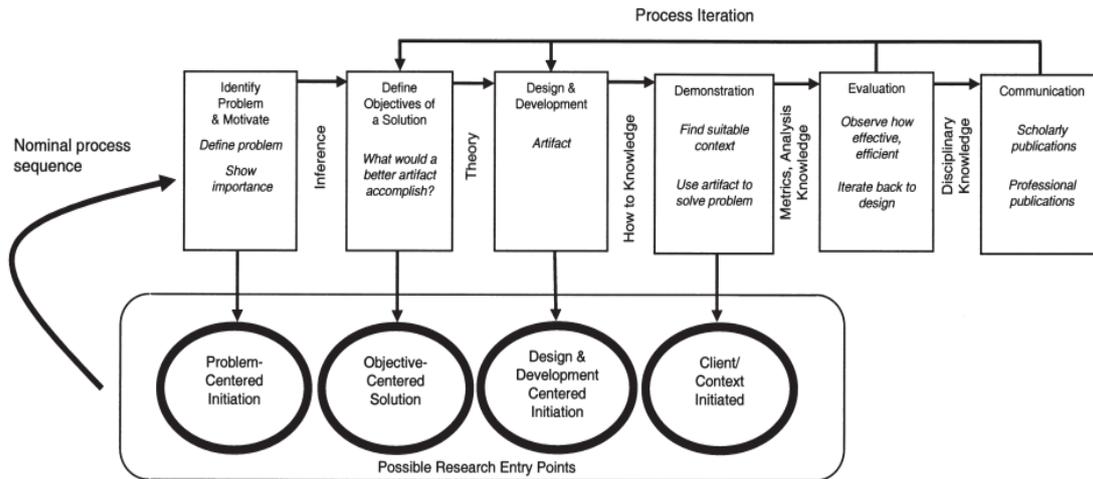


Figura 1.1 – Diagrama de método de investigação [1]

1.5. Estrutura e Organização da Dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, cada um desempenhando um papel essencial na apresentação do estudo e dos resultados alcançados.

No primeiro capítulo, são abordados o contexto e a motivação do estudo, assim como os objetivos e as questões de investigação propostas. O segundo capítulo é dedicado à revisão da literatura, focando-se no planeamento das redes 5G NR e nas limitações das gerações anteriores.

O terceiro capítulo oferece uma descrição detalhada do simulador de sistema utilizado no estudo, abordando suas características, além de explicar a descrição e configuração dos cenários implementados. No quarto capítulo, são apresentados os resultados tanto teóricos quanto das simulações realizadas. Além disso, este capítulo inclui a discussão e análise do desempenho do sistema.

No quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões baseadas nos resultados obtidos, juntamente com sugestões para possíveis direções de pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

2. Revisão de Literatura

Neste capítulo, será apresentada a revisão da literatura, que foi estudada para o planejamento da rede privada 5G do Instituto de Saúde do Zango 8000.

2.1. Fases das Redes Móveis

A geração celular sem fio (G) geralmente refere-se a uma mudança na natureza fundamental do serviço, tecnologia de transmissão não retrocompatível e novas bandas de frequência.

Nos últimos anos, a indústria sem fio testemunhou um crescimento fenomenal, tanto em termos de tecnologia móvel quanto de assinantes. Houve uma clara mudança da telefonia fixa para a telefonia celular móvel, especialmente desde o início do século. Até o final de 2010, havia mais de quatro vezes mais assinaturas de telefonia celular móvel do que linhas telefônicas fixas. Tanto os operadores de redes móveis quanto os fornecedores sentiram a importância de redes eficientes com design igualmente eficiente. Isso resultou em um foco maior em serviços relacionados ao Planejamento e Otimização de Redes [2].

A evolução das redes celulares móveis foi categorizada em gerações da seguinte forma:

- 1G: Redes analógicas.
- 2G: Redes digitais.
- 3G: Suporte multimídia e transmissão por espectro espalhado.
- 4G: Redes totalmente comutadas por IP.
- 5G: Núcleo multi-tecnologia reconfigurável, convergindo novas tecnologias como Nanotecnologia, Computação em Nuvem e Rádio Cognitivo.

2.2. Redes Móveis da Quinta Geração

A 5G (Quinta Geração de Redes Móveis e Sem Fio) pode ser uma comunicação sem fio completa, sem limitações, trazendo-nos um mundo real sem fio perfeito - World Wide Wireless Web (www). A 5G denota a próxima fase importante dos padrões de telecomunicações móveis além dos padrões 4G/IMT-Advanced. Atualmente, 5G não é um termo oficialmente usado para qualquer especificação particular ou em qualquer documento oficial ainda publicado por

empresas de telecomunicações ou organismos de normalização como 3GPP, WiMaxForum ou ITU-R. Cada novo lançamento melhorará ainda mais o desempenho do sistema e adicionará novas capacidades com novas áreas de aplicação. Algumas das aplicações adicionais, que beneficiam da conectividade móvel, são automação residencial, transporte inteligente, segurança e e-books.

A tecnologia móvel 5G mudou a forma de usar telefones celulares com uma largura de banda muito alta. Os usuários nunca experimentaram antes uma tecnologia com tão alto valor. As tecnologias 5G incluem todos os tipos de recursos avançados que tornam a tecnologia móvel 5G extremamente poderosa e com grande demanda no futuro próximo. Para crianças, a diversão com a tecnologia Bluetooth e Pico nets tornou-se disponível no mercado. Os usuários também podem conectar seus telefones celulares com tecnologia 5G aos seus laptops para obter acesso à internet de banda larga. A tecnologia 5G inclui câmera, gravação MP3, tocador de vídeo, grande memória do telefone, discagem rápida, tocador de áudio e muito mais do que se pode imaginar [11], [12], [13].

Na quinta geração, a arquitetura de rede consiste em um terminal do usuário (que tem um papel crucial na nova arquitetura) e em várias tecnologias de acesso rádio independentes e autônomas (RAT). O sistema móvel 5G é um modelo baseado em IP para interoperabilidade de redes sem fio e móveis. Dentro de cada terminal, cada uma das tecnologias de acesso rádio é vista como o link IP para o mundo exterior da Internet [2].

| Technology ⇨ | 1G | 2G | 3G | 4G | 5G |
|--------------------------------------|----------------------------|---|---|--|---|
| Feature ⏴ Start/Deployment | 1970 – 1980 | 1990 – 2004 | 2004-2010 | Now | Soon (probably 2020) |
| Data Bandwidth | 2kbps | 64kbps | 2Mbps | 1 Gbps | Higher than 1Gbps |
| Technology | Analog Cellular Technology | Digital Cellular Technology | CDMA 2000 (1xRTT, EVDO) UMTS, EDGE | Wi-Max LTE Wi-Fi | WWWW(coming soon) |
| Service | Mobile Telephony (Voice) | Digital voice, SMS, Higher capacity packetized data | Integrated high quality audio, video and data | Dynamic Information access, Wearable devices | Dynamic Information access, Wearable devices with AI Capabilities |
| Multiplexing | FDMA | TDMA, CDMA | CDMA | CDMA | CDMA |
| Switching | Circuit | Circuit, Packet | Packet | All Packet | All Packet |
| Core Network | PSTN | PSTN | Packet N/W | Internet | Internet |

Tabela 2.1 – comparação das gerações das tecnologias móveis [2]

2.3. Limitações do 4G / Desafios Do 5G

Assim como as gerações anteriores, a rede 4G incorporou às características e funcionalidades do 3G, aumentando a capacidade e taxa por meio da utilização de uma melhor interface de rádio e melhorias no *core* da rede, chamado de EPC (*Evolved Packet Core*). A maior parte do ganho de velocidade e capacidade era obtida por meio de melhorias na eficiência do uso do espectro (como em técnicas de modulação e esquemas de codificação). Melhorias incrementais na modulação e no esquema de codificação, não seriam suficientes para atender os requisitos do 5G, já que está próximo ao limite. Portanto, outros métodos devem ser explorados [14]. A capacidade do sistema, de acordo com a teoria de Shannon, é aproximada e apresentada como:

$$C_T = \sum_{\text{Celulas}} \sum_{\text{Canais}} B_i \log_2(1 + P_i/N_p)$$

em que B_i é a largura de banda do i -ésimo canal, P_i a potência do i -ésimo canal e N_i o ruído do i -ésimo canal. Para ampliar a capacidade C_T total de um sistema é necessário aumentar a cobertura (adicionando novas células), o número de subcanais (via MIMO massivo), largura de banda (faixa de frequência adicional) e melhor relação sinal ruído. Dentre as técnicas que podem ser utilizadas para aumentar a capacidade destacam-se:

- Largura de Banda – Mais espectro, agregação de portadoras, radio cognitivo, transmissão não-ortogonal, comunicação full-duplex;
- Potência – Mais antenas por meio do uso de MIMO massivo e conformação de feixe;
- Relação Sinal-Ruído – Cancelamento de interferência, modulação de ordem elevada.



Figura 2.1 – Comparação Dos Requisitos Entre As Redes 4G E 5G

2.4. Necessidades e Características do 5G

Desde a rede 2G, cada nova geração busca o aumento da taxa de transmissão para melhorar os serviços móveis para os consumidores. Entretanto, a rede 5G difere das gerações anteriores porque a taxa de transmissão não é o único motivo que impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias. O Projeto de Parceria para a Terceira Geração (Third Generation Partnership Project – 3GPP) formou um grupo de estudo para investigar casos de uso para novos serviços e tecnologias, identificando funcionalidades e características que as redes 5G precisariam atender. O estudo resultou em mais de 70 casos, agrupados em três categorias de acordo com os atributos de desempenho que cada caso necessitaria. As três categorias são:

- Banda Larga Móvel aperfeiçoada (enhanced Mobile Broadband – eMBB) – Serviços que demandam alta taxa de transmissão para uma grande área de cobertura, como vídeos de alta-definição, jogos imersivos, dentre outros;
- Comunicações de Baixa Latência Ultra confiáveis (Ultra-reliable and Low-latency Communications – uRLLC) – Serviços sensíveis à latência, como controle automático de veículos, internet tátil, cirurgia remota, dentre outros;
- Comunicação massiva Tipo Máquina (Massive Machine Type Communications – mMTC) – Serviço utilizados por dispositivos de baixo custo, baixo consumo de energia e um número elevado de dispositivos por área, como cidades inteligentes e rede de sensores sem fio para agricultura [15], [16].



Figura 2.2 – Categorias de serviços 5G [3]

2.5. Arquitetura da Rede 5G

Para suportar os novos requisitos de rede, como baixa latência e uma conectividade massiva, a rede 5G não apenas deve melhorar a eficiência das tecnologias anteriores, mas também possuir uma arquitetura flexível e escalável para se adaptar aos diversos cenários atuais e futuros. A rede 5G devesse coexistir com o LTE e Wi-Fi por um longo período. Essa coordenação entre os diversos requisitos de tráfego e mobilidade do usuário entre essas redes deve ser administradas de forma que a taxa de transmissão e continuidade de mobilidade seja alcançada. Em um ambiente tão flexível, é necessário considerar a separação entre o plano do usuário e o plano de controle e também a redefinição dos limites entre a rede de core e a rede de acesso [3].

Devido aos requisitos de desempenho (tais como taxa e latência), é necessário que algumas funções do core estejam na extremidade da rede, assim como funções tipicamente da rede de acesso estejam mais centralizadas. Com cada vez maior utilização de elementos virtualizados, é esperada uma grande flexibilidade, programabilidade e escalabilidade na rede, com a dissociação do software e hardware, também chamada de softwarização da rede.

Os componentes da rede Core e Acesso 5G são descritos a seguir. A. Rede Core para ter a facilidade de dimensionar, implementar e adaptar a rede, o 3GPP por meio do Release 14 introduziu a estratégia da utilização de uma arquitetura plana com a divisão entre o plano de controle (PC) e o plano de usuário (PU) (Control and User Plane Separation – CUPS) já na rede de core do 4G, chamada de EPC *Evolved Packet Core*. Essa independência fornece um suporte mais eficiente ao aumento de tráfego, pois permite uma ampliação nos elementos do PU sem a necessidade de ampliar elementos do PC. Essa separação também permite uma evolução independente dos planos de forma que as implementações de novas tecnologias possam ser atualizadas e substituídas. O CUPS forma a arquitetura básica da evolução do EPC para o core 5G [3].

A Figura 2.3 ilustra essa transição na rede 4G, com a separação entre os planos no SGW (Serving Gateway) e PGW (Packet Data Network Gateway).

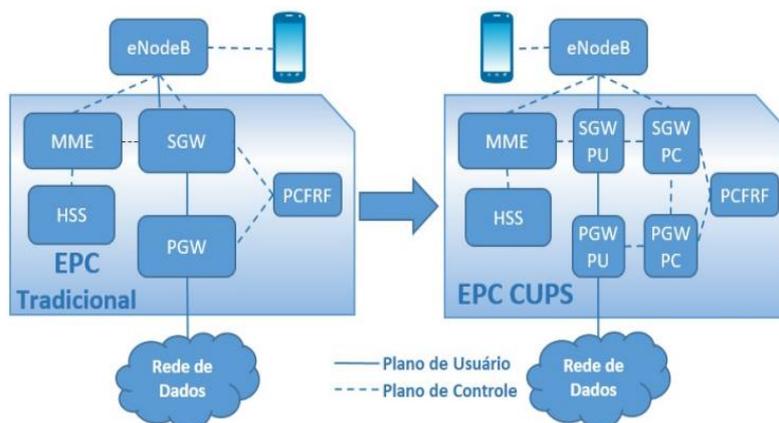


Figura 2.3 – EPC tradicional X EPC CUPS [3]

Na Figura 2.4 é apresentada a arquitetura de core 5G. Por fazer parte dos Releases 15 e 16, que é uma evolução do Release 14, essa arquitetura possui similaridades com o EPC. Ela possui uma divisão completa entre o plano de controle e o plano de usuário.

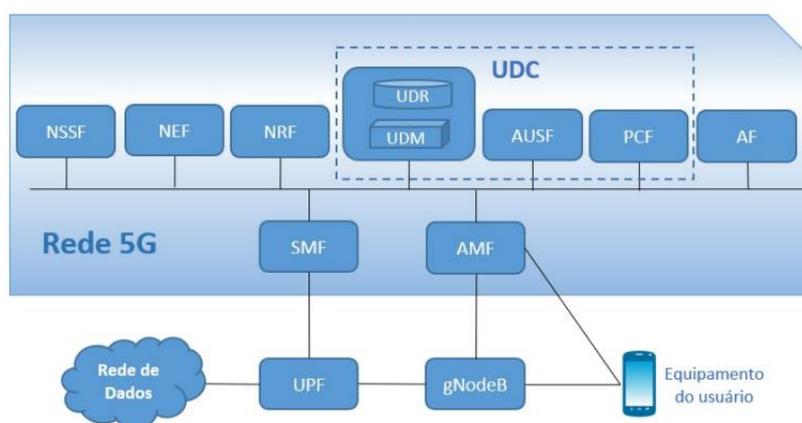


Figura 2.4 – Arquitetura 5G [3]

2.6. Fatiamento de Rede

O fatiamento de rede é baseado na tecnologia NFV e SDN, e é a tecnologia-chave para realizar a rede sob demanda, e também é a tecnologia-chave da arquitetura de rede 5G. O fatiamento de rede é uma rede lógica múltipla de ponta a ponta executada em uma infraestrutura física comum para um modelo de negócios específico. A rede lógica é isolada e segura, podendo ser customizada e adaptada de acordo com as características do negócio.

Usando a tecnologia de fatiamento de rede, podemos mapear de forma inteligente as necessidades de negócios e de terceiros com fatias de rede e realizar a transformação dinâmica do status de operação da rede, SLA e requisitos de negócios por meio de um sistema de base de

conhecimento inteligente. Ao mesmo tempo, a função de rede pode ser organizada e implantada dinamicamente para implementar plug and play [4].

2.7. Arquitetura de Fatiamento de Rede em 5G

A fatia de rede pode ser uma arquitetura recursiva, considerando o caso de uma fatia de rede ser alugada para um terceiro e o terceiro construir suas próprias fatias de rede na fatia de rede alugada. A RAN (rede de acesso por rádio) não é fatiada, mas apenas a CN (rede principal) é fatiada na arquitetura. O isolamento de RAN e CN é um princípio de design muito importante, portanto, a arquitetura real do fatiamento de rede 5G deve ser baseada em tais modelos de rede. Na Figura 2.5 apresenta-se o modelo de arquitetura de fatia de rede core 5G.

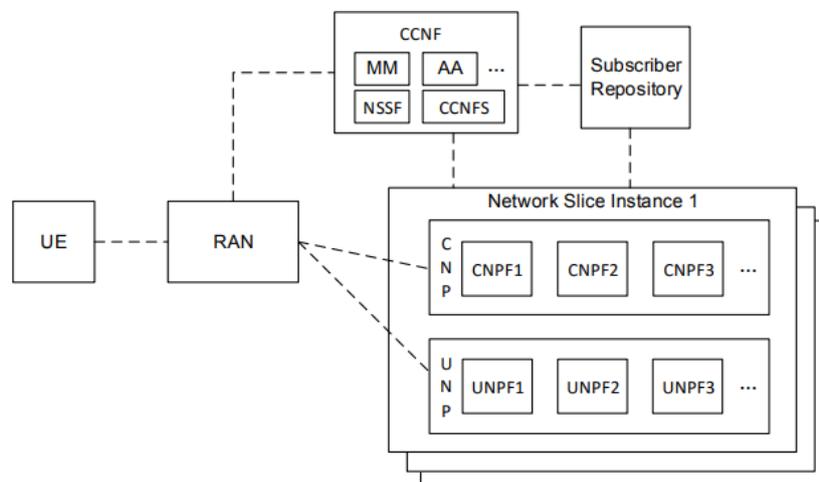


Figura 2.5 – Modelo de Arquitetura de Fatia de Rede [4]

2.8. MIMO Massivo

Como o nome sugere, a arquitetura MIMO (Massive Multiple-Input Multiple-Output) ou M-MIMO depende de um grande número de antenas na estação base (BS). Isso permite atender a um grande número de usuários. O M-MIMO atraiu muito interesse na última década devido ao seu potencial significativo de ganho de eficiência espectral. No entanto, a promessa tecnológica do M-MIMO é limitada por dois desafios fundamentais, a saber, *consumo de energia e saturação do recetor* [5].

Especificamente, cada antena no M-MIMO é conectada a uma cadeia de radiofrequência (RF) correspondente que consiste em um amplificador de baixo ruído (LNA), um misturador, um amplificador de ganho variável (VGA) com um controlador automático de ganho (AGC) e um conversor analógico-digital (ADC).

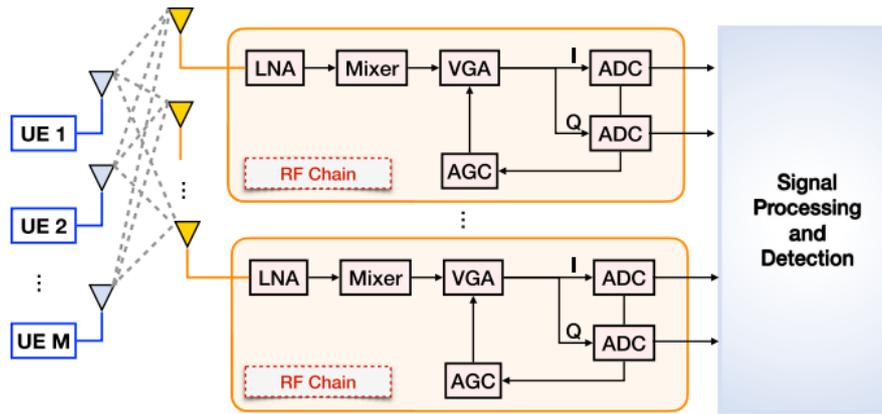


Figura 2.6 - A Arquitetura Do Receptor Do Sistema MIMO MASSIVO CONVENCIONAL (M-MIMO) Com Equipamento De Usuário De Uplink (UE). Cada Cadeia De RF Consiste Em LNA, Mixer, VGA, AGC E ADC [5].

2.9. Desafios que Limitam um Sistema M-MIMO

2.9.1. Consumo de Energia

Entre todos os componentes da cadeia de RF, o ADC mapeia o sinal analógico recebido nas amostras de banda base digital e domina o consumo total de energia da cadeia de RF. Observe que o consumo de energia do ADC cresce linearmente com a taxa de amostragem, mas exponencialmente com o número de bits que decidem a resolução do ADC. Assim, o consumo total de energia do M-MIMO é uma função do orçamento de bits do ADC.

2.9.2. Saturação do Recetor

Outro impedimento para os sistemas M-MIMO é devido à saturação do recetor-ADC, normalmente, esse é o caso dos sistemas de comunicação sem fio. Esse impedimento é causado pelo fato de que os ADCs são limitados pela sua faixa dinâmica (DR). Tais efeitos indesejáveis, mas inevitáveis, levam a componentes de alta frequência no sinal digital, criando assim aliasing nas medições. Conseqüentemente, o desempenho de todo o sistema se deteriora, a Fig. 2.7 ilustra as amostras de saída [17], [18].

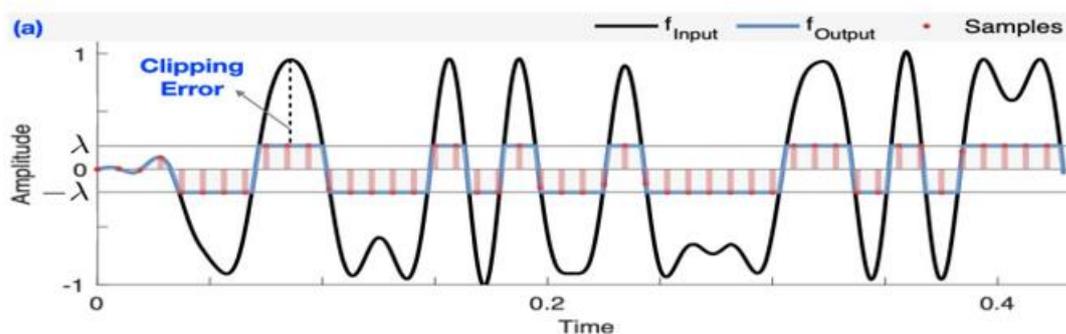


Figura 2.7 - Ilustração De Amostras De Saída [5]

2.10. Redes Privadas 5G

As redes celulares de quinta geração (5G) estão sendo lançadas em todo o mundo. As redes 5G estão moldando o mundo industrial, bem como nossas vidas diárias, permitindo muitas novas aplicações, por meio de taxas de pico de vários Gbps com latência ultrabaixa e confiabilidade ultra-alta. As operadoras de redes móveis tendem a implantar redes em áreas com grande número de assinantes em busca de receita para cobrir os custos de implantação. Isso pode resultar em baixa cobertura de rede em áreas urbanas menos povoadas e até mesmo nenhuma cobertura em zonas mais remotas. A cobertura também pode ser insatisfatória em locais internos com condições adversas de radiofrequência (RF).

Como resultado dessas deficiências, as redes privadas, também denominadas redes não públicas, atraíram um interesse significativo, as redes privadas não são apenas uma construção teórica. Embora ainda estejam em seus estágios iniciais, elas existem hoje [6].

Construída com base em tecnologias 5G, uma rede 5G privada é uma rede local para conectividade sem fio dedicada dentro de uma área específica. Mais importante, ela pode ser gerenciada de forma independente pelo seu proprietário, que pode controlar totalmente todos os aspectos da rede, como agendamento de prioridades, alocação de recursos, segurança, etc. Os usuários corporativos podem definir as suas próprias estratégias de segurança e manter dados confidenciais e proprietários locais. Ao contrário da Ethernet, uma rede 5G privada elimina equipamentos com fio caros e volumosos, sendo capaz de conectar um grande número de dispositivos em um ambiente dinâmico onde pessoas e objetos estão em movimento.

Em comparação com as redes LTE privadas, as redes 5G privadas desfrutam de vantagens tanto no domínio do rádio quanto na arquitetura do sistema. No domínio do rádio, as redes 5G privadas oferecem flexibilidade de espectro, taxas de dados de pico de vários Gbps, latência ultrabaixa, confiabilidade ultra-alta e conectividade massiva. Ao nível do sistema, o fatiamento vertical da rede, a computação de borda privada e a segurança aprimorada são essenciais para realizar redes 5G privadas verdadeiramente isoladas.

Deve-se notar também que uma rede 5G privada inclui muitas vantagens das redes 5G públicas e, mais importante, simplifica um número significativo de desafios, como o gerenciamento de interferências [6], a Fig. 2.8 ilustra as componentes de uma rede 5G privada [8].

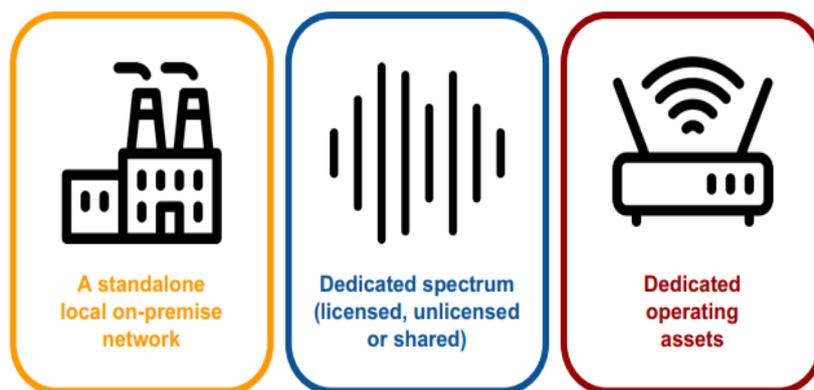


Figura 2.8 - Componentes de uma Rede 5G Privada. [8]

2.10.1. 5G SA (standalone)

Representa a implantação completa do 5G e utiliza uma arquitetura nativa desta tecnologia. Ele é autônomo o que permite o proveito de todo o potencial do 5G sem dependência de redes legadas, significando que a rede 5G SA possui maior capacidade em comparação com o 5G *non-standalone* (5G NSA), que utiliza redes 4G existentes como base.

Existem ainda necessidades específicas de 5G para particulares, como o 5G indoor que cobre e fornece conectividade otimizadas para espaços internos como shoppings, aeroportos, etc. Utilizando técnicas de cobertura e distribuição de sinal específicas para garantir uma experiência de conectividade de alta qualidade em ambientes fechados. Outro tipo relevante são as redes 5G para áreas rurais e 5G em realidade virtual avançada projetada para fornecer alta velocidade e a baixa latência necessárias para experiências imersivas e interativas [10].

2.10.2. Requisitos de Redes 5G Privadas

A gigante fabricante de redes de telecomunicações Ericsson define 5 requisitos principais para redes 5G privadas. As indústrias estão digitalizando seus processos e modernizando suas redes privadas. As redes precisam ser resilientes, seguras, de alto desempenho e preparadas para o futuro para permitir operações críticas para os negócios e de missão crítica. Uma rede 5G privada deve ter controle total de cobertura, usuários, dispositivos, qualidade de serviço (QoS), segurança aprimorada, implantações flexíveis para todas as situações. Os principais requisitos de capacidade de negócios e de missão crítica são ilustrados na Tabela 2.2.

| Requirements | Description |
|-------------------------------|--|
| Reliability | Must provide Ultra Reliable Low Latency Communication (URLLC), capacity, adequate network coverage, and robust handover functionality to improve reliability in transmitting data traffic in terms of fixed duration, volume, and the probability of success |
| High availability | Must promise maximum availability to the end user through robust solutions. Downtime can be zero by constructing redundant critical elements and control system maintenance |
| Security | Must allow complete end-to-end security and privacy for infrastructure, data, and personnel from threats. Should comply with the security principles of CIA triad, namely, confidentiality, integrity, and availability |
| Interworking/interoperability | Integration with public 5G networks to ensure service continuity for mission-critical applications (autonomous vehicles) that may require to hop networks from a private to public network |

Tabela 2.2 - Requisitos de redes 5G privadas [8]

2.10.3. Principais Facilitadores de Redes 5G Privadas

A tecnologia 5G como uma rede 5G privada é uma sugestão empolgante com benefícios do 5G, como latência inferior a 1ms, confiabilidade superior a 99,99999% e altas taxas de transmissão de dados na faixa de Gbps. O mais recente padrão global 5G do 3GPP supera o Wi-Fi e o 4G LTE, mas também oferece outras vantagens. Por exemplo, a densidade de conexão dos dispositivos aumentou dez vezes em relação ao 4G LTE, tornando o 5G atraente e potencial para implantações massivas de IoT. Portanto, o 5G é ideal para implantações de rede privada com alto número de dispositivos finais para indústria, saúde e outras empresas. Além disso, o 5G pode suportar fatiamento de rede para tornar a operação da rede e controle de trabalho mais fáceis para o operador de rede privada. As redes 5G privadas têm novos recursos que se condensam em lucros diretos para as empresas digitais, a Tab. 2.3 ilustra os principais facilitadores de redes 5G privadas [8].

| Drivers | Description |
|---|--|
| Guaranteed coverage | Usage in remote and underserved areas, indoor/in-building, seamless mobility |
| Network control | Control over resources, operations, and network management |
| Performance | Profiles that will support demanding applications and QoS guarantees |
| End user data protection traffic prioritization | Identity and Access Management (IAM), privacy and data integrity prioritize applications based on the traffic, isolate traffic based on business and technical needs |
| Customization | Ensure the enterprise meets its business needs |
| Ultra-low latency | Sub 1 ms latency |

Tabela 2.3 – Principais facilitadores de redes 5G privadas [8].

2.10.4. Características 3GPP para 5G privado

Os recursos definidos pelo 3GPP para habilitar as redes 5G privadas são ilustrados na Fig. 2.9. Esses recursos permitem que o 5G privado possa ser considerado um bom substituto para Wi-

Fi 6 ou soluções com fio no setor privado/vertical. A tecnologia 5G é definida pelo 3GPP, como escalável, flexível e preparada para o futuro, com rádio de alto desempenho, aumentada para serviços locais. Os seguintes aspetos são adequados para redes 5G privadas.

- Recursos de segurança e mobilidade bem definidos que atendem a requisitos específicos para uma determinada aplicação (por exemplo, automação industrial).
- Recursos como o núcleo baseado em software, gerenciamento centralizado, plano de controle (CP) - divisão do plano do usuário (UP), virtualização, redes auto-organizadas (SON) permitem que ele se destaque. Flexibilidade por métodos de acesso ao espectro, características de alto desempenho definidas para a classe URLLC. Para os requisitos de IIoT, o 5G privado oferecerá posicionamento de alta precisão.

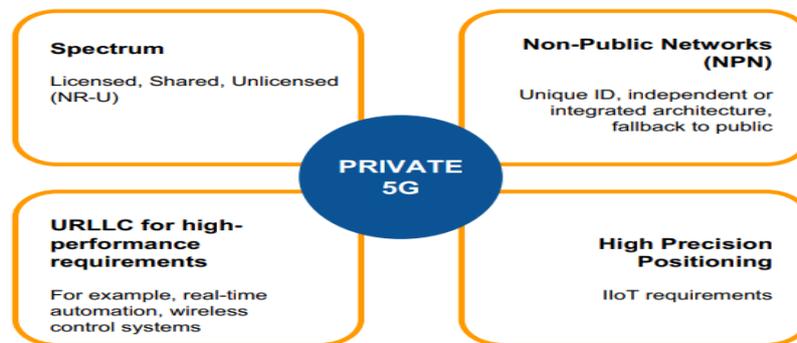


Figura 2.9 - Características 3GPP para 5G privado [8]

2.10.5. Recursos Exclusivos das Redes 5G Privadas

QoS previsível personalizado: Os indicadores de desempenho (por exemplo, taxa de transferência, latência e taxa de perda de pacotes) podem ser bem melhor controlados em redes 5G privadas. Além disso, o desempenho do sistema e o uso de recursos para diferentes serviços verticais podem ser adaptados a requisitos específicos da rede com base nas estatísticas locais. Embora as redes 5G privadas sejam relativamente independentes das redes 5G públicas, pode haver necessidade de comunicações entre empresas por meio de redes 5G públicas e não públicas em alguns casos de uso. *Por exemplo, a continuidade do serviço é necessária quando uma ambulância se desloca de uma fábrica servida por uma rede 5G privada para a externa servida por uma rede 5G pública. O mesmo deve ser o caso dos serviços de vídeo contínuos* [6].

- *Modelos consistentes de ML (Machine Learning):* As redes privadas 5G apresentam um conjunto de atores e comportamentos estatisticamente consistentes, ao contrário das redes públicas onde os usuários e cenários podem exibir uma grande variação estatística.

Diferentes configurações industriais privadas terão uma certa semelhança estrutural, adequada para ser abordada por meio de aprendizado multitarefa. Além disso, um conjunto de redes 5G privadas que têm proprietários diferentes e pretendem preservar a privacidade dos dados é um caso exemplar para o uso de esquemas de aprendizagem distribuída que preservam a privacidade. Além disso, devido a uma demanda de aplicativos menos variável, uma inteligência artificial (IA) superficial que emprega ML ou aprendizado por reforço (RL) pode ser usada para alocação de recursos. Quando existe uma grande mudança de domínio entre ambientes de rede, a adaptação de domínio pode ser usada.

Os objetivos revolucionários e as consequentes vantagens das redes 5G privadas são potencializados por novas arquiteturas e tecnologias. O 3GPP analisou alguns casos de uso que dependem de redes 5G privadas. Com base nessa análise, o 3GPP propôs duas arquiteturas básicas para redes 5G privadas, ou seja, paradigmas integrados de rede autônoma e pública. A *5G Alliance for Connected Industries and Automation* identificou ainda três opções de implantação para redes 5G privadas integradas na rede pública. Além dessas novas arquiteturas, os principais desenvolvimentos e tecnologias para redes 5G privadas incluem gerenciamento de espectro, URLLC, integração com redes sensíveis ao tempo (TSNs), fatiamento de rede vertical, gerenciamento de interferência, localização e rastreamento e computação de borda privada. Apesar de suas vantagens, as redes sem fio 5G privadas também apresentam alguns desafios [6].

2.10.6. Arquitetura de Implantação 5G

A Figura 2.10 (A) descreve um modelo abstrato da arquitetura do sistema 5G. O sistema é composto principalmente pelos seguintes segmentos: rede de acesso via rádio (RAN), rede Core, Gestão e Orquestração, bem como rede de transporte (não destacada separadamente na figura). O 3GPP definiu novos recursos e opções arquitetônicas para o sistema 5G geral, inclusive para RAN e redes principais.

Na RAN, a interface NR combinada com o massive Multi-Input Multi-Output (mMIMO), beamforming e o suporte para operação em bandas de frequência mais altas permitem uma taxa de transferência de dados sem precedentes para usuários finais móveis.

No lado da rede principal, a separação das funções de controle e plano do usuário, a decomposição dos componentes principais em funções mais granulares, a virtualização dessas

funções, a nova arquitetura de qualidade de serviço (QoS) e a arquitetura baseada em serviço (SBA) fornecem coletivamente um sistema altamente flexível, modular e programável que suporta várias necessidades e requisitos. Para fins de nossa discussão, o sistema de núcleo 5G (5GC) pode ser abstraído em dois blocos funcionais principais: funções de plano de usuário (UPF) e funções de plano de controle (CP), conforme ilustrado na Figura 2.10 (A) [7].

O UPF realiza as funções que lidam com roteamento e encaminhamento de dados do usuário, é o ponto de ancoragem de mobilidade do equipamento do usuário (UE), entre outras coisas. O bloco CP fornece todas as outras funções principais que lidam com vários aspectos do dispositivo e controle de rede, como controle e gerenciamento de acesso, gerenciamento de sessão, gerenciamento de mobilidade e gerenciamento de políticas, entre outras funções.

A gestão realiza todas as funções relacionadas com a rede, serviço e gestão de utilizadores. Isso inclui, por exemplo, configurações de componentes de rede para oferecer serviços, monitoramento de desempenho de rede e serviço, medição e facturamento. Outra função importante deste segmento é o gerenciamento (criação/reconfiguração/remoção) do fatiamento de rede para suportar os requisitos de vários serviços [20]. Todas essas funções de gerenciamento são realizadas por meio de um conjunto de sistemas, como sistema de suporte à operação (OSS) e orquestrador.

Finalmente, o segmento de rede de transporte fornece o encanamento necessário entre vários componentes da arquitetura de rede para troca de dados, controle e informações de gerenciamento. Os modelos de implantação do 5G no domínio vertical estão na Figura 2.10 (A-D) [7], [14], [19].

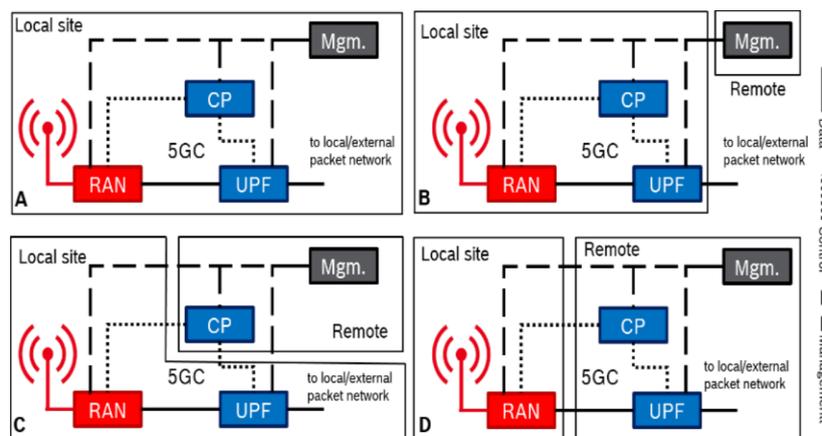


Figura 2.10 - Arquitetura do sistema 5G (A) e modelos de implantação (A-D) [7].

2.10.7. Segurança das redes 5G

A arquitetura de rede 5G traz novos desafios em relação a segurança cibernética quando comparada com as redes anteriores, cujo histórico demonstra vulnerabilidades relacionadas à segurança em comunicações fim-a-fim. A segurança no tráfego de informações (voz e dados) é um importante aspecto em redes e sistemas de telefonia móvel e não se limita somente à intercetação e modificação da informação como vulnerabilidade [9].

Comparando historicamente com as gerações anteriores, (1G) não incluía aspectos de criptografia no tráfego de informações, nas redes 2G, introduziram-se técnicas de criptografia, mitigando as vulnerabilidades a nível de camada física, A transição entre o 2G e 3G introduziu o tráfego de dados e acesso à Internet banda larga. Dessa forma, as arquiteturas passaram a realizar tanto a comutação de circuito (voz) quanto de pacotes (dados). As redes móveis 4G estão expostas aos mesmos problemas das redes de computadores como DoS, falsificação de endereços IP (Internet Protocol), e acesso à identificação do usuário [9].

As redes 5G apresentam diversos mecanismos de segurança para mitigar as vulnerabilidades persistentes no processo de sinalização das redes legadas, assim como para prover proteção contra ataques cibernéticos de outra natureza. Dentro das várias formas de segurança destacamos aqui SDN.

2.10.8. Redes definidas por Software e Virtualização de Funções de Rede no 5G

A introdução do conceito de SDN nas redes 5G permite realizar a separação dos planos de controle (plano de sinalização) e dados (plano de usuário). Essa abordagem garante as características de flexibilidade e programabilidade das redes 5G em conjunto com outras tecnologias. O plano de controle é responsável por coordenar a dinâmica geral da rede, comportando o tráfego de funções de roteamento, com a decisão de encaminhamento de pacotes, e da aplicação de políticas de qualidade de serviço e segurança. Tem-se como figura central o controlador, um dispositivo que domina todos os nós da rede.

Já o plano de dados transporta a informação das aplicações em execução na infraestrutura. Por isso, é onde atuam as funções tradicionais de segurança como firewalls e dispositivos de detecção de intrusão. O controle centralizado introduz a possibilidade de um atacante controlar toda a rede [20],[21].

Enquanto, a programabilidade pode ocasionar vulnerabilidades em caso de implementação inconsistente de isolamento de tráfego e dos recursos. Para mitigar estes riscos, deve-se isolar funções de acordo com o nível de sensibilidade a segurança e exposição, delimitando domínios.

Além disso, inclui-se o controle de acessos por meio de uma estrutura de identificação que permita a autenticação do usuário, garantindo a segurança principalmente de funções de controle e de dados usados para a tomada de decisões. A infraestrutura NFV é composta pelas funções de rede virtualizadas (Virtualized Network Functions, VNFs), orquestrador NFV, gerenciador NFV e o gerenciador de infraestrutura virtual (Virtual Infrastructure Manager, VIM) [9].

CAPÍTULO 3

3. Simulador de Sistemas

3.1. Descrição do Simulador

Para realizar o planejamento celular de uma rede 5G e analisar o desempenho do sistema, foi utilizado um simulador desenvolvido em JAVA, no qual o código original foi modificado para incluir algumas das novas funcionalidades do 5G NR, para o cenário específico de estudo.

Realizamos a simulação considerando a banda de frequência do 5G NR, conhecida como FR1 como banda baixa, que opera abaixo de 6 GHz. Na banda FR1, utilizou-se uma frequência portadora de 3,6 GHz, e usando a numerologia 1. Nessa configuração, a largura de banda total foi definida em 50 MHz, com espaçamento de 30 kHz entre as subportadoras e a transmissão de 28 símbolos OFDM em cada subtrama de 1 ms., conforme apresentado na Tabela 3.1.

| Parâmetros | Numerologia 1- FR1 |
|--|--------------------|
| Frequência de portadora [GHz] | 3.6 |
| Largura de banda [MHz] | 50 |
| Espaçamento entre sub-portadoras [KHz] | 30 |
| TTI [ms] | 1 |

Tabela 3.1 - Características globais do simulador

O simulador é configurado com um modelo de simulação de canal 3D que segue as orientações definidas pelo 3GPP, conforme mostrado na Figura 3.1. Esse modelo pode ser utilizado em simulações de nível de ligação e de nível de sistema, permitindo a integração entre essas duas abordagens. O simulador de nível de ligação possibilita a determinação dos valores da relação sinal-ruído (SNR), nos quais a conexão entre uma estação base (BS) e um dispositivo de usuário (UE) atinge a taxa de erro de bloco (BLER) estipulada para um conjunto de bits. A partir dos resultados dessa simulação de enlace, procede-se à configuração dos parâmetros para o nível de sistema. O simulador de nível de sistema, por sua vez, examina o comportamento da rede 5G NR, analisando como os dispositivos móveis comunicam com as estações base em diferentes condições de transmissão e recepção.

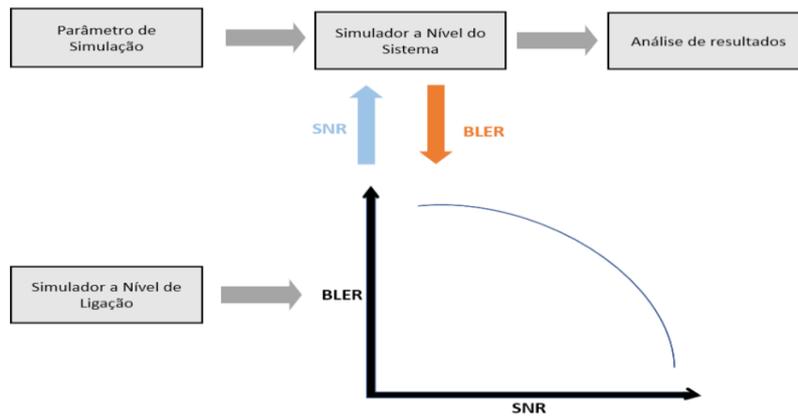


Figura 3.1 - Relação entre os simuladores de nível de sistema e de ligação [22]

O processo de simulação consiste em 3 fases que formam a base do funcionamento do simulador de sistema, conforme representadas na Figura 3.2.

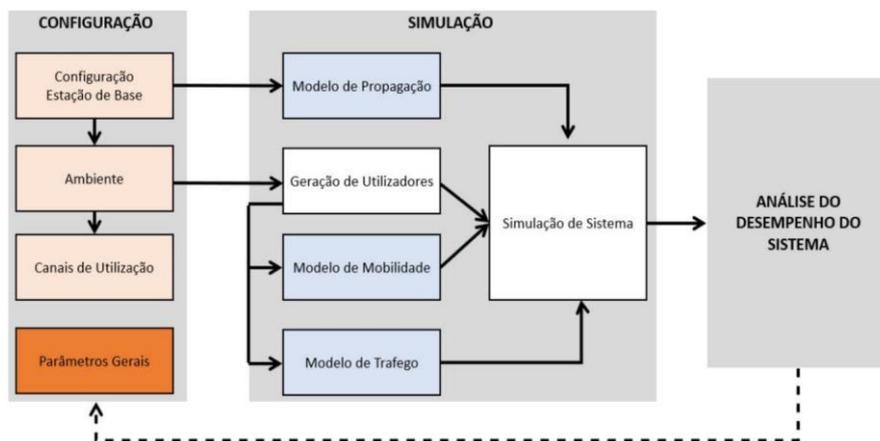


Figura 3.2 - Fases da simulação [22]

3.2. Cenários de Implementação

Conforme mencionado anteriormente foi adicionado um cenário para o ambiente específico, Escola de Saúde de Luanda. O cenário foi simulado com parâmetros específicos, operando nas frequências de 3,6 GHz (numerologia 1), conforme descrito na seção 3.1. O cenário faz uso da tecnologia 5G NR, em uma configuração onde cada setor de célula é equipado com mMIMO, utilizando 256 antenas ativas. Cada setor é projetado para atender um total de 40 usuários.

Cada estação base (BS) possui três setores e está dividida em duas zonas, com diferentes taxas de dados, dependendo da distância em relação à BS. Para distâncias de até 25 metros da BS, são utilizados símbolos 256QAM com uma taxa de correção de erros (R_c) de 7/8. Para distâncias de até 50 metros, utilizam-se símbolos 16QAM com R_c de 3/4. O número de BSs

varia conforme o cenário considerado. Os parâmetros específicos de ambos os cenários estão resumidos na Tabela 3.2.

| Parâmetros | Escola de Saúde de Luanda |
|----------------------------------|---------------------------|
| Número de BS | 4 |
| Número total de sector | 12 |
| Número total de UEs | 480 |
| Esquemas de modulação | 16QAM;256QAM |
| Altura da antena da BS – hBS [m] | 25 |
| Esquema de Transmissão | mMiMO |
| Modo de Transmissão | <i>Full-Buffer</i> |

Tabela 3.2 – Parâmetros de configuração para o cenário Escola de Saúde de Luanda

Na Figura 3.3 é apresentada a interface gráfica do simulador de sistema do cenário ilustrando a disposição da BS, representadas como ponto azul, e a localização dos utilizadores representados por pontos vermelhos, estando os pontos pretos representando as APs, no cenário da Escola de Saúde no Zango em Luanda, onde os utilizadores se encontram nas salas de aulas, gabinetes e no pátio da escola durante o período de aulas. A Figura 3.3 ilustra detalhadamente essa configuração.

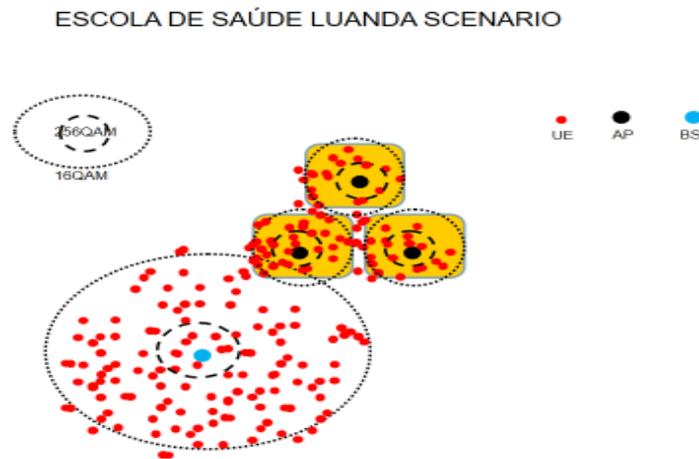


Figura 3.3 - Representação gráfica do cenário Escola de Saúde do Zango Luanda.

CAPÍTULO 4

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentamos os diversos resultados da simulação de sistema efetuada, com foco na avaliação do desempenho do sistema 5G NR, considerando o cenário específico que foi implementado, nomeadamente o cenário da Escola de Saúde do Zango em Luanda.

Além de apresentar os resultados numéricos e gráficos, também realizamos uma discussão de forma a avaliar o desempenho do sistema.

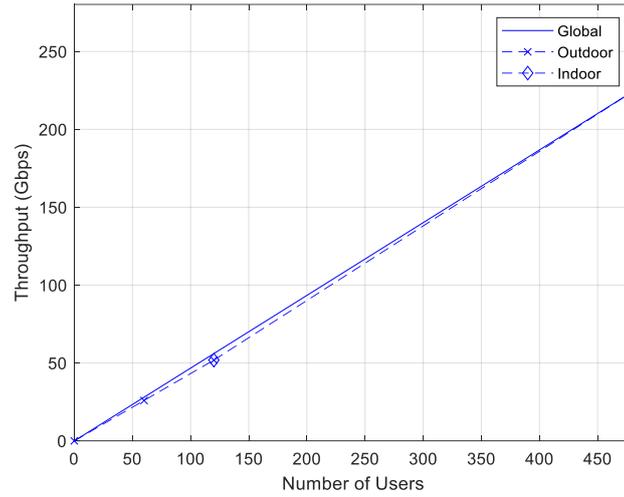
4.1. Resultados Teóricos

O resultado teórico em relação ao Planeamento Celular do Cenário Escola de Saúde de Luanda encontra-se nos Anexos.

4.2. Resultados do *Throughput*

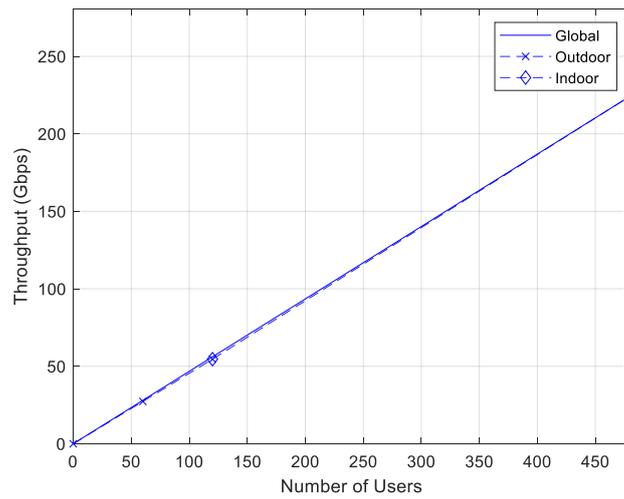
A discussão e a análise dos resultados serão centradas na avaliação do sistema em termos de throughput com o intuito de avaliar o desempenho do sistema em relação do cenário implementado, conforme mencionado anteriormente na Secção 3.2. Além disso, examinaremos o impacto dos diversos parâmetros considerados na simulação. Na simulação realizada, foram consideradas duas modulações M-QAM, nomeadamente 16QAM e 256QAM. Relativamente à rede de acesso rádio virtualizada implementada foi utilizada a técnica de agrupamento (clustering) estático onde o principal objetivo da utilização desta técnica é aprimorar o desempenho global do sistema, melhorando a eficiência espectral.

Quanto ao tamanho do cluster da RAN adotado nesta configuração, o valor “1C” indica a ausência de clustering, o que significa que os utilizadores são atendidos exclusivamente por uma BS. Os gráficos apresentados ilustram a variação do throughput em relação ao número de utilizadores, a variação do throughput em relação à potência com diferentes tamanhos de clusters, nomeadamente 1C e 3C. Para a realização dessa simulação, foi considerado de início a presença de 40 utilizadores por setor, com um total de 256 antenas ativas para servir esses utilizadores.



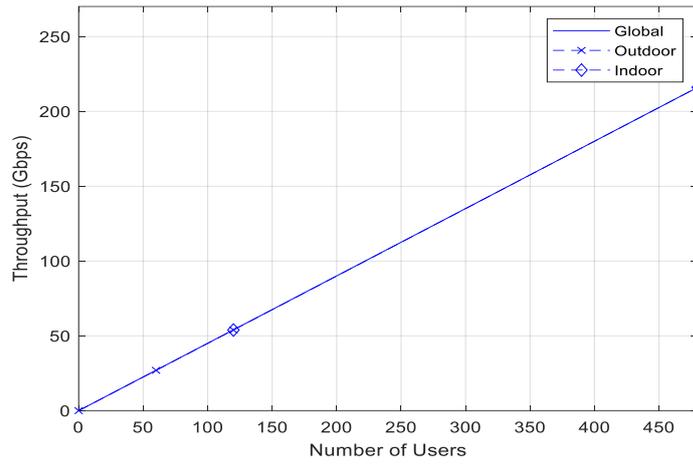
$N_{s1}=40, N_{s2}=40, P_{tx}=49\text{dBm}, \text{Raio}=300\text{m}$

Figura 4.1- Throughput vs. Número de Utilizadores, Escola de Saúde do Zango Luanda, $P_{tx}=49\text{dB}$, raio=300m.



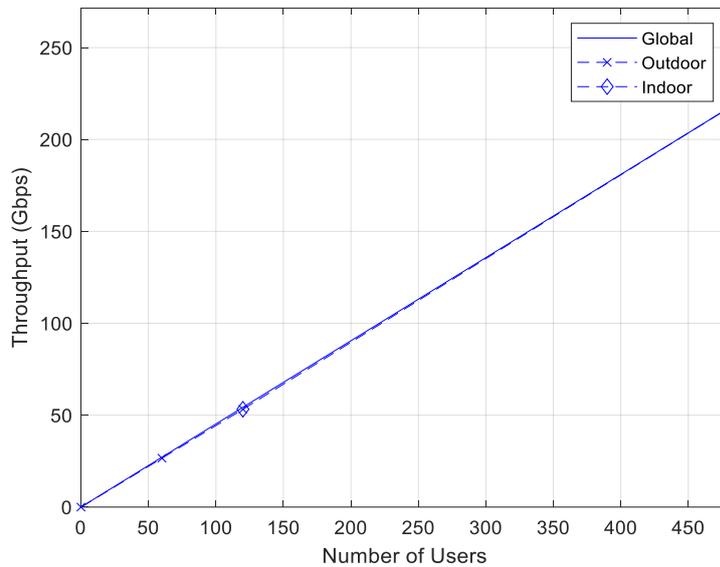
$N_{s1}=40, N_{s2}=40, P_{tx}=49\text{dBm}, \text{Raio}=150\text{m}$

Figura 4.2 - Throughput vs. Número de Utilizadores, Escola de Saúde do Zango Luanda, $P_{tx}=49\text{dB}$, raio=150m.



Ns1=40, Ns2=40, Ptx=44dBm, Raio=300m

Figura 4.3 - Throughput vs. Número de utilizadores, Escola de Saúde do Zango Luanda, Ptx=44dB, raio=300m.



Ns1=40, Ns2=40, Ptx=44dBm, Raio=150m

Figura 4.4 – Throughput vs. Número de Utilizadores, Escola de Saúde do Zango Luanda, Ptx=44dB, raio=150m.

Ao analisar os resultados das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, que descrevem a variação do throughput em relação ao número de utilizadores, observa-se que, na Figura 4.1, o throughput aumenta de forma linear com o número de usuários, tanto em valores globais como em ambiente ao ar livre (outdoor) e internos (indoor). Esse aumento linear sugere uma infraestrutura de rede estável, que responde diretamente à adição de mais usuários, mantendo a eficiência.

Na Figura 4.2, assim como no gráfico anterior, o throughput também cresce linearmente com o número de usuários, porém com um raio de cobertura menor (150 metros). Embora o

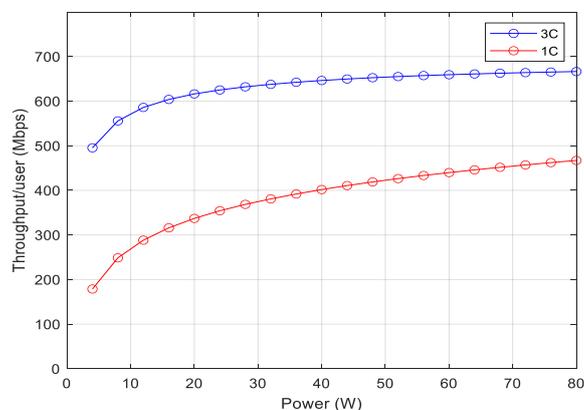
comportamento seja semelhante ao da Figura 4.1, o menor raio pode implicar em uma maior densidade de usuários por área, mas o throughput continua a aumentar de forma estável.

A Figura 4.3 apresenta um comportamento similar, com o throughput crescendo de forma linear. No entanto, a potência de transmissão é menor (44 dBm). Mesmo com a redução da potência, o throughput aumenta com o número de usuários, embora seja possível que, com um número muito grande de usuários, a eficiência se degrade mais rapidamente devido à menor potência de transmissão.

Por fim, a Figura 4.4 mostra o throughput (Gbps) em função do número de usuários, também com um raio de 150 metros e potência de 44 dBm. Todos os gráficos indicam um crescimento linear do throughput à medida que o número de usuários aumenta, sugerindo que a rede é capaz de lidar eficientemente com um grande número de usuários, sem perdas significativas no desempenho.

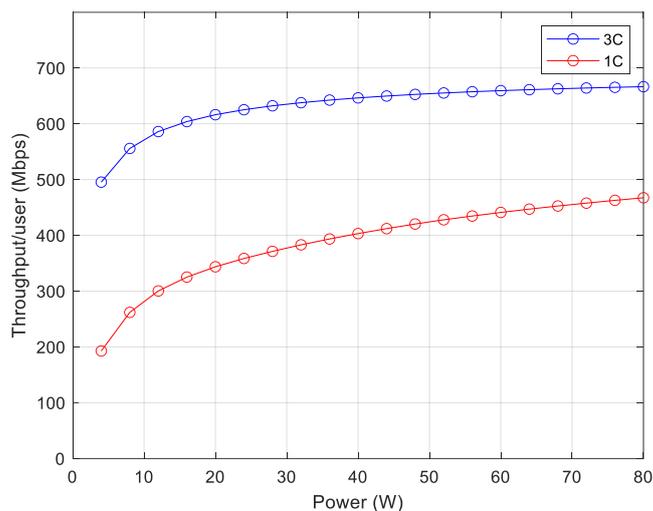
As variações no raio de cobertura e na potência de transmissão parecem não impactar drasticamente o comportamento linear do throughput, mas podem ter influência em condições mais extremas, como em cenários com um número muito elevado de usuários ou em ambientes densamente povoados.

O comportamento linear sugere que a rede mantém uma alta capacidade de throughput por usuário à medida que o número de usuários cresce, sendo eficiente na alocação de recursos até 480 usuários. Além disso, os gráficos indicam que o sistema é escalável, lidando bem com o aumento do número de usuários em diferentes condições, tanto variando o raio quanto a potência de transmissão. O throughput permanece elevado e proporcional ao número de usuários, tanto em ambientes interiores quanto exteriores.



$N_s1=40$, $N_s2=40$, $P_{tx}=49\text{dBm}$, Raio=300m

Figura 4.5 - Throughput vs Potência, Escola de Saúde do Zango Luanda, cluster 1C e 3C.



Ns1=40, Ns2=40, Ptx=49dBm, Raio=150m

Figura 4.6 - Throughput vs Potência, Escola de Saúde do Zango Luanda, cluster 1C e 3C.

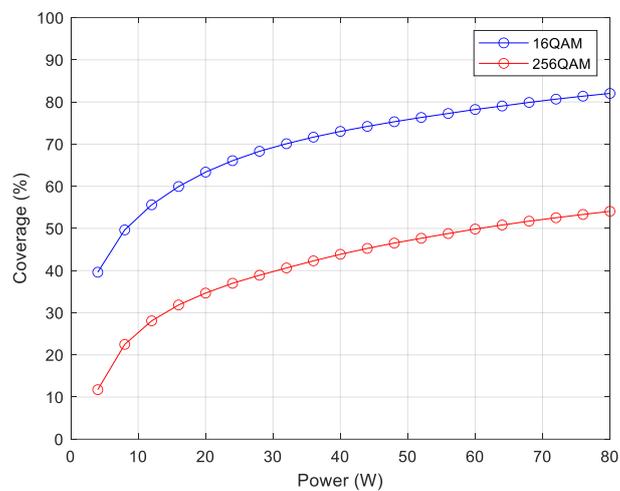
Na Figura 4.5, é apresentado o throughput por usuário (Mbps) em função da potência de transmissão (W) para dois cenários: "3C" (três células) e "1C" (uma célula). Neste gráfico, o throughput por usuário aumenta rapidamente com o aumento da potência até cerca de 20 W, momento em que o ganho de throughput começa a diminuir e estabilizar. O cenário 3C atinge um throughput mais elevado (acima de 600 Mbps), comparado ao cenário 1C (acima de 400 Mbps), demonstrando que o agrupamento de três células resulta em um desempenho superior. O aumento da potência tem impacto significativo no throughput até um certo limite (20 W), após o qual os ganhos diminuem, sugerindo um ponto de saturação. O uso de múltiplas células oferece um aumento notável no throughput por usuário, mostrando a vantagem de configurar redes com mais células para otimizar o desempenho.

Na Figura 4.6, o comportamento é semelhante ao da Figura 5, mostrando novamente o throughput por usuário em função da potência de transmissão (W), mas com um raio de cobertura menor (150 m). O throughput aumenta com a potência até estabilizar em torno de 20 W, com o cenário 3C atingindo throughput acima de 600 Mbps, enquanto 1C chega a pouco mais de 400 Mbps. A redução no raio de cobertura não parece afetar significativamente o comportamento geral do gráfico, mantendo o padrão de ganho até certo limite de potência.

A análise mostra que a distância menor (150 m) não altera de maneira significativa o comportamento do throughput em função da potência, com o desempenho se estabilizando em torno de 20 W em ambos os casos. O uso de três células (3C) continua a mostrar resultados superiores em relação a uma célula (1C), principalmente em termos de throughput por usuário.

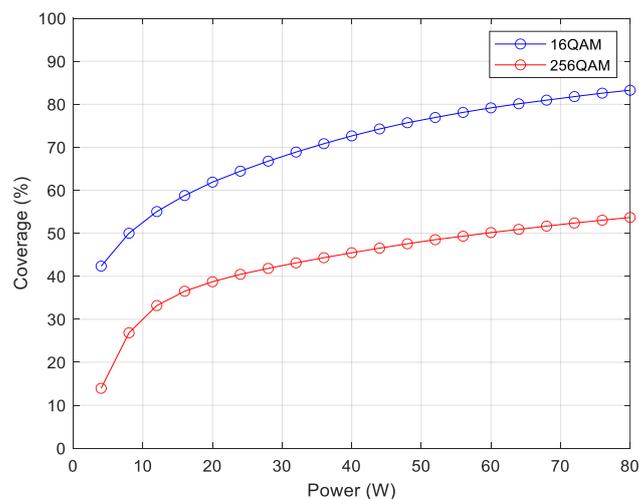
De maneira geral, podemos concluir que o throughput cresce linearmente com a potência de transmissão até um certo ponto, demonstrando a eficiência do sistema na distribuição de capacidade. O aumento da potência de transmissão melhora o throughput até cerca de 20 W, após o qual os ganhos se tornam marginais, possivelmente devido a limitações de hardware ou à saturação da capacidade do sistema.

Por fim, o uso de múltiplas células (3C) proporciona um desempenho significativamente melhor em comparação com uma única célula (1C), especialmente em cenários de alta densidade, tornando-se uma estratégia eficaz para maximizar o throughput em redes com grande número de usuários.



$Ns_1=40$, $Ns_2=40$, $P_{tx}=49\text{dBm}$, Raio=300m

Figura 4.7 - Cobertura (em %) em relação à potência (W), Escola de Saúde do Zango Luanda, raio=300m.



$Ns_1=40$, $Ns_2=40$, $P_{tx}=49\text{dBm}$, Raio=150m

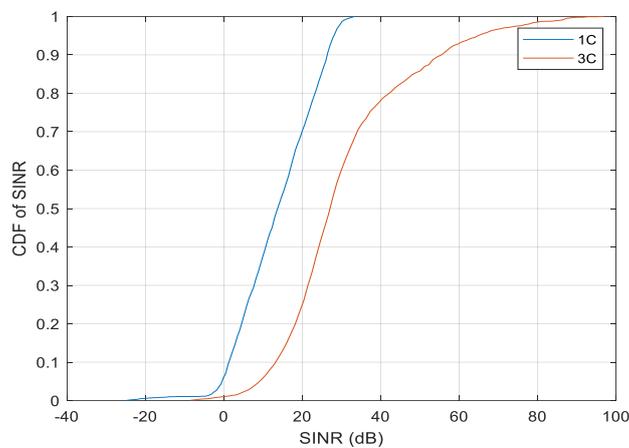
Figura 4.8 - Cobertura (em %) em relação à potência (W), Escola de Saúde do Zango Luanda, raio=150m.

4.3. Resultado da Cobertura

Na Figura 4.7, com o raio de 300 metros, observa-se que a cobertura aumenta conforme a potência de transmissão cresce. Para a modulação 16QAM (linha azul), a cobertura cresce de forma mais acentuada com o aumento da potência em comparação à modulação 256QAM (linha vermelha). Com 80 W de potência, a 16QAM atinge aproximadamente 90% de cobertura, enquanto a 256QAM alcança menos de 70%.

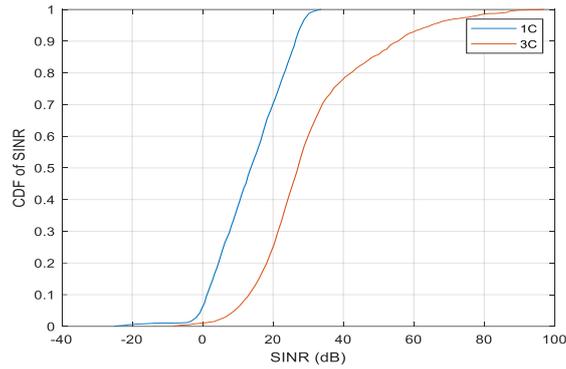
Já na Figura 4.8, com o raio reduzido para 150 metros, o comportamento geral é semelhante, mas as curvas mostram uma cobertura idêntica em ambos os casos. A modulação 16QAM atinge quase 85% de cobertura em 80 W, enquanto a 256QAM também melhora, mas ainda apresenta uma diferença significativa em relação à 16QAM, alcançando uma cobertura menor.

A redução do raio de cobertura para 150 metros melhora ligeiramente a cobertura para ambas as modulações. No entanto, a 16QAM mantém uma vantagem clara em termos de desempenho, especialmente em potências mais elevadas. Assim, a 16QAM se mostra mais eficiente em termos de cobertura tanto em cenários com raio de 300 metros quanto com raio de 150 metros, com uma diferença mais acentuada em potências elevadas.



$Ns1=40$, $Ns2=40$, $Ptx=49dBm$, Raio=300m

Figura 4.9 - CDF (função de distribuição acumulada) do SINR (dB), Escola de Saúde do Zango Luanda, raio=300m.



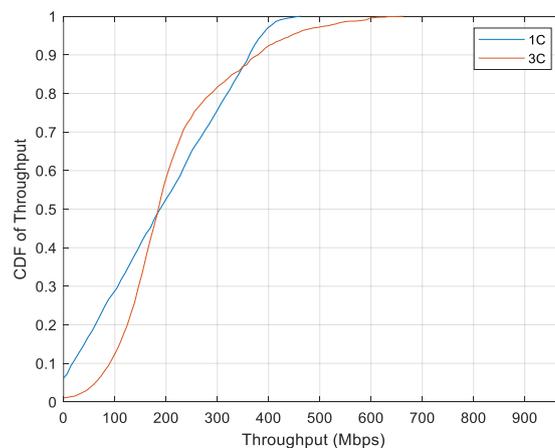
Ns1=40, Ns2=40, Ptx=49dBm, Raio=150m

Figura 4.10 – CDF (função de distribuição acumulada) do SINR (dB), Escola de Saúde do Zango Luanda, raio=150m.

4.4. Resultado do CDF do SINR

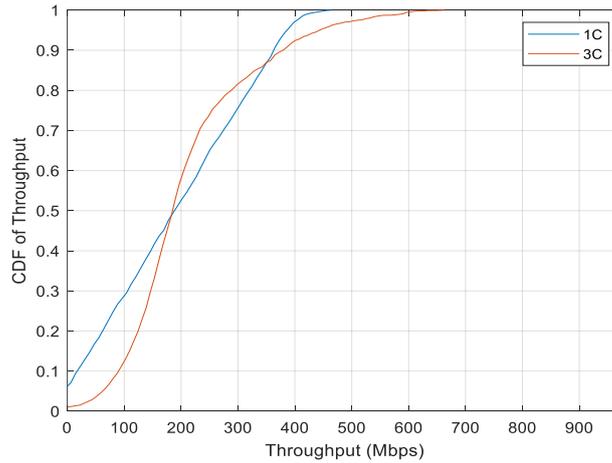
Na Figura 4.9 ilustra-se o CDF do SINR, com Raio = 300 m. Observa-se que a configuração 1C (linha azul) apresenta um SINR significativamente pior em comparação com a configuração 3C (linha vermelha). A curva da configuração 3C mostra um ganho de SINR elevado em níveis baixos de SINR, indicando um desempenho superior com o agrupamento de três células. Isso sugere que, com um raio de 300 metros, a configuração 3C tem melhores condições de sinal em relação à configuração 1C.

Já na Figura 4.10 observa-se o CDF do SINR, quando o Raio = 150 m. Pode-se verificar que há uma quase indentidade entre as Figuras 4.10 e 4.9 o que indica que continua a ser o agrupamento 3C a garantir a melhor distribuição do CDF do SINR no cenário específico da escola de Saúde do Zango. Isso deve-se à redução da interferência intercelular garantida pela configuração 3C comparativamente à 1C.



Ns1=40, Ns2=40, Ptx=49dBm, Raio=300m

Figura 4.11 - CDF do Throughput, Escola de Saúde do Zango Luanda, raio=300m.



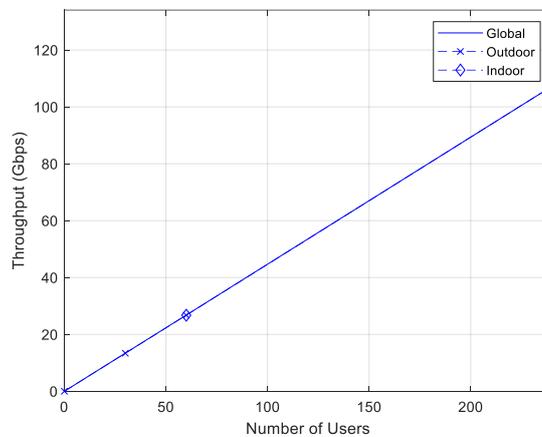
Ns1=40, Ns2=40, Ptx=49dBm, Raio=150m

Figura 4.12 - CDF do Throughput, Escola de Saúde do Zango Luanda, raio=150m.

4.5. Resultado do CDF do Throughput

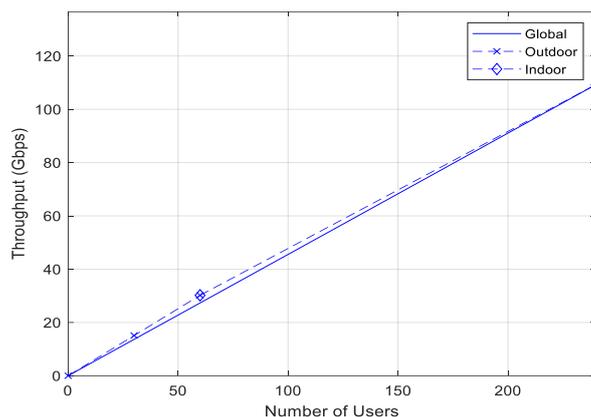
Na Figura 4.11 (CDF do Throughput, Raio = 300 m), observa-se que a configuração 1C (linha azul) apresenta um throughput geralmente inferior em comparação à configuração 3C (linha vermelha), especialmente acima de 400 Mbps. As duas curvas aproximam-se e convergem a partir de 200 Mbps, mas 3C demonstra desempenho superior na maior parte da faixa de throughput, indicando maior eficiência neste cenário específico com um raio de 300 metros.

Na Figura 4.12 (CDF do Throughput, Raio = 150 m), com o raio menor, o throughput aumenta para ambas as configurações, 1C e 3C, mas 3C continua a destacar-se, mantendo um throughput superior em quase toda a faixa. Pode-se verificar que há uma quase indentidade entre as Figuras 4.11 e 4.12 o que indica que continua a ser o agrupamento 3C a garantir a melhor distribuição do Throughput do SINR no cenário específico da escola de Saúde do Zango.



Ns1=20, Ns2=20, Ptx=49dBm, Raio=300m

Fig 4.13 - Throughput vs. Número de Usuários, Escola de Saúde de Luanda, Nu=240.



Ns1=20, Ns2=20, Ptx=49dBm, Raio=150m

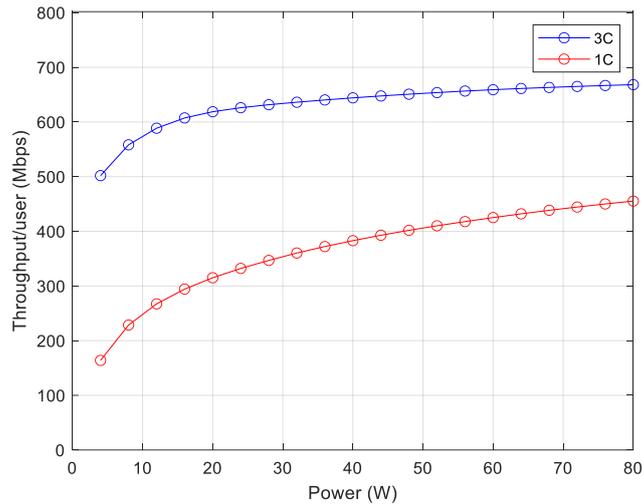
Figura 4.14 - Throughput vs. Número de Usuários, Escola de Saúde do Zango Luanda, Nu=240.

4.6. Resultados do Throughput e da Cobertura para Nu=240

Ao analisarmos o gráfico da Figura 4.13 (Raio = 300 m), observa-se que o throughput total (Gbps) aumenta de forma linear conforme o número de usuários cresce. Tanto as curvas para ambientes Indoor quanto Outdoor seguem essa tendência linear, com diferenças mínimas entre elas. Esse comportamento indica que, independentemente do ambiente, o throughput global se comporta de maneira semelhante, aumentando proporcionalmente ao número de usuários.

Na Figura 4.14 (Raio = 150 m), observa-se um comportamento similar ao da Figura 4.13, mas com o raio reduzido para 150 metros. No global o throughput continua a crescer linearmente com o número de usuários, mas é visível um maior declive de throughput para os usuários outdoor comparativamente aos indoor. Esta diferença entre as curvas dos ambientes Indoor e Outdoor apenas ocorre nesta situação em particular.

A linearidade observada em ambos os gráficos sugerem que o sistema escala bem com o aumento do número de usuários, sem apresentar degradação significativa de desempenho. A redução do raio de cobertura para 150 metros não afeta globalmente essa relação linear entre throughput e número de usuários. Portanto, o sistema continua a escalar eficientemente, tanto para usuários em ambientes internos quanto externos, mantendo o desempenho estável à medida que mais usuários são adicionados.

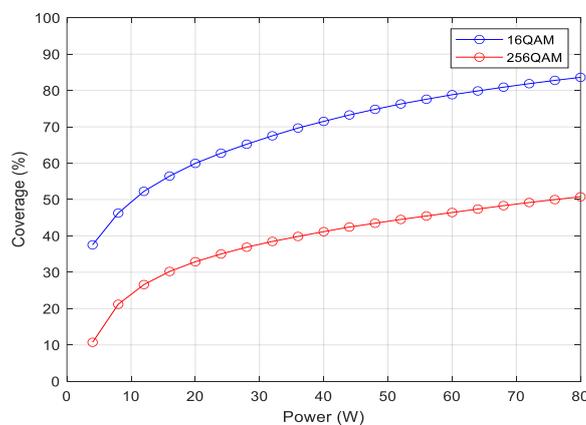


$N_s1=20, N_s2=20, P_{tx}=49\text{dBm}, \text{Raio}=150\text{m}$

Figura 4.15 - Throughput vs. Potência, Escola de Saúde do Zango Luanda, raio=150m.

Este gráfico, com o raio de 150 m, mostra o throughput em função da potência (W) para duas configurações: 3C (três células) e 1C (uma célula). A configuração 3C apresenta um throughput significativamente superior, atingindo aproximadamente 675 Mbps, enquanto a configuração 1C atinge cerca de 450 Mbps em potências mais elevadas.

A configuração 3C demonstra um desempenho superior em termos de throughput em comparação à 1C, especialmente em potências mais altas. Esse comportamento pode sugerir que a configuração 3C faz melhor uso dos recursos disponíveis, como o espectro de frequências ou o número de canais, permitindo uma maior capacidade de throughput, principalmente quando a potência de transmissão é aumentada.

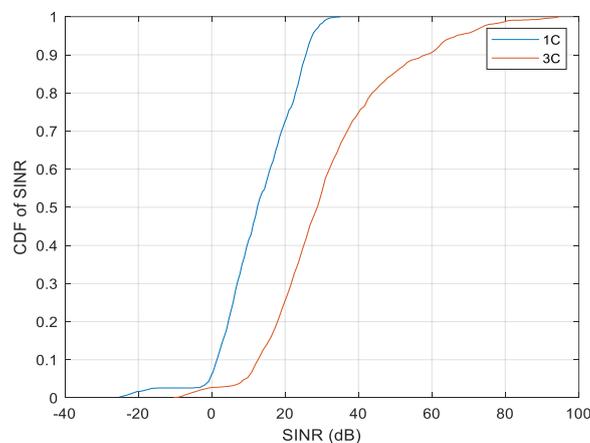


$N_s1=20, N_s2=20, P_{tx}=49\text{dBm}, \text{Raio}=150\text{m}$

Figura 4.16 - Cobertura vs. Potência, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda.

O gráfico da Figura 4.16 apresenta a cobertura em função da potência para as modulações 16QAM e 256QAM. Observa-se que o 16QAM oferece uma cobertura maior em todas as potências, alcançando quase 85% em níveis de potência mais elevados, enquanto o 256QAM se estabiliza em torno de 50%.

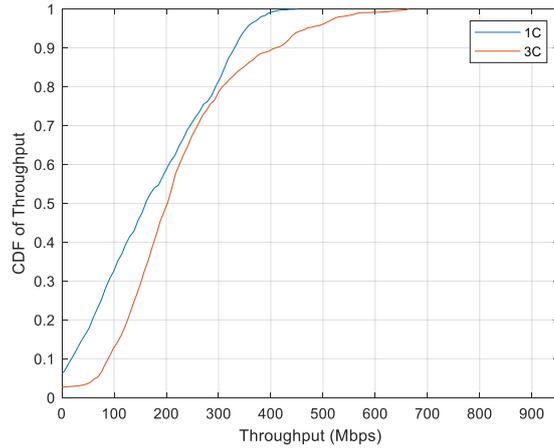
Isso demonstra que o 16QAM proporciona uma cobertura significativamente melhor em todas as faixas de potência em comparação ao 256QAM. Modulações de ordem mais baixa, como o 16QAM, geralmente têm um desempenho superior em termos de cobertura, pois são menos suscetíveis a degradações de sinal e requerem uma menor qualidade de canal (SNR) para operar de forma eficiente.



$N_s1=20$, $N_s2=20$, $P_{tx}=49\text{dBm}$, Raio=150m

Figura 4.17 - CDF de SINR, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda.

Analisando o comportamento da Figura 4.17, podemos observar que a configuração 3C apresenta um SINR (Relação Sinal-Interferência-Ruído) mais alto em comparação à 1C. Esse comportamento é típico em cenários com menor interferência entre células, uma vez que o 3C tende a lidar com menos interferência intercelular em comparação ao 1C, que envolve múltipla coordenação entre células e, portanto, menos fontes de interferência.

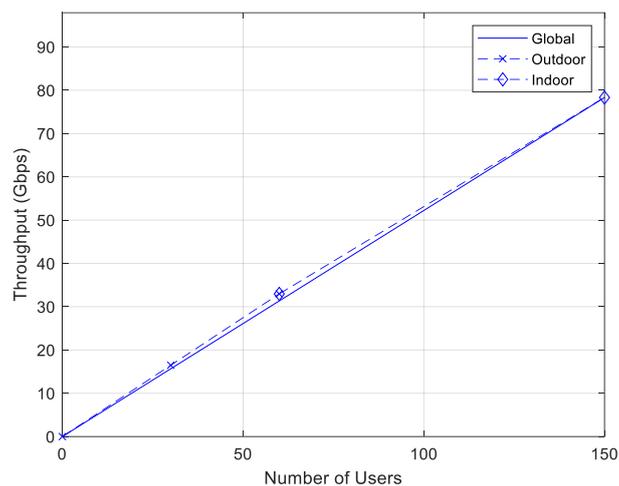


$Ns1=20, Ns2=20, Ptx=49dBm, Raio=150m$

Figura 4.18 - CDF de Throughput, cenário Escola de Saúde do Zango Luanda.

A Figura 4.18 mostra que a configuração 3C apresenta um throughput ligeiramente melhor, especialmente em valores mais altos (cerca de 600 Mbps). No entanto, a diferença em comparação à configuração 1C não é tão significativa quanto em outros gráficos analisados. Embora o 3C ofereça uma vantagem em throughput, essa diferença em relação ao 1C é pequena.

Esse resultado sugere que, enquanto a configuração 3C é ligeiramente superior em termos de throughput, a configuração 1C pode ser mais eficiente em relação ao SINR.



$Ns1=20, Ns2=10, Ptx=49dBm, Raio=150m$

Figura 4.19 - Throughput vs. número de usuários, Escola de Saúde do Zango Luanda, $Nu=150$.

Analisando a Figura 4.19, que mostra a relação entre o número de usuários (Nu variando de 0 a 150) e a taxa de transferência (throughput) em Gbps (variando de 0 a 80 Gbps), podemos

observar alguns padrões interessantes. A linha global (linha contínua) indica que, à medida que o número de usuários aumenta, o throughput cresce de forma linear. Isso sugere que o sistema possui uma escalabilidade direta, onde o throughput aumenta proporcionalmente ao número de usuários conectados. A linha Outdoor (linha tracejada com marcadores "x") também mostra um crescimento linear do throughput com o aumento do número de usuários em ambientes externos. Há pequena variação positiva dessa curva indicando maior throughput para os usuários outdoor comparativamente ao comportamento global.

Em relação ao comportamento Indoor (linha tracejada com marcadores "losangos"), a curva segue um padrão linear similar ao dos usuários outdoor. Apesar do throughput também crescer proporcionalmente ao número de usuários, há um declive inferior o que indica menor throughput do que os usuários outdoor.

Esse comportamento indica que, independentemente do número de global utentes no cenário, o sistema apresenta um desempenho de throughput estável e escalável com base no número de usuários conectados, o que é um aspeto positivo para a infraestrutura de rede de saúde em Luanda.

CAPÍTULO 5

5. Conclusões e Trabalhos Futuro

5.1 Conclusões

A presente dissertação teve como seu principal objetivo o planeamento de uma rede privada 5G, tendo como cenário a Escola de Saúde do Zango em Luanda.

O estudo apresentou uma avaliação abrangente do desempenho de uma rede 5G NR em um cenário específico implementado na Escola de Saúde de Luanda. A análise incluiu tanto os resultados teóricos quanto as simulações realizadas, permitindo uma visão detalhada sobre o comportamento do throughput, cobertura e eficiência do sistema.

Os resultados das simulações indicam que o throughput cresce de forma linear com o aumento do número de utilizadores, mostrando que a rede mantém um desempenho eficiente e escalável, tanto em ambientes indoor quanto outdoor. Variações na potência de transmissão e no raio de cobertura não afetam drasticamente o comportamento geral, embora o sistema demonstre uma tendência de saturação após certa potência (20W), além de uma leve degradação em cenários com alta densidade de usuários.

A configuração com agrupamento de três células (3C) mostrou-se vantajosa em termos de throughput, especialmente em cenários de alta densidade, enquanto a configuração com uma célula (1C) apresentou melhor qualidade de sinal (SINR). Esses resultados indicam que a escolha da configuração ideal dependerá dos objetivos de implementação, como priorizar maior capacidade de throughput (3C) ou uma melhor qualidade de sinal (1C).

Além disso, a modulação 16QAM mostrou-se mais eficiente em termos de cobertura, especialmente em potências mais altas, enquanto a modulação 256QAM, embora tenha menor cobertura, oferece maiores taxas de transmissão de dados.

Por fim, o estudo demonstra que o sistema 5G NR analisado é eficiente e escalável, suportando um grande número de utilizadores com uma distribuição equilibrada de recursos. O uso de múltiplas células e uma adequada gestão de parâmetros como potência e modulação podem aprimorar o desempenho em diferentes cenários, atendendo às necessidades específicas de cobertura e throughput.

5.2 Trabalho Futuro

Com base nos resultados obtidos e na análise realizada, é possível identificar várias áreas que podem ser aprofundadas ou melhoradas em trabalhos futuros. Como trabalhos futuros propomos que embora a técnica de clustering utilizada tenha mostrado melhorias no desempenho, trabalhos futuros poderiam explorar algoritmos mais avançados e dinâmicos de agrupamento, capazes de se adaptar às condições da rede em tempo real. Isso poderia otimizar ainda mais a eficiência espectral e o throughput em cenários com diferentes densidades de usuários. A simulação utilizou duas técnicas de modulação, 16QAM e 256QAM. Seria interessante explorar outras técnicas de modulação, como 64QAM e modulações de ordem ainda mais elevada, avaliando o impacto no throughput e na cobertura, especialmente em cenários de alta densidade de usuários e ambientes desafiadores, como áreas urbanas densas.

O estudo atual concentrou-se em uma rede homogênea. Uma direção promissora seria investigar o desempenho de redes heterogêneas (HetNets), combinando macrocélulas com pequenas células (small cells) para cobrir áreas densamente povoadas e melhorar a eficiência do espectro em diferentes cenários, como áreas indoor e outdoor.

Referências Bibliográficas

- [1] KEN Peffers, Tuure Tuunanen, Marcus A. Rothenberger & Samir Chatterjee (2007) A Design Science Research Methodology for Information Systems Research, *Journal of Management Information Systems*, 24:3, 45-77, DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302
- [2] SHARMA, Pankaj. Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, v. 2, n. 8, p. 47-53, ago. 2013. Disponível em: www.ijcsmc.com. Acesso em: [19/07/2024].
- [3] OLIVEIRA, Lidiano A. N.; ALENCAR, Marcelo S.; LOPES, Waslon Terllizzie A. Evolução da arquitetura de redes móveis rumo ao 5G. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação (RTIC)*, v. 8, n. 2, out. 2018.
- [4] WEI, Huan; ZHANG, Zhenfeng; FAN, Bin. Network slice access selection scheme in 5G. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, [s.d.].
- [5] LIU, Ziang; BHANDARI, Ayush; CLERCKX, Bruno. λ -MIMO: Massive MIMO via modulo sampling. *IEEE Transactions on Communications*, v. 71, n. 11, p. 6301-6316, nov. 2023.
- [6] M. Wen, Q. Li, K. J. Kim, D. López-Pérez, O. A. Dobre, H. V. Poor, P. Popovski, and T. A. Tsiftsis, "Private 5G networks: Concepts, architectures, and research landscape, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 16, no. 1, pp. 7–22, Jan. 2022.
- [7] A. Rostami, Private 5G networks for vertical industries: Deployment and operation models, Corporate Sector Research and Advance Engineering, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany. [Online]. Available: ahmad.rostami@de.bosch.com.
- [8] S. Eswaran and P. Honnavalli, Private 5G networks: a survey on enabling technologies, deployment models, use cases and research directions, *Telecommunication Systems*, vol. 82, pp. 3–26, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11235-022-00978-z>.
- [9] TACCA, Ítalo A. S.; VILAS BOAS, Evandro C.; AQUINO, Guilherme P. Aspectos de Segurança Cibernética em Redes Móveis 5G. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 40., 2022, Santa Rita do Sapucaí. Anais [...]. Santa Rita do Sapucaí: SBrT, 2022.
- [10] TELLES, André. Rede 5G: variações com aplicabilidade em IoT. São Paulo: Senac, 2024.
- [11] GHOSH, A.; MUHAMED, R.; ANDREWS, J. G. *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.
- [12] OHRTMAN, F. *WiMAX Handbook: Building 802.16 Wireless Networks*. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [13] PAREEK, D. *The Business of WiMAX*. Hoboken: Wiley, 2006.

- [14] DAHLMAN, Erik; PARKVALL, Stefan; SKOLD, Johan. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Amsterdam: Academic Press, 2018.
- [15] RODRIGUEZ, Jonathan. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Chichester: Wiley, 2015.
- [16] PENTTINEN, Jyrki T. J. *5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications*. Hoboken: Wiley, 2019.
- [17] Millimeter Wave Massive MIMO: A Paradigm for 5G de Shahid Mumtaz e Jonathan Rodriguez, que aborda tecnologias MIMO, eficiência espectral e energética no contexto do 5G.
- [18] Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency de Emil Björnson, Jakob Hoydis e Luca Sanguinetti, que discute detalhadamente o impacto de ADCs de baixa e alta resolução em sistemas M-MIMO, com foco em eficiência energética e desempenho de hardware.
- [19] STALLINGS, William. *5G: Architecture and Network Design*. Wiley, 2021.
- [20] MARSEN, Doug; CORDERO, Carlos. *Software-Defined Networking (SDN): Anatomy of OpenFlow Volume I*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.
- [21] SCHAEFER, Marcin H. *Network Function Virtualization (NFV) with a Touch of SDN: Theoretical and Practical Aspects*. Springer, 2018.
- [22] A. Correia, “Ferramentas de Simulação.” 2006.

Anexos

Anexo A

Planeamento Celular do Cenário Escola de Saúde do Zango Luanda

Neste anexo são apresentados os resultados teóricos relativos ao Planeamento Celular do Cenário Escola de Saúde do Zango Luanda. Tal como se encontra descrito na Secção 3.2, neste cenário, cada BS/AP tem 2 zonas com diferentes ritmos binários, dependendo da distância à estação de base, sendo que por isso foram utilizadas duas modulações distintas: os símbolos 256QAM possuem uma taxa de codificação (R_c) de 7/8 e o seu alcance é de 25 metros da BS, enquanto os símbolos 16QAM possuem uma $R_c=3/4$ e o seu alcance excede os 50 metros.

Utilizou-se o 5G NR com M-MIMO, em que cada setor de célula utiliza M-MIMO com $M=256$ antenas, de forma a servir $K=21$ utentes, $M/K=12$ antenas por utente, sendo utilizado o sistema TDD. Uma vez que todas as BSs e APs têm 3 setores, e que neste cenário são utilizadas 1 BS + 3 APs, logo há no total: $3 \times 4 = 12$ setores.

Considerou-se a frequência portadora (f_c)=3.6 GHz com numerologia 1, largura de banda por portadora (B_t)=50 MHz, espaçamento entre sub-portadoras (Δf)=30 KHz e OFDM com 28 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1.0 ms.

O tempo de coerência do canal (T_c) é de 25 ms, enquanto a largura de banda de coerência do canal (B_c) é de 8 MHz. É utilizado o modo *duplex* TDD, com tempo de transmissão do DL igual ao do UL mais a duração dos pilotos (τ_p).

De seguida, são apresentados mais dados necessários para a obtenção dos resultados teóricos:

$L_{path} = 43.6 + 32 \log(d)$ dB, sendo d expresso em metros; $EIRP_{TX}=24$ dBm;
 $10\log(F)=8$ dB; $M_f=13$ dB; $10\log(kT)= -174$ dBm; $G_{RX}=2$ dB; $L_{RX}=0$ dB; $T_c=25$ ms;
 $B_c=8$ MHz; $10\log\left(\frac{E_b}{N_o}\right)=5.1$ dB (256QAM); $10\log\left(\frac{E_b}{N_o}\right)=0,1$ dB (16QAM); $N_{sc}=1650$ sub-portadoras; $T_s=1$ ms.

- Cálculo da Potência do Ruído (P_n):

Para calcular a potência do ruído foi utilizada a seguinte equação:

$$\begin{aligned} 10 \log(P_n) &= 10 \log(kT) + 10 \log(F) + 10 \log(B_t) & (2) \\ 10 \log(P_n) &= -174 + 8 + 10 \log(50 \times 10^6) = -174 + 8 + 77 = -89 \text{ dBm} \end{aligned}$$

- Cálculo do Número de *bits* (N_b) e Débitos Binários (R_b):

Primeiramente, procedeu-se ao cálculo do número de *bits*, tendo-se recorrido à seguinte equação:

$$N_b = N_{\text{símbolo/trama}} \times N_{sc} \times \log_2(MQAM) \times R_c \quad (3)$$

Para a Modulação 256QAM:

$$N_{b1} = 56 \times 1650 \times \log_2(256) \times \frac{7}{8} = 56 \times 1650 \times 8 \times \frac{7}{8} = 646800 \text{ bits}$$

Para a Modulação 16QAM:

$$N_{b2} = 56 \times 1650 \times \log_2(16) \times \frac{3}{4} = 56 \times 1650 \times 4 \times \frac{3}{4} = 277200 \text{ bits}$$

De seguida, calcularam-se os respetivos débitos binários, através da seguinte equação:

$$R_b = \frac{N_b}{T_s} \quad (4)$$

Para a Modulação 256QAM:

$$R_{b1} = \frac{N_{b1}}{T_s} = \frac{646800}{1.0 \times 10^{-3}} = 646.8 \text{ Mbps}$$

Para a Modulação 16QAM:

$$R_{b2} = \frac{N_{b2}}{T_s} = \frac{277200}{1.0 \times 10^{-3}} = 277.2 \text{ Mbps}$$

- Cálculo da Relação Sinal-Ruído (SNR):

De modo a calcular a relação sinal-ruído foi utilizada a seguinte equação:

$$10 \log(SNR) = 10 \log\left(\frac{E_b}{N_o}\right) + 10 \log\left(\frac{R_b}{B_t}\right) \quad (5)$$

Para a Modulação 256QAM:

$$10 \log(SNR) = 5.1 + 10 \log\left(\frac{646.8 \times 10^6}{50 \times 10^6}\right) = 5.1 + 11.1 = 16.2 \text{ dB}$$

Para a Modulação 16QAM:

$$10 \log(SNR) = 0.1 + 10 \log\left(\frac{277.2 \times 10^6}{50 \times 10^6}\right) = 0.1 + 7.4 = 7.5 \text{ dB}$$

- Cálculo da Sensibilidade (S):

De forma a calcular a sensibilidade utilizou-se a seguinte equação:

$$10 \log(S) = 10 \log(SNR) + 10 \log(P_n) \quad (6)$$

Para a Modulação 256QAM:

$$10 \log(S) = 16.2 - 89 = -72.8 \text{ dBm}$$

Para a Modulação 16QAM:

$$10 \log(S) = 7.5 - 89 = -81.5 \text{ dBm}$$

- Cálculo da Perda de Propagação (L_{path}):

Para calcular a perda de propagação recorreu-se à seguinte equação:

$$L_{path} = EIRP_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - M_f - 10 \log(S) \quad (7)$$

Para a Modulação 256QAM:

$$L_{path1} = 24 + 2 - 0 - 13 + 72.8 = 85.8 \text{ dBm}$$

Para a Modulação 16QAM:

$$L_{path2} = 24 + 2 - 0 - 13 + 81.5 = 94.5 \text{ dBm}$$

- Cálculo do raio de cobertura no interior (*indoor*) dos edifícios:

Para calcular o raio de cobertura no interior (*indoor*) dos edifícios foi utilizada a seguinte equação:

$$L_{path} = 43.6 + 32 \log(d) \text{ dB, sendo } d \text{ expresso em metros} \quad (8)$$

Para a Modulação 256QAM:

$$L_{path} = L_{path1} \Leftrightarrow 43.6 + 32 \log(d) = 85.8 \Rightarrow d_1 = 10^{\frac{(85.8-43.6)}{32}} = 20.8 \text{ m}$$

Para a Modulação 16QAM:

$$L_{path} = L_{path2} \Leftrightarrow 43.6 + 32 \log(d) = 94.5 \Rightarrow d_1 = 10^{\frac{(94.5-43.6)}{32}} = 38.9 \text{ m}$$

- Análise da Capacidade do M-MIMO no cenário *Indoor* da Escola de Saúde:

Primeiramente, calculou-se o número máximo de símbolos para transmitir no canal com M-MIMO (τ_c), através da seguinte equação:

$$\tau_c = B_c \times T_c \quad (9)$$

$$\tau_c = 8 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3} = 200000 \text{ símbolos}$$

Considerando que $\tau_p=K=21$, obtém-se que:

- No DL: $N_s = \frac{\tau_c}{2} = \frac{200000}{2} = 100000$ símbolos transmitidos em cada T_c
- No UL: $N_s = \frac{\tau_c}{2} - \tau_p = \frac{200000}{2} - 21 = 99979$ símbolos transmitidos em cada T_c

De seguida, calculou-se a taxa de símbolos no DL (R_s), utilizando a seguinte equação:

$$R_s = \frac{N_s}{T_c} \quad (10)$$

$$R_s = \frac{1 \times 10^5}{25 \times 10^{-3}} = 4 \times 10^6 \text{ sps em cada } B_c$$

- Caso da Numerologia 1, onde (B_t)=50 MHz:

De forma a calcular a taxa de símbolos total na rede (R_{st}), recorre-se à seguinte equação:

$$R_{st} = \frac{B_t}{B_c} \times R_s \quad (11)$$

$$R_{st} = \frac{50 \times 10^6}{8 \times 10^6} \times 4 \times 10^6 = 2.5 \times 10^7 \text{ sps}$$

De seguida, calculou-se a taxa de símbolos e a área de cada uma das zonas (1 e 2), através das equações (11), (12) e (13), respetivamente:

$$R_{stn} = R_{st} \times R_c \quad (12)$$

$$A_1 = \pi \times d_1^2 \quad (13)$$

$$A_2 = \pi \times (d_2^2 - d_1^2) \quad (14)$$

Para a Zona 1, com $R_c = 7/8$ (256QAM), obtém-se que:

$$R_{st1} = 2.5 \times 10^7 \times \frac{7}{8} = 2.2 \times 10^7 \text{ sps}$$

$$A_1 = \pi \times (20.8)^2 = 1.4 \times 10^3 \text{ m}^2$$

Para a Zona 2, com $R_c = 3/4$ (16QAM), obtém-se que:

$$R_{st2} = 2.5 \times 10^7 \times \frac{3}{4} = 1.9 \times 10^7 \text{ sps}$$

$$A_2 = \pi \times (38.9^2 - 20.8^2) = 3.4 \times 10^3 \text{ m}^2$$

Depois, calculou-se a taxa de símbolos por setor (R_{sc}) para as zonas 1 e 2, considerando que em cada setor da célula há $K=21$ pedestres/setor:

$$A_T = \pi \times d_2^2 \quad (15)$$

$$R_{sc1} = R_{st1} \times K \times \left(\frac{A_1}{A_T} \right) \quad (16)$$

$$R_{sc2} = R_{st2} \times K \times \left(\frac{A_2}{A_T} \right) \quad (17)$$

Para a Zona 1:

$$R_{sc1} = 2.2 \times 10^7 \times 21 \times \left(\frac{1.4 \times 10^3}{\pi \times 38.9^2} \right) = 1.3 \times 10^8 \text{ sps}$$

Para a Zona 2:

$$R_{sc2} = 1.9 \times 10^7 \times 21 \times \left(\frac{3.4 \times 10^3}{\pi \times 38.9^2} \right) = 2.8 \times 10^8 \text{ sps}$$

A partir da taxa de símbolos por setor de cada uma das zonas já é possível obter o ritmo binário por setor (R_{bc}) de cada uma delas, através da seguinte equação:

$$R_{bc} = R_{sc} \times N_{bits/símbolo} \quad (18)$$

Para a Zona 1:

$$R_{bc1} = 1.3 \times 10^8 \times 8 = 105.4 \times 10^7 \text{ bps}; (8 \text{ bits/símbolo})$$

Para a Zona 2:

$$R_{bc2} = 2.8 \times 10^8 \times 4 = 112.3 \times 10^7 \text{ bps}; (4 \text{ bits/símbolo})$$

Já, o ritmo binário total por setor (R_{bc}) é obtido a partir da seguinte equação:

$$R_{bc} = R_{bc1} + R_{bc2} \quad (19)$$

$$R_{bc} = 105.4 \times 10^7 + 112.3 \times 10^7 = 217.7 \times 10^7 \text{ bps}$$

- Cálculo da Eficiência Espectral (ϵ):

Para calcular a eficiência espectral recorreu-se à seguinte equação:

$$\epsilon = \frac{R_{bc}}{B_t} \quad (20)$$

$$\epsilon = \frac{217.7 \times 10^7}{50 \times 10^6} = 43.5 \text{ bps/Hz/setor}$$

- Cálculo da Eficiência Espectral por Utilizador (ϵ_K):

A eficiência espectral por utilizador é calculada através da seguinte equação:

$$\epsilon_K = \frac{\epsilon}{K} \quad (21)$$

$$\epsilon = \frac{43.5}{21} = 2.1 \text{ bps/Hz/pedestre}$$

- Cálculo do *Throughput*:

Tendo em conta que no interior do cenário há no total 12 setores, o *throughput* total é obtido através da seguinte equação:

$$\textit{Throughput} = R_{bc} \times 12 \quad (22)$$

$$\textit{Throughput} = 217.7 \times 10^7 \times 12 = 26.1 \text{ Gbps}$$