



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Planeamento e Otimização de Redes 5G

Evódia Eunice Monteiro Medina

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Prof. Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,
ISCTE-IUL

Outubro, 2023



TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação

Planeamento e Otimização de Redes 5G

Evódia Eunice Monteiro Medina

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Prof. Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,
ISCTE-IUL

Outubro, 2023

Agradecimentos

Gostaria de começar expressando a minha profunda gratidão à minha família, com um agradecimento especial à minha mãe, Maria Monteiro, por todo o apoio inabalável e incentivo ao longo desta jornada. Ao meu pai, Manuel Medina, as minhas irmãs e ao meu irmão, agradeço por todo o incentivo e apoio que me proporcionaram.

Quero também estender o meu sincero reconhecimento ao meu namorado Silvio, que esteve ao meu lado durante todo este processo, obrigada pelo encorajamento constante e pelo apoio incondicional.

Ao Professor Américo Correia, expresso minha gratidão por ter aceitado ser meu orientador, pela sugestão do tema, por toda a disponibilidade, orientação e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao longo desta jornada, aprendi que nunca devemos desistir dos nossos objetivos.

A todos vós, expresso a minha mais profunda gratidão.

Obrigada por fazerem parte desta conquista!

Resumo

Nos últimos anos, as redes móveis evoluíram substancialmente, tornando-se um componente essencial da vida cotidiana. O 5G surge como resposta às crescentes demandas por conectividade, inovação e eficiência, trazendo consigo desafios que requerem um planejamento detalhado e uma análise cuidadosa de desempenho.

Neste contexto, surge a necessidade de planejar as redes 5G, tendo em conta as particularidades desta geração e eliminando as limitações da geração anterior. Para abordar essa necessidade, esta dissertação concentra-se no planejamento e análise de desempenho de um sistema 5G NR em um ambiente de estádio, considerando dois cenários (Std e Std3D), caracterizados por uma elevada densidade de utilizadores, com ênfase na busca por soluções eficazes para enfrentar os desafios da interferência e otimizar a qualidade da comunicação.

A análise concentrou-se no desempenho do sistema, avaliando o *throughput* e a cobertura, variando parâmetros como o número de utilizadores, modulação (16QAM e 256QAM), arquiteturas de antenas de grande escala, incluindo sistemas M-MIMO. Foram utilizadas frequências portadoras de 3.5 GHz e 28 GHz, correspondentes às numerologias 1 e 2 do 5G NR.

Foi desenvolvido e atualizado um simulador de sistema para implementar o ambiente de estádio considerando os dois cenários. Além disso, o estudo incluiu o planejamento celular teórico de um dos cenários implementados.

Os resultados indicam que a introdução da estratégia de *clustering* proporcionou melhorias significativas no desempenho, com ênfase no *clustering* 3C, que reduziu a interferência. A modulação 16QAM demonstrou uma cobertura superior à 256QAM. A numerologia 2 superou a numerologia 1 tanto em *throughput* quanto em cobertura.

Palavras-Chave: 5G NR; Simulação a Nível de Sistema; Planejamento de redes; *Clustering*; Modulação; Frequência Portadora.

Abstract

In recent years, mobile networks have evolved substantially, becoming an essential component of everyday life. 5G comes as a response to the growing demands for connectivity, innovation, and efficiency, bringing with it challenges that require detailed planning and careful performance analysis.

In this context, there is a need to plan 5G networks, considering the particularities of this generation and eliminating the limitations of the previous generation. To address this need, this thesis focuses on the planning and performance analysis of a 5G NR system in a stadium environment, considering two scenarios (Std and Std3D), characterized by a high density of users, with emphasis on the search for effective solutions to face the challenges of interference and optimize the quality of communication.

The analysis focused on system performance, evaluating throughput and coverage, varying parameters such as number of users, modulation (16QAM and 256QAM), large-scale antenna architectures, including M-MIMO systems. Carrier frequencies of 3.5 GHz and 28 GHz were used, corresponding to numerologies 1 and 2 of 5G NR.

A system simulator was developed and updated to implement the stadium environment considering both scenarios. In addition, the study included theoretical cellular planning of one of the implemented scenarios.

The results indicate that the introduction of the clustering strategy provided significant improvements in performance, with emphasis on 3C clustering, which reduced interference. 16QAM modulation demonstrated superior coverage to 256QAM. Numerology 2 surpassed numerology 1 in both throughput and coverage.

Keywords: 5G NR; System Level Simulation; Network Planning; Clustering; Modulation; Carrier Frequency.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Glossário de Siglas e Abreviaturas	xv
CAPÍTULO 1	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Questões de Investigação.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Método de Investigação.....	2
1.5 Estrutura e Organização da Dissertação	3
CAPÍTULO 2	5
Revisão de Literatura.....	5
2.1. Evolução das Redes Móveis	5
2.2. A Quinta Geração das Redes Móveis	5
2.3. Peculiaridades da Rede 5G Relativamente à Geração Atual 4G.	6
2.4. Arquitetura da Rede 5G.....	9
2.4.1. Tipificação da Arquitetura 5G.....	9
2.4.2. Diferenças Técnicas entre 5G SA e 5G NSA.....	10
2.4.3. Diferenças da Arquitetura 4G	11
2.5. Tecnologias que Garantem o Suporte aos Serviços e Aplicações.....	12
2.5.1. Fatiamento de Rede - Network Slicing	12
2.5.2. Ondas Milimétricas	13
2.5.3. Sistemas M-MIMO	14
2.5.4. Formatação de Feixe – Beamforming	15
2.5.5. Espectro.....	16
2.6. Redes Privadas 5G.....	17
2.6.1. Modos de Implementação	18
2.6.2. Opções de Alocação de Espectro para 5G Privado	21
2.6.3. Tecnologias Facilitadoras para a Implantação de Redes Privadas 5G.....	24
2.7. Otimização.....	28
2.7.1. Principais KPIs a considerar na Otimização 5G NR RAN	28

2.7.2. Técnicas de Otimização de Cobertura.....	28
CAPÍTULO 3	31
Simulador de Sistema	31
3.1. Descrição do Simulador de Sistema	31
3.2. Cenários de Implementação.....	33
CAPÍTULO 4	37
Resultados e Discussão.....	37
4.1. Resultados Teóricos.....	37
4.2. Resultados das Simulações	37
4.2.1. Resultados de <i>Throughput</i>	38
4.2.2. Resultados de Cobertura.....	44
CAPÍTULO 5	47
Conclusões e Trabalho Futuro	47
5.1. Conclusões.....	47
5.2. Trabalho Futuro	49
Referências Bibliográficas	51
Anexos.....	55
Anexo A.....	55
Planeamento Celular do Cenário Std.....	55

Índice de Figuras

Figura 1.1 Diagrama do método de investigação [1]	3
Figura 2.1 - Previsão da capacidade de dispositivos vs tráfego esperado em 2023 [4]	6
Figura 2.2 - Principais categorias de serviços do 5G [9]	8
Figura 2.3 - Arquitetura Core 5G [8]	9
Figura 2.4 - Arquitetura de rede 5G NSA vs 5G SA [8]	10
Figura 2.5 - Fatiamento da Rede 5G [12]	12
Figura 2.6 - Sistema M-MIMO - <i>Uplink</i> e <i>Downlink</i> M-MIMO [18]	15
Figura 2.7 - Técnica de beamforming em 5G comparado ao 4G [21]	16
Figura 2.8 - Capacidade vs Cobertura considerando o espectro por categoria [8]	17
Figura 2.9- Implementação autónoma [23]	19
Figura 2.10 - Implementação com RAN partilhada [23]	20
Figura 2.11 - Implementação com RAN partilhada e plano de controle [23]	20
Figura 2.12 - Implementação hospedada pela rede pública [23]	21
Figura 2.13 - Integração de sistemas 5G e TSN.[33]	27
Figura 2.14 - Tipos de Small Cell [36]	29
Figura 3.1 - Relação entre os simuladores de nível de sistema e de ligação [37]	32
Figura 3.2 - Fases da simulação [37]	32
Figura 3.3 - Representação gráfica do cenário Std	34
Figura 3.4 - Representação gráfica do cenário Std3D	35
Figura 4.1- <i>Throughput</i> vs. Número de Utilizadores, cenário Std, cluster RAN 1C e 3C. 38	
Figura 4.2 - <i>Throughput</i> vs. Número de Utilizadores, cenário Std 3D, cluster RAN 1C e 3C.	39
Figura 4.3 - <i>Throughput</i> vs Potência, cenário Std, cluster RAN 1C e 3C	41
Figura 4.4 - <i>Throughput</i> vs Potência, cenário Std3D, cluster RAN 1C e 3C	42
Figura 4.5 - Taxa média de <i>Throughout</i> vs Tempo para o cenário Std e Std3D para a frequência portadora de 28GHz	43
Figura 4.6 - Taxa média de <i>Throughout</i> vs Tempo para o cenário Std e Std3D para a frequência portadora de 3.5GHz	43
Figura 4.7 - Cobertura vs Potência, cenário Std, cluster 1C e 3C	44
Figura 4.8 - Cobertura vs Potência, cenário Std3D, cluster 1C e 3C.	45

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais diferenças técnicas entre as redes 5G e 4G	7
Tabela 2.2 - Opções de implementação e espectro para redes privadas 5G - Adaptada de [23]	23
Tabela 3.1 - Características globais do simulador.....	31
Tabela 3.2 - Parâmetros de configuração para o cenário Std e Std3D	34
Tabela 4.1 - Parâmetros considerados para planejamento teórico do cenário Std.	56

Glossário de Siglas e Abreviaturas

1G – *Primeira Geração*

2G – *Segunda Geração*

3D – *Três Dimensões*

3G – *Terceira Geração*

3GPP – *Third Generation Partnership Project*

4G – *Quarta Geração*

5G – *Quinta Geração*

AoA – *Azimuth Angle of Arrival*

BBU – *Unidade de Banda de Base*

BER – *Bit Error Rate*

BLER – *Block Error Rate*

BS – *Base Station*

CUPS -*Control Plane – User Plane Separation*

C-RAN – *Cloud Radio Access Network*

D2D – *Device-to-Device*

DL – *Downlink*

EE – *Energy Efficiency*

eNB – *Evolved Node B*

eMBB – *enhanced Mobile Broadband*

E-UTRA – *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*

E-UTRAN – *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network;*

EPC – *Evolved Packet Core*

FDD – *Frequency Division Duplex*

FD-MIMO – *Full Dimension MIMO*

FR – *Frequency Range*

gNB – *Fifth Generation NodeB*

IMT– *International Mobile Telecommunications*

IoT – *Internet of Things*

ITU – *International Telecommunication Union*

KPI – *Key Performance Indicators*

LTE – *Long Term Evolution*

MME – *Mobility Management Entity*
MIMO – *Multiple-Input-Multiple-Output*
M-MIMO – *Massive MIMO*
mMTC – *massive Machine Type Communications*
mmWave – *millimeter Wave*
M-QAM – *M-ary Quadrature Amplitude Modulation*
NFV – *Network Function Virtualization*
NPN – *Non-Public Networks*
NR – *New Radio*
NSA – *Non-Standalone*
QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*
QoS – *Quality of Service*
RAN – *Radio Access Network*
RF – *Radio Frequency*
RRU – *Remote Radio Unit*
SA – *Standalone*
SDN – *Software Defined Networks*
SE – *Spectral Efficiency*
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*
TBS – *Transport Block Size*
TDD – *Time Division Duplexing*
TRP – *Transmission Reception Point*
TTI – *Transmission Time Interval*
UE – *User Equipment*
UL – *Uplink*
URLLC – *Ultra-Reliable Low Latency Communications*

CAPÍTULO 1

Introdução

Neste capítulo faz-se uma breve descrição do tema da dissertação apresentando os objetivos, motivação, enquadramento e respectivas questões de investigação. São também, definidos e detalhados o processo de investigação aplicado para a elaboração da dissertação.

1.1 Enquadramento e Motivação

A rápida evolução das redes de comunicação móvel nas últimas décadas tem transformado profundamente a forma como interagimos com o mundo digital. Desde a introdução das redes de segunda geração (2G), as comunicações sem fio têm desempenhado um papel fundamental em nossas vidas diárias. No entanto, a crescente demanda por largura de banda, o aumento do número de dispositivos conectados e as novas aplicações emergentes pressionaram os limites das redes de quarta geração (4G), tornando imperativa a transição para a quinta geração: o 5G.

Contudo, o 5G não é apenas uma extensão natural das gerações anteriores, ele representa uma mudança de paradigma. As redes 5G são projetadas para serem altamente flexíveis e capazes de suportar uma variedade de casos de uso, desde comunicações em alta velocidade até aplicações de *Internet of Things* (IoT) com baixa latência e alta confiabilidade.

A necessidade de uma rede 5G é evidente em vários contextos, visto que possui peculiaridade relativamente à geração anterior 4G. O 4G visa alguns objetivos essenciais que são muito difíceis de alcançar, como oferecer taxas de dados muito altas para utilizadores em movimento de alta velocidade ou garantir ao utilizador um *handover* sem interrupção. Enquanto o 5G, apresenta alta quantificação e conceção no que diz respeito a uma gama mais alargada de parâmetros do que tradicionalmente tem sido utilizado, para suportar os serviços e os casos críticos de desempenho das redes, levando a mudanças profundas. Em princípio tudo pode ser otimizado, tanto nos princípios de conceção como na gestão da rede, que precisam de ter em conta a atribuição de recursos dependentes de tempo ou de carga.

Neste caso, surge a necessidade de fazer o planeamento desta nova geração de rede, definir as técnicas e parâmetros mais eficientes a utilizar, compreender os desafios e otimizar o desempenho tanto a nível de *throughput* como de cobertura, especialmente em cenários complexos com alta densidade de dispositivos, como em estádios, na qual vai ser analisada e estudada na presente dissertação.

1.2 Questões de Investigação

A presente dissertação responde as seguintes questões de investigação:

- Q1) Quais as peculiaridades da rede 5G relativamente à geração atual 4G?
- Q2) Quais são os requisitos de implementação da rede 5G relativamente a nova arquitetura da rede capaz de fazer face às os desafios do 4G?
- Q3) Como o 5G garante o suporte para os diversos serviços?

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho passa por efetuar o planeamento celular de uma rede 5G NR aplicado em ambiente de estádio desportivo, com uma ênfase especial na avaliação do desempenho do sistema a nível de *throughput* e cobertura. Deste modo, a avaliação do desempenho será feita através de um simulador implementado em JAVA, adaptado para o ambiente em estudo.

Esta dissertação também analisa as diferenças em termos de planeamento e otimização da rede da quinta geração(5G) relativamente à geração anterior (4G), fazendo uma abordagem sintetizada das características da rede, funcionalidades e diferenças da geração anterior na introdução de novos recursos.

1.4 Método de Investigação

Esta dissertação adota a metodologia de pesquisa em *Design Science* (DSRM) [1], com ênfase na abordagem do problema, considerando a necessidade de planeamento de redes 5G NR diante das limitações da geração anterior.

Este modelo consiste numa sequência de seis etapas em que o primeiro consiste na identificação e motivação do problema de análise. A segunda etapa, definição dos objetivos da solução e, na terceira, o desenho e desenvolvimento da solução, representado em contexto da dissertação, como sendo, o planeamento celular de redes 5G NR para o estádio, na qual, procedeu-se a adaptação do simulador de sistema, incluindo a configuração específica para cada cenário em análise.

A quarta etapa consiste na demonstração, que corresponde às simulações realizadas através do software utilizado. A quinta etapa consiste na avaliação dos resultados obtidos através das simulações, na qual é realizada uma análise do desempenho da rede, de forma a determinar se esta é ou não funcional para o problema que propusemos resolver. Por último, a sexta etapa, consiste na comunicação dos resultados obtidos, que no presente caso, corresponde esta dissertação.

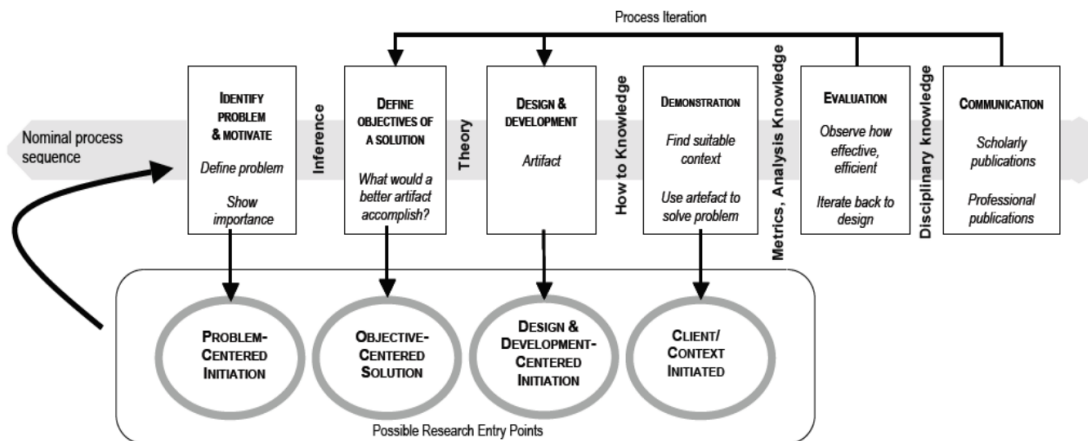


Figura 1.1 Diagrama do método de investigação [1]

1.5 Estrutura e Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, cada um desempenhando um papel específico na apresentação do estudo realizado e dos resultados obtidos.

No primeiro capítulo retrata o enquadramento e a motivação, bem como os objetivos e as questões de investigação. O segundo capítulo concentra-se na revisão da literatura relacionada ao planeamento das redes 5G NR e às limitações da geração anterior. Na qual, são apresentados os conceitos fundamentais, as tecnologias envolvidas e as abordagens existentes. O terceiro capítulo detalha a descrição do simulador de sistema utilizado, descreve as características, bem como a descrição e configuração dos cenários implementados. O quarto capítulo apresenta os resultados teóricos e das simulações. Além disso, é feita a discussão e a análise do desempenho do sistema. O quinto e último capítulo apresenta as principais conclusões com base nos resultados obtidos, bem como possíveis direções para trabalhos futuros.

Revisão de Literatura

Este capítulo destina-se a apresentar a revisão de literatura relacionado ao planeamento das redes 5G NR, apresentando as principais técnicas que visam resolver as limitações da geração anterior.

2.1. Evolução das Redes Móveis

As comunicações percorreram um longo caminho desde a primeira geração de telefonia móvel (1G), que era baseada na transmissão analógica de sinais de rádio, depois surgiram as versões digitais 2G, 3G, 4G e 5G. A necessidade de taxas de dados mais altas, maior fluxo, alta eficiência espectral, arquitetura de rede mais simples, bem como um grande número de serviços exigidos pelos utilizadores levou ao desenvolvimento de novas tecnologias [2].

As redes 1G trouxeram mobilidade aos serviços de voz analógicos. As redes móveis de primeira geração (1G) eram bastante limitadas em termos de oferta de serviços, tendo sido desenvolvidas no início dos anos 80. Nas redes móveis 1G o único serviço existente era o de voz.

As redes 2G trouxeram os serviços digitais de voz e serviços de dados básicos (SMS, Fax). O recurso à codificação digital da voz e às técnicas de modulação digitais permitiram um aumento da eficiência espectral três vezes maior do que nas redes analógicas de 1G. E dada a normalização dos padrões, com a 2G passou a ser possível efetuar roaming internacional, e tornou-se possível a disponibilização de um conjunto de serviços de voz e dados.

As redes 3G, a terceira geração da tecnologia móvel, está baseada em multimédia e é normalizada em 1999. Trouxeram uma melhor experiência de internet móvel, desencadeando o sucesso dos ecossistemas das aplicações móveis.

As redes 4G trouxeram os serviços baseados em IP (Voz e Dados), uma experiência de internet de banda larga rápida, com protocolos e arquiteturas de redes unificadas, e velocidade de dados superior.

2.2. A Quinta Geração das Redes Móveis

A crescente necessidade de redes sem fio mais robustas é motivada pelo crescente uso de serviços móveis multimídia, resultando em uma demanda cada vez maior por tráfego de dados.

A necessidade de maior conectividade através de redes sem fios é impulsionada pelo aumento do número de serviços móveis multimédia e levou a um aumento exponencial da procura de

tráfego de dados. De acordo com pesquisas conduzidas pela Ericsson espera-se que o tráfego de dados móveis cresça aproximadamente 43% ao ano, chegando a 107 Exabytes (EB) por mês até o final de 2023. A Figura 2.1 ilustra esse aumento previsto no número de dispositivos e tráfego para 2023 [3], [4].

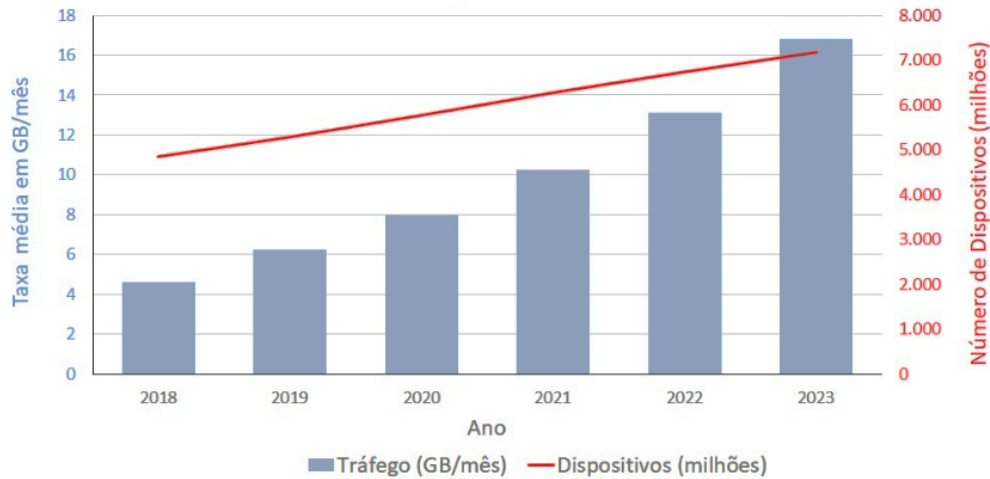


Figura 2.1 – Previsão da capacidade de dispositivos vs tráfego esperado em 2023 [4]

As novas aplicações tais como *Internet of Things* (IoT), comunicação *Device-to-Device* (D2D), *e-healthcare*, comunicação *Machine-to-Machine* (M2M) e principalmente o *streaming* de vídeo estão na origem da crescente utilização dos recursos das redes móveis. Com o crescimento acentuado da utilização destas aplicações faz com que seja preciso novos requisitos das redes móveis, tais como latência inferior a 1 ms, taxa média por utilizador de 10 Gbit/s, fiabilidade para comunicações críticas.

As redes de quarta geração (4G), também conhecidas como *Long-Term Evolution* (LTE), devido às limitações da tecnologia e do tipo de arquitetura não conseguem atingir estes requisitos. Com o objetivo de satisfazer estas exigências, a rede móvel foi redesenhada de modo a contornar as limitações das redes 4G. Tal como as gerações anteriores, a rede 4G incorporou algumas características da 3G, aumentando a capacidade e o débito através da utilização de uma melhor interface rádio e melhorias na core da rede, designado por *Evolved Packet Core* (EPC), porém essas melhorias não foram suficientes para satisfazer os desafios do 4G [5].

2.3. Peculiaridades da Rede 5G Relativamente à Geração Atual 4G.

A rede 5G, foi desenvolvida para satisfazer os requisitos IMT-2020 [5] definidos pela especificação ITU-R M.2083, utiliza uma nova arquitetura de rede e um sistema de rádio que fornece largura de banda de alta capacidade, baixa latência, melhor QoS e conectividade massiva entre utilizadores, objetos e sensores face a geração anterior.

O 5G difere das gerações anteriores porque a velocidade de transmissão não é a única razão que impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias. Surge como uma revolução dos sistemas de comunicações móveis. Quebrando o paradigma evolutivo da primeira (1G) à quarta geração (4G), que manteve o foco na comunicação entre pessoas e na melhoria da qualidade de serviço (QoS). O Relatório Making 5G NR a reality (2016) produzido pela Qualcomm, define o 5G como uma plataforma para inovações que redefinirá uma ampla gama de indústrias conectando virtualmente todos e tudo, desde trabalhadores e pacientes até robôs, suportando as necessidades de conectividade em diversos casos de uso que mudam o mundo. O 5G reúne o mundo das pessoas para alcançar novos níveis de eficiência que beneficiam toda a sociedade [6].

A tabela 2.1 apresenta um resumo das principais diferenças técnicas do 5G que o diferenciam do 4G e o tornam uma tecnologia versátil e adequada para uma ampla gama de aplicações e setores.

Tabela 2.1 - Principais diferenças técnicas entre as redes 5G e 4G

Características	4G	5G
Velocidade	100 Mbps	10 Gbps
Latência por utilizador	10 ms	1 ms
Dispositivos conectados	100 mil dispositivos/km ²	1 milhão dispositivos/km ²
Implementação	Difícil e complexa	Mais simples.
Tempo de resposta	Rápido, mas considerado lento em comparação com o 5G	Cerca de 5 vezes mais rápido do que o 4G
Consumo energético	Alto consumo de energia	Economiza energia em quase 90%
Utilização de bateria	Consumo elevado	Gera poupanças de até 10% na utilização da bateria

O 5G é um sistema projetado para atender aos requisitos do IMT-2020 [5], definidos pela especificação ITU-R e fornece recursos mais avançados em comparação com o 4G. De acordo com a classificação apresentada pela *International Telecommunication Union* (ITU) as três principais categorias que as redes 5G pretendem satisfazer são os seguintes [7], [8]:

Enhanced Mobile Broadband (eMBB): serviços que requerem altas velocidades de transmissão para uma vasta área de cobertura, tais como vídeo de alta-definição, jogos imersivos etc. Esse cenário abrange diversos tipos de casos, incluindo coberturas a grandes áreas ou localidades com diferentes requisitos de desempenho. No caso de uma cobertura localizada, ou seja, alta densidade de utilizadores, é exigida uma alta capacidade de tráfego de dados enquanto a necessidade de mobilidade é baixa. Por outro lado, no caso de grandes áreas de cobertura é desejada uma capacidade de mobilidade média a alta com um requisito de taxa de transferência de dados por utilizador superior aos padrões atuais, mas provavelmente, inferiores ao exigido no caso de cobertura localizada. Na prática, o objetivo do serviço eMBB é maximizar a taxa de dados, de forma a garantir uma confiabilidade moderada.

Ultra-Reliable and Low Latency communications (URLL): visa atender aplicações para as quais são exigidos baixos valores de latência para as redes. A URLL possui requisitos de qualidade de serviço bastante rigorosos, tais como latência e disponibilidade, na qual, o principal requisito é garantir um alto nível de confiabilidade. Nesta categoria é levada em consideração aplicações como por exemplo, controle de robôs, realidade aumentada, veículos autónomos, segurança no trânsito, cirurgia remota.

Massive Machine Type Communications (mMTC): é caracterizado por um elevado número de dispositivos conectados transmitindo um volume de dados relativamente pequeno e não sensível a atraso, diz respeito a quantidade de dispositivos conectados para os quais são exigidos uma duração de bateria prolongada e um custo reduzido para implementação. Também se consideram os cenários como por exemplo *smart cities* e redes de sensores sem fios para agricultura. O objetivo do mMTC é maximizar a taxa de chegada que pode ser suportada em um determinado recurso de rádio.

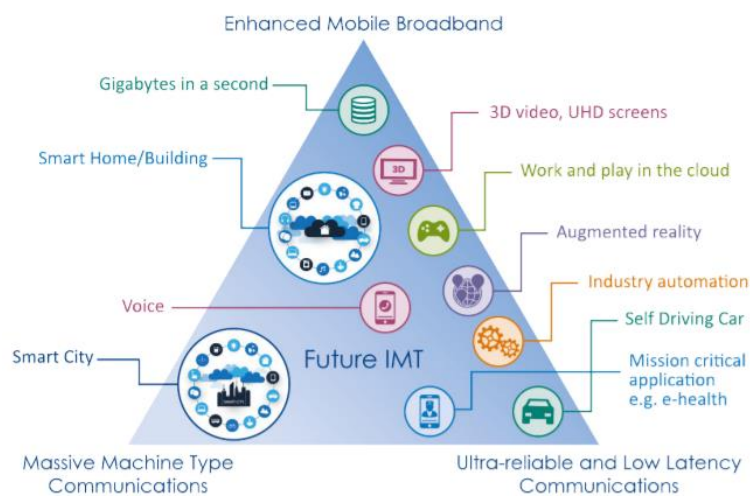


Figura 2.2 - Principais categorias de serviços do 5G [9]

2.4. Arquitetura da Rede 5G

A arquitetura 5G, embora compatível com a 4G, é redesenhada para atender a desafios como baixa latência e conectividade massiva. Ela oferece uma arquitetura flexível e escalável, coexistindo com LTE e Wi-Fi. A separação entre plano de utilizador e de controle é essencial, e a softwarização da rede proporciona flexibilidade, programabilidade e escalabilidade.

Os componentes do núcleo 5G e da rede de acesso são descritos da seguinte forma [4]:

Rede Core - a rede core 5G adota uma separação entre o plano do utilizador e o plano de controle, chamada de *Control and User Plane Separation (CUPS)* introduzida no *Release 14* do 3GPP, conforme representado na Figura 2.3. Isso permite escalabilidade mais eficiente à medida que o tráfego aumenta, bem como evolução independente dos planos. A função UPF desacopla o controle de *gateway* de pacotes e UPFs, enquanto a função AMF agrega funções de gerenciamento de sessão.

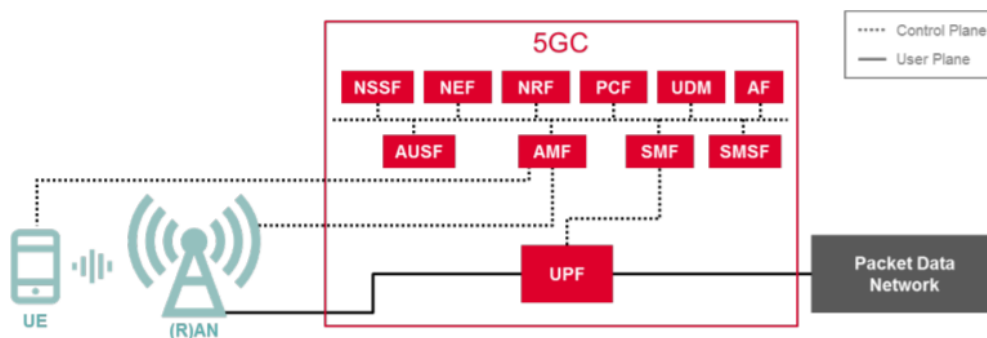


Figura 2.3 - Arquitetura Core 5G [8]

Rede Acesso - na rede de acesso 5G, a interface de rádio 5G NR oferece flexibilidade e suporte a diversas frequências, incluindo ondas milimétricas (acima de 24 GHz), banda C e frequências abaixo de 3 GHz, para altas taxas de transmissão e cobertura em camadas.

2.4.1. Tipificação da Arquitetura 5G

O 5G suporta dois tipos de arquitetura de rede:

- *Non-Standalone (NSA)*
- *Standalone (SA)*

A arquitetura NSA também é chamada de "*E-UTRA - NR Dual Connectivity (EN-DC)*" ou "Opções de arquitetura 3", prevê coexistência harmônica entre o 5G NR e LTE pois implica uso da rede de acesso de rádio 4G existente junto com o 5G NR.

Entretanto, no cenário NSA, a estação base 5G NR é combinada com a estação LTE por meio da dupla conectividade, esta funcionalidade permite a ligação simultânea de um dispositivo móvel em ambas as tecnologias. Pode também ligar-se no plano de controlo em LTE e no plano do utilizador em 5G NR. A NSA permite que as operadoras aproveitem seus investimentos da rede 4G em vez de implementar um novo núcleo para 5G combinando redes de acesso 4G e 5G com as redes core LTE. O 5G Radio Access Network (RAN) pode ser implantado e suportado pelo *Evolved Packet Core* (EPC) existente [8], [10].

Este modo permite uma conectividade dupla o que significa que pode se conectar o UE a dois NBs. Neste caso, o eNB é o principal e o gNB é secundário. Com base nas informações apropriadas que a E-UTRAN recebe do MME para o UE, bem como dados de configuração local determina se a conectividade dupla será usada para esse UE. A parte de acesso de rádio LTE da rede permitirá todo o controle de funcionalidade e o NR será o nó secundário [4].

Relativamente a arquitetura SA, as estações base 5G NR ou LTE são utilizadas para o plano de controle assim como para o plano do utilizador e a rede core tem apenas uma tecnologia. A opção SA é a solução mais simples para permitir que as operadoras implementem uma rede independente, realizando *handover* entre as redes 4G e 5G de forma a prover continuidade no serviço, a sua arquitetura tem a vantagem definitiva de garantir alta velocidade e garantia de serviço de ponta a ponta, no entanto, isso significa investimento adicional e complexidades de executar vários núcleos na rede. A Figura 2.4 representa os dois tipos de arquitetura do 5G.

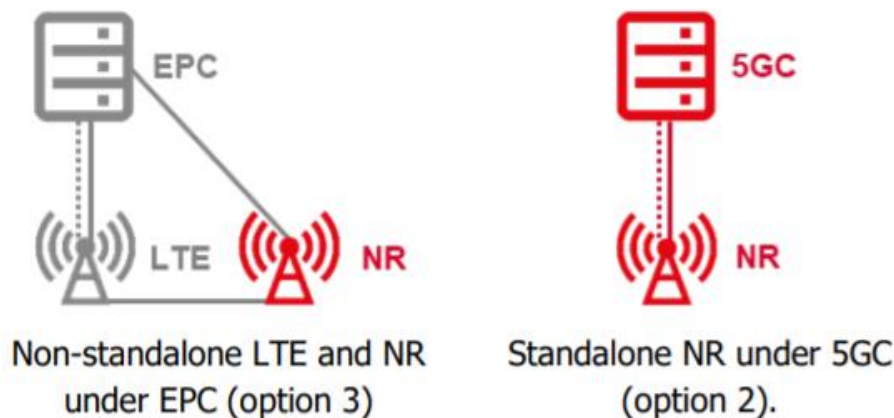


Figura 2.4 – Arquitetura de rede 5G NSA vs 5G SA [8]

2.4.2. Diferenças Técnicas entre 5G SA e 5G NSA

A principal diferença entre NSA e SA é que a NSA fornece sinalização de controle de 5G para a estação base 4G, enquanto na SA a estação base 5G está diretamente conectada à rede central 5G e a sinalização de controle não depende da rede 4G.

Os benefícios dessas duas arquiteturas incluem [8], [10]:

- 5G-NSA é uma atualização de baixo custo do núcleo em comparação com um núcleo 5G necessário para 5G-SA.
- O 5G-NSA facilita as implantações de rede 5G, pois reutiliza as instalações 4G existentes, permitindo assim um rápido tempo de comercialização.
- Com a NSA, a implantação é mais rápida o tempo de lançamento no mercado é menor, uma vez que os locais 4G podem ser utilizados para instalar rádio 5G.
- A SA requer a construção de estações base 5G e a rede principal 5G de *backend* para realizar as características e funções do 5G. O SA envolve um núcleo 5G com arquitetura *Service Based Architecture* (SBA) para escalabilidade e flexibilidade para fornecer uma rede super-rápida com latência ultrabaixa para casos de uso do 5G.

2.4.3. Diferenças da Arquitetura 4G

A mudança da arquitetura 4G para o 5G traz uma série de alterações essenciais, especialmente no núcleo da rede, que são fundamentais para a evolução das redes móveis. Estas mudanças incluem a migração para frequências de ondas milimétricas, a implementação de MIMO massivo e a introdução do conceito de fatiamento de rede, que serão detalhados na secção 2.5.

Uma das mudanças mais marcantes é a diferença substancial entre o núcleo da rede 4G, conhecido como *Evolved Packet Core* (EPC), e o núcleo da rede 5G. O 5G core adota abordagens inovadoras, como virtualização e design nativo de software em nuvem, o que representa um avanço significativo em relação ao EPC do 4G.

Algumas das distinções notáveis entre o núcleo do 5G e seu predecessor 4G incluem a Função do Plano do Utilizador (UPF) que o 5G introduz, a UPF desempenha um papel fundamental no encaminhamento e processamento eficiente do tráfego de dados dos utilizadores na rede 5G, proporcionando maior flexibilidade e eficiência na gestão de recursos e a Função de Gerenciamento de Acesso e Mobilidade (AMF) que desempenha um papel importante no gerenciamento do acesso à rede e na mobilidade dos dispositivos, como mencionado anteriormente na secção 2.4.

Além disso, nas arquiteturas tradicionais de redes móveis, cada BS executa o processamento de banda de base através da BBU e o processamento de radiofrequência através da RRU. Normalmente, a BBU está localizada perto da base da torre, enquanto a RRU está no topo da torre, perto das antenas para evitar perdas. A arquitetura *Cloud RAN* (C-RAN) na rede 5G separa fisicamente a estação BBU, proporcionando benefícios como redução de custos operacionais, melhor desempenho, coordenação entre células e facilidade de manutenção. Essa abordagem, permite que várias operadoras compartilhem recursos de acesso rádio como serviço de nuvem [4].

2.5. Tecnologias que Garantem o Suporte aos Serviços e Aplicações

2.5.1. Fatiamento de Rede - Network Slicing

Dentro dos recursos que acompanham o 5G que garantem o suporte aos diversos serviços, o mais notável de todos é o fatiamento da rede (*Network Slicing*) pois é ele que permite que as operadoras apliquem e ofereçam diferentes tipos de *Quality of Service* (QoS) para diferentes casos de uso. O fatiamento de rede em 5G é uma tecnologia que oferece a possibilidade de segmentar uma única infraestrutura física em diversas redes virtuais, cada uma com suas próprias características e requisitos específicos permitindo que múltiplas redes lógicas operem simultaneamente em uma infraestrutura de rede física compartilhada. Por exemplo, uma operadora pode dedicar uma fatia de rede a comunicações de veículo para veículo (V2V) e essa fatia de rede fará uso da URLLC para fornecer canais de comunicação que são críticos para a missão e sensíveis à latência [4], [11].

A Figura 2.5 representa um exemplo de fatiamento de rede 5G na qual cada fatia pode ser utilizada para atender requisitos específicos.

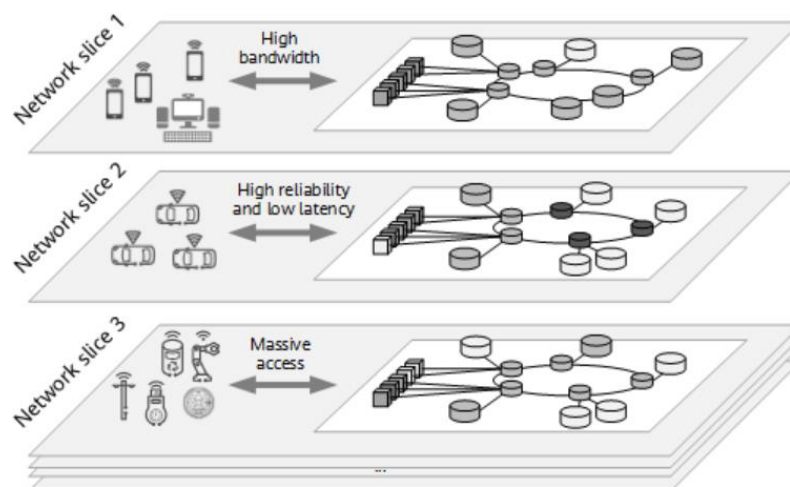


Figura 2.5 - Fatiamento da Rede 5G [12]

O Fatiamento de rede é possível devido ao uso generalizado do paradigma de SDN, que oferece controle sobre diversos dispositivos envolvidos, além da NFV. A tecnologia NFV é responsável por gerenciar as funções de rede virtual e permite uma alocação flexível de recursos virtuais, além de oferecer uma arquitetura modular para essas funções, cria funções virtualmente dedicadas para cada um dos segmentos da rede. Já o SDN é capaz de proporcionar a comunicação entre essas funções de rede virtual, utilizando planos de separação e roteamento de rede para obter isolamento de recursos para cada fatia de rede. Dessa forma, a SDN garante que cada fatia de rede tenha os seus próprios recursos dedicados e separados, permitindo uma melhor personalização e otimização dos serviços de rede oferecidos [13], [14].

Com a combinação dessas tecnologias, é possível segmentar a rede física em diversas fatias lógicas, cada uma com suas próprias funções dedicadas e recursos isolados para atender às necessidades específicas de cada caso de uso [15].

As operadoras podem assim gerenciar diversos casos de uso de 5G com diferentes *throughput*, latência e demandas de disponibilidade, dividindo os recursos da rede para múltiplos utilizadores. O fatiamento da rede torna-se assim extremamente útil em aplicações como a *IoT*, quando a quantidade de utilizadores pode ser extremamente elevada, mas a demanda por largura de banda geral é baixa. O benefício da operadora no uso do fatiamento de rede é a eficiência operacional com a redução do tempo para lançamento sendo que permite realizar testes para novos potenciais serviços 5G com mais rapidez [4].

As várias "fatias" da rede são isoladas uma da outra e de forma a garantir maior segurança na comunicação e a possibilidade de modificar a uma fatia sem afetar as outras. Por exemplo, que um operador pode modificar drasticamente um serviço que oferece a seus clientes, agindo apenas de forma direcionada sem afetar o desempenho das outras. Além disso, é possível realizar testes e pesquisas em fatias dedicadas que reproduzem uma rede de produção, sem interferir nas outras fatias que atendem aos serviços reais em produção [16].

2.5.2. Ondas Milimétricas

As ondas milimétricas operam em frequências muito altas, o que permite taxas de dados muito mais altas e oferece características e vantagens significativas no contexto do 5G.

As ondas milimétricas encontram-se associadas a frequências entre os 25 GHz e os 100 GHz, bem como frequências na banda E (71–76 GHz, 81–86 GHz), permitem uma maior capacidade de transmissão de dado. Isso ocorre porque a capacidade de transmissão de dados está diretamente relacionada à frequência da onda. Como resultado, as ondas milimétricas permitem que o 5G alcance velocidades de dados que são substancialmente superiores às das redes 4G. No entanto, devido às altas frequências, as transmissões de ondas milimétricas sofrem elevadas perdas de propagação, o que torna o seu alcance bastante limitado.

A comunicação em frequências milimétricas envolve comprimentos de ondas curtos, o que permite a utilização de várias antenas em uma área pequena, com pouca separação entre elas, muitas vezes apenas metade do comprimento de onda de distância, nestes casos, as estações base 5G usam as técnicas de formação de feixe e o M-MIMO para coordenar efetivamente essas antenas.

Essas características das ondas milimétricas tornam-nas especialmente adequadas para áreas de alta densidade de dispositivos, como também cenários onde se espera um elevado número de utilizadores, na qual a demanda pelo tráfego de dados é elevada. Ao utilizar ondas milimétricas em áreas densamente povoadas, o 5G pode alocar recursos de forma eficiente, fornecendo altas taxas de dados onde são mais necessárias [17].

2.5.3. Sistemas M-MIMO

A técnica M-MIMO representa uma das tecnologias que desempenham um papel fundamental na melhoria da capacidade, eficiência e desempenho global das redes 5G.

Os sistemas M-MIMO envolvem o uso de múltiplas antenas de transmissão e recepção tanto nas BS quanto nos dispositivos finais. A principal ideia por trás do M-MIMO é aproveitar o princípio das *Multiple-Input-Multiple-Output* (MIMO), mas em uma escala massiva. Em vez de apenas algumas antenas, como em sistemas MIMO convencionais, os sistemas M-MIMO usam um grande número de antenas, por exemplo, 100 ou mais são equipados nas BSs para melhorar a capacidade e o desempenho do sistema, eficiência espectral e energética tanto nas comunicações *downlink* quanto *uplink*.

Para aprimorar ainda mais o desempenho, o M-MIMO faz uso da técnica de Formação de Feixes (*Beamforming*), detalhada na secção 2.5.4, para direcionar sinais de forma precisa, reduzindo interferências e melhorando a qualidade e alcance do sinal sem fio. Assim, os sistemas M-MIMO podem aumentar significativamente o *throughput* para os dispositivos finais, proporcionando uma experiência mais rápida e confiável para os utilizadores [18], [19].

A Figura 2.7 ilustra um sistema de M-MIMO, na qual a formatação de feixe é aplicada na ligação *Downlink*.

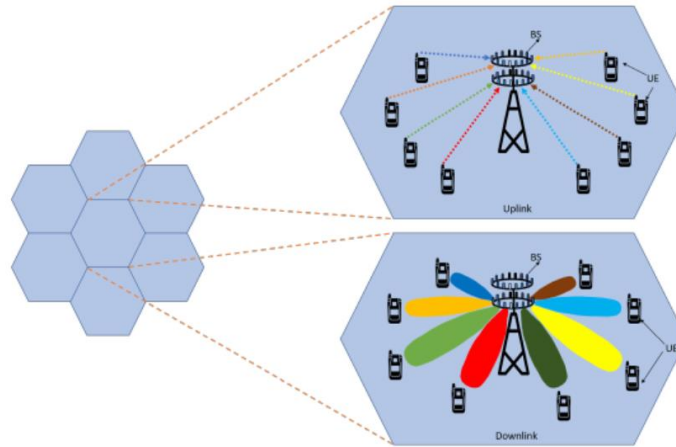


Figura 2.6 - Sistema M-MIMO - *Uplink* e *Downlink* M-MIMO [18]

2.5.4. Formatação de Feixe – Beamforming

Conforme mencionado anteriormente, as ondas milimétricas operam em frequências muito elevadas, o que resulta em consideráveis perdas de propagação. Para superar esse desafio, a rede 5G emprega uma técnica conhecida como formação de feixe, ou "*beamforming*", por meio de um grande número de antenas, a fim de compensar essas perdas.

A formatação de feixe é uma técnica que envolve o direcionamento preciso de sinais de transmissão ou recepção em uma direção específica, em vez de transmitir ou receber igualmente em todas as direções. Isso é alcançado ajustando as fases e amplitudes dos sinais transmitidos por várias antenas em um sistema de comunicação. Como resultado, o sinal resultante é concentrado em um feixe direcionado, aumentando a potência efetiva nessa direção e melhorando a qualidade e confiabilidade da comunicação.

Essa técnica envolve o uso de um conjunto de radiadores para realizar uma espécie de filtragem espacial, visando capturar ou transmitir energia em uma direção específica. A melhoria alcançada ao direcionar os sinais corresponde ao ganho de transmissão/recepção. No contexto dessa tecnologia, as BS utilizam antenas que estão relativamente próximas uma da outra, geralmente com intervalos aproximados de meio comprimento de onda, e que têm a mesma orientação de polarização de forma a garantir uma alta correlação durante a recepção dos sinais.

As técnicas de formatação de feixe podem ser utilizadas tanto no transmissor quanto no receptor, a fim de aumentar a relação sinal ruído (SNR) para compensar as perdas [20].

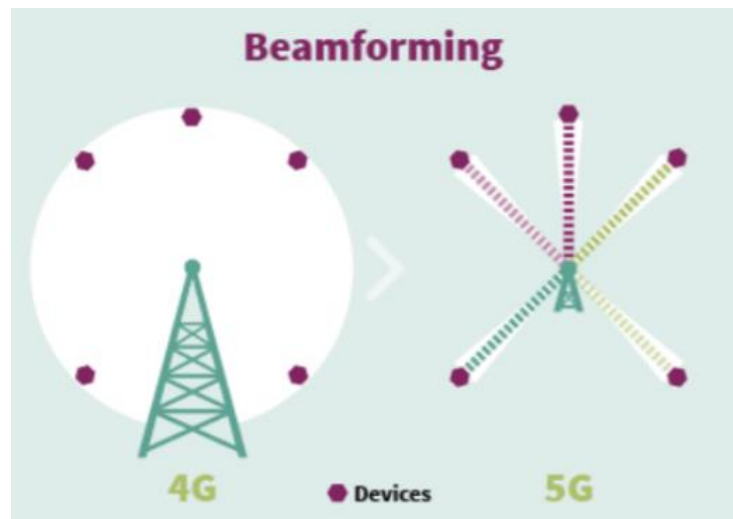


Figura 2.7 - Técnica de *beamforming* em 5G comparado ao 4G [21]

2.5.5. Espectro

A variedade de requisitos e as necessidades de espectro mostram que há muitas opções e desafios na introdução do 5G. É necessária mais largura de banda de espectro para implantar redes 5G (do que 4G) para suportar os casos de uso do 5G e resolver as limitações do 4G. Para o planejamento da rede as diversas operadoras devem, portanto, considerar a viabilidade de diferentes opções para atender aos casos de uso inicialmente pretendidos e garantir a interoperabilidade de suas redes.

Em termos de características físicas, o espectro pode ser dividido em três faixas de frequência: até 1 GHz, até 6 GHz e acima de 6 GHz [8], [22].

Cada um desses intervalos de espectro tem características específicas que as tornam adequados para determinados cenários de implementação.

A faixa de baixo espectro (até 1 GHz) tem aspectos de propagação que a tornam viável para a cobertura de grandes áreas, como ambientes rurais.

A faixa intermediária do espectro (até 6 GHz), fornece um tipo de cobertura mais viável para a implementação em áreas urbanas onde se prevê maior capacidade de dispositivos conectados.

Por último, a faixa de alto espectro (acima de 6 GHz) é mais limitada na cobertura, em contrapartida, pode fornecer uma capacidade muito alta devido à quantidade de espectro não utilizado e disponível nessas frequências.

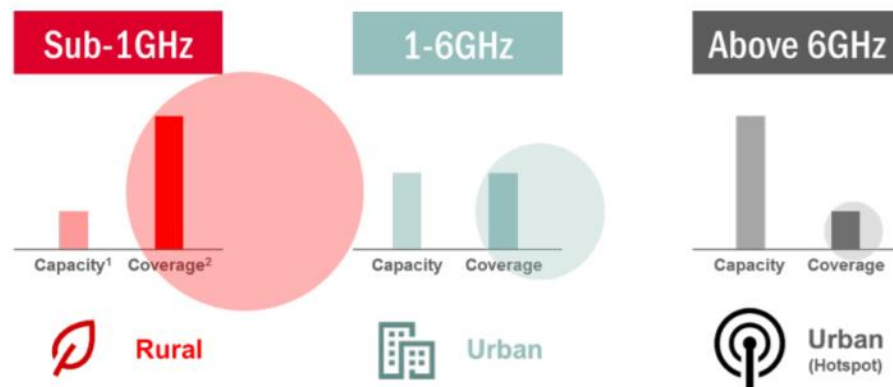


Figura 2.8 - Capacidade vs Cobertura considerando o espectro por categoria [8]

Os requisitos técnicos estabelecidos pelo ITU e que vão de encontro ao IMT-2020, especificam que as operadoras precisam de pelo menos 100 MHz de banda para garantir as aplicações e casos de uso inicialmente definidos. Para frequências acima de 6 GHz, o requisito é de até 1 GHz de banda por operadora [8].

2.6. Redes Privadas 5G

As redes privadas 5G estão emergindo como uma alternativa viável para organizações que buscam maior controle e personalização sobre sua conectividade sem fio. Em contraste com as redes públicas que oferecem serviços de rede móvel para assinantes públicos, as redes privadas são destinadas ao uso exclusivo de um cliente corporativo, como uma indústria vertical ou uma empresa.

Uma rede Privada 5G é uma rede dedicada com características de comunicação aprimoradas, conectividade unificada, serviços otimizados e segurança personalizada em uma área específica.

As redes privadas 5G podem ser usadas em uma variedade de aplicações em vários setores, incluindo manufatura, saúde, transporte e retalho. Por exemplo na manufatura, as redes privadas 5G podem ser usadas para permitir a automação de processos de produção, melhorando a eficiência e reduzindo custos. Na saúde, podem ser usadas para melhorar a conectividade entre os pacientes e os profissionais de saúde, permitindo diagnósticos mais precisos e tratamentos mais eficazes. No transporte, podem ser usadas para permitir a comunicação entre veículos autônomos, melhorando a segurança e reduzindo o congestionamento nas estradas.

As redes privadas 5G as novas ofertas de negócios que o fatiamento de rede permite, oferecem maior desempenho, segurança e uma série de recursos avançados que as distinguem das redes públicas. Por exemplo, o fatiamento de rede conforme referido na secção 2.5.1 permite que diferentes aplicações e serviços sejam separados em fatias virtuais de rede para melhorar a eficiência de serviços específicos, o que torna possível criar uma rede 5G privada com características específicas e autogestão. Outra característica que difere uma rede pública de uma rede privada 5G é o suporte para antenas inteligentes, que podem ser ajustadas para direcionar o sinal para áreas específicas onde a cobertura é necessária. As redes privadas 5G também oferecem maior confiabilidade e menor latência, o que é importante para aplicações de missão crítica, como a automação industrial e os veículos autónomos.

2.6.1. Modos de Implementação

As Redes privadas, também chamadas de NPNs (*Non-Public Networks*), podem ser implementadas de duas formas [23]:

- 1) Implementação autónoma
- 2) Implantação Integrada da Rede Pública

O fatiamento de rede é utilizado para personalizar o comportamento do sistema e o isolamento de recursos/funções para serviços específicos em todos estes modos de implementação.

- 1) Implementação autónoma

Nesse cenário, uma rede 5G privada é implementada como um sistema isolado e independente sem dependência de uma rede pública. Conforme ilustrado na Figura 2.9, a rede privada autónoma (ou NPN autónoma) é completamente separada da versão pública, todos os fluxos de dados e funções de rede (plano de utilizador e plano de controle) são de responsabilidade da organização proprietária dessa rede. Embora uma rede 5G privada autónoma possa operar de forma independente, existe uma opção de conexão à rede pública por meio de uma *firewall* que pode ser configurada opcionalmente por meio de uma conexão à rede pública. Embora essas redes usem tecnologias 5G, elas são totalmente independentes e isoladas da infraestrutura pública 5G.

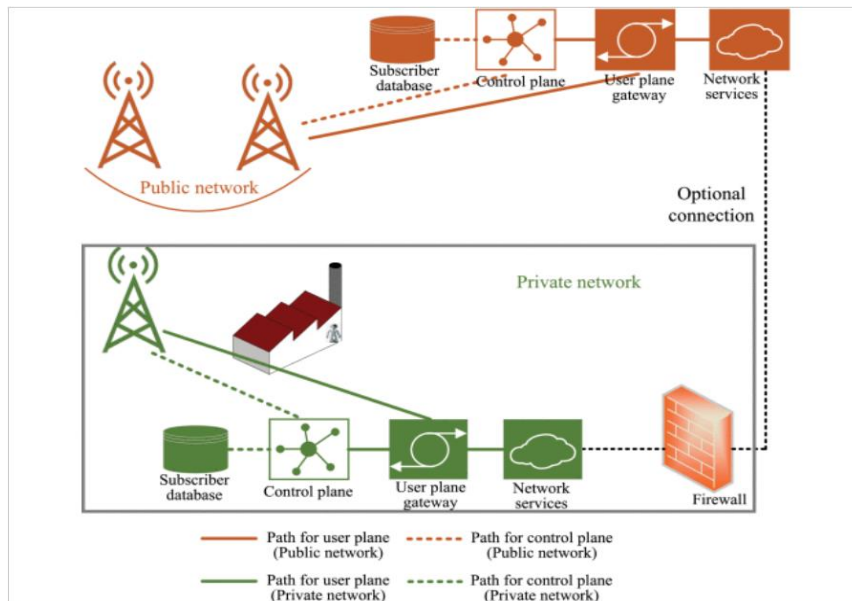


Figura 2.9 - Implementação autônoma [23]

2) Implantação Integrada da Rede Pública

Nesse cenário, uma rede 5G privada é implementada com o suporte de uma rede pública, combinando a infraestrutura adotada para serviços públicos com a infraestrutura nas instalações de um cliente com serviços e recursos dedicados para atender a necessidades específicas. As redes privada e pública não estão fisicamente isoladas, em comparação com a implementação autônoma, este tipo de implementação tem menor personalização, autocontrole e segurança [24].

Esse tipo de rede privada 5G pode ser dividido em três casos:

a) RAN partilhada

Neste caso conforme ilustrado na Figura 2.10, a rede privada e a pública podem partilhar todo acesso rádio, no entanto todas as funções de controle e os serviços permanecem totalmente separadas, todos os fluxos de dados das redes 5G não públicas são restritos à área local. Existe apenas uma única BS para a RAN partilhada, mas podem ser configuradas BSs adicionais exclusivas para utilizadores da rede privada. A rede privada possui identidade própria, embora exista um acordo de partilha de RAN com a rede pública em que o modelo de rede central multioperador 3GPP [25] para a partilha de RAN é o principal facilitador para realizar tais implementações.

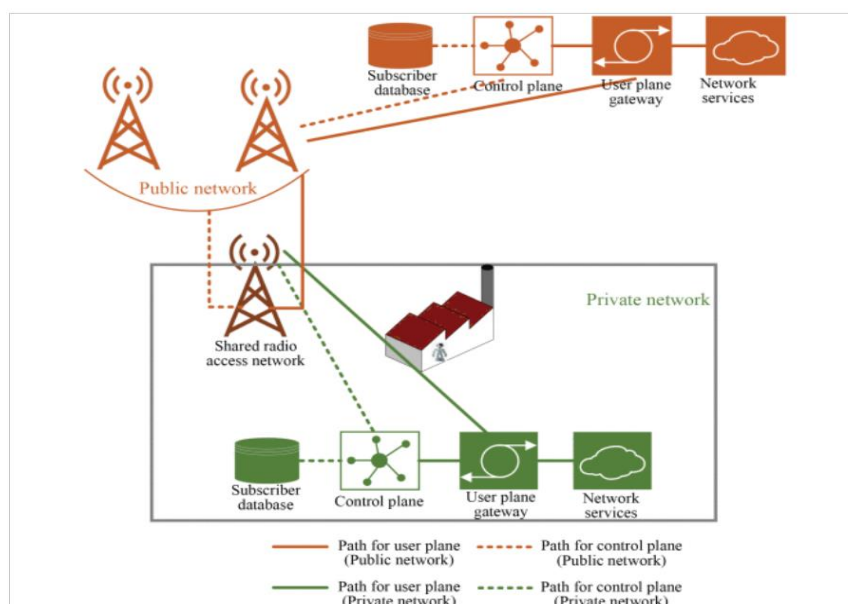


Figura 2.10 - Implementação com RAN partilhada [23]

b) RAN partilhada e plano de controle

Neste caso, redes públicas e privadas partilham parte da RAN semelhante ao caso acima. Além disso, as funções de rede do plano de controle são sempre tratadas na rede pública conforme ilustrado na Figura 2.11. Este caso, pode ser implementado utilizando o fatiamento vertical de rede de forma a criar redes logicamente independentes sobre a mesma infraestrutura física [26], [27]. No entanto, todos os fluxos de tráfego da rede privada ainda permanecem dentro de áreas definidas. A rede privada e a pública possuem identificadores de fatia separados. Os dispositivos na rede privada são assinantes da rede pública, que podem se conectar diretamente à rede pública e aos serviços associados.

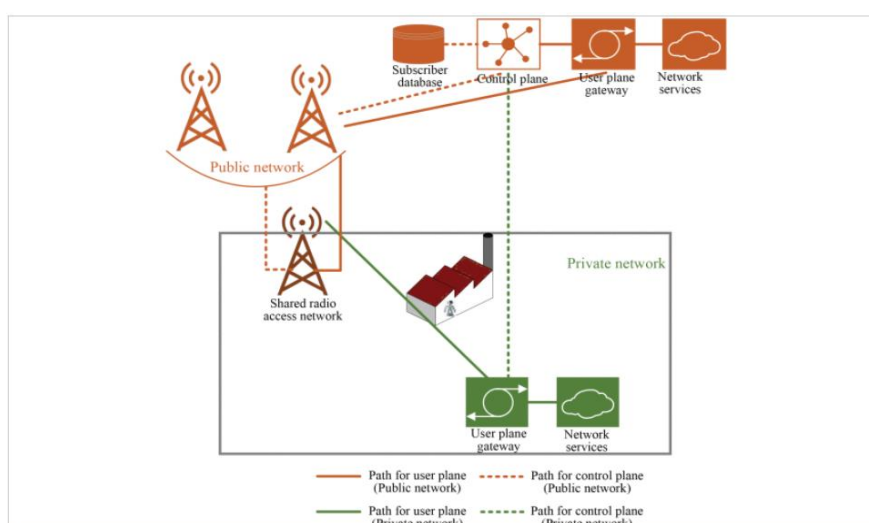


Figura 2.11 - Implementação com RAN partilhada e plano de controle [23]

c) Hospedado pela Rede Pública

Nesse caso, a rede privada é totalmente hospedada pela rede pública, sendo toda a gestão feita pela operadora desde a rede de acesso, o plano de controle e plano de utilizador, os serviços e a conectividade. Todos os fluxos de dados da rede privada são direcionados para a rede pública por meio da RAN partilhada conforme ilustrado na Figura 2.12. Contudo, as duas porções são consideradas partes de redes completamente diferentes para garantir o isolamento e a independência de ambas as porções. Neste cenário a virtualização das funções de rede em um ambiente de nuvem podem ser exploradas para a sua implementação.

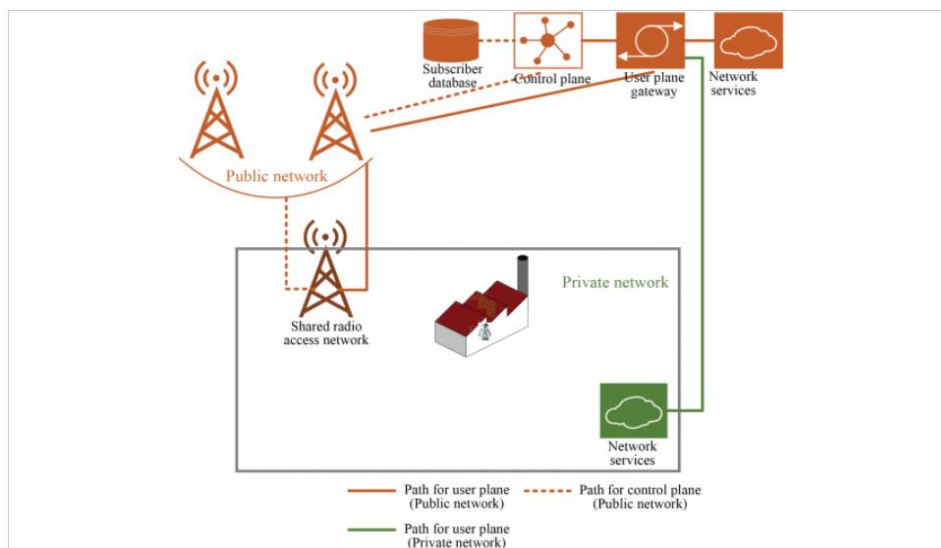


Figura 2.12 - Implementação hospedada pela rede pública [23]

Esses modelos de redes privadas oferecem flexibilidade para atender às necessidades específicas de segurança e resiliência das empresas. No entanto, em ambientes compartilhados, soluções autônomas inovadoras são essenciais para monitoramento em tempo real de qualidade de serviço, disponibilidade e gestão de serviços. Isso é crucial para atender aos diversos requisitos da *IoT* e manter operações altamente confiáveis.

2.6.2. Opções de Alocação de Espectro para 5G Privado

Um dos principais ingredientes para o sucesso das redes privadas 5G é o espectro sendo que as redes privadas 5G são construídas para atender às necessidades específicas de uma organização, a disponibilidade do espectro é fundamental para garantir que a rede possa operar com desempenho ideal de forma a atender às expectativas e garantir o suporte das aplicações críticas.

As redes 5G privadas podem ser implementadas em três diferentes tipos de espectro [23]:

1) Espectro licenciado

O espectro licenciado para redes 5G privadas pode ser obtido de operadoras de rede móvel, ou seja, uma operadora de rede móvel aloca uma parte dedicada de suas bandas de espectro de propriedade para uso privado. Esta é uma continuação do modelo clássico de licenciamento de espectro, e diferentes modelos de negócios podem ser aplicados.

O espectro licenciado é a escolha ideal para oferecer suporte a serviços privados de comunicação ultraconfiável de baixa latência (URLLC), pois oferece a mais alta previsibilidade.

2) Espectro não licenciado

Outra opção para implantação de redes 5G privadas é o espectro não licenciado, por exemplo, na banda de 2,4 GHz, na banda de 5 GHz e na de 6 GHz. Essas bandas de espectro são aproveitadas por Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee e várias outras tecnologias e são abertas para uso compartilhado.

O espectro partilhado assíncrono e síncrono são os dois modos principais de partilha de espectro propostos para o 5G em espectro não licenciado.

O espectro partilhado assíncrono pode ser utilizado em redes 5G privadas que não requerem URLLC, e o acesso ao meio é controlado por meio de protocolos de partilha, ouvir antes de falar, para coexistir eficientemente com outros utilizadores do espectro na mesma banda. O espectro partilhado síncrono permite um desempenho mais confiável do que o modelo assíncrono, e o seu uso é recomendado em redes privadas que exigem URLLC melhorado.

3) Espectro privado dedicado

O espectro privado dedicado é obtido através da agência reguladora responsável pela gestão do espectro em uma determinada região ou país. Geralmente, as empresas interessadas em utilizar o espectro privado dedicado precisam de solicitar uma licença à agência reguladora, que pode exigir uma série de requisitos e procedimentos para a concessão da licença.

Devido à interferência reduzida, as redes 5G privadas que operam com espectro privado dedicado oferecem grande segurança de desempenho. Este modelo permite a operação de redes 5G privadas independentemente das operadoras de redes móveis públicas.

Este modelo está sendo explorado em muitos mercados globais. Por exemplo, o governo alemão reservou uma banda de 100 MHz em 3,7-3,8 GHz para uso industrial, nos EUA, a *Federal Communications Commission* (FCC) permite que o *Citizen Broadband Radio Service* (CBRS) nos 3.5 GHz seja utilizado para redes privadas, empregando a técnica de partilha de espectro para não interferir com outros que já utilizam essas bandas ou próximas [28].

A utilização do espectro privado dedicado pode oferecer benefícios significativos em termos de controle, segurança e disponibilidade de rede, o que pode ser especialmente importante em setores como a indústria, onde as aplicações são críticas e exigem alto desempenho e confiabilidade.

Considerando que a implementação das redes 5G privadas pode ser realizada de diversas formas, e considerando as quatro abordagens de implementação e as três opções de espectro disponíveis, na Tabela 2.2 foram comparadas as cinco formas mais comuns que a rede 5G pode ser implementadas, levando em consideração fatores importantes como a personalização, que permite adequar a rede às necessidades da organização, o custo, é importante considerar os custos envolvidos na implementação da rede 5G privada, que podem variar de acordo com a abordagem e espectro escolhido, o isolamento, que garante a segurança e privacidade dos dados, o autocontrole, possibilita que a organização tenha um maior controle sobre a rede, podendo ajustá-la de acordo com suas necessidades e objetivos.

Tabela 2.2 - Opções de implementação e espectro para redes privadas 5G - Adaptada de [23]

Modos de implementação	Espectro privado dedicado	Espectro licenciado	Espectro não licenciado
Autónoma	-Alta personalização; -Isolamento físico completo; -Elevado autocontrole; -Custo muito elevado	-----	----
RAN Partilhada	-Alta personalização; -Totalmente isolado em termos lógicos; -Autocontrole moderado; -Custos elevados;	- Personalização moderada; -Isolamento moderado; -Autocontrole moderado; -Custos elevados;	----
RAN Partilhada e Plano de Controle	----	-Baixa personalização -Baixo isolamento -Baixa autocontrole; -Baixo custo.	----
Hospedado pela Rede Pública	----	-Baixa personalização -Sem isolamento físico; -Baixo autocontrole; -Custos muito baixos.	----

Resumindo, a Tabela 2.2 mostra que as redes privadas 5G podem ser implementadas de várias formas, dependendo do modelo operacional do espectro privado dedicado. O modelo autónomo é altamente personalizado, graças ao seu isolamento físico total, mas tem custos elevados. Com o uso de espectro licenciado, a implementação de RAN partilhada pode reduzir os custos em comparação com o uso de espectro privado dedicado, devido a uma personalização mais moderada. No entanto, para o modelo de RAN partilhada e plano de controle, o espectro licenciado limita a personalização, o que resulta em um baixo autocontrole a custos mais baixos. Especificamente, quando o espectro licenciado é fornecido pela rede pública, a personalização é baixa, o que significa que apenas é possível um baixo autocontrole. Apesar disso, essa implementação tem vantagens em termos de baixos custos de implantação [23].

Em suma, a escolha do modelo mais adequado depende das necessidades e objetivos da organização, bem como dos custos envolvidos na implementação da rede privada 5G.

2.6.3. Tecnologias Facilitadoras para a Implantação de Redes Privadas 5G

A implementação de redes privadas 5G pode ser facilitada por várias tecnologias que permitem um desempenho otimizado e personalizado para as necessidades específicas de cada empresa ou organização. A seguir, vamos explorar cada uma dessas tecnologias e como elas podem ser utilizadas para alcançar os objetivos desejados na implementação de redes privadas 5G.

1) Fatiamento de Rede

Conforme referido na secção 2.5.1, o fatiamento (*Network Slicing*) de rede é um recurso fundamental das redes 5G para atender a diversos requisitos em uma única infraestrutura física dividindo uma rede física em várias redes lógicas, ou seja, fatias da rede. Está é uma tecnologia essencial para a implementação de redes 5G privadas, o fatiamento de rede é usado para atender às necessidades de personalização e isolamento por caso de uso/tipo de tráfego. As fatias de rede são construídas de acordo com requisitos específicos e, portanto, são especializadas com diferentes características (por exemplo, para fatias URLLC ou eMBB).

Com o benefício de NFV e SDN, o fatiamento de rede permite a criação de redes privadas 5G para atender a diferentes requisitos de negócios em diferentes setores (por exemplo, fábricas inteligentes, empresas de logística, hospitais com cirurgia robótica remota, estádios desportivos etc).

2) Computação de Borda Privada

A computação de borda (*Private edge computing*) é uma tecnologia importante para as redes 5G privadas pois ela oferece a capacidade de executar tarefas de alta carga computacional e armazenar grandes volumes de dados na borda da rede, de forma descentralizada, em comparação com a computação em nuvem tradicional.

É possível obter vários benefícios por meio da computação de borda devido à proximidade entre o utilizador e os servidores locais. Isso pode incluir melhorias na percepção de localização, maior privacidade e segurança de dados, redução do armazenamento em nuvem, economia de energia e redução do tempo de resposta. É importante destacar que a computação de borda e a computação em nuvem podem ser complementares, com a computação em nuvem processando grandes volumes de dados em tempo não real, enquanto a computação de borda pode processar tarefas e tomar decisões em tempo real. Isso pode permitir a análise em tempo real de dados gerados por vários dispositivos [23], [29].

A utilização da computação de borda privada oferece diversos benefícios adicionais, ao adicionar serviços seguros e privados para demandas locais e configurações de rede. Isto é possível por meio da distribuição ágil de conteúdo, otimização de conteúdo com reconhecimento de RAN que depende das estatísticas locais. Utilizando essas estatísticas, é possível criar um Ambiente Virtual de Coisas (VEoT) que combina a IoT e Realidade Aumentada (AR), integrando também a inteligência artificial para possibilitar um monitoramento, controle e adaptação eficazes em ambientes sem fio em constante mudança, ao mesmo tempo em que otimiza a utilização dos recursos disponíveis.

A computação de borda privada é instalada de forma distribuída, o que reduz a possibilidade de que um único ataque físico ou cibernético comprometa toda a rede, desempenhando um papel fundamental na proteção da área local e das informações confidenciais contra ataques digitais. Em contraste com a computação em nuvem centralizada convencional, a borda privada é uma opção mais segura para a proteção dos dados sensíveis [23], [30].

A combinação das tecnologias de 5G e MEC apresenta-se como uma alternativa viável para empresas que necessitam de dados em tempo real para a tomada de decisões e operações ágeis pois oferece às empresas uma plataforma de computação dedicada e altamente segura, proporcionando baixa latência em grandes áreas. A redução da latência abre novas possibilidades para a criação de aplicações de Realidade Aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR) em eventos e locais como por exemplo, apresentações, jogos em estádio e parques temáticos, oferecendo aos utilizadores experiências mais imersivas e interativas [28].

3) Gestão de Interferência

A gestão de interferência em redes 5G privadas é um processo crucial para garantir o desempenho ideal da rede. Uma rede 5G privada pode ser utilizada em diversos setores, como manufatura, saúde, transporte, entre outros, e, portanto, é importante ter uma rede confiável e com baixa latência.

Para minimizar a interferência em redes 5G privadas, algumas técnicas recomendadas incluem, por exemplo: acesso múltiplo, espalhamento de espectro, controle de potência de transmissão e cancelamento de interferência.

O acesso múltiplo pode ser determinístico ou aleatório, enquanto o espalhamento de espectro pode ser feito por sequência direta (DSSS) ou por salto de frequência (FHSS). O controle de potência de transmissão envolve o ajuste dinâmico da potência de transmissão para reduzir a interferência e aumentar a eficiência espectral [23].

4) *Time Sensitive Network Support*

O 3GPP Rel. 16 permite a colaboração dos sistemas 5G com a rede já existente de *Time Sensitive Network Support* (TSN). A TSN é baseada num conjunto de normas *Ethernet* do IEEE e destina-se a satisfazer as diversas necessidades de aplicações sensíveis ao tempo na Indústria 4.0 [31].

A solução TSN é capaz de efetuar uma sincronização precisa de todos os dispositivos numa rede e utiliza um agendamento coordenado para garantir o desempenho determinístico das aplicações em tempo real. Para suportar esta sincronização de tempo TSN, o sistema 5G é integrado na rede existente como uma ponte TSN, com tradutores TSN em ambos os lados do dispositivo e do sistema, conforme ilustrado na Figura 2.13. Estes dispositivos de tradução mapeiam as configurações da rede TSN para a estrutura de *QoS* do 5G, permitindo uma transmissão eficiente através da *Ethernet*. Além disso, é importante notar que todo o sistema 5G pode ser considerado como "sistema sensível ao tempo", o que significa que a sincronização de tempo TSN pode ser utilizada para garantir a precisão da sincronização temporal em toda a rede [31].

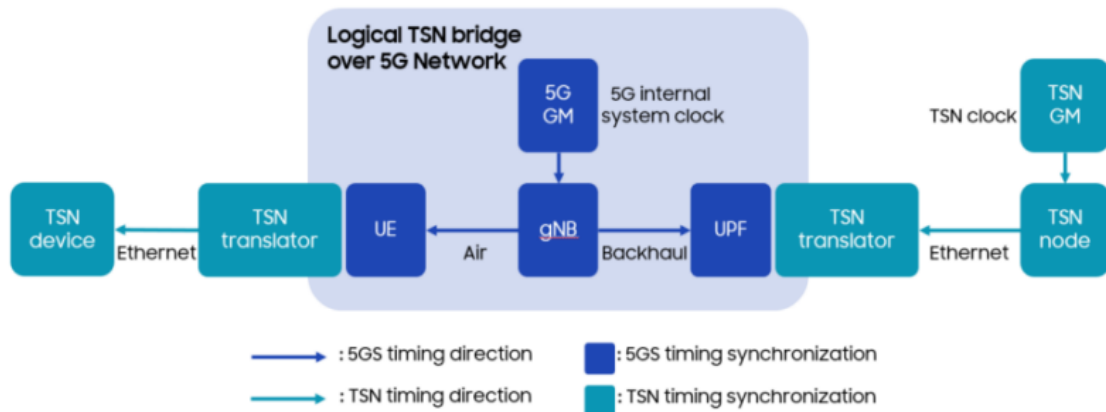


Figura 2.13 - Integração de sistemas 5G e TSN.[32]

Nas redes privadas, é comum encontrar muitas aplicações industriais que necessitam de uma sincronização de tempo extremamente precisa, muitas vezes na ordem de microssegundos. Nesse contexto, a utilização da TSN em conjunto com os sistemas 5G permite uma sincronização precisa e confiável para atender às exigências das aplicações sensíveis ao tempo [32].

5) Posicionamento e Localização

A disponibilidade de sistemas de posicionamento e localização de alta precisão é um fator-chave para o desenvolvimento e implementação bem-sucedida de aplicações em redes privadas 5G, sendo que muitas aplicações de redes 5G privadas envolvem a interação entre o mundo digital e físico em tempo real, estes dependem altamente de informações de localização precisas.

Considerando que uma estimativa de localização é baseada em medições que dependem do processamento estatístico de sinais, as estatísticas locais fornecidas pela rede privada desempenham um papel essencial na localização e rastreamento [33]. Por exemplo, um veículo guiado automaticamente que transporta material entre um armazém e um ponto de entrega no exterior, é um bom representante de tais aplicações. O cliente pode localizar mercadorias e encomendas em trânsito e nos centros de distribuição.

Nos cenários exteriores, os sistemas globais de navegação por satélite (GNSS) são a dominante, mas apresentam limitações em relação ao fornecimento de informações precisas de posicionamento, principalmente em ambientes internos industriais, nesse sentido, a localização baseada em radiofrequência (RF) torna-se um fator essencial para o desempenho das redes 5G privadas. Além disso, a tecnologia 5G NR oferece várias funcionalidades que permitem um posicionamento altamente preciso, incluindo o uso de múltiplas antenas e uma largura de banda ampla [23].

2.7. Otimização

2.7.1. Principais KPIs a considerar na Otimização 5G NR RAN

A otimização em redes 5G NR RAN é um processo essencial que envolve duas fases: otimização inicial e otimização contínua. Na fase inicial, antes do lançamento da rede, os engenheiros realizam ajustes físicos e de parâmetros para atender aos objetivos de cobertura e desempenho. Na fase contínua após o lançamento, dados da rede são coletados e analisados regularmente, e correções são implementadas para manter o desempenho da rede dentro dos limites acordados.

Em termos simples podemos dizer que os KPIs descrevem o nível de aptidão física de uma rede. De acordo com o padrão 3GPP [31], existem seis KPIs principais que influenciam diretamente o desempenho da rede e experiência do utilizador final que pode ser categorizado nas seguintes subcategorias [34].

- **Acessibilidade:** Mede a probabilidade de um utilizador se conectar com sucesso a uma fatia da rede.
- **Integridade:** Avalia se os dados da rede foram modificados sem autorização.
- **Utilização:** Refere-se à utilização eficiente dos recursos sem prejudicar a experiência do utilizador.
- **Retenabilidade:** Verifica a capacidade da rede em manter conexões de serviço sob condições diversas.
- **Mobilidade:** mostra quantas vezes um *Handover* dentro da NR-RAN é bem-sucedido, independentemente do *Handover* ter sido feito devido a uma fraca cobertura ou por qualquer outro motivo.
- **Eficiência energética:** Avalia a utilização eficiente de energia para transferência de dados na rede.

2.7.2. Técnicas de Otimização de Cobertura

O conceito de otimização de cobertura e capacidade tem recebido uma extrema atenção por parte de alguns organismos devido à sua elevada complexidade. Este tipo de otimização é realizado com base em medidas (*Drive Tests*) e ferramentas de planeamento para fornecer uma melhor rede celular.

A otimização de cobertura e capacidade é fundamental e requer a identificação e correção de problemas de cobertura, levando em consideração fatores como densidade de rede, localização de dispositivos, condições ambientais e padrões de tráfego para garantir a máxima cobertura e capacidade da rede.

As *Small cells* são componentes-chave para melhorar a cobertura 5G. São sistemas de baixa potência implementados em áreas pequenas para fornecer alta velocidade de dados e baixa latência [18].

Existem três tipos: Femtocell, Picocell e Microcell, cada uma com diferentes alcances conforme representado na Figura 2.14.

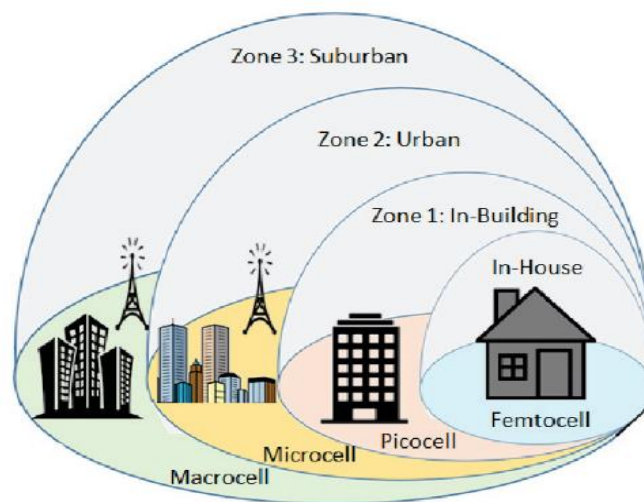


Figura 2.14 - Tipos de Small Cell [35]

Essas *small cells* são cruciais para atender aos requisitos do 5G, como maior largura de banda, comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência (URLLC), conectividade massiva e eficiência espectral aprimorada. Elas são fáceis de implementar, consomem menos energia e podem ser integradas com tecnologias avançadas, como M-MIMO, *beamforming* e ondas milimétricas (*mmWaves*), para maximizar o desempenho da rede 5G.

Simulador de Sistema

3.1. Descrição do Simulador de Sistema

Para realizar o planeamento celular de uma rede 5G e avaliar o comportamento de um sistema, foi utilizado um simulador desenvolvido em JAVA, no qual foram feitas alterações ao código original de forma a adaptar o simulador com algumas das novas funcionalidades do 5G NR, bem como introduzir dois cenários de estudo (Std e Std3D).

Neste sentido, foram realizadas simulações considerando diferentes bandas de frequência dentro da NR 5G, tanto a banda baixa, denominada banda FR1, com frequências abaixo de 6 GHz, quanto a banda alta, denominada banda FR2. Na banda FR1, foi utilizada a frequência portadora de 3.5 GHz, considerada como numerologia 1. Nesta configuração, a largura de banda foi fixada em 50 MHz, espaçamento entre as sub-portadoras de 30 kHz e OFDM com 28 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1 ms. Por outro lado, na banda FR2, que representa frequências mais elevadas, considerou-se como numerologia 2, a frequência portadora de 28 GHz com uma largura de banda de 100 MHz, e espaçamento entre 60 kHz e sub-portadoras OFDM com 56 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1 ms, conforme resumido na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características globais do simulador

Parâmetros	Numerologia 1- FR1	Numerologia 2 - FR2
Frequência de portadora [GHz]	3.5	28
Largura de banda [MHz]	50	100
Espaçamento entre sub-portadoras [KHz]	30	60
TTI [ms]	1	1

O simulador é configurado com um modelo de simulação de canal 3D que segue as diretrizes estabelecidas pelo 3GPP conforme representado na Figura 3.1. Este modelo é aplicável em simulações de ligação e de nível de sistema, fornecendo uma interconexão entre essas duas abordagens. O simulador de nível de ligação permite determinar os valores da relação sinal-ruído (SNR) que uma conexão entre um BS e uma determinada UE atinge uma taxa de erro de bloco desejada (BLER) para um bloco de bits. Com base nos resultados da simulação do nível de conexão, é realizada a parametrização do nível do sistema. O simulador do sistema, por sua vez, avalia o comportamento da rede 5G NR, analisando como os terminais móveis interagem com as estações base em diferentes situações de transmissão e receção.

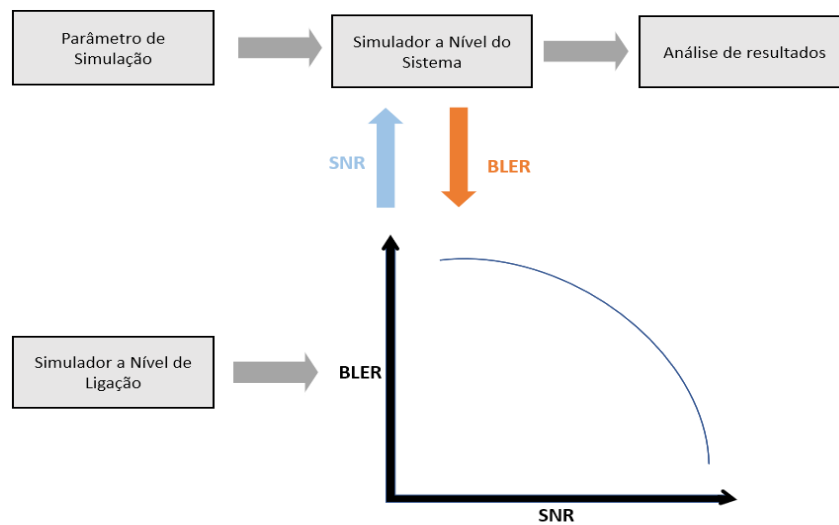


Figura 3.1 - Relação entre os simuladores de nível de sistema e de ligação [36]

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

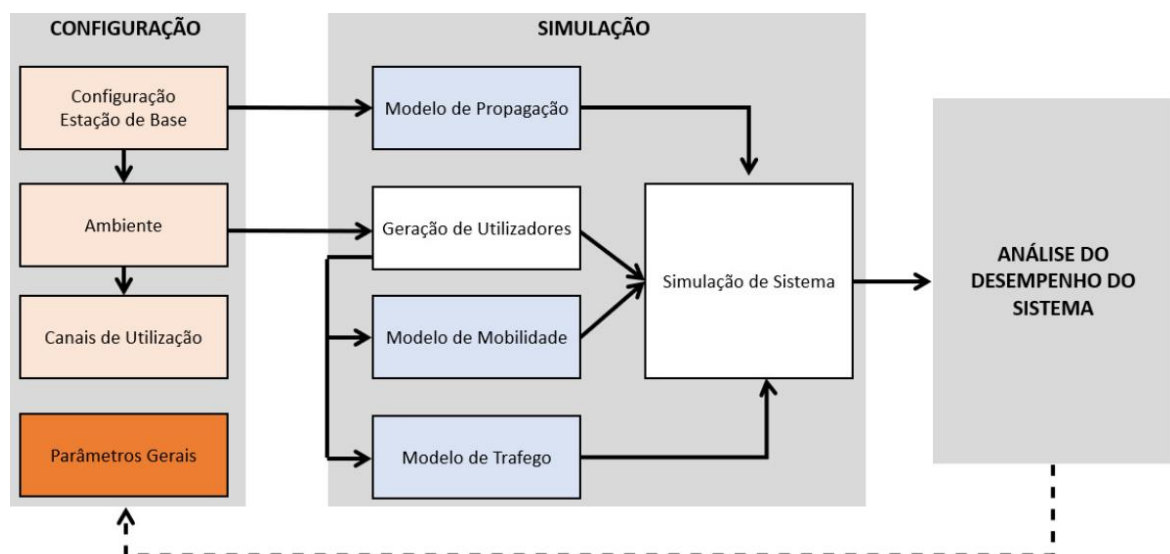


Figura 3.2 - Fases da simulação [36]

Na fase de configuração do sistema inclui a determinação precisa da localização e configuração do BS, a definição dos cenários de simulação e a especificação dos parâmetros gerais. No que diz respeito à fase de simulação, desempenha um papel importante neste processo, uma vez que executa os modelos de simulação que englobam o modelo de propagação, mobilidade e tráfego, bem como os vários cenários implementados. Além disso, também é realizada a geração das diversas UEs que serão atendidas pelo sistema. Durante esta fase, a topologia para os diferentes cenários explorados é construída de forma coerente, permitindo dotar os dispositivos móveis de um padrão de mobilidade representativo do cenário em análise.

Relativamente aos modelos de propagação, são estabelecidos por meio de quatro classes em JAVA. A primeira delas é a classe "Hata3GPP", que retrata as perdas médias de propagação considerando a distância entre os UE e as BS. A classe "*Fast_AoA*", por sua vez, realiza cálculos das variações do ângulo de chegada (AoA), enquanto também aborda a distribuição de probabilidade associada a essas variações. Para lidar com as variações de pequena escala no sistema, é utilizada a classe "*Fast_Fading*", que segue o modelo de desvanecimento de *Rayleigh*. Em contrapartida, a classe "*Shadowing*" assume o controlo das variações de grande escala no sistema através do modelo de desvanecimento Log-normal.

Finalmente, a última fase consiste na análise do desempenho do sistema, na qual, podemos evidenciar o comportamento do sistema em cada um dos cenários implementados. Esta análise engloba vários aspetos, tais como rendimento, cobertura, carga nas células, desempenho dos algoritmos de gestão de recursos de rádio.

3.2. Cenários de Implementação

Conforme referido anteriormente, foram implementados dois cenários considerando estúdio 5G NR, nomeadamente Std e Std3D. Ambos foram simulados com parâmetros específicos e operando nas frequências de portadora de 3.5 GHz (numerologia 1) e 28 GHz (numerologia 2), conforme detalhado na secção 3.1. Ambos utilizam a tecnologia 5G NR, com uma configuração em que cada setor de célula utiliza mMIMO composto por 256 antenas ativas. Cada setor de célula acomoda um total de 21 utilizadores.

Cada BS, possui 3 setores e está dividida em 2 zonas com diferentes ritmos binários dependendo da distância em relação à BS. Para distâncias até 8 metros da BS, são utilizados símbolos 256QAM com uma taxa de correção de erros (R_c) de 7/8, enquanto para distâncias até 16 metros, são utilizados símbolos 16QAM com R_c de 3/4. O número de BSs variam de acordo com o cenário em consideração. Os parâmetros específicos de ambos os cenários estão resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de configuração para o cenário Std e Std3D

Parâmetros	Std	Std3D
Número de BSs	12	24
Nº total sector	36	72
Nº total de UEs	756	1512
Esquemas de modulação	16QAM ;256QAM	16QAM;256QAM
Altura da antena da BS – hBS [m]	25	25 e 1,5
Esquema de transmissão	mMIMO	mMIMO
Modo de transmissão	<i>Full-Buffer</i>	<i>Full-Buffer</i>

Na Figura 3.3 e Figura 3.4, é apresentada a interface gráfica do simulador de sistema para ambos os cenários ilustrando a disposição das distintas BS, representadas como pontos pretos, e a localização dos utilizadores, representados por pontos vermelhos. A escolha da BS encarregada de atender a um utilizador específico é realizada pela própria rede.

O cenário Std, representa o cenário de um estádio de futebol, onde os utilizadores se encontram nas bancadas durante um jogo. A Figura 3.3 ilustra detalhadamente essa configuração, abrangendo uma área de 0,17x0,25 km², ou seja, 0,0425 km².

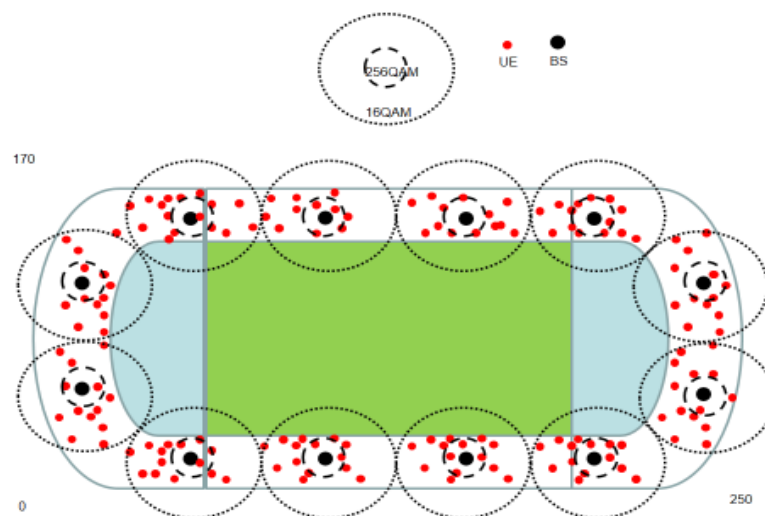


Figura 3.3 - Representação gráfica do cenário Std

Neste cenário, sendo que os utilizadores encontram-se apenas nas bancadas, representa um ambiente direcionado a células de dimensões amplas e cobertura contínua, no qual as células são implementadas para atender uma grande quantidade de utilizadores e lidar com picos de tráfego. As BSs, possuem uma altura de 25 metros e estão localizadas ao nível do telhado, considerando que o estádio com sendo *close-roof*. Este cenário é controlado em termos de interferência através da utilização de TRPs macro, ou seja, pontos de acesso por rádio instalados acima dos telhados, é assumido um modelo de tráfego "*full-buffer*", em que sempre há dados disponíveis para transmissão na fonte de tráfego.

O cenário Std3D conforme ilustrado na Figura 3.4, representa também um ambiente no estádio durante um evento, como por exemplo um concerto 3D, em que há uma concentração a significativa de UEs tanto nas bancadas como no relvado. Nesse contexto, com o objetivo de fornecer uma cobertura eficiente e capacidade adequada para a grande quantidade de utilizadores presentes, é implementada de múltiplas BSs, no total de 24 BSs, conforme detalhado na Tabela 3.2.

Este cenário representa um ambiente com uma concentração de utilizadores mais significativa face ao cenário anterior, na qual espera-se grande demanda de tráfego devido ao elevado número de utilizadores presente em toda a área. As BSs têm uma altura de 25 metros para a área das bancadas e 1.5 metros para atender à área do relvado, e também é adotado um modelo de tráfego "*full-buffer*".

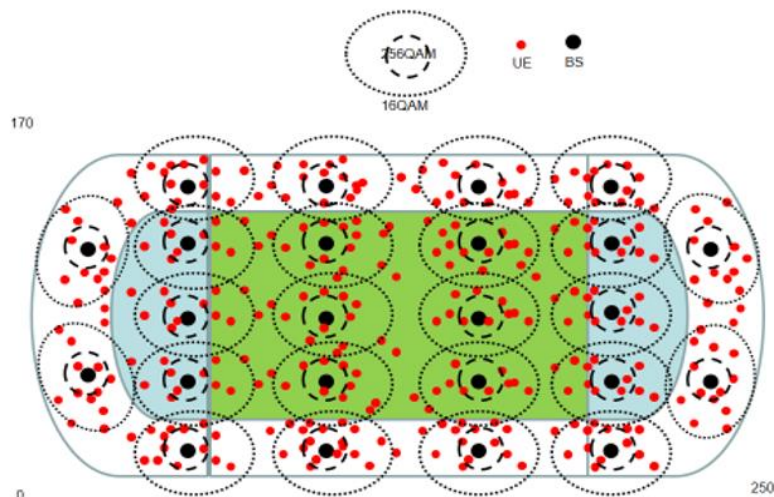


Figura 3.4 - Representação gráfica do cenário Std3D

Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentamos os resultados teóricos como também os resultados das simulações efetuadas, com foco na avaliação do desempenho do sistema 5G NR, considerando os dois cenários específicos que foram implementados. Além de apresentar os resultados numéricos e gráficos, também realizamos uma discussão de forma a avaliar o desempenho do sistema.

4.1. Resultados Teóricos

Os resultados teóricos em relação ao Planeamento Celular do Cenário Std encontra-se no Anexos .

4.2. Resultados das Simulações

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através das simulações a nível de sistema elaboradas, com base no planeamento celular de uma rede 5G considerando o cenário de um estádio de desportivo.

A discussão e a análise dos resultados serão centradas na avaliação do sistema em termos de *throughput* e de cobertura com o intuito de avaliar o desempenho do sistema em relação aos dois subcenários implementados, conforme mencionado anteriormente na Secção 3.2. Além disso, examinaremos o impacto dos diversos parâmetros considerados nas simulações.

Nas simulações realizadas, 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 e reduzindo a interferência entre as BSs. Neste contexto a rede é dividida em três conjuntos adjacentes de BSs, onde cada utilizador é servido por, no mínimo, uma BS.

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. Por outro lado, quando o tamanho do cluster é definido como “3C”, a rede é segmentada em três conjuntos de sites adjacentes, permitindo que cada utilizador seja servido simultaneamente por três sites. Isso resulta em uma redução significativa da interferência entre utilizadores, o que, por sua vez, contribui para aprimorar a qualidade do serviço e o desempenho geral da rede.

4.2.1. Resultados de *Throughput*

Esta secção apresenta os resultados referentes ao *throughput*. Os gráficos apresentados ilustram a variação do *throughput* em relação ao número de utilizadores, a variação do *throughput* em relação à potência e o *throughput* médio em função do tempo. Esses resultados abrangem ambos os cenários implementados (Std e Std3D) com diferentes tamanhos de clusters, nomeadamente 1C e 3C. Para a realização dessas simulações, foi considerado a presença de 21 utilizadores por setor, com um total de 256 antenas ativas para servir esses utilizadores.

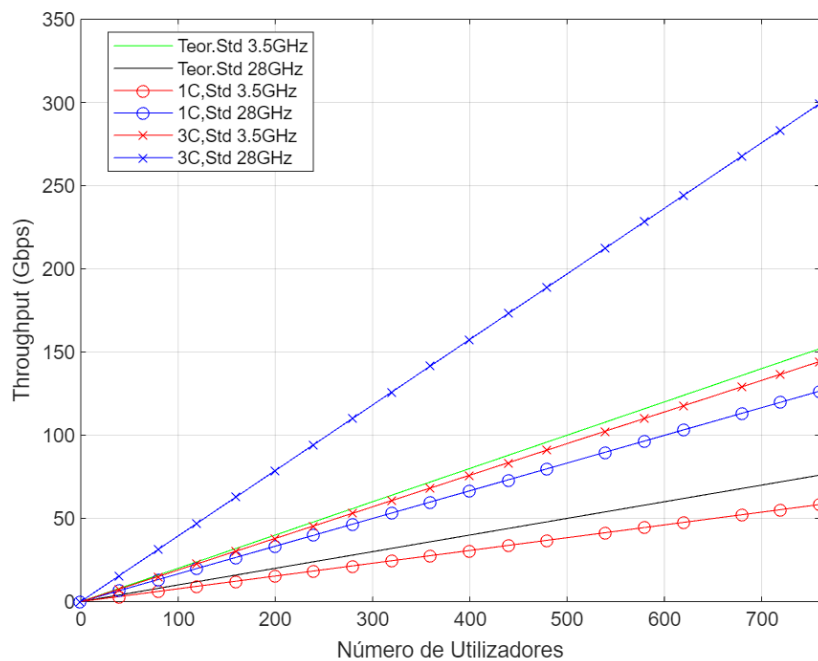


Figura 4.1- *Throughput* vs. Número de Utilizadores, cenário Std, cluster RAN 1C e 3C.

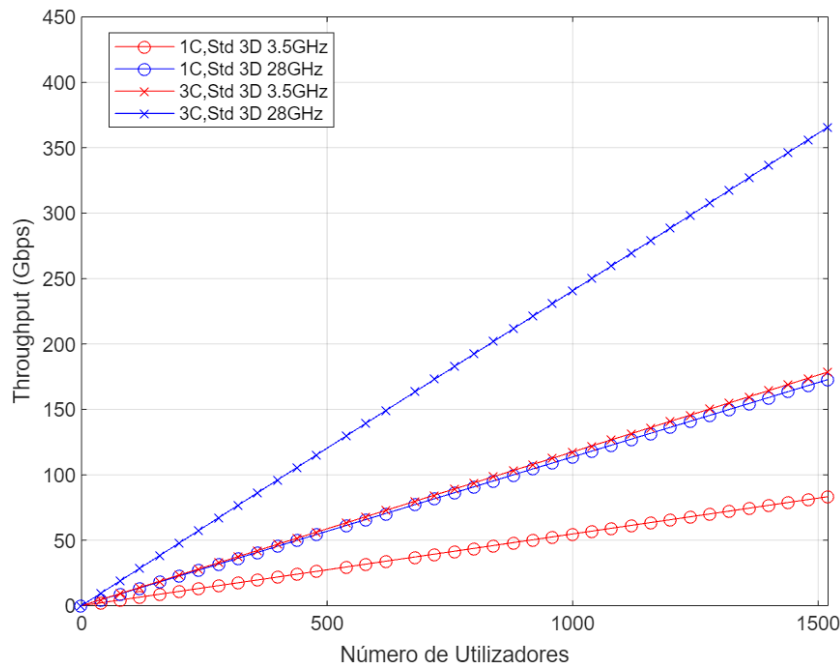


Figura 4.2 - *Throughput* vs. Número de Utilizadores, cenário Std 3D, cluster RAN 1C e 3C.

Ao analisar os resultados representados nas Figura 4.1 e Figura 4.2, que descrevem a variação do *throughput* em relação ao número de utilizadores, verifica-se que o cluster com tamanho igual a três (3C) atinge níveis de *throughput* significativamente superiores em ambos os cenários e frequências, independentemente do número de utilizadores. Isso representa um desempenho superior quando comparado com o cluster da RAN de tamanho igual a um (1C). A razão da configuração 3C ser muito superior à 1C tem a ver com a significativa redução da interferência inter-sites.

Podemos observar que no cenário Std representado na Figura 4.1, para a frequência da portadora 28 GHz e largura de banda 100 MHz, foi considerado o uso da numerologia 2 do 5G NR, atinge-se um *throughput* máximo de aproximadamente 299 Gbps para o cluster com tamanho 3C. Seguido da frequência de portadora 3.5 GHz e largura de banda 50 MHz, considerado o uso da numerologia 1, que atinge um valor de aproximadamente 144Gbps.

O gráfico da Figura 4.1 também representa os resultados teóricos obtidos a partir dos cálculos detalhados no Anexo A, na qual, podemos observar que para a numerologia 1, operando a uma frequência de 3.5 GHz, o *throughput* atinge um valor máximo de 75.6 Gbps. Por outro lado, a numerologia 2, com uma frequência portadora de 28 GHz, alcança um valor máximo de 151.2 Gbps, representado assim um melhor desempenho face a numerologia 1. É essencial notar que, para os resultados teóricos foi considerado que o sistema está a operar no modo TDD, na qual, metade do tempo é dedicado à transmissão das BS para os dispositivos móveis (*Downlink*), enquanto a outra metade é reservada para a transmissão dos dispositivos móveis para as BS (*Uplink*), apenas metade da capacidade está sendo utilizada. No entanto, nas simulações apresentadas, foi considerado que apenas existe o tráfego *Downlink*, não há *Uplink*. Portanto, os valores das simulações são o dobro dos valores teóricos, uma vez que os resultados teóricos representam metade *Downlink* e a outra metade *Uplink*.

Ao examinarmos os resultados no cenário Std3D representado na Figura 4.2, constata-se que, à semelhança do no cenário anterior, o cluster 3C para a frequência de portadora 28 GHz e largura de banda 100 MHz, numerologia 2, atinge um valor de aproximadamente 365Gbps, seguido da numerologia 1, frequência de portadora 3.5 GHz, que atinge um valor de aproximadamente 178Gbps.

Em suma, foram alcançados valores de *throughput* mais elevados para 3C, em comparação com 1C, onde cada utilizador é servido por apenas um site, o reuso da frequência em todos os locais circundantes a esse local resulta em interferência mais significativa, especialmente quando o número de utilizadores aumenta.

Destaca-se também o facto de que na Figura 4.2, onde se representa o cenário Std3D, considerando que este cenário incorpora o dobro de BS e utilizadores em comparação com o cenário Std, é expectável um aumento no *throughput* devido ao acréscimo de mais BS e utilizadores. Há, contudo, uma maior interferência ao servir simultaneamente um número maior de dispositivos, o que origina uma quebra nesse aumento. Mesmo assim, traduz-se em uma distribuição mais eficiente dos recursos da rede e, conseqüentemente, em um aumento do *throughput* global.

Essa observação é relevante, pois demonstra a capacidade de dimensionamento e escalabilidade do sistema em resposta ao aumento da demanda, também confirma a eficácia das estratégias de expansão da rede, como a adição de BS, para lidar com um número crescente de utilizadores e garantir uma experiência de alta qualidade.

Em termos gerais, independentemente do cenário, frequência e número de utilizadores considerados, fica claro que o cluster da RAN com tamanho igual a três (3C) por otimizar a distribuição de tráfego e minimizar a interferência, consegue atingir um desempenho superior e o uso de frequências mais altas resulta em um maior *throughput*, permitindo acomodar mais utilizadores, com um desempenho satisfatório. À medida que o número de utilizadores aumenta, o *throughput* também aumenta linearmente para ambos os tipos de cluster e frequências. Isto indica que, o sistema é capaz de acomodar um maior número de utilizadores oferecendo um aumento adicional no *throughput*.

De seguida, seguem-se a Figura 4.3 e Figura 4.4 que representam a variação do *throughput* em função da potência para os dois cenários.

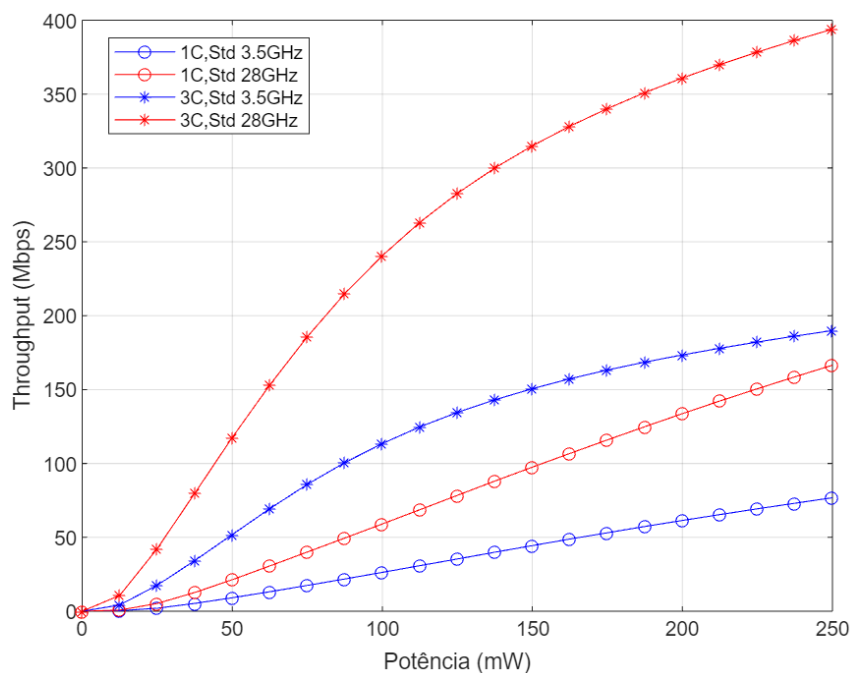


Figura 4.3 - *Throughput* vs Potência, cenário Std, cluster RAN 1C e 3C

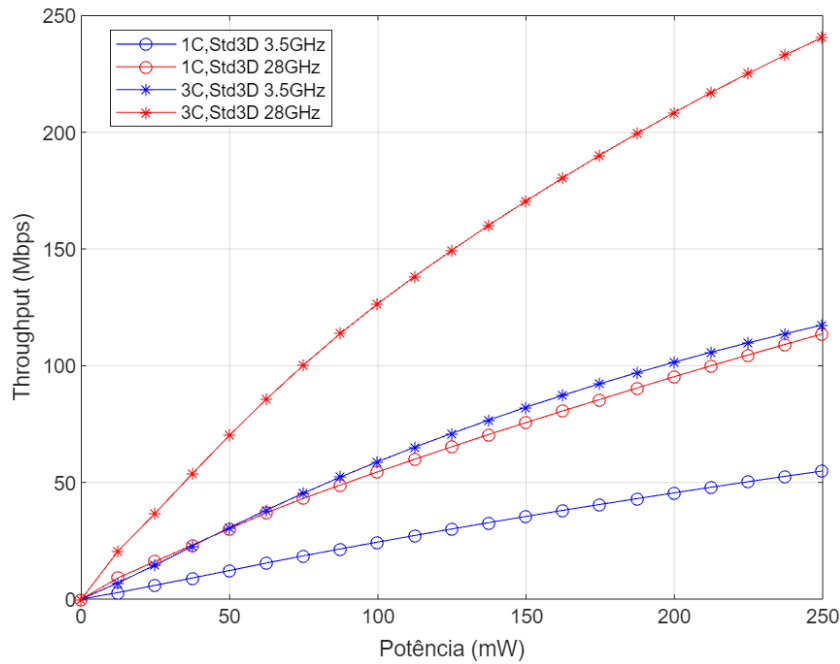


Figura 4.4 - *Throughput* vs Potência, cenário Std3D, cluster RAN 1C e 3C

Ao analisar os gráficos representados nas Figura 4.3 e Figura 4.4 do *throughput* em função da potencia de transmissão verifica-se que, o cluster 3C independentemente do cenário considerado é a que atinge valor mais elevado em relação ao 1C. Isso significa que, com o *clustering* 3C, o sistema é capaz de alcançar taxas de transferência de dados mais altas para uma determinada potência de transmissão.

Nota-se também que o cluster 3C também supera o desempenho na frequência de 28 GHz em comparação com a frequência de 3.5 GHz tanto para o cenário Std como para também para o Std3D, o que é esperado, uma vez que na frequência mais alta geralmente há maior largura de banda e maior capacidade de transmissão.

Em suma verifica-se que à medida que a potência de transmissão aumenta, o *throughput* também tende a aumentar. Contudo, esse aumento no *throughput* não é linear. Essa não linearidade ocorre porque um sinal com potência mais elevada resulta em mais interferência nos outros sites de transmissão e, portanto, mais retransmissões de pacotes recebidos erradamente, o que, por sua vez, tende a diminuir o *throughput*.

A seguir, as Figura 4.5 e Figura 4.6 apresentam o *Throughput* médio em função do tempo. Estes resultados dizem ambos respeito à configuração 1C.

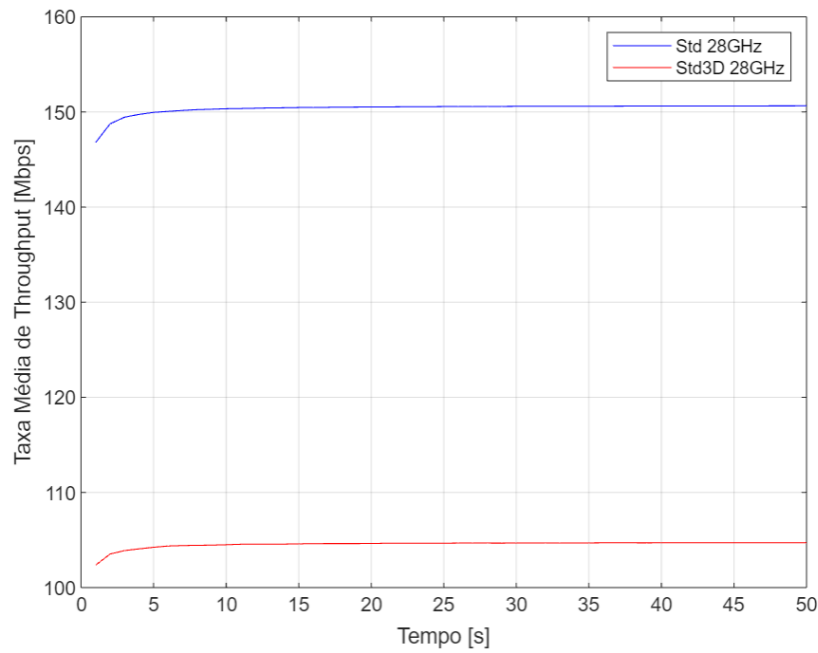


Figura 4.5 - Taxa média de *Throughput* vs Tempo para o cenário Std e Std3D para a frequência portadora de 28GHz

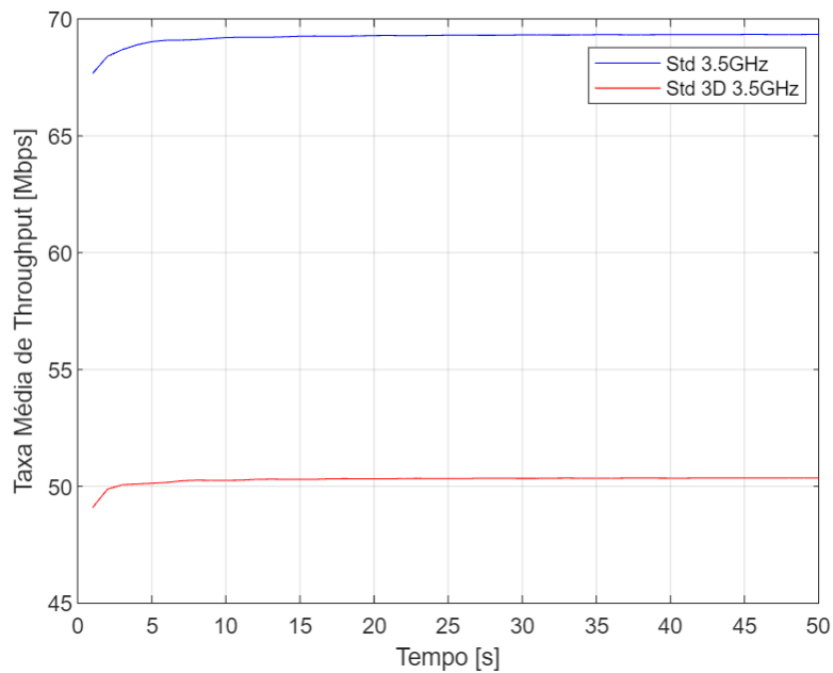


Figura 4.6 - Taxa média de *Throughput* vs Tempo para o cenário Std e Std3D para a frequência portadora de 3.5GHz

A Figura 4.5 representa a evolução do *throughput* médio ao longo do tempo para dois cenários (Std e Std3D), ambos operando na mesma frequência de 28GHz. Para o cenário Std o *throughput* médio inicia em cerca de 102.351 Mbps no primeiro segundo e aumenta gradualmente ao longo do tempo. Após um período inicial de crescimento, atinge um valor estável de cerca de 104.638 Mbps e permanece relativamente constante em torno deste valor.

Em contrapartida, o cenário Std3D também inicia com um *throughput* médio mais baixo, de 92.789 Mbps nos primeiros segundos. Semelhante ao cenário Std aumenta gradualmente até atingir um valor estável a volta de 94.348Mbps.

À semelhança do gráfico da Figura 4.5, o gráfico da Figura 4.6 que representa os 2 cenários para a frequência portadora de 3.5GHz, verifica-se que ambos apresentam um comportamento semelhante, o cenário Std permite obter valor mais elevado a nível de *throughput*, atingindo máximo aproximadamente 69.3Mbps e estabiliza em torno deste. Enquanto, o cenário Std3D atinge um máximo de 50.3 Mbps e estabiliza a volta deste valor.

Em resumo, os gráficos mostram que, apesar do aumento na frequência de portadora para 28GHz obtém-se um desempenho melhor comparando com os 3.5GHz, para ambos cenários.

O cenário Std supera o cenário Std3D em termos da taxa média de *throughput*, esta otimização de desempenho pode igualmente ser associada ao fato de que o cenário Std apresenta uma configuração com menos BS, o que potencialmente leva a uma distribuição mais eficaz de recursos de rede, contribuindo assim para esta diferença de desempenho entre os dois cenários.

4.2.2. Resultados de Cobertura

Esta secção tem como propósito apresentar os resultados obtidos em termos da cobertura em função da percentagem da potência de transmissão, para os dois cenários implementados (Std e Std3D), assim como para os diferentes tamanhos de *clustering* utilizados (1C e 3C). Para ambos os gráficos que se seguem foram simulados 21 utilizadores por setor.

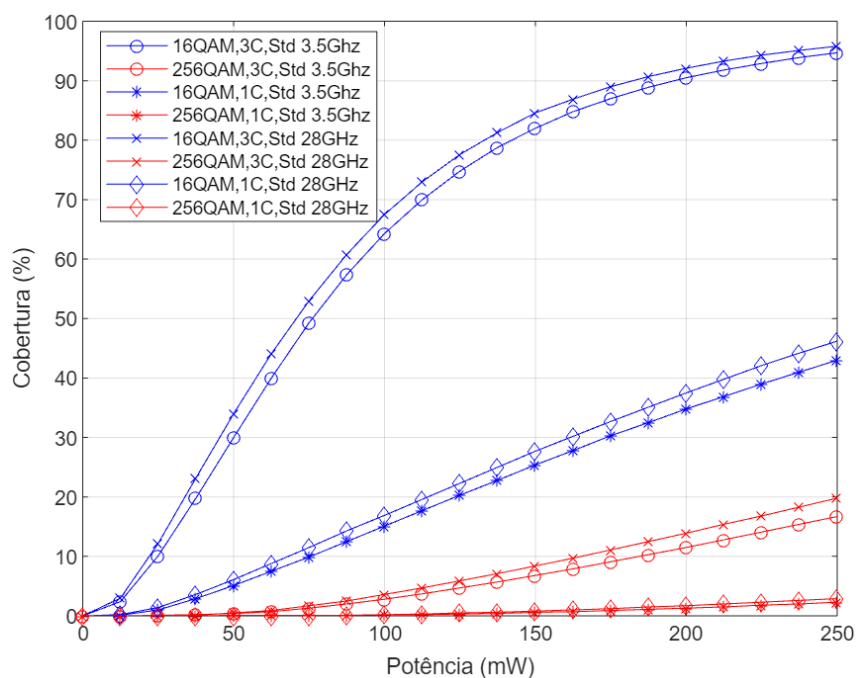


Figura 4.7 - Cobertura vs Potência, cenário Std, cluster 1C e 3C.

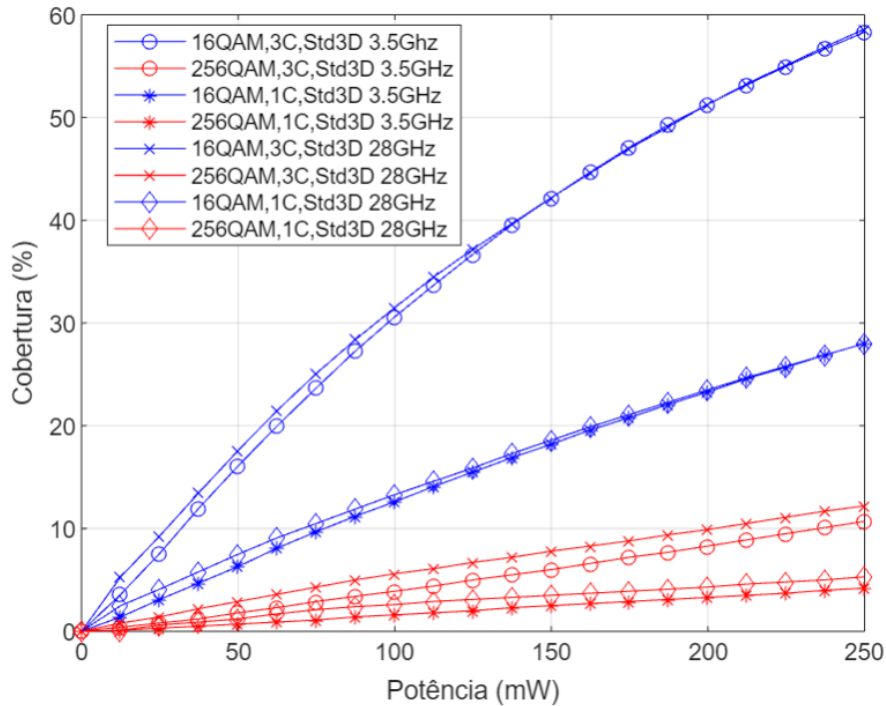


Figura 4.8 - Cobertura vs Potência, cenário Std3D, cluster 1C e 3C.

Ao analisar os gráficos representados nas Figura 4.7 e Figura 4.8, que ilustram a variação de cobertura em função da potência, torna-se evidente que, tanto para o cenário Std, como para o cenário Std 3D, o cluster da RAN com tamanho três (3C) permite atingir uma taxa de cobertura mais elevada, independentemente da frequência utilizada. Isso deve-se à colaboração entre múltiplas estações base, o que resulta em uma distribuição de sinal mais eficiente em toda a área atendida. Este fator se reflete em um desempenho superior em comparação com o uso de um cluster de tamanho um (1C).

No que diz respeito à modulação, observa-se que, independentemente do cenário implementado, a modulação 16QAM apresenta um melhor desempenho, face a modulação 256QAM, por permitir alcançar uma percentagem superior de cobertura, tanto para o cluster 1C, como para o cluster 3C. Isso significa que o sinal modulado em 16QAM é capaz de alcançar distâncias maiores sem perder qualidade de transmissão.

Por outro lado, a modulação 256QAM apresenta uma percentagem de cobertura menor. Isso implica que o sinal modulado em 256QAM tem uma capacidade limitada de alcance e tende a degradar-se mais rapidamente com o aumento da distância, embora possa oferecer maior capacidade de transmissão de dados, acaba por ser mais sensível a interferências e atenuações de sinal, o que pode resultar em uma qualidade de sinal comprometida.

Considerando o tamanho do cluster 3C e efetuando uma análise direta ao gráfico da Figura 4.7 que corresponde ao cenário Std, a modulação 16QAM permite atingir uma taxa de cobertura 95.8% enquanto a modulação de 256QAM atinge uma taxa de 19.8%. No que diz respeito ao cenário Std3D representado na Figura 4.8, a modulação 16QAM permite atingir uma taxa de cobertura mais elevada de 58.6% seguida da modulação 256QAM, em que a taxa de cobertura para a potência máxima alcança o valor de aproximadamente 12%.

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1. Conclusões

A presente dissertação teve como seu principal objetivo o planeamento e análise de desempenho de um sistema 5G NR, tendo em conta os cenários de implementação considerando um ambiente de um estádio.

Neste contexto, o desempenho do sistema foi analisado através de um simulador, atualizado de modo a simular uma rede 5G NR, na qual foi implementada dois cenários de estudo a decorrer num ambiente de um estádio (Std e Std3D) onde se considera uma grande demanda de tráfego dado ao elevado número de UEs presentes em toda a área. Foram executadas simulações considerando os dois cenários implementados ambas com configurações distintas na qual o número utilizador e número de BSs variam de acordo com cada cenário. Foi considerado dois tipos de modulação, nomeadamente 16QAM e 256QAM, na qual, também foi implementado arquiteturas de antenas de grande escala, sistema M-MIMO com a utilização de 256 antenas ativas por setor para servir os UEs.

No que diz respeito a gama de frequências a utilizar, foram selecionadas as numerologias 1 e 2 do 5G NR, com frequências portadoras de 3.5 GHz e 28 GHz, respetivamente.

A avaliação de desempenho do sistema baseou-se nos resultados obtidos para o *throughput* e a cobertura da rede, na qual foi apresentado os resultados do *throughput* em função do número de utilizadores, em função da potência, como também a taxa média *throughput* em função do tempo. Em termos de cobertura, foi apresentado os resultados taxa de cobertura alcançada em função da percentagem de potência transmitida.

No âmbito da otimização do sistema, foi incorporada a estratégia denominada "*clustering*", na qual que permite a um terminal seja atendido por pelo menos uma BS ou simultaneamente por múltiplas BSs, avaliando assim dois cenários distintos: um em que não existe *clustering*, ou seja, quando o tamanho do cluster da RAN possui o valor de um (1C), e outra, quando o tamanho do cluster é igual a três (3C), na qual a rede é repartida em três conjuntos de sites adjacentes.

Os resultados obtidos revelaram um impacto positivo na performance do sistema quando se utilizou a técnica de *clustering* tanto em termos de *throughput* quanto de cobertura, evidenciaram que a utilização do *clustering* 3C superou consistentemente o *clustering* 1C em todos os cenários. Mais especificamente, os resultados obtidos a nível de *throughput* em função dos utilizadores, demonstram claramente que independentemente do cenário (Std ,Std 3D), frequência e número de utilizadores considerados, o *clustering* 3C atingiu níveis de *throughput* significativamente superiores, devido à baixa interferência associada.

Portanto, a implementação da técnica de *clustering* 3C demonstrou ser uma escolha mais eficaz na otimização do desempenho do sistema em comparação com o *clustering* 1C, mostrando assim que essa estratégia oferece uma abordagem eficaz para lidar com a interferência e otimizar a qualidade da comunicação em ambientes complexos, tais como os dois cenários em análise considerando o ambiente em estádio.

Em relação aos resultados obtidos a nível de *throughput* em função da potência transmitida também se verifica que com *clustering* 3C, o sistema é capaz de alcançar taxas de transferência de dados mais altas para uma determinada potência de transmissão.

Por outro lado, no que diz respeito à cobertura os resultados indicam que a modulação de 16QAM apresentou um melhor desempenho face a modulação 256QAM, permitiu alcançar uma percentagem superior de cobertura, independentemente da aplicação da técnica de *clustering*, ou seja, tanto para o cluster 1C como para o cluster 3C, a modulação 16QAM permitiu a obter um maior alcance de cobertura. Notavelmente, a melhor taxa de cobertura foi obtida com *clustering* 3C, alcançando uma taxa de 95.8% para o cenário Std e 58.6% para o cenário Std3D. Isso evidencia que, o sinal modulado em 16QAM é capaz de alcançar distâncias maiores sem comprometer qualidade de transmissão.

Considerando também as duas numerologias utilizadas, os resultados teóricos do planeamento celular como também os resultados das simulações, torna-se evidente que, em termos de *throughput*, o sistema apresenta um desempenho significativamente superior quando opera com a numerologia 2, com frequência portadora de 28 GHz, em comparação com a configuração que utiliza a numerologia 1, com frequência portadora de 3.5 GHz. Além disso, no que diz respeito à cobertura, a escolha da numerologia 2, também se destaca, proporcionando uma taxa de cobertura superior.

Estes resultados sublinham a importância da seleção adequada de parâmetros e técnicas de otimização, modulação e numerologia, quando se pretende planejar e otimizar um sistema de comunicação 5G NR. A presente dissertação contribui para o avanço no conhecimento das melhores práticas para planejar e implementar redes 5G NR em ambientes desafiadores, como estádios, eventos populares, onde a demanda por alta qualidade e desempenho precisam ser asseguradas.

5.2. Trabalho Futuro

Dado o ritmo constante de avanços nas redes 5G, é fundamental reconhecer a necessidade de adaptação. Portanto, como parte do trabalho futuro, propõe-se a introdução de novos cenários que permitam explorar a aplicabilidade do simulador em diversos contextos. Por exemplo, pesquisas futuras podem investigar como a comunicação D2D pode ser implementada em estádios, especialmente em situações de alta densidade de dispositivos, como também avaliar como isso afeta o *throughput* e a cobertura. Além disso, é pertinente considerar também, a possibilidade de implementação com experimentos práticos em um ambiente de estádio real a fim de validar as conclusões obtidas por meio das simulações, pode ser uma extensão valiosa deste trabalho.

Esta abordagem permitirá uma análise mais abrangente do desempenho da rede 5G em vários cenários, proporcionando insights valiosos quer para a comunidade acadêmica como também para a indústria de telecomunicações de forma auxiliar na escolha dos parâmetros e configurações no planejamento das novas redes e otimizar de acordo com as características de cada ambiente.

Referências Bibliográficas

- [1] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, “A Design Science Research Methodology for Information Systems Research,” *J. Manag. Inf. Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, Dec. 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- [2] M. A. M. Albreem, “5G wireless communication systems: Vision and challenges,” in *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, Kuching, Sarawak, Malaysia: IEEE, Apr. 2015, pp. 493–497. doi: 10.1109/I4CT.2015.7219627.
- [3] “5G is coming: Ericsson Mobility Report 2018,” *We speak IoT*, Jul. 04, 2018. <https://www.wespeakiot.com/5g-is-coming-ericsson-mobility-report-2018/>
- [4] L. A. Oliveira, M. S. Alencar, and W. T. A. Lopes, “Evolução da Arquitetura de Redes Móveis Rumo ao 5G,” *Rev. Tecnol. Informação E Comun.*, vol. 8, no. 2, pp. 43–50, 2018.
- [5] “Press Release,” *ITU*. <https://www.itu.int:443/en/mediacentre/Pages/pr26-2020-evaluation-global-affirmation-imt-2020-5g.aspx>
- [6] “Qualcomm takes a significant step toward making 5G NR a reality | Qualcomm.” <https://www.qualcomm.com/news/onq/2016/06/qualcomm-takes-significant-step-toward-making-5g-nr-reality> (accessed Sep. 29, 2023).
- [7] “On the Secrecy Capacity of 5G New Radio Networks | Wireless Communications & Mobile Computing.” <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1155/2018/4359261>
- [8] “Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf.” Accessed: Feb. 06, 2022. [Online]. Available: https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf
- [9] “DiscussionPaper_Setting the scene for 5G_GSR18.pdf.” Accessed: Sep. 29, 2023. [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-D/Conferences/GSR/Documents/GSR2018/documents/DiscussionPaper_Setting%20the%20scene%20for%205G_GSR18.pdf
- [10] 5g Networks, “5G-NSA and 5G-SA networks compared,” *5G Networks*, Sep. 01, 2021. <https://www.5g-networks.net/5g-technology/5g-nsa-and-5g-sa-networks-compared/>
- [11] H. Basilier, J. Lemark, A. Centonza, and T. Asberg, “Applied network slicing scenarios in 5G,” *Ericsson Technol. Rev.*, vol. 2021, no. 2, pp. 2–11, Feb. 2021, doi: 10.23919/ETR.2021.9904667.
- [12] L. Xiaoyang, “What Is Network Slicing? How Does It Work? - Huawei,” Jul. 01, 2021. <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/Network+Slicing.html> (accessed Sep. 29, 2023).
- [13] S. Khan Tayyaba and M. A. Shah, “5G cellular network integration with SDN: Challenges, issues and beyond,” in *2017 International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE)*, Islamabad, Pakistan: IEEE, Mar. 2017, pp. 48–53. doi: 10.1109/C-CODE.2017.7918900.
- [14] F. Yang, H. Wang, C. Mei, J. Zhang, and M. Wang, “A flexible three clouds 5G mobile network architecture based on NFV & SDN,” *China Commun.*, vol. 12, no. Supplement, pp. 121–131, Dec. 2015, doi: 10.1109/CC.2015.7386160.
- [15] S. Zhang, “An Overview of Network Slicing for 5G,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. 3, pp. 111–117, Jun. 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800234.
- [16] T. Reply, “Fatiamento de rede, abrindo caminho para a tecnologia 5G,” *Reply*. <https://www.reply.com/pt/telco-and-media/5g-network-slicing> (accessed Sep. 30, 2023).
- [17] C. L. Gonçalves, “Simulação a nível de sistemas 5G através da utilização de ondas milimétricas,” masterThesis, 2021. Accessed: Sep. 30, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.iscte-iul.pt/handle/10071/23654>

- [18] R. Chataut and R. Akl, “Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction,” *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2753, May 2020, doi: 10.3390/s20102753.
- [19] N. H. M. Adnan, I. Md. Rafiqul, and A. H. M. Z. Alam, “Massive MIMO for Fifth Generation (5G): Opportunities and Challenges,” in *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, Jul. 2016, pp. 47–52. doi: 10.1109/ICCCCE.2016.23.
- [20] S. Kutty and D. Sen, “Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 18, no. 2, pp. 949–973, 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2504600.
- [21] “5G - The high-speed mobile network of the future,” *EE Times Asia*, Sep. 17, 2019. <https://www.eetasia.com/5g-the-high-speed-mobile-network-of-the-future/> (accessed Sep. 30, 2023).
- [22] A. Zakeri, N. Gholipoor, M. Tajallifar, S. Ebrahimi, and M. R. Javan, “E2E Migration Strategies Towards 5G: Long-term Migration Plan and Evolution Roadmap,” p. 10.
- [23] M. Wen *et al.*, “Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape,” *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 16, no. 1, pp. 7–25, Jan. 2022, doi: 10.1109/JSTSP.2021.3137669.
- [24] “5G-ACIA_5G_Non-Public_Networks_for_Industrial_Scenarios_09-2021.pdf.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: https://5g-acia.org/wp-content/uploads/5G-ACIA_5G_Non-Public_Networks_for_Industrial_Scenarios_09-2021.pdf
- [25] “ts_123251v140000p.pdf.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123251/14.00.00_60/ts_123251v140000p.pdf
- [26] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, “Network Slicing in 5G: Survey and Challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, May 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600951.
- [27] W. Y. Poe, J. Ordonez-Lucena, and K. Mahmood, “Provisioning Private 5G Networks by Means of Network Slicing: Architectures and Challenges,” in *2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Dublin, Ireland: IEEE, Jun. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145055.
- [28] A. Aijaz, “Private 5G: The Future of Industrial Wireless,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 14, no. 4, pp. 136–145, Dec. 2020, doi: 10.1109/MIE.2020.3004975.
- [29] E. C. Strinati *et al.*, “Beyond 5G Private Networks: the 5G CONNI Perspective,” in *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Taipei, Taiwan: IEEE, Dec. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367460.
- [30] J. P. Tomás, “What’s the role of edge computing in 5G manufacturing?,” *RCR Wireless News*, Aug. 27, 2021. <https://www.rcrwireless.com/20210827/5g/what-role-edge-computing-5g-manufacturing> (accessed May 02, 2023).
- [31] “ETSI TS 128 554 V16.7.0 (2021-01) 5G; Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI) (3GPP TS 28.554 version 16.7.0 Release 16).” Accessed: Mar. 21, 2023. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/128500_128599/128554/16.07.00_60/ts_128554v160700p.pdf
- [32] “Private_Network_Vol.2_Network_Architecture_and_Features_for_Industrial_Scenarios.pdf.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: https://images.samsung.com/is/content/samsung/assets/global/business/networks/insights/white-papers/1026-private-networks-vol-2-architectures-and-features-for-industrial-scenarios/Private_Network_Vol.2_Network_Architecture_and_Features_for_Industrial_Scenarios.pdf

- [33] Mahmood, Kashif, Gavras, Anastasius, and Hecker, Artur, “Non-Public-Networks - State of the art and way forward,” Nov. 2022, doi: 10.5281/ZENODO.7230191.
- [34] M. Fuentes *et al.*, “5G New Radio Evaluation Against IMT-2020 Key Performance Indicators,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 110880–110896, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3001641.
- [35] M. D. Jundhare and A. V. Kulkarni, “An overview and current development of femtocells in 5G technology,” in *2016 IEEE International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT)*, Pune, India: IEEE, Dec. 2016, pp. 204–209. doi: 10.1109/ICAECCT.2016.7942583.
- [36] A. Correia, “Ferramentas de Simulação.” 2006.

ANEXOS

Anexo A

Planeamento Celular do Cenário Std

Neste anexo, apresentamos os resultados dos cálculos efetuados em relação ao planeamento celular considerando o cenário Std, na qual, os utilizadores estão nas bancadas e a cobertura é fornecida pelo 5G NR com a tecnologia M-MIMO. Para esta análise, consideramos que o sistema opera no modo TDD.

Conforme ilustrado na Figura 3.3, o cenário em análise apresenta uma configuração em que as BS foram divididas em duas zonas distintas, cada uma com ritmos binários diferentes, dependendo da proximidade em relação à BS e foram utilizados dois esquemas de modulação, na qual, a modulação 256QAM com uma taxa de codificação (R_c) de $7/8$ para dispositivos dos UE localizados até 8 metros da BS, e a modulação 16QAM com (R_c) de $3/4$ para dispositivos situados a uma distância entre 8 e 16 metros da BS, conforme mencionado anteriormente na secção 3.2.

Os parâmetros utilizados para o planeamento e análise do sistema neste cenário são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros considerados para planeamento teórico do cenário Std.

Parâmetros	Valor	
	Numerologia 1	Numerologia 2
Frequência Portadora (f_c)	3.5 GHz	28 GHz
Largura de Banda por Portadora (B_t)	50 MHz	100 MHz
Espaçamento de Sub-portadoras (Δf)	30 KHz	60 KHz
Número de Símbolos por Subtrama (OFDM)	28	56
Número de Antenas Massivas por Setor (M)	256	
Número de Antenas por Utilizador (M/K)	12	
Número de UEs por Setor (K)	21	
Tempo de Coerência do Canal (T_c)	25 ms	
Largura de Banda de Coerência do Canal (B_c)	8 MHz	
Potência de Transmissão ($EIRP_{TX}$)	24 dBm	
Ganho da Antena de Receção (G_{RX})	0 dB	
Perda na Antena de Receção (L_{RX})	0 dB	
Ganho de Propagação em dB ($10\log(F)$)	8 dB	
Margem de Desvanecimento (M_F)	13 dB	
Densidade Espectral de Potência do Ruído Térmico ($10 \log(kT)$)	-174 dBm	
Número de Sub-portadoras (Nsc)	1650	
Duração de Símbolo (T_s)	1 ms	

- Cálculo da Potência do Ruído

Para calcular a potência do ruído, foi utilizado a seguinte equação:

$$10 \log(P_n) = 10 \log(kT) + 10 \log(B_c) + 10 \log(F) \quad (1)$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela 4.1 que compõe a equação (1) obtém-se que:

$$10 \log(P_n) = -174 + 8 + 80 = -86 \text{ dBm}$$

- Cálculo do número de bits e débitos binários:

Para determinar o número de bits (N_b), foi utilizado a seguinte equação:

$$N_b = N_{\text{símb/trama}} \times N_{sc} \times N_{\text{bits/símb.}} \quad (2)$$

Para a modulação 256QAM:

$$N_b = 56 \times 1650 \times 7 = 646800 \text{ bits}$$

Para esta modulação obtêm-se um débito binário capaz de assegurar uma comunicação eficiente tendo em conta o grande número de utilizadores no estádio.

Para a modulação 16QAM:

$$N_b = 56 \times 1650 \times 3 = 277200 \text{ bits}$$

Na modulação 16QAM, ainda obtemos um débito binário considerável suficiente para oferecer uma experiência de dados satisfatória aos utilizadores durante eventos esportivos no estádio.

Os valores de ritmo binário, em bits por segundo, podem ser expressos da seguinte forma:

$$R_b = 10 \log \left(\frac{N_b}{T_s} \right) \quad (3)$$

Na modulação 256QAM, alcançamos um elevado ritmo binário de 646.8 Mbps, proporcionando uma notável taxa de transmissão de dados, fundamental para atender às necessidades dos utilizadores no estádio. Na modulação 16QAM, embora ligeiramente menor, o ritmo binário é ainda substancial, atingindo 277.2 Mbps, assegurando uma experiência de dados satisfatória para os utilizadores.

- Relação Sinal-Ruído

De seguida calculamos a relação sinal-ruído, foi utilizada a seguinte equação:

$$10 \log(SNR) = 10 \log \left(\frac{E_b}{N_0} \right) + 10 \log \left(\frac{R_b}{B_t} \right) \quad (4)$$

Na qual, E_b/N_0 representa a relação entre a energia média por bit e a densidade espectral de potência do ruído.

Considerando os valores de E_b/N_0 para as diferentes modulações:

Para a modulação 256QAM:

$$10 \log \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = 5.1 \text{ dB} \quad (5)$$

Para a modulação 16QAM:

$$10 \log \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = 0.1 \text{ dB} \quad (6)$$

Aplicando a equação (4), para a modulação 256QAM, a SNR é de 13.2 dB, indica uma qualidade de sinal robusta, essencial para manter uma comunicação estável e rápida em um ambiente ruidoso, considerando o ambiente do estádio. Para a modulação 16QAM, obtêm-se um valor de SNR de 4.5 dB embora seja um pouco mais sensível ao ruído em comparação com o 256QAM. Ainda assim assegura uma transmissão de dados que atende às necessidades dos utilizadores, garantindo uma comunicação eficaz.

- Cálculo da Potência do Sinal

A potência do Sinal (S) é calculada usando a relação entre SNR e potência de ruído (P_n) através da seguinte equação:

$$10 \log(S) = 10 \log(SNR) + 10 \log(P_n) \quad (7)$$

Aplicando a equação (7), para a modulação 256QAM, a potência do sinal é -72.8 dBm, o que sugere que uma potência de transmissão mais elevada é necessária para superar as perdas de propagação e garantir a qualidade da comunicação. Para a modulação 16QAM, a potência do sinal é de -81.5 dBm, o que indica que a comunicação requer menos potência de transmissão em comparação com 256QAM tornando-a mais eficiente considerando este ambiente em estádio.

- Cálculo da Perda de Propagação

A perda de propagação (L_{path}) é calculada utilizando a equação:

$$L_{path} = EIRP_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - M_F - 10 \log(S) \quad (8)$$

Assumindo os parâmetros da Tabela 4.1 e tendo considerando que cada BS tem 2 zonas, os cálculos resultam nas seguintes perdas de propagação:

Para a modulação 256QAM:

$$L_{path_1} = 11dB + 72.8dB = 83.8dB \quad (9)$$

Para a modulação 16QAM:

$$L_{path_2} = 11dB + 81.5dB = 92.5dB \quad (10)$$

O resultado demonstra que, para a modulação 256QAM, a perda de propagação é de 83.8 dB, enquanto para a modulação 16QAM, a perda é de 92.5 dB. Esses valores mais altos na modulação 16QAM indicam que o sinal sofre perdas de propagação mais significativas, exigindo uma maior potência de transmissão garantir uma qualidade de comunicação adequada.

- Cálculo da Distância da Zona de Cobertura

A partir da perda de propagação para cada uma das zonas calculadas, podemos determinar as distâncias das zonas de cobertura (R_1, R_2) expressa em metros, na qual foi considerando a seguinte equação:

$$L_{path} = 61.9 + 25.5 \log(R) \quad (11)$$

Para a modulação 256QAM:

$$L_{path} = L_{path_1} \Rightarrow R_1 = 7.2m$$

Para a modulação 16QAM:

$$L_{path} = L_{path_2} \Rightarrow R_2 = 15.9m$$

Esses cálculos determinam a distância aproximada que o sinal pode se propagar eficazmente em cada modulação.

- Análise da Capacidade mMIMO do Sistema

A seguir, explora-se em detalhes a capacidade do sistema mMIMO para o cenário em estudo. Para avaliar a capacidade, inicialmente, determinamos o número máximo de símbolos que podem ser transmitidos no canal com mMIMO, considerando os parâmetros da Tabela 4.1 utilizando a equação:

$$\tau_c = B_C \times T_C = 200000 \text{ símbolos} \quad (12)$$

Considerando que $\tau_p = K$, onde K representa o número utilizadores por sector temos que:

- 1) No *Downlink* (DL) $\Rightarrow N_s = 100000$ símbolos são transmitidos a cada T_C .
- 2) No *Uplink* (UL) $\Rightarrow N_s = 100000 - 21$ símbolos são transmitidos a cada T_C .

- Taxa de Símbolos no *Downlink*

A Taxa de Símbolos no *Downlink* (R_s) é calculada através da seguinte equação:

$$R_s = \frac{N_s}{T_C} \quad (13)$$

Ao aplicar esta equação obtêm-se uma taxa de símbolo no DL de 0.4×10^7 sps em cada B_C .

- A Taxa de Símbolos na Rede

A taxa de símbolos total na rede é calculada para cada numerologia, na qual, foi utilizada a seguinte equação:

$$R_{st} = \frac{B_t}{B_C} \times R_s \quad (14)$$

Onde B_t é a largura de banda total e B_C é a largura de banda do canal considerado 8 MHz e R_s é a taxa de símbolos no DL, calculado anteriormente.

Para a numerologia 1 aplicando a equação (14):

$$R_{st} = \frac{50}{8} \times 0.4 \times 10^7 \Rightarrow R_{st} = 2.5 \times 10^7 \text{ sps}$$

A taxa de símbolos na zona 1 e 2 (R_{st_1}, R_{st_2}) é calculada multiplicando R_{st} pela taxa de codificação R_c de cada zona.

Na zona 1, com $R_c = 7/8$ (256QAM) obtêm-se:

$$Rst_1 = Rst \times \frac{7}{8} \Rightarrow Rst_1 = 2.1875 \times 10^7 \text{ sps} \quad (15)$$

Na zona 2, com $Rc = 3/4$ (16QAM), obtêm-se:

$$Rst_2 = Rst \times \frac{3}{4} \Rightarrow Rst_2 = 0.9375 \times 10^7 \text{ sps} \quad (16)$$

Para numerologia 2 aplicando a equação (14):

$$Rst = \frac{50}{8} \times 0.4 \times 10^7 \Rightarrow Rst = 5 \times 10^7 \text{ sps}$$

Na zona 1, com $Rc = 7/8$ (256QAM), obtêm-se:

$$Rst_1 = Rst \times \frac{7}{8} \Rightarrow Rst_1 = 4.375 \times 10^7 \text{ sps} \quad (17)$$

Na zona 2, com $Rc = 3/4$ (16QAM), obtêm-se:

$$Rst_2 = Rst \times \frac{3}{4} \Rightarrow Rst_2 = 1.875 \times 10^7 \text{ sps} \quad (18)$$

- Taxa de Símbolos por Setor em Cada Zona:

A taxa de símbolos por setor é calculada para cada área da zona (A_1, A_2) levando em consideração o número utilizador por setor (K), através da seguinte equação:

$$Rsc_{1,2} = Rst_{1,n} \times K \times (A_{1,2} / A_T) \quad (19)$$

Onde, A_T é a área total do setor e:

$$A_1 = \pi \times 8^2 \quad (20)$$

$$A_2 = \pi \times (16^2 - 8^2) \quad (21)$$

- O Ritmo Binário Total por Setor

O Ritmo Binário Total por Setor (Rbc) é obtido somando as taxas de símbolos por setor (Rsc) das zonas Rsc_1 e Rsc_2 dado pela seguinte equação:

$$Rbc = Rsc_1 + Rsc_2 \quad (22)$$

Para a numerologia 1:

$$Rsc_1 = 2.1875 \times 10^7 \times \left(\frac{A_1}{A_T}\right) \Rightarrow Rbc_1 = 91.875 \times 10^7 \text{ bps}; (8\text{bits/símbolo})$$

$$Rsc_2 = 0.9375 \times 10^7 \times \left(\frac{A_2}{A_T}\right) \Rightarrow Rbc_2 = 118.125 \times 10^7 \text{ bps}; (4\text{bits/símbolo})$$

Aplicando a equação (22) obtêm-se o valor de Rbc para numerologia 1:

$$Rbc = Rsc_1 + Rsc_2 = 210 \times 10^7 \text{ bps}$$

Para numerologia 2:

Efetuada o cálculo das taxas de símbolos por setor (Rsc) das zonas Rsc_1 e Rsc_2 através da equação (19) obtêm-se:

$$Rsc_1 = 4.375 \times 10^7 \times \left(\frac{A_1}{A_T}\right) \Rightarrow Rbc_1 = 183.75 \times 10^7 \text{ bps}; (8\text{bits/símbolo})$$

$$Rsc_2 = 1.875 \times 10^7 \times \left(\frac{A_2}{A_T}\right) \Rightarrow Rbc_2 = 236.25 \times 10^7 \text{ bps}; (4\text{bits/símbolo})$$

Aplicando a equação (22) obtêm-se o valor de Rbc para numerologia 2:

$$Rbc = Rsc_1 + Rsc_2 = 420 \times 10^7 \text{ bps}$$

Ao analisar os resultados, verifica-se que quando o sistema opera com a numerologia 2 com uma frequência de 28 GHz, a capacidade de transmissão é significativamente maior, com um Rbc de $420 \times 10^7 \text{ bps}$. Isso mostra que, com uma frequência portadora mais alta e considerando as outras configurações, o sistema pode suportar uma taxa de transmissão de dados mais elevada em comparação com a numerologia 1, permitindo lidar com as demandas de comunicação resultante do cenário em análise ou seja um ambiente em um estádio com elevada concentração de utilizadores.

- A Eficiência Espectral

A Eficiência Espectral é calculada através da seguinte equação:

$$\varepsilon = Rbc \times B_t \quad (23)$$

Para ambas as numerologias 1 e 2, a eficiência espectral é de 42 bps/Hz/ setor.

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

$$\varepsilon_K = \frac{\varepsilon}{K} \quad (24)$$

Tanto para a numerologia 1 quanto para a numerologia 2, a eficiência espectral por utilizador é de 2 bps/Hz/UE.

- *Throughput*

Considerando os 36 setores da célula e ambas as numerologias, o valor do *throughput* total é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Throughput} = Rbc \times 36 \quad (25)$$

Para a numerologia 1, o *throughput* total é de 75.6Gbps, enquanto para a numerologia 2, é de 151.2Gbps.

Os resultados teóricos apresentados acima proporcionam uma análise detalhada do planejamento celular do cenário Std de forma a avaliar o desempenho do sistema ao considerar os dois esquemas de modulação, 256QAM e 16QAM, bem como os outros parâmetros considerados. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a configuração com a Numerologia 2 (28 GHz) oferece uma capacidade de transmissão superior, adequada para lidar com as demandas de comunicação presente neste cenário em análise.