

iscte

INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Planeamento de rede privada 5G para Ministério das Finanças da
Guiné-Bissau

Carlos Mário Fernandes

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

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

Outubro, 2024



TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação

Planeamento de rede privada 5G para Ministério das Finanças da
Guiné-Bissau

Carlos Mário Fernandes

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

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

Outubro, 2024

Agradecimento

Em primeiro lugar, agradeço a Deus Todo-Poderoso pelo dom da vida e pela saúde que Ele me concedeu. Gostaria de agradecer a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram neste processo. No entanto, a lista seria muito longa e poderia acabar esquecendo alguém, por isso, permitam-me destacar algumas pessoas que foram extremamente importantes, começo pela minha família: minha esposa, Cristiana Sanca, e meus filhos, Evgueni Sanca Fernandes e Svetlana Sanca Fernandes. Por motivos de estudo, tive que ficar longe deles durante dois anos, e sentiram muito a minha falta. A seguir, agradeço à minha tia, Teresa Albino Nhaga, a quem carinhosamente chamo de "vizinha", pelo Alojamento em Lisboa, ao Caithson António Silva Biaguê meu grande amigo, obrigado pela motivação e força que tem me dado ao longo desta caminhada, e ao meu amigo Yannick Gama, a quem chamo de "colega de estudo", Muito obrigado pelo seu apoio e conselhos.

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

Resumo

As redes móveis passaram por uma grande evolução e se tornaram fundamentais para o dia a dia nos últimos anos. O surgimento do 5G é uma resposta à crescente necessidade de conectividade, inovação e eficiência, mas também traz desafios que implicam um planeamento, cuidados e análise de desempenho muito delicados.

Nesse cenário, é extremamente importante desenvolver um plano para as redes 5G, levando em consideração as características específicas dessa tecnologia e superando as limitações do 4G. Com isso em mente, esta dissertação foca no planeamento e análise do desempenho de um sistema 5G NR, em um ambiente específico do Ministério das Finanças da Guiné-Bissau. A ênfase está em encontrar soluções que possam minimizar interferências e melhorar a qualidade

A análise focou-se no desempenho do sistema, avaliando tanto o throughput quanto a cobertura, variando parâmetros como o número de usuários, tipos de modulação (16QAM e 256QAM) e arquiteturas de antenas de grande escala, incluindo sistemas M-MIMO. Foi utilizada a frequência de 3,6 GHz e, além disso, um simulador de sistema foi desenvolvido e atualizado para simular um ambiente laboral no Ministério das Finanças da Guiné-Bissau. Os resultados mostraram que a aplicação da estratégia de clustering trouxe melhorias significativas no desempenho, especialmente com o clustering 3C, que reduziu a interferência. A modulação 16QAM apresentou uma cobertura superior à da 256QAM.

Palavras-Chave: 5G NR; Simulação a Nível de Sistema; Planeamento de redes; Clustering; Modulação.

Abstract

Mobile networks have undergone significant evolution and have become essential in everyday life in recent years. The emergence of 5G responds to the growing need for connectivity, innovation, and efficiency, but it also brings challenges that require careful planning, attention, and delicate performance analysis.

In this context, it is extremely important to develop a plan for 5G networks, considering the specific characteristics of this technology and overcoming the limitations of 4G. With this in mind, this dissertation focuses on the planning and performance analysis of a 5G NR system, specifically in the environment of the Ministry of Finance in Guinea-Bissau. The emphasis is on finding solutions that can minimize interference and improve quality.

The analysis focused on system performance, evaluating both throughput and coverage while varying parameters such as the number of users, modulation types (16QAM and 256QAM), and large-scale antenna architectures, including M-MIMO systems. The frequency of 3.6 GHz was used, and a system simulator was developed and updated to simulate a workplace environment in the Ministry of Finance in Guinea-Bissau. The results showed that the application of a clustering strategy brought significant performance improvements, especially with 3C clustering, which reduced interference. The 16QAM modulation provided better coverage compared to 256QAM.

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

Índice

Agradecimento	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice das Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
Glossário de Siglas e Abreviaturas	viii
CAPÍTULO 1	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Questões de Pesquisa	2
1.3 Objetivo	2
1.4 Metodologia de Investigação.....	3
CAPÍTULO 2	6
Estado da Arte	6
2.1 Estado da Arte.....	6
2.2 A Quinta Geração das Redes Móveis (5G).....	7
2.3 Sistema de segurança na rede 5G	8
2.4 Vulnerabilidade da rede 5G.....	9
2.5 Arquitetura da Rede 5G.....	9
2.6 Arquitetura de rede 5G-NSA (Non-Stand-Alone) e 5G-SA.....	10
2.7 As Tecnologias que Garantem Suporte aos Serviços e Aplicações Numa Rede 5G 11	
2.7.1 Fatiamento de Rede - Network Slicing	11
2.7.2 Sistema M-MIMO	13
2.7.3 Formatação de feixe	14
2.7.4 Espectro	16
2.8 Redes Privadas 5G	17
2.8.1 Modos de implementação	18
2.8.2 Opções de Alocação de Espectro para 5G Privado	22
CAPÍTULO 3	26
Simulador de Sistema	26
3.1 Descrição do Simulador de Sistema.....	26
3.2 Cenários de Implementação.....	28
CAPÍTULO 4	31
Resultados e Discussão	31
4.1 Resultados das Simulações.....	31

4.1.1	Resultados de Throughput	31
4.1.2	Resultados de Cobertura	36
4.1.3	Resultados do CDF do SINR e do Throughput.....	38
CAPÍTULO 5.....		40
Conclusões e Trabalho Futuro		40
5.1	Conclusões.....	40
5.2	Trabalho futuro	41
Referencias bibliográficas		42
Anexos		46
Anexo A.....		46
	Tecnologias Facilitadoras para a Implantação de Redes Privadas 5G	46
	Otimização.....	49
Anexo B.....		51
	Planeamento Celular do Cenário InF (Ministério das Finanças – Bissau)	51

Índice das Figuras

Figura 1.1 DSRM Process Model [1].....	4
Figura 2.1 Evolução das redes de comunicações móveis [7]	6
Figura 2.2 Previsão da capacidade de dispositivos vs tráfego esperado em 2023[14].	7
Figura 2.4 arquitetura de core 5G [14]	10
Figura 2.5 Arquiteturas 5G: Não-Autónoma (á esquerda) e Autónoma (Direita) [18]	11
Figura 2.6 Fatiamento da rede 5G[23]	12
Figura 2.7 Sistema M-MIMO - Uplink e Downlink M-MIMO [39]	14
Figura 2.8 Técnica de beamforming em 5G comparado ao 4G [38]	15
Figura 2.9 Capacidade vs Cobertura considerando o espectro por categoria [26]	17
Figura 2.10 – Implementação da rede 5G autónoma [28]	19
Equação 2.11- Implementação com RAN partilhada [28].....	20
Figura 2.12- Implementação com RAN partilhada e plano de controle [23].....	21
Figuras 3.1 - Relação entre os simuladores de nível de sistema e de ligação [40].....	27
Figura 3.2 - Fases da simulação [40]	27
Figura 3.3 - Representação gráfica do cenário Std/InF	30
Figura 4.1 - Throughput vs. Número de Utilizadores, cluster RAN Outdoor e Indoor, Nu=210	32
Figura 4.2- Throughput vs. Número de Utilizadores, cluster RAN Outdoor e Indoor, Nu=480	33
Figura 4.3- Troughput vs Potência, cluster RAN 1C e 3C	34
Figur 4.4 - Troughput vs Potência, cluster RAN 1C e 3C.....	35
Figura 4.5 - Cobertura vs Potência, modulações 12QAM e 256QAM, Nu=210.....	36
Figuras 4.6- Cobertura vs Potência, modulações 16QAM e 256QAM, Nu=480.....	37
Figuras 4.7- CDF do SINR, 1C e 3C.....	38
Figuras 4.8- CDF do Throughput, 1C e 3C.....	39
Figura A.1 A integração dos sistemas 5G e TSN [28].....	48
Figura A.2 - Tipos de Small Cell [37]	50

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Opções de implementação e espectro para redes privadas 5G - Adaptada de [28].	24
Tabela 3.1 - Características globais do simulador	26
Tabela 3.2 – Parâmetros de configuração	29

Glossário de Siglas e Abreviaturas

- 1G** – Primeira Geração
- 2G** – Segunda Geração
- 3G** – Terceira Geração
- 3GPP** – Third Generation Partnership Project
- 4G** – Quarta Geração
- 5G** – Quinta Geração
- BS** – estação de base
- DSRM** - Design Science Research Methodology
- eMBB** –Enhanced Mobile Broadband
- EPC** – Evolved Packet Core
- IMSI** - Identificador Internacional de Assinante Móvel
- IoT** – Internet of Things
- LTE** – Long Term Evolution
- mMTC** – Massive Machine Type Communications
- MIMO** – Multiple-Input-Multiple-Output
- M-MIMO** – Massive MIMO
- NFV** - virtualização das funções de rede
- NR** – New Radio
- VR/AR** - Realidade Virtual/Aumentada
- 3D** – Três Dimensões
- AoA** – Azimuth Angle of Arrival
- BER** – Bit Error Rate
- BLER** – Block Error Rate
- ITU** – International Telecommunication Union
- KPI** – Key Performance Indicators
- mmWave** – millimeter Wave
- M-QAM** – M-ary Quadrature Amplitude Modulation
- QAM** – Quadrature Amplitude Modulation
- RAN** – Radio Access Network

TTI – Transmission Time Interval

NPNs - Non-Public Network

NSA – Non-Standalone

QoS - qualidade do serviço

SA – Standalone

SNR - relação sinal-ruído

SDN -redes definidas por software

UE – User Equipment

UL – Uplink

URLLC – Broadband Ultra-Reliable Low-Latency Communication

CAPÍTULO 1

Introdução

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

1.1 Enquadramento e Motivação

A quinta geração de tecnologia móvel, ou 5G, representa uma revolução significativa nas comunicações sem fio. Ao suceder a tecnologia 4G, o 5G não é apenas uma melhoria incremental, mas uma mudança paradigmática que promete transformar fundamentalmente a forma como nos conectamos, comunicamos e interagimos com o mundo digital. Uma das características distintivas do 5G é sua impressionante velocidade de transmissão de dados. Comparado ao 4G, o 5G oferece uma largura de banda substancialmente maior, permitindo downlink e uplink muito mais rápidos. Essa capacidade é crucial para suportar a crescente demanda por serviços de streaming de alta qualidade, realidade virtual, jogos online e outras aplicações intensivas em dados. Além da velocidade, a latência reduzida é outra vantagem marcante do 5G. A latência na transmissão de dados, é minimizada no 5G, possibilitando interações em tempo real e facilitando o desenvolvimento de tecnologias como carros autônomos e cirurgias remotas.

A capacidade aprimorada é uma resposta direta à explosão de dispositivos conectados na era da Internet das Coisas (IoT). Com o 5G, espera-se que bilhões de dispositivos possam comunicar-se simultaneamente, impulsionando aplicações como cidades inteligentes, casas conectadas e automação industrial avançada.

A confiabilidade do 5G é garantida por meio de tecnologias inovadoras, como o conceito de “network slicing”, que permite a criação de redes virtuais personalizadas para atender a diferentes requisitos de serviços. Isso é crucial para garantir uma conexão estável e confiável em diversas situações e ambientes.

Além disso, o 5G não é apenas uma atualização tecnológica, é um catalisador para uma série de inovações e avanços em diversos setores. Desde a telemedicina até a automação industrial avançada, passando por experiências de realidade aumentada mais imersivas, o 5G está

moldando um futuro onde a conectividade é o alicerce para uma sociedade mais eficiente, segura e interconectada.

No entanto, vale ressaltar que a implementação global do 5G não está isenta de desafios, incluindo questões de infraestrutura, segurança e privacidade. À medida que essa tecnologia continua a se expandir, é essencial abordar esses desafios para garantir um aproveitamento completo de seu potencial transformador.

1.2 Questões de Pesquisa

Diante desse cenário, apresento a seguir algumas questões que exploram os potenciais impactos e desafios dessa transição para o 5G:

- Como a adoção do 5G influencia a economia global, a competitividade e a inclusão digital?
- Como a tecnologia 5G impulsiona a inovação em comunicações móveis e quais são suas características distintivas?
- Quais são os principais desafios e considerações de segurança associados à implementação em larga escala do 5G?
- Quais são as perspectivas e tendências futuras para o 5G, considerando evoluções tecnológicas e aplicações emergentes?
- Como a tecnologia 5G impulsiona a inovação em comunicações móveis e quais são as suas características distintivas?

1.3 Objetivo

O objetivo principal desta iniciativa é realizar o planejamento e implementação eficientes de uma rede 5G NR no ambiente operacional do Ministério das Finanças da Guiné-Bissau. Especificamente, o foco será na otimização da cobertura e na maximização do throughput da rede. Para alcançar este propósito, será desenvolvido um plano abrangente de implementação, considerando as particularidades do Ministério. Além disso, este projeto visa avaliar comparativamente o planejamento e otimização da rede 5G em relação à geração anterior (4G), destacando as características distintas, funcionalidades e benefícios da nova geração. A avaliação do desempenho será conduzida por meio de simulações utilizando um simulador JAVA adaptado ao ambiente específico do Ministério das Finanças, proporcionando insights valiosos para a eficácia da transição para o 5G neste complexo governamental.

1.4 Metodologia de Investigação

A metodologia de investigação adotada para o desenvolvimento desta dissertação baseou-se na Design Science Research Methodology (DSRM), com ênfase na abordagem do problema. O foco principal foi considerar a necessidade de planeamento de redes 5G NR diante das limitações da geração anterior, 4G, ainda em uso no Ministério das Finanças da Guiné-Bissau.

O DSRM é uma metodologia de pesquisa amplamente utilizada no desenvolvimento de investigações tecnológicas, composta por seis etapas. Na primeira etapa, dedicada à identificação do problema e sua motivação, a segunda etapa envolve a definição dos objetivos da solução proposta. A terceira etapa concentra-se no design e desenvolvimento da solução.

Após a conclusão do desenvolvimento, a pesquisa avança para a quarta etapa, que se refere à demonstração da solução. A quinta etapa é a avaliação, na qual a solução da tecnologia 5G NR proposta será avaliada em termos de custo e benefício. Finalmente, a sexta etapa trata da comunicação dos resultados obtidos [1].

A figura a seguir demonstra as etapas previstas para a metodologia DSRM:

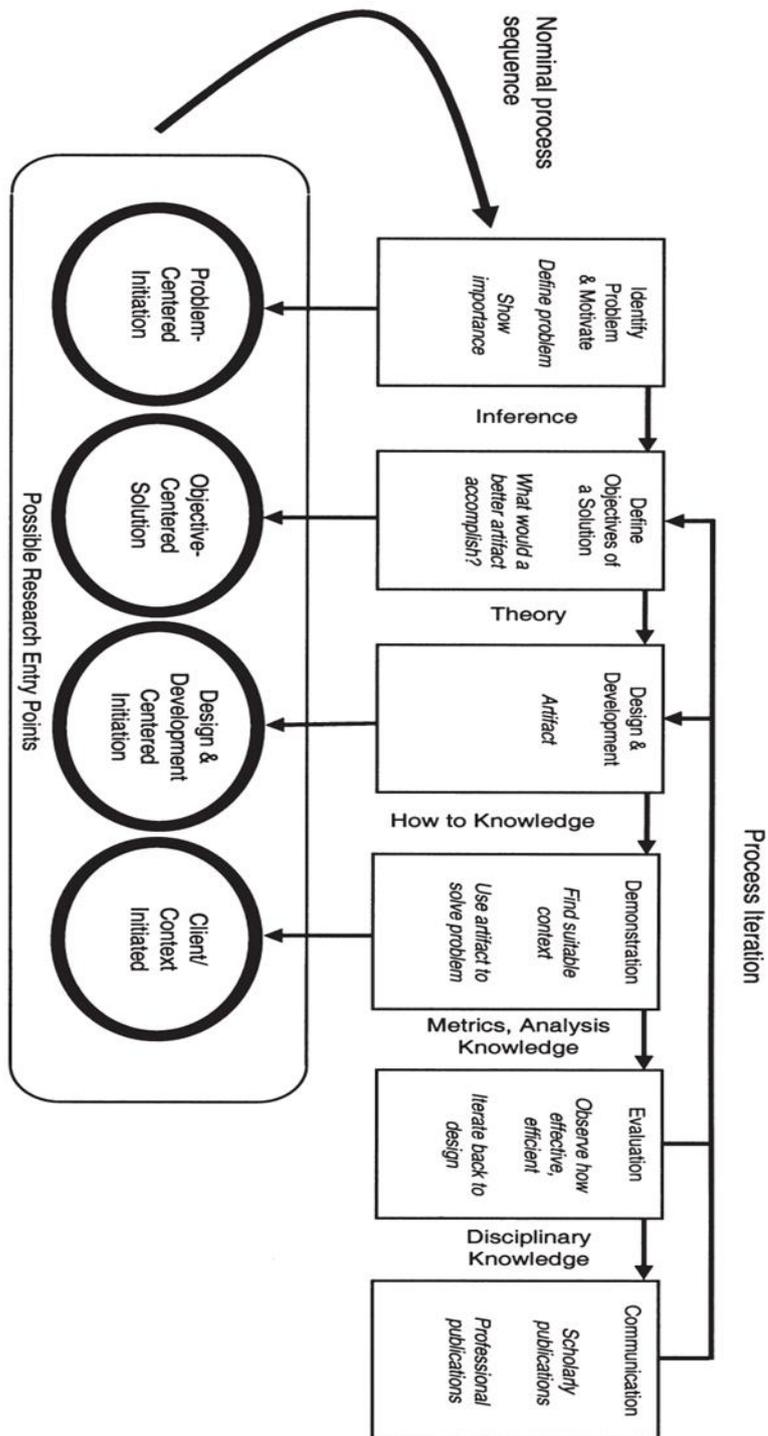


Figura 1.1 DSRM Process Model [1]

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

O primeiro capítulo trata do contexto geral, incluindo a motivação, os objetivos e as questões de investigação. No segundo capítulo, é feita uma revisão da literatura, abordando o planejamento de redes 5G NR e as limitações das gerações anteriores, com a apresentação dos conceitos fundamentais, tecnologias envolvidas e abordagens existentes. O terceiro capítulo descreve o simulador de sistema utilizado, apresentando suas principais características, além da explicação e configuração do cenário específico implementado. O quarto capítulo foca nos resultados teóricos e nas simulações realizadas, acompanhados de uma análise e discussão sobre o desempenho do sistema. Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões fundamentadas nos resultados e sugere possíveis sugestões para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

Estado da Arte

Neste capítulo apresenta-se o estado da arte com a teoria e os conceitos estruturantes e descreve-se o modelo de análise.

2.1 Estado da Arte

Desde o advento da primeira geração (1G) de redes móveis em 1980 até a mais recente quinta geração (5G), as comunicações móveis têm passado por uma evolução marcante. A 1G trouxe dispositivos analógicos básicos com a tecnologia AMPS, NMT, TACS e possui uma taxa de dados de até 2,4kbps, enquanto o 2G introduziu mensagens de texto e roaming, operando no sistema GSM e tendo uma taxa de dados de até 144kbps. A terceira geração (3G) permitiu a transmissão de dados multimídia e acesso à internet com taxa de dados de 5-30 Mbps, enquanto o 4G e a tecnologia LTE revolucionaram as velocidades de banda larga sem fio com uma taxa de transmissão de 1Gbps [20].

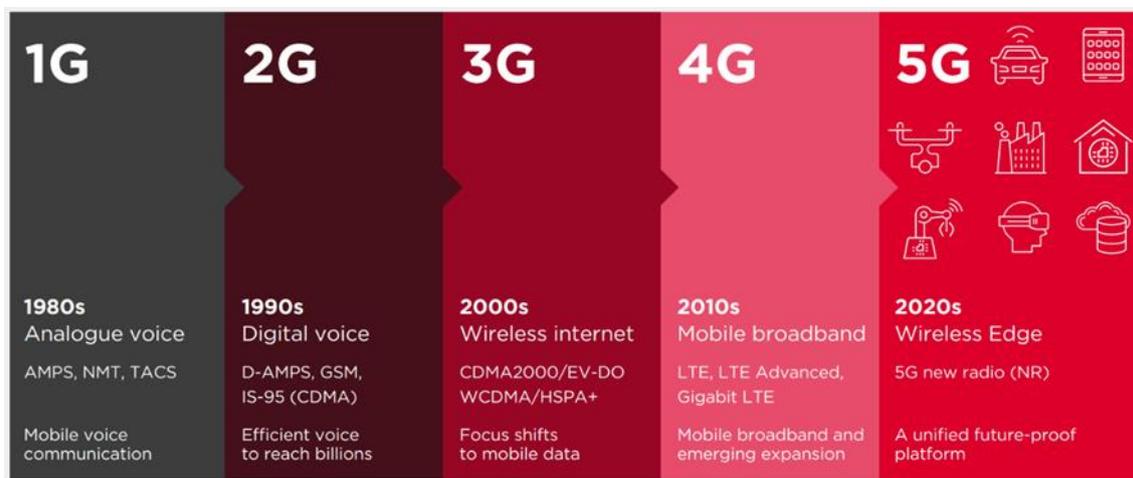


Figura 2.1 Evolução das redes de comunicações móveis [7]

2.2 A Quinta Geração das Redes Móveis (5G)

A 5G, lançada em 2020, promete uma revolução na conectividade, oferecendo velocidades ultrarrápidas, menor latência e capacidade para suportar uma infinidade de dispositivos conectados simultaneamente [2] [3]. Seu impacto é sentido em diversos setores, incluindo indústria, saúde, transporte e entretenimento, impulsionando a inovação e transformando a maneira como interagimos com a tecnologia [3]. Embora enfrentem desafios como infraestrutura robusta e segurança cibernética, as oportunidades oferecidas pelo 5G são vastas, incluindo novos modelos de negócios e empregos especializados em tecnologia [4]. Tecnologias complementares como Wi-Fi 6 e Open RAN desempenham um papel importante na otimização da conectividade, garantindo uma experiência contínua e aprimorada [5].

A implantação de novas gerações de redes móveis coloca desafios difíceis devido a vários fatores, como a relação custo-benefício, infraestruturas existentes e aspectos das novas tecnologias. Em particular, um dos principais desafios para a implantação do 5G reside na cobertura rádio 5G otimizada, tendo em conta diversas métricas de desempenho do serviço [6]. As previsões da Ericsson em 2018 indicavam que o tráfego de dados móveis estava previsto aumentar em cerca de 43% a cada ano, chegando a um total de 107 exabytes por mês até o final de 2023. Isso significa que haveria um grande aumento no número de dispositivos conectados e na quantidade de dados transmitidos através desses dispositivos até o ano de 2023. A Figura 2.2 mostra como esse aumento era esperado acontecer [14].

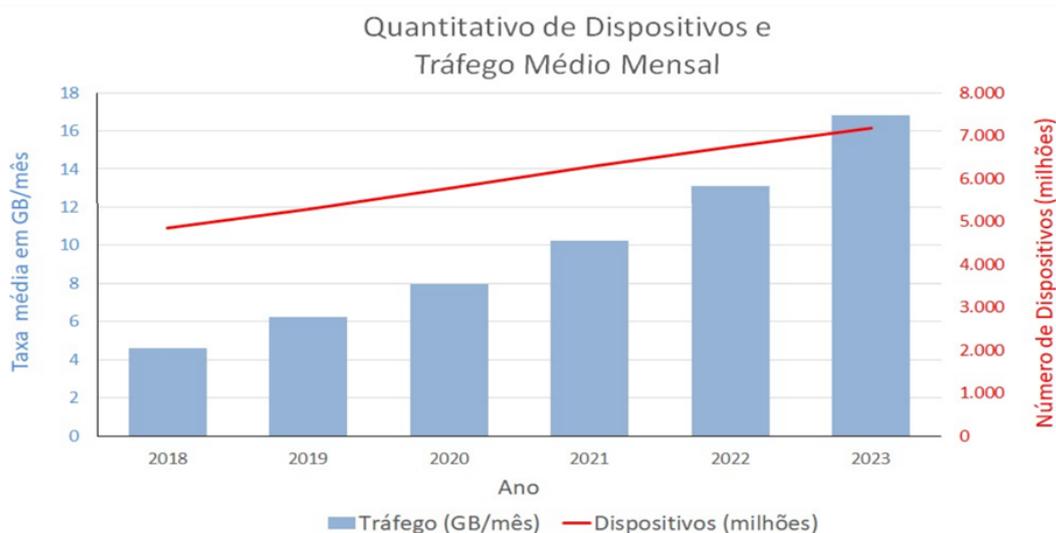


Figura 2.2 Previsão da capacidade de dispositivos vs tráfego esperado em 2023[14].

Conforme classificado pela União Internacional de Telecomunicações (UIT), as três categorias principais que as redes 5G têm como objetivo atender são [22] (ver Figura 2.3):

Enhanced Mobile Broadband (eMBB): Esta categoria visa oferecer velocidades de banda larga extremamente altas e uma experiência de usuário aprimorada em dispositivos móveis. Isso possibilitará streaming de vídeo de alta-definição, jogos em nuvem, realidade virtual/aumentada e outras aplicações intensivas em dados em movimento.

Massive Machine Type Communications (mMTC): Aqui, o foco está em permitir a conexão de um grande número de dispositivos simultaneamente. Isso é essencial para a Internet das Coisas (IoT), onde bilhões de dispositivos estarão interconectados, desde dispositivos domésticos inteligentes até infraestrutura urbana inteligente.

Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC): Esta categoria visa fornecer comunicações de banda larga altamente confiáveis e de baixa latência. Isso é crucial para aplicativos que exigem alta confiabilidade e tempos de resposta muito baixos, como cirurgias remotas, automação industrial e veículos autônomos.



Figura 2.3 - Principais categorias de serviços do 5G [14]

2.3 Sistema de segurança na rede 5G

Ao pensar na implementação de qualquer sistema de comunicação, em primeiro lugar, deve-se discutir o problema de segurança, e a gestão da segurança de redes é um processo dinâmico de desenvolvimento contínuo [8], A segurança é um elemento crucial para as redes e serviços 5G,

assim como foi para as gerações anteriores de tecnologia móvel, como 2G, 3G e 4G LTE. As redes de comunicação móvel desempenham um papel fundamental na conectividade global, atendendo a bilhões de pessoas em todo o mundo. Além disso, elas são essenciais para sustentar infraestruturas críticas, como redes inteligentes, unidades de atendimento de emergência e operações militares avançadas. Portanto, garantir a segurança dessas redes é essencial não apenas para proteger os dados e a privacidade dos usuários, mas também para garantir o funcionamento confiável de serviços vitais e a segurança nacional [9][10].

Desde o desenvolvimento dos protocolos de comunicação para sistemas 5G (5G-S), tem sido feito um esforço significativo para abordar vulnerabilidades conhecidas no protocolo LTE, com um foco especial na mitigação de ataques como coletores de IMSI (Identificador Internacional de Assinante Móvel) [11]. Como resultado desse esforço, o 5G introduz o Identificador Permanente de Assinatura (SUPI), substituindo o IMSI, e estabelece uma Infraestrutura de Chave Pública (PKI), permitindo a criptografia do SUPI no Identificador Oculto de Assinatura (SUCI). Essas medidas visam fortalecer a segurança e a privacidade dos usuários, oferecendo uma camada adicional de proteção contra potenciais ataques e interceptações de dados [10][12].

2.4 Vulnerabilidade da rede 5G

As redes 5G, como qualquer outra tecnologia, apresentam algumas vulnerabilidades potenciais que precisam ser consideradas e mitigadas para garantir a segurança dos dados e dos usuários. A implantação escalonada das redes móveis da 5G implica que, durante um período de transição, parte da infraestrutura e dos dispositivos ainda estará operando em tecnologias mais antigas, como 3G e 4G [21].

2.5 Arquitetura da Rede 5G

A arquitetura da rede core 5G é projetada para fornecer conectividade rápida, confiável e de baixa latência para uma ampla gama de dispositivos e aplicativos, isso exige não apenas melhorias nas tecnologias existentes, mas também uma arquitetura flexível e escalável para lidar com diferentes cenários presentes e futuros [15]. A rede 5G vai coexistir com o LTE e Wi-Fi por um longo período, exigindo coordenação para garantir uma transmissão estável e mobilidade contínua entre essas redes [16].

Nesse ambiente flexível, é importante separar o plano do usuário do plano de controle e redesenhar os limites entre o núcleo e a rede de acesso. Para atender aos requisitos de desempenho, algumas funções do núcleo precisam estar na borda da rede, enquanto outras, normalmente na rede de acesso, devem ser mais centralizadas.

A virtualização dos elementos da rede 5G traz flexibilidade, programabilidade e escalabilidade, separando o software do hardware, em um processo chamado de softwarização da rede [17].

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

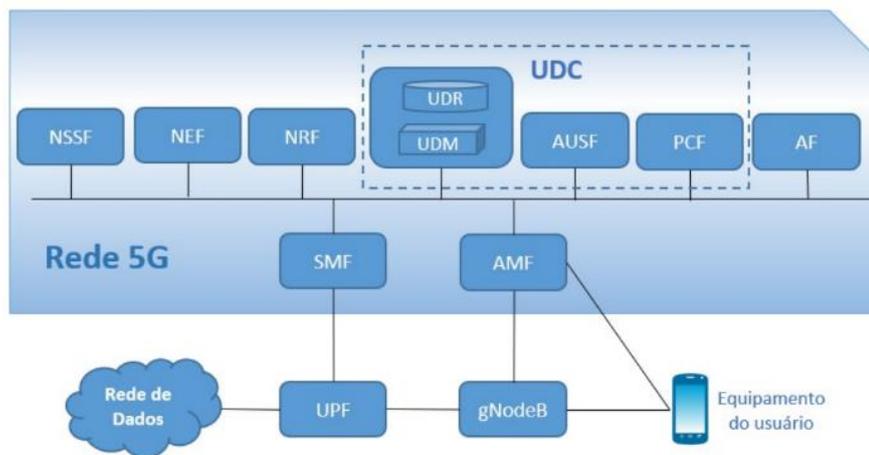


Figura 2.4 arquitetura de core 5G [14]

2.6 Arquitetura de rede 5G-NSA (Non-Stand-Alone) e 5G-SA

Em dezembro de 2017, o 3GPP (3rd Generation Partnership Project) aprovou o lançamento 15, que delineia uma rede 5G dependente (non-standalone NSA). Essa abordagem não autônoma permite uma rápida implementação da conectividade de alta velocidade, pois aproveita a infraestrutura de rede já existente, evitando a necessidade de construir um novo sistema completo do zero para o 5G. Em outras palavras, é uma arquitetura de transição da 4G para a 5G. No modelo NSA, apenas a tecnologia de rádio precisa ser atualizada, enquanto outros componentes da rede podem permanecer os mesmos.

No entanto, para aproveitar ao máximo o potencial da 5G e suportar novos serviços, é necessária uma nova arquitetura independente do sistema 4G existente. Essa arquitetura independente, conhecida como SA (standalone), é considerada a configuração definitiva da 5G. Ela não apenas

inclui melhorias na transmissão de rádio, mas também possui um núcleo 5G nativo baseado em nuvem, proporcionando uma infraestrutura mais avançada e flexível para suportar as demandas futuras das redes móveis [20] (ver Figura 2.5).

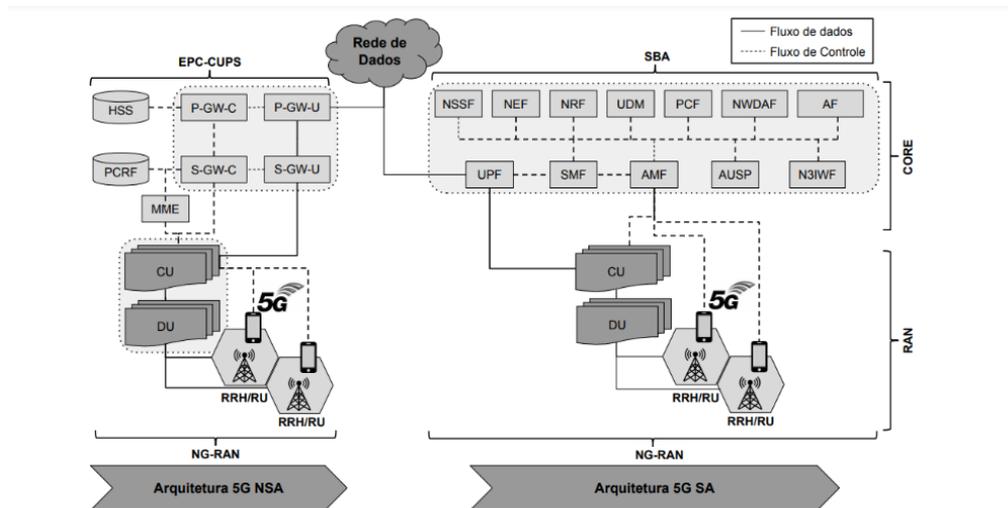


Figura 2.5 Arquiteturas 5G: Não-Autônoma (à esquerda) e Autônoma (Direita) [18]

2.7 As Tecnologias que Garantem Suporte aos Serviços e Aplicações Numa Rede 5G

2.7.1 Fatiamento de Rede - Network Slicing

O fatiamento de rede é uma tecnologia essencial na arquitetura das redes 5G. Ele permite que uma única infraestrutura física de rede seja dividida em várias redes virtuais independentes, cada uma otimizada para atender diferentes tipos de serviços e requisitos. Isso maximiza o uso da infraestrutura de rede ao alocar recursos de maneira dinâmica e eficiente.

Além disso, permite a criação de fatias específicas para aplicações com requisitos variados, como baixa latência, alta largura de banda ou alta confiabilidade. Por exemplo, fatias dedicadas a dispositivos IoT podem priorizar baixa latência e alta densidade de conexões, enquanto fatias para veículos autônomos podem exigir ultra-baixa latência e alta confiabilidade. Fatias para VR/AR (Realidade Virtual/Aumentada) necessitam de alta largura de banda e baixa latência, e fatias para serviços de emergência podem ser configuradas para ter prioridade máxima e alta disponibilidade (ver Figura 2.6)[43],[23][41] .

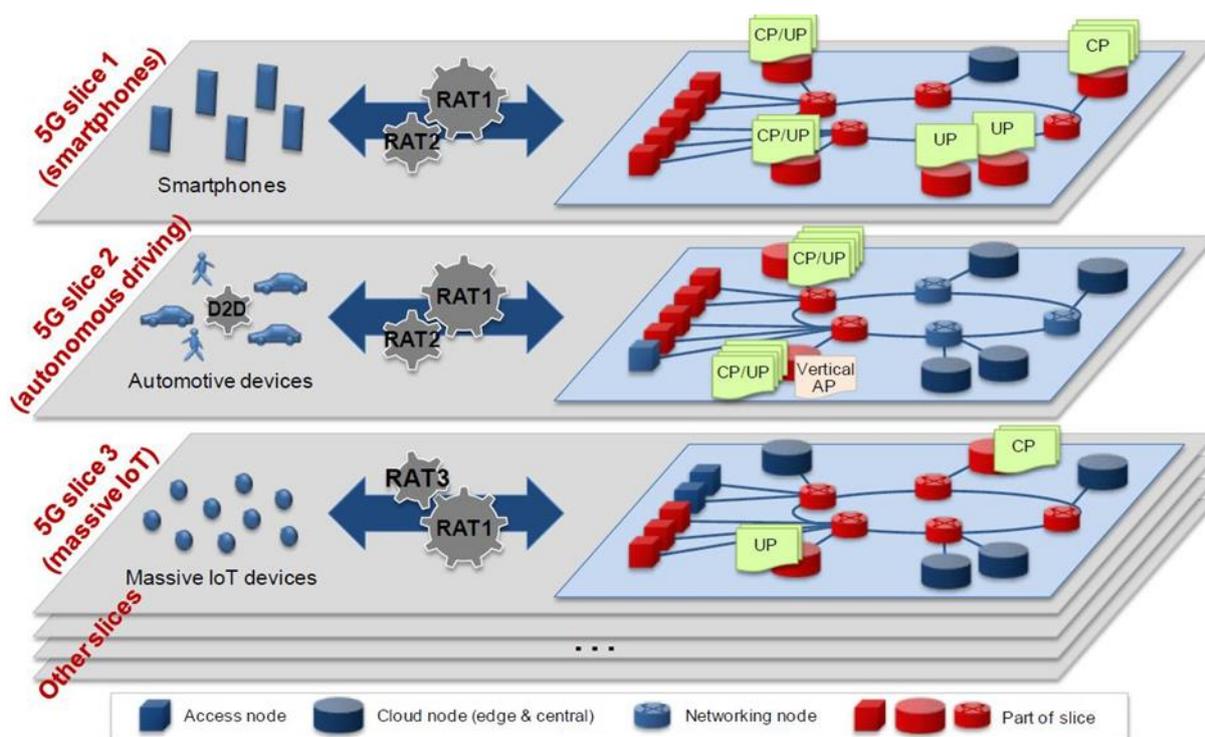


Figura 2.6 Fatiamento da rede 5G[23]

A virtualização das funções de rede (NFV) e as redes definidas por software (SDN) são fundamentais para a implementação eficaz do fatiamento de rede (network slicing) nas redes 5G. A NFV permite a virtualização de funções de rede que tradicionalmente eram implementadas em hardware dedicado. Isso facilita a criação de fatias de rede que podem ser rapidamente configuradas e ajustadas conforme necessário. Ao virtualizar funções de rede, as operadoras podem reduzir custos associados à compra e manutenção de hardware especializado, além de melhorar a utilização dos recursos existentes. NFV também permite escalabilidade dinâmica das funções de rede, ajustando automaticamente os recursos de acordo com a demanda, o que é essencial para manter a qualidade do serviço (QoS) em diferentes fatias de rede.

SDN separa o plano de controle do plano de dados, permitindo um controle centralizado e programável da rede. Isso é muito importante para a criação e gestão de fatias de rede, permitindo uma orquestração mais eficiente. SDN possibilita a automação de muitos processos de gerenciamento de rede, tornando mais ágil a implementação e modificação de fatias de rede, além de responder rapidamente a mudanças nas necessidades do serviço. Com SDN, cada fatia

de rede pode ser personalizada para atender requisitos específicos de desempenho, latência e segurança, permitindo uma otimização detalhada para diferentes aplicações e serviços.

NFV e SDN são tecnologias essenciais para o sucesso do fatiamento de rede 5G, proporcionando a flexibilidade, eficiência, controle e automação necessários para criar e gerenciar múltiplas fatias de rede independentes e otimizadas para diferentes casos de uso. Essa integração garante que as redes 5G possam atender de maneira eficaz a uma vasta gama de requisitos de serviços, desde IoT e veículos autônomos até realidade aumentada e serviços de emergência[41],[42].

2.7.2 Sistema M-MIMO

Em relação aos sistemas M-MIMO (Massive-MIMO), eles são uma tecnologia crucial para o 5G, especialmente quando usados na faixa de ondas milimétricas. Esses sistemas podem ser adaptados para funcionar em bandas de frequência típicas das mmWave através da técnica de beamforming, resultando em melhorias significativas. Com a combinação de M-MIMO e beamforming, os feixes de sinal podem alcançar vários usuários em locais diferentes e não correlacionados, aumentando a capacidade da célula[39].

Portanto, o M-MIMO é uma solução promissora que pode aumentar consideravelmente o throughput dos usuários e a capacidade da rede, pois permite a aplicação de beamforming aos dados transmitidos e recebidos, além de coordenar a interferência. Devido ao comprimento de onda reduzido das ondas milimétricas, os sistemas M-MIMO podem ser equipados com um grande número de antenas na estação base de forma compacta. Dessa forma, as perdas de caminho (pathloss) nas comunicações milimétricas, causadas pelas altas frequências das operações 5G NR, são compensadas pelos altos ganhos de antena proporcionados pelo aumento do número de antenas na estação base, alcançados através do beamforming e dos esquemas de antena ativa (ver Figura 2.7, $M \geq 100$).

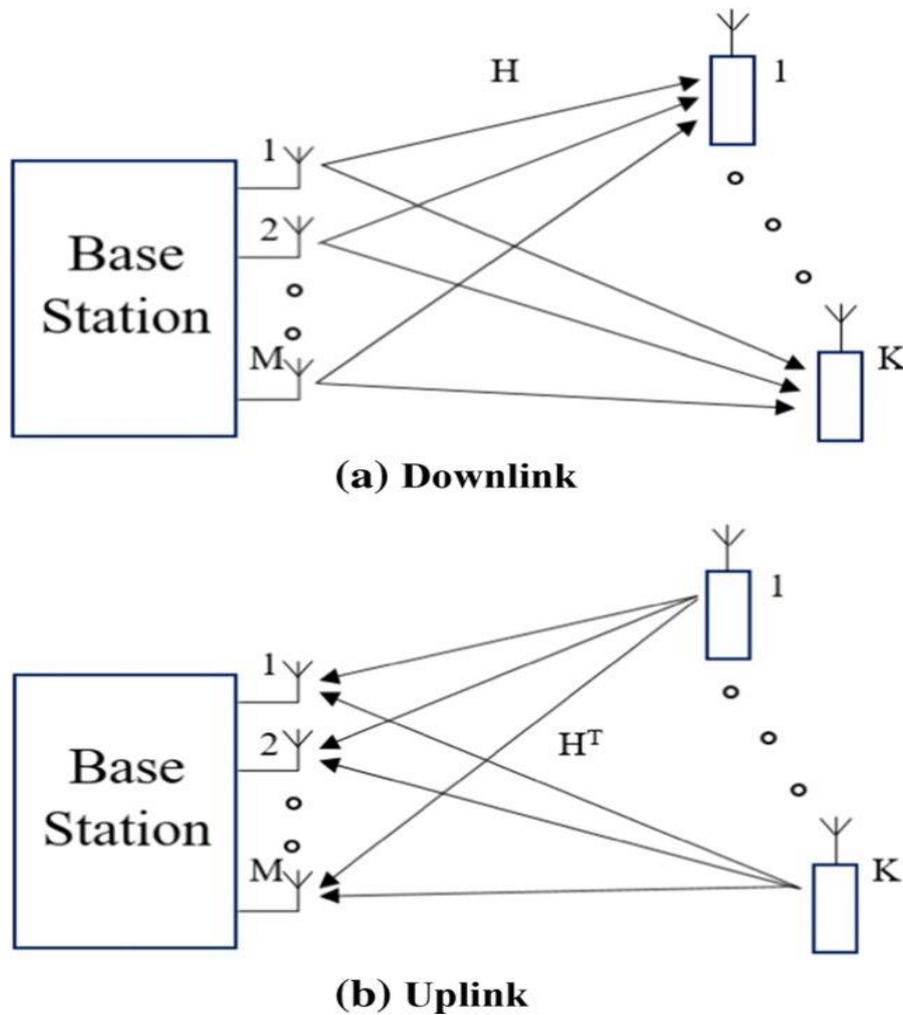


Figura 2.7 Sistema M-MIMO - Uplink e Downlink M-MIMO [39]

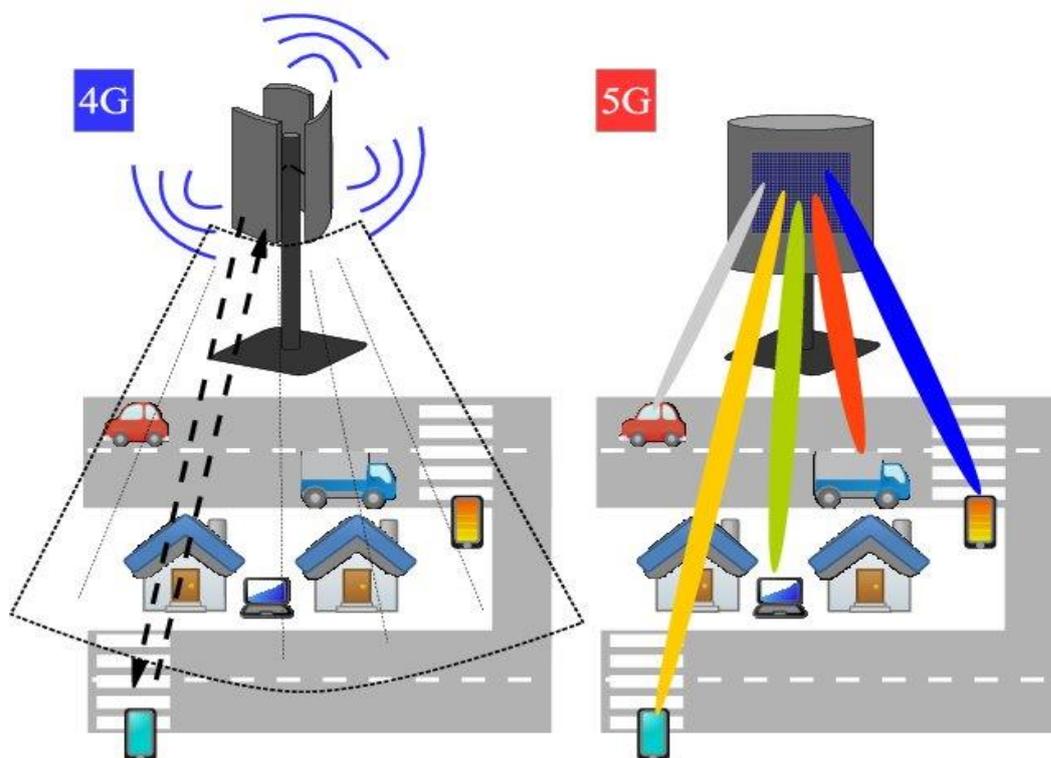
2.7.3 Formatação de feixe

A formatação de feixe, ou "beamforming", é uma técnica essencial utilizada na rede 5G para mitigar as perdas de propagação que ocorrem devido às altas frequências das ondas milimétricas. Essas ondas, operando em frequências muito elevadas, sofrem perdas significativas durante a transmissão. Para superar esse problema, a 5G usa a formação de feixe, que envolve um grande número de antenas para concentrar os sinais de transmissão ou recepção em direções específicas, em vez de dispersá-los igualmente em todas as direções.

Essa concentração é conseguida ajustando as fases e amplitudes dos sinais que são transmitidos por várias antenas em um sistema de comunicação. O resultado é um sinal mais focado e direcionado, o que aumenta a potência efetiva na direção desejada, melhorando assim a qualidade e a confiabilidade da comunicação.

A técnica de formação de feixe utiliza um conjunto de radiadores que atuam como uma espécie de filtro espacial, capturando ou transmitindo energia de forma direcionada. A vantagem dessa abordagem está no ganho de transmissão ou recepção, que é obtido ao direcionar os sinais precisamente. Nas redes 5G, as estações base (BS) usam antenas colocadas próximas umas das outras, geralmente com intervalos de meio comprimento de onda, e com a mesma orientação de polarização. Isso garante uma alta correlação durante a recepção dos sinais, otimizando a comunicação[25][28].

Tanto transmissores quanto receptores podem usar técnicas de formação de feixe para aumentar a relação sinal-ruído (SNR), compensando assim as perdas de propagação e garantindo uma comunicação mais eficiente e robusta, ver Figura 2.8.



beamforming em 5G comparado ao 4G [38]

Figura 2.8
Técnica de

2.7.4 Espectro

A introdução do 5G traz uma variedade de requisitos e necessidades de espectro, que apresentam muitas opções e desafios. Comparado com o 4G, o 5G precisa de mais largura de banda de espectro para suportar os seus casos de uso e superar as limitações da geração anterior. Por isso, no planeamento da rede, as operadoras devem considerar diversas opções viáveis para atender os casos de uso pretendidos e garantir a interoperabilidade de suas redes.

Fisicamente, o espectro de frequências pode ser dividido em três faixas: até 1 GHz, até 6 GHz e acima de 6 GHz. Cada uma dessas faixas possui características específicas que as tornam adequadas para diferentes cenários de implementação.[26][27]

Faixa de Baixo Espectro (até 1 GHz): Esta faixa tem excelentes características de propagação, o que a torna ideal para a cobertura de grandes áreas, como regiões rurais. A capacidade de atravessar obstáculos e cobrir longas distâncias é uma vantagem significativa desta faixa.

Faixa Intermediária do Espectro (até 6 GHz): Esta faixa é adequada para áreas urbanas, oferecendo uma boa combinação de cobertura e capacidade. É especialmente viável em locais com alta densidade de dispositivos conectados, proporcionando um equilíbrio entre alcance e desempenho.

Faixa de Alto Espectro (acima de 6 GHz): Apesar da sua limitação em termos de cobertura, devido à menor capacidade de penetração e alcance, esta faixa oferece uma capacidade extremamente alta. Isso se deve à grande quantidade de espectro disponível e não utilizado nessas frequências, tornando-a ideal para aplicações que requerem altas taxas de transferência de dados.

Cada faixa de espectro tem seu papel específico na arquitetura 5G, e o uso combinado dessas faixas permite que as redes 5G ofereçam uma cobertura abrangente e capacidade elevada, atendendo às diversas necessidades e casos de uso modernos (ver Figura 2.9).

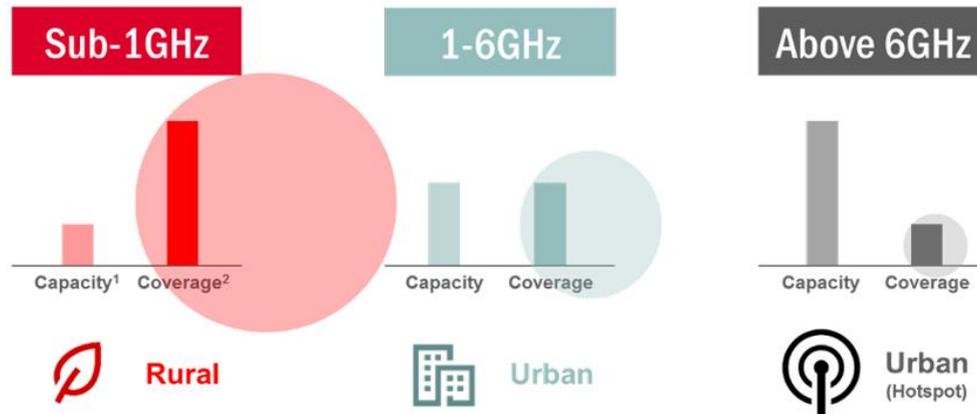


Figura 2.9 Capacidade vs Cobertura considerando o espectro por categoria [26]

2.8 Redes Privadas 5G

As redes privadas 5G estão a destacar-se como uma alternativa atrativa para organizações que desejam maior controle e personalização na sua conectividade sem fio. Diferentes das redes públicas, que oferecem serviços de rede móvel para o público em geral, as redes privadas são projetadas para uso exclusivo de clientes corporativos, como indústrias específicas ou empresas.

Uma rede privada 5G é uma rede dedicada que oferece comunicação aprimorada, conectividade unificada, serviços otimizados e segurança personalizada em uma área específica. Essas redes podem ser aplicadas em diversos setores, como manufatura, saúde, transporte e entretenimento.

Na manufatura, por exemplo, as redes privadas 5G podem facilitar a automação de processos de produção, aumentando a eficiência e reduzindo custos. No setor de saúde, essas redes podem melhorar a conectividade entre pacientes e profissionais de saúde, permitindo diagnósticos mais precisos e tratamentos mais eficazes. No transporte, as redes privadas 5G podem possibilitar a comunicação entre veículos autônomos, melhorando a segurança e diminuindo o congestionamento nas estradas.

As redes privadas 5G, juntamente com as novas oportunidades de negócios proporcionadas pelo fatiamento de rede, oferecem maior desempenho, segurança e uma série de recursos avançados que as diferenciam das redes públicas[5].

2.8.1 Modos de implementação

As Redes privadas, também chamadas de NPNs (Non-Public Networks), podem ser implementadas de duas formas [28]:

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

O fatiamento de rede oferece uma camada adicional de flexibilidade e eficiência, permitindo uma personalização e isolamento adicionais que podem ser indispensáveis para atender às necessidades específicas das empresas e organizações.

1) Implementação autónoma

Neste cenário, uma rede 5G privada é construída como um sistema isolado e independente, sem qualquer dependência da rede pública. Como ilustrado na Figura 2.10, uma rede privada autónoma (ou NPN autónoma) é completamente separada da rede pública. Todos os fluxos de dados e funções de rede (tanto no plano de utilizador quanto no plano de controle) são geridos pela organização que possui a rede.

Embora uma rede 5G privada autónoma possa operar de forma totalmente independente, existe a opção de se conectar à rede pública por meio de uma firewall, que pode ser configurada para permitir essa conexão. Mesmo utilizando tecnologias 5G, essas redes são totalmente independentes e isoladas da infraestrutura 5G pública.

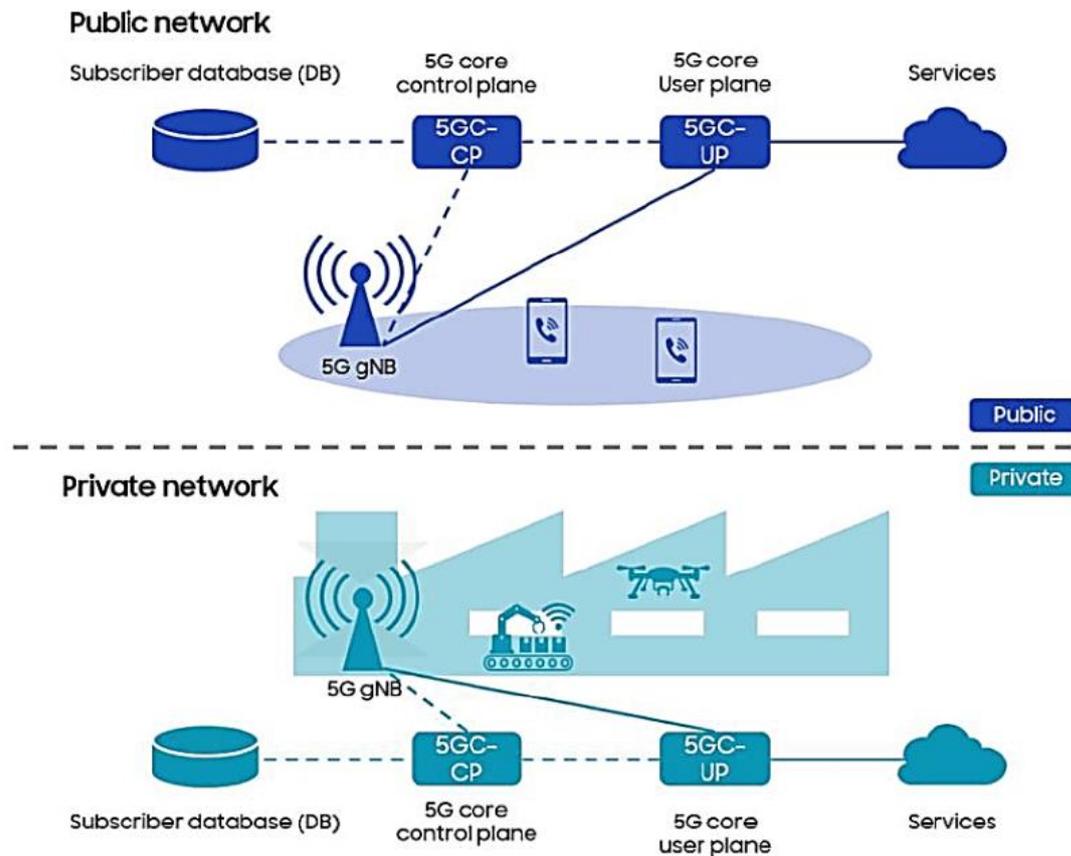


Figura 2.10 – Implementação da rede 5G autónoma [28]

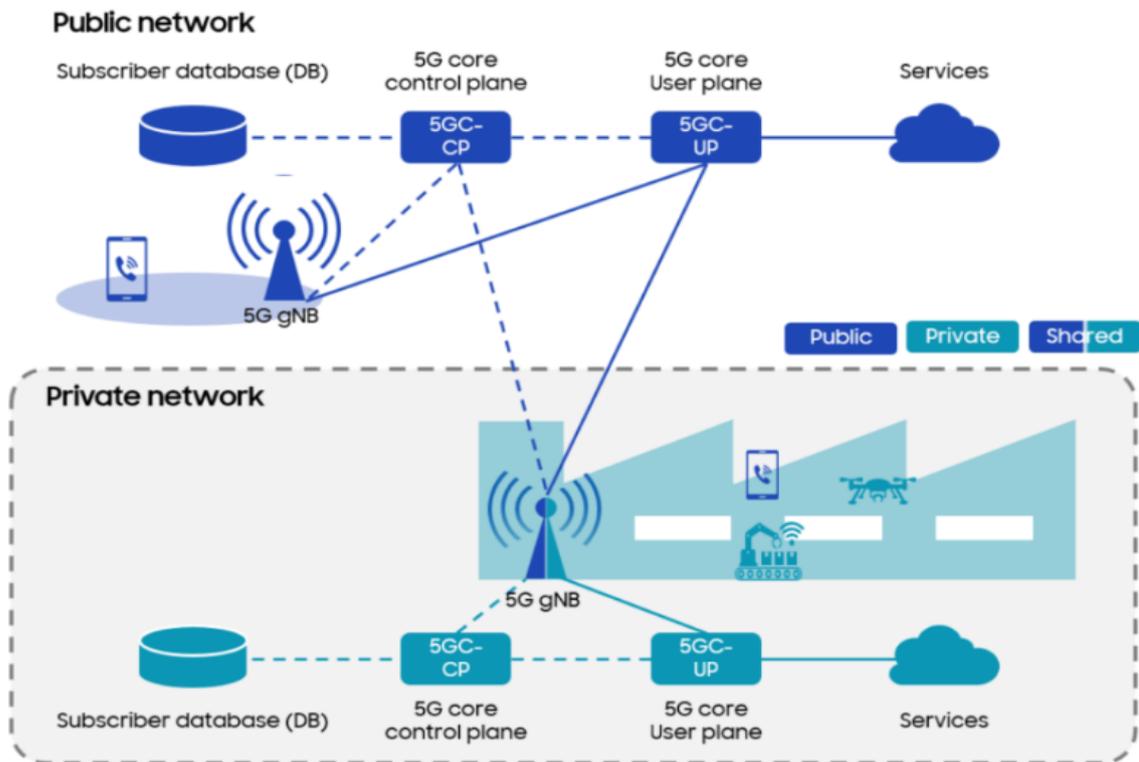
2) Implantação Integrada na Rede Pública

Neste cenário, uma rede 5G privada é implementada utilizando a infraestrutura de uma rede pública. Isso combina a infraestrutura utilizada para serviços públicos com a infraestrutura localizada nas instalações do cliente, oferecendo serviços e recursos dedicados para atender a necessidades específicas. Diferente da implementação autónoma, onde a rede privada é fisicamente isolada da rede pública, nesse tipo de implementação as redes privada e pública não estão fisicamente separadas. Como resultado, essa abordagem oferece menor possibilidade de personalização, controle autónomo e segurança em comparação com a implementação autónoma [28][29].

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

a) RAN partilhada

Neste modelo, a rede privada e a rede pública compartilham toda a infraestrutura de acesso rádio. Contudo, as funções de controle e os serviços são completamente distintos e separados. Todos os fluxos de dados da rede privada 5G permanecem restritos à área local definida. Há uma única estação base para a RAN compartilhada, mas é possível configurar estações base adicionais exclusivamente para os usuários da rede privada. Embora a rede privada tenha a sua própria identidade, ela opera com um acordo de compartilhamento de RAN com a rede pública, utilizando o modelo de rede central multioperador 3GPP como principal facilitador para essa configuração [25] (ver Figura 2.11).



Equação 2.11- Implementação com RAN partilhada [28]

b) RAN e plano de controle compartilhados

Neste cenário, tanto as redes públicas quanto as privadas compartilham parte da RAN (Rede de Acesso por Rádio), semelhante ao exemplo anterior. Além disso, as funções de rede do plano de controle são sempre gerenciadas pela rede pública. Esta abordagem é mostrada na Fig. 2.12, e pode ser implementado por meio do fatiamento vertical de rede, o que permite a criação de redes logicamente independentes sobre a mesma infraestrutura física. No entanto, todo o tráfego da rede privada continua confinado dentro de áreas específicas. As redes privada e pública possuem identificadores de fatia distintos. Os dispositivos na rede privada são assinantes da rede pública, podendo conectar-se diretamente à rede pública e aos serviços relacionados.[29]

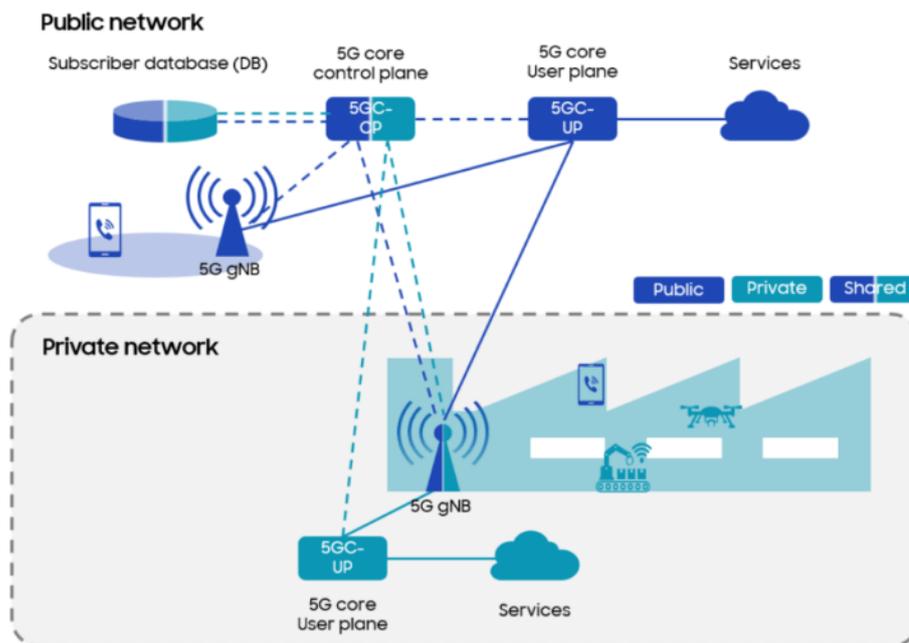


Figura 2.12- Implementação com RAN partilhada e plano de controle [23]

C) Hospedado na Rede Pública:

Neste cenário, a rede privada é totalmente suportada pela rede pública. O tráfego de ambas as redes, pública e privada, ocorre dentro das áreas designadas. Conforme ilustrado na Fig. 2.13, todos os fluxos de dados da rede privada são encaminhados para a rede pública através da RAN compartilhada. No entanto, para garantir que ambas as redes permaneçam separadas e independentes, elas são tratadas como redes completamente distintas. Esse cenário pode ser

implementado utilizando a virtualização de funções de rede em um ambiente de nuvem, como o fatiamento vertical de rede.

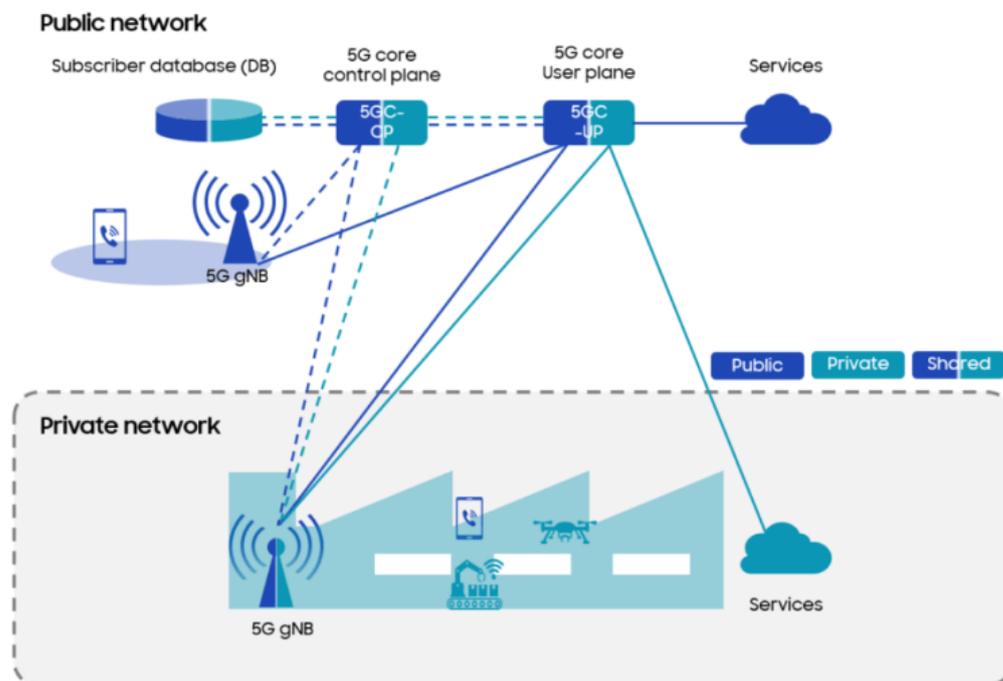


Figura2. 13- Implementação hospedada pela rede pública [28]

Estes tipos de redes privadas proporcionam flexibilidade para atender às necessidades específicas de segurança e resiliência das empresas. Contudo, em ambientes compartilhados, é vital ter soluções autônomas inovadoras que possam monitorar em tempo real a qualidade do serviço, disponibilidade e gestão de serviços. Isso é fundamental para satisfazer os diversos requisitos da IoT e garantir operações altamente confiáveis.

2.8.2 Opções de Alocação de Espectro para 5G Privado

A implantação de redes 5G privadas está essencialmente ligada à disponibilidade de espectro. Sem um espectro adequado e acessível, as redes privadas não podem operar de maneira eficiente ou atingir o desempenho esperado. Portanto, a disponibilidade de espectro é um dos componentes essenciais e decisivos para o sucesso das redes 5G privadas. Esse fator influencia diretamente a capacidade das redes de oferecer alta velocidade, baixa latência e conexão confiável, que são os principais benefícios esperados do 5G. Conseqüentemente, assegurar a

disponibilidade e a gestão eficiente do espectro é fundamental para a viabilidade e o desempenho das redes 5G privadas [28].

As redes 5G privadas podem ser configuradas utilizando três tipos distintos de espectro:

- 1) Espectro licenciado
- 2) Espectro não licenciado
- 3) Espectro privado dedicado

1) Espectro Licenciado

Para redes 5G privadas, o espectro licenciado pode ser adquirido de operadoras de rede móvel. Nesse caso, a operadora reserva uma parte específica das suas bandas de espectro para uso privado. Este modelo segue o padrão tradicional de licenciamento de espectro e permite a aplicação de diferentes estratégias comerciais. O espectro licenciado é particularmente adequado para serviços de comunicação ultraconfiável e com baixa latência, pois proporciona a maior previsibilidade no desempenho da rede.

2) Espectro Não Licenciado

Outra alternativa para implementar redes 5G privadas é usar espectro não licenciado, como as bandas de 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz. Essas bandas são utilizadas por tecnologias como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee e outras, e estão disponíveis para uso compartilhado. Existem dois métodos principais de compartilhamento de espectro para 5G em bandas não licenciadas:

Compartilhamento Assíncrono: Ideal para redes 5G privadas que não precisam de comunicação ultraconfiável e de baixa latência (URLLC). Nesse modelo, o acesso ao espectro é gerido por protocolos de compartilhamento, como "ouvir antes de falar", para garantir uma convivência eficiente com outros usuários na mesma banda.

Compartilhamento Síncrono: Oferece um desempenho mais estável em comparação com o modelo assíncrono e é recomendado para redes privadas que necessitam de uma URLLC aprimorada.

3) Espectro privado dedicado

O espectro privado dedicado é obtido por meio de autorização de órgãos reguladores. Com menor interferência, as redes 5G privadas que operam com espectro exclusivo garantem um desempenho mais confiável. Esse modelo permite que as redes 5G privadas funcionem independentemente dos operadores de redes móveis públicas, o que está sendo explorado em diversos mercados ao redor do mundo.

Por exemplo, na Alemanha, o governo reservou uma faixa de 100 MHz na banda de 3,7-3,8 GHz para uso industrial. No Japão, foram alocados 200 MHz na faixa de 4,5 GHz e 900 MHz na faixa de 28,2-28,3 GHz para empresas construírem suas próprias infraestruturas 5G. Nos Estados Unidos, a Comissão Federal de Comunicações (FCC) permite o uso da banda de 3,5 GHz (CBRS) para redes privadas, utilizando uma técnica de compartilhamento de espectro para evitar interferências com outros usuários dessas faixas ou adjacentes. Na China, a faixa de 3,3-3,4 GHz é destinada a usos internos, enquanto a banda licenciada de 5,925-7,125 GHz é direcionada para indústrias.[30]

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.	----

Tabela 2.1 Opções de implementação e espectro para redes privadas 5G - Adaptada de [28].

A Tabela 2.1 ilustra como as redes privadas 5G podem ser implementadas de várias maneiras, dependendo do modelo de operação do espectro privado dedicado. O modelo autónomo, que oferece um isolamento físico total, é altamente personalizado, mas também é mais caro. Usar espectro licenciado permite a implementação de RAN (Rede de Acesso por Rádio)

compartilhada, o que pode reduzir custos em comparação com o uso de espectro privado dedicado, devido a uma personalização menos intensa.

No entanto, no modelo de RAN compartilhada com controle centralizado, o uso de espectro licenciado limita a capacidade de personalização, resultando em menor autonomia, mas com custos mais baixos. Especificamente, quando o espectro licenciado é fornecido por uma rede pública, a personalização é limitada, permitindo um baixo nível de autocontrole, embora essa abordagem ofereça vantagens em termos de custos reduzidos de implantação.[28]

Portanto, a escolha do modelo de rede privada 5G mais adequado depende das necessidades e objetivos da organização, além dos custos envolvidos na implementação.

CAPÍTULO 3

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, introduzindo o cenário específico de estudo (InF) que consiste no Ministério das Finanças em Bissau.

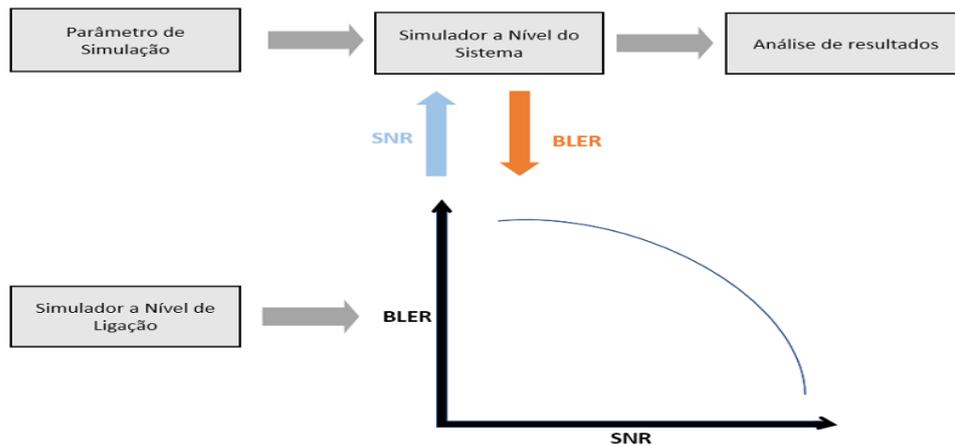
Neste sentido, foram realizadas simulações considerando diferentes situações dentro do 5G NR, com a frequência de portadora de 3.6 GHz nesta configuração a largura de banda foi fixada em 50 MHz, com espaçamento entre as sub-portadoras de 30 kHz e OFDM com 28 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1 ms. conforme constado na Tabela 3.1.

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

Tabela 3.1 - Características globais do simulador

O simulador é configurado com um modelo de simulação de canal 3D que segue as diretrizes estabelecidas pelo 3GPP conforme representado na Figura 3.1. Este modelo é aplicável em simulações de nível de sistema, mas precisa de dados do simulador de nível de ligação, havendo uma interconexão entre esses dois simuladores. O simulador de nível de ligação permite determinar os valores da relação sinal ruído (SNR) que uma conexão entre um BS e um determinado terminal UE necessita para se atingir uma taxa de erro de bloco de bits especificada (BLER). No simulador de ligação é necessário contabilizar o efeito do desvanecimento devido aos múltiplos percursos, o tipo de modulação e codificação além do número de antenas de emissão e receção e do algoritmo de descodificação. Com base nos resultados da simulação do nível de ligação, 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 recepção (ver Figura 3.1).



Figuras 3.1 - Relação entre os

simuladores de nível de sistema e de ligação [40]

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

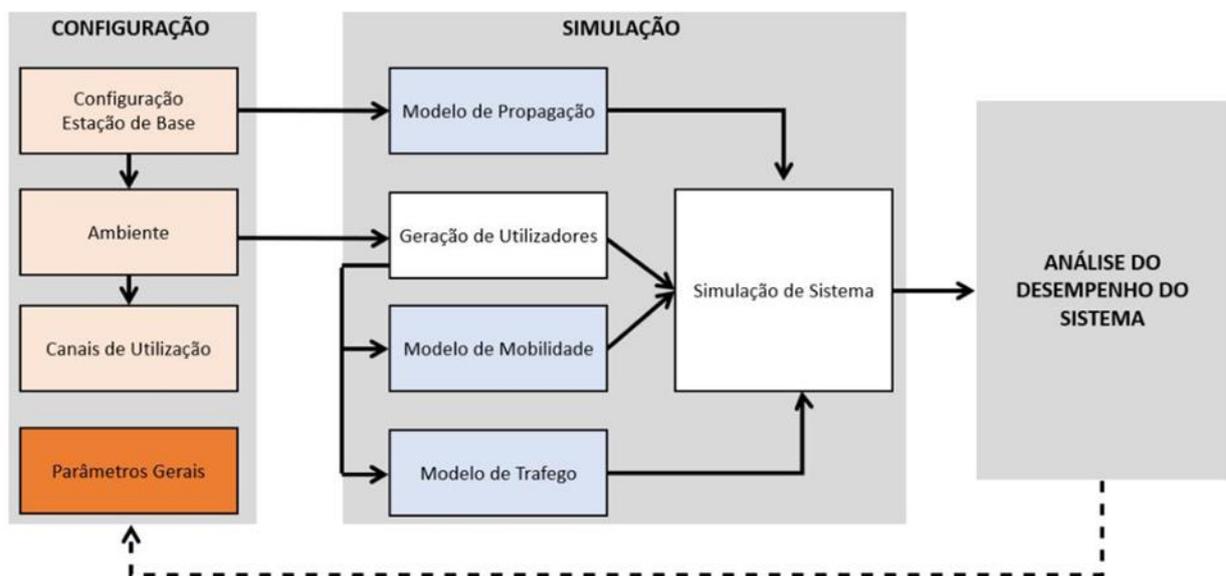


Figura 3.2 - Fases da simulação [40]

A 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 dos diversos UEs que serão contabilizados 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 o cálculo do desvanecimento devido aos múltiplos percursos e obstruções considerando as variações 3D 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 taxa de transferência efetiva dos dados (throughput), cobertura, carga nas células, desempenho dos algoritmos de gestão de recursos de rádio.

3.2 Cenários de Implementação

Conforme referido anteriormente, foi implementado o cenário 5G NR, considerando o Ministério das Finanças em Bissau, representado no simulador pela sigla "InF". Foi simulado com parâmetros específicos e operando nas frequências de portadora de 3.6 GHz, conforme detalhado na secção 3.1. utilizando 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 número variável de utilizadores. Cada célula tem três setores. Isto é, cada site tem uma BS que possui 3 setores e está 'dividido' em 2 zonas com diferentes ritmos binários dependendo da distância à BS. Para distâncias até cerca de 25 metros da BS, são transmitidos/recebidos símbolos 256QAM com uma taxa de correção de erros (R_c) de $7/8$, enquanto para distâncias

até cerca de 49 metros, são utilizados símbolos 16QAM com taxa de correção $R_c=3/4$. O número de BSs variam de acordo com o cenário em consideração. Os parâmetros específicos do cenário estão resumidos na Tabela 3.2.

Parâmetros	InF
Número de BSs+APs	1+6
Nº total sector	21
Nº total de UEs	Variável
Esquemas de modulação	16QAM ;256QAM
Altura da antena da BS – hBS [m]	10
Esquema de transmissão	mMIMO
Modo de transmissão	Full-Buffer

Tabela 3.2 – Parâmetros de configuração

Na Figura 3.2, é apresentada a interface gráfica do simulador de sistema para o cenário ilustrando a disposição da BS, representada como ponto azul, os pontos de acesso (APs) representados por cor preta e a localização dos utilizadores, representados por pontos vermelhos.

O cenário InF, representa o cenário do Ministério das Finanças da Guiné-Bissau, onde os utilizadores se encontram nos diferentes pisos durante o expediente. A Figura 3.2 ilustra detalhadamente essa configuração, abrangendo uma área de 5900 m².

MINISTÉRIO FINANÇAS DE BISSAU SCENARIO

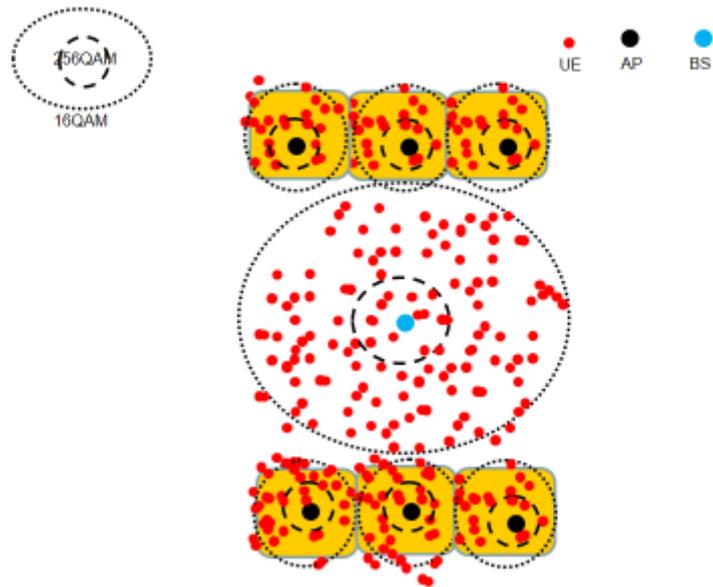


Figura 3.3 - Representação gráfica do cenário Std/InF

Neste cenário, em que os utilizadores se encontram nos gabinetes e no exterior à volta do edifício, representa-se um ambiente direccionado a células de dimensões amplas e cobertura contínua, no qual as células são implementadas para atender os utilizadores e lidar com picos de tráfego. A BS, possui uma torre com mais de 10 metros de altura onde estão situadas a 10 metros de altura as antenas fora do edifício. E as subestações (APs) têm as antenas a alturas de 3.5 metros no primeiro piso e 5 metros no segundo piso e estão localizadas dentro e ao longo do edifício, estando a BS localizada no centro da área.

CAPÍTULO 4

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

4.1 Resultados das Simulações

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através das simulações a nível de sistema realizadas, com base no planeamento celular de uma rede 5G considerando o cenário do Misterio das Finanças da Guiné-Bissau.

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 ao cenário 'InF' implementado, 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 melhorar o desempenho global do sistema, melhorando a eficiência espectral e reduzindo a interferência no cenário.

4.1.1 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 e a variação do throughput em relação à potência transmitida.

Para a realização dessas simulações, foi considerado a presença de um número variável de utilizadores por setor, com um total de 256 antenas ativas para servir esses utilizadores em cada setor.

Com um NumberOfFlows de 10 (número de utilizadores por setor da BS), NumberOfFlowAPs de 10 (número de utilizadores por setor ds cada AP) e in_power de 100 (potência de transmissão de 25W/100=250mW em cada APs) , max_cell_tx_power de 25W (potência de transmissão da BS), temos: $A=210$, que é o número total de Ues no cenário, e $B=30$ que representa o número de UEs servidos pela BS outdoor. Logo, $C=A-B=180$, com C o número de UEs atendidos pelas BSs indoor (APs).

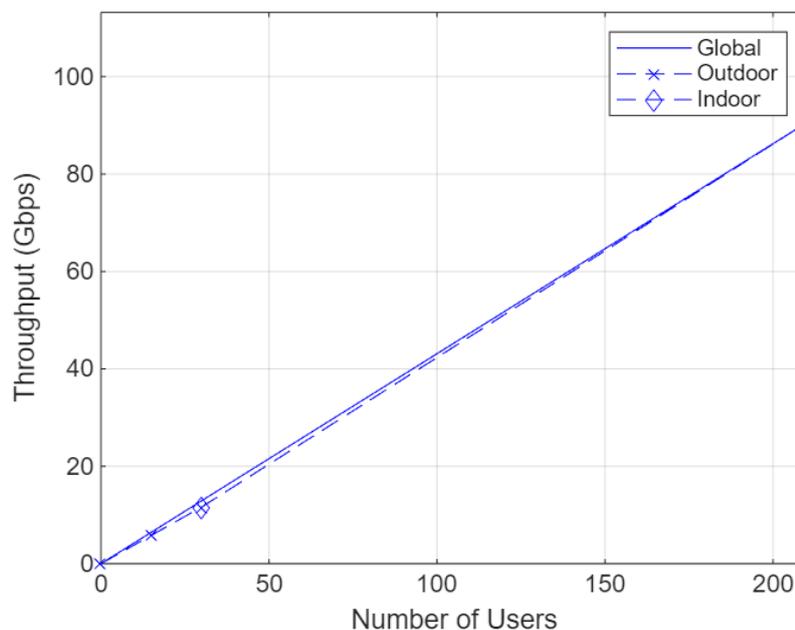


Figura 4.1 - Throughput vs. Número de Utilizadores, cluster RAN Outdoor e Indoor, $N_u=210$

Do gráfico da Figura 4.1 pode-se concluir o seguinte. O throughput cresce linearmente com o número de utilizadores, quer globalmente (legenda 'Global'), quer em ambientes exteriores ('Outdoor') ou interiores ('Indoor'). O declive da reta 'Global' é muito idêntico ao das retas 'Outdoor' e 'Indoor' o que indica idênticos desempenho de throughput nos dois ambientes. Contudo, é possível notar que o throughput (declive da reta) dos utilizadores no exterior é ligeiramente inferior ao throughput (declive da reta) dos utilizadores no interior.

Com um NumberOfFlows de 40, NumberOfFlowAPs de 20 e in_power de 100, max_cell_tx_power de 25, temos: $A=480$, que é o número total de UEs, e $B=120$ que representa o número de UEs atendidos pelas BSs outdoor. Logo, $C=A-B$, sendo $C=360$ o número de UEs atendidos pelas BSs indoor.

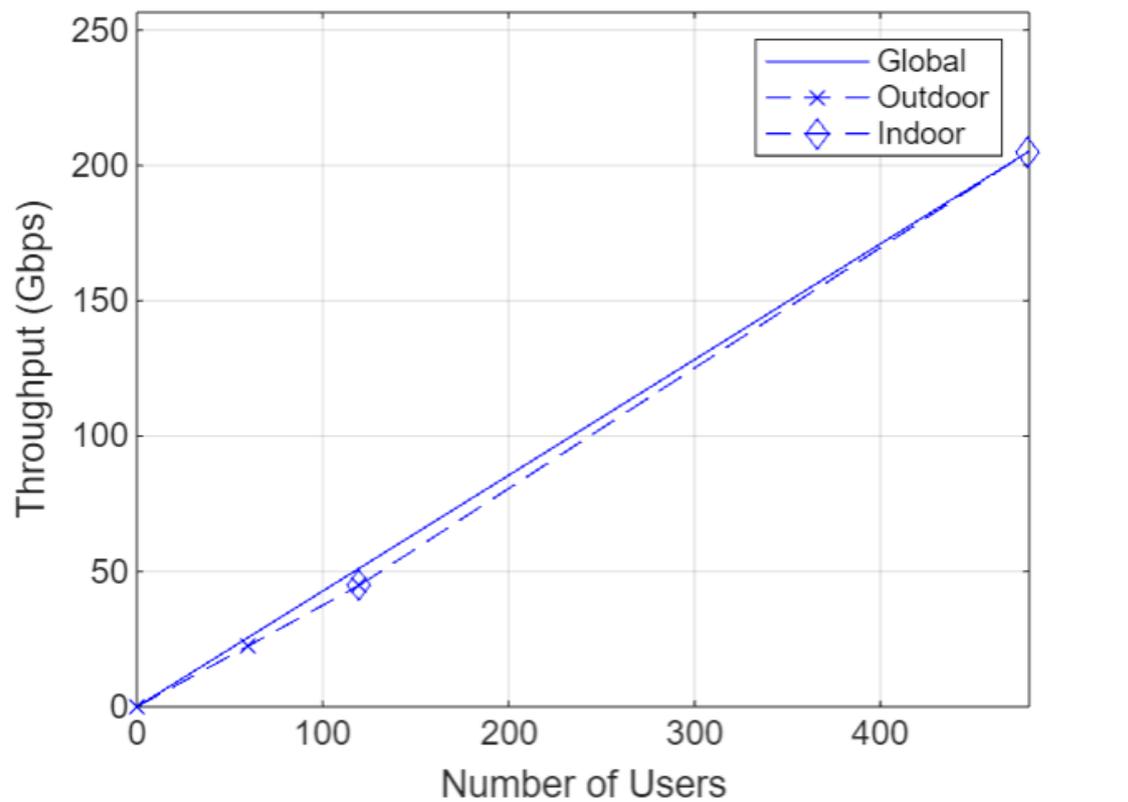


Figura 4.2- Throughput vs. Número de Utilizadores, cluster RAN Outdoor e Indoor, Nu=480

Ao comparar os resultados representados na Figura 4.1 e Figura 4.2 que descrevem a variação do throughput em relação ao número de utilizadores, verifica-se que o ambiente Indoor continua a atingir níveis de throughput ligeiramente superiores ao do ambiente Outdoor, independentemente do número de utilizadores. O declive da reta ‘Global’ na Figura 4.2 é muito idêntico ao da reta correspondente na Figura 4.1 o que indica idênticos desempenho de throughput nas duas figuras. O throughput continua a aumentar linearmente com o número de utilizadores. Neste último gráfico 4.2, obtemos um throughput médio por utilizador de $206\text{Gbps}/480=0.429\text{Gbps/utente}$ e no gráfico anterior 4.1 obtém-se $90\text{Gbps}/210=0.429\text{Gbps/utente}$.

De seguida, temos a Figura 4.3 que representa a variação do throughput em função da potencia para as duas situações de clustering, 1C e 3C. A representação gráfica contém os seguintes dados:

NumberOfFlows de 10, NumberOfFlowAPs de 10 e in_power de 100, max_cell_tx_power de 10, temos: $A=210$, que é o número total de UEs, e $B=30$ que representa o número de UEs atendidos pela BS outdoor. Logo, $C=180$, sendo C o número de UEs atendidos pelas BSs indoor.

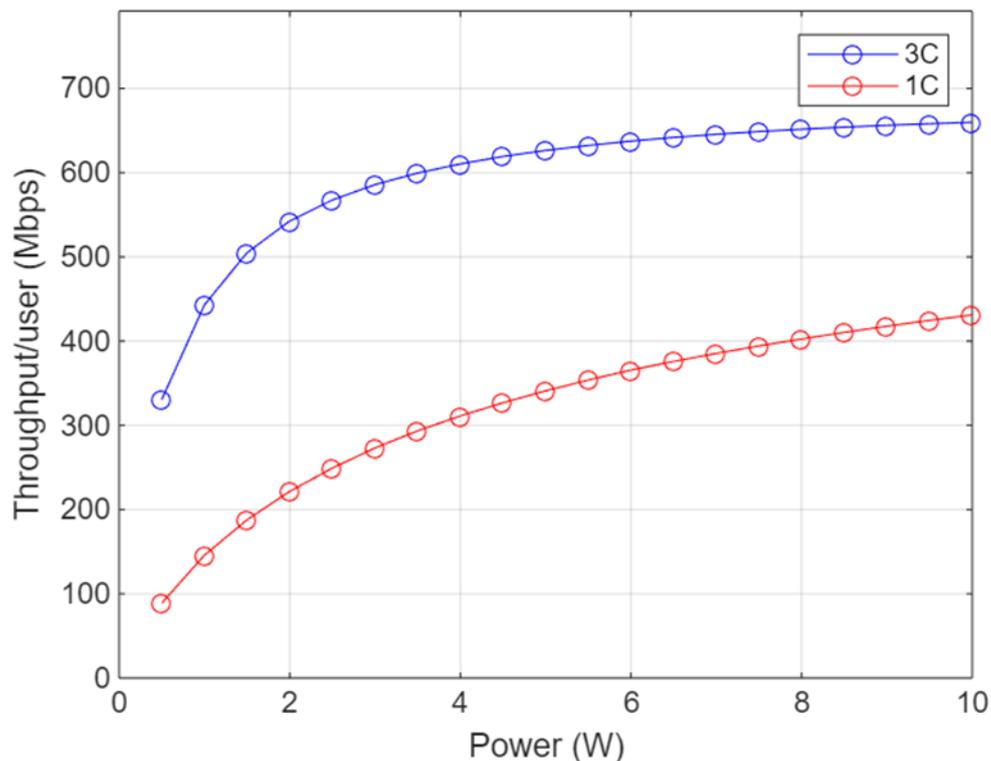
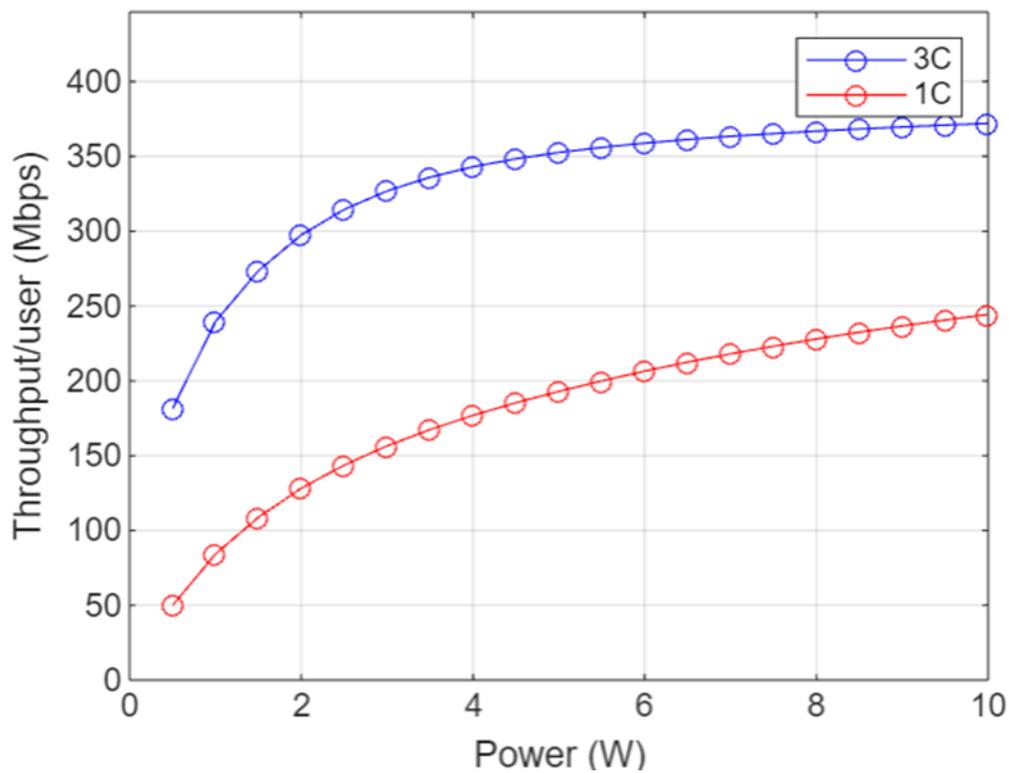


Figura 4.3- Troughput vs Potência, cluster RAN 1C e 3C

Da Figura 4.3 podemos concluir que o throughput/utilizador não cresce linearmente com o incremento da potência transmitida. Na curva 3C para 4W de potência obtém-se mais de 600Mbps do throughput, sendo o valor máximo obtido para 10W com cerca de 660Mbps. Na curva 1C para 4W de potência ultrapassa-se 300Mbps e o valor máximo de throughput é de cerca 430Mbps. Este último valor coincide com o valor obtido das Figuras 4.1 e 4.2 em termos de throughput médio global por utilizador.

Na Figura 4.4 simulou-se com NumberOfFlows de 40, NumberOfFlowAPs de 20 e in_power de 100, max_cell_tx_power de 10, temos: $A=480$, que é o número total de UEs, e $B=120$ que representa o número de UEs atendidos pela BS outdoor. Logo, $C=360$, sendo C o número de UEs atendidos pelas BSs (APs) indoor.



Figur 4.4 - Troughput vs Potência, cluster RAN 1C e 3C

Ao analisar os gráficos representados nas Figura 4.3 e Figura 4.4 do throughput em função da potência da transmissão verifica-se que, o cluster 3C, independentemente dos cenários considerados é o que atinge o valor mais elevado em comparação com o 1C. Isso significa que com o cluster 3C o sistema é capaz de alcançar a taxa de transferência de dados mais altas para determinadas potências de transmissão porque é um sistema com muito menos interferência devido a haver três BS/AP a transmitir para um mesmo terminal. 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, será necessário fazer retransmissões de pacotes recebidos erradamente, o que, por sua vez, tende a diminuir o throughput. É de realçar o decréscimo dos valores de throughput máximo da Figura 4.4 relativamente aos da Figura 4.3. Isso pode dever-se ao aumento do número de utilizadores que passou de 210 para 480, mantendo-se constante a potência de transmissão máxima em 10W.

4.1.2 Resultados de Cobertura

Esta secção tem como propósito apresentar os resultados da cobertura em função da potência de transmissão da BS exterior, e foram simulados 20 utilizadores por sector.

A Figura 4.5 diz respeito a um NumberOfFlows de 10, NumberOfFlowAPs de 10 e in_power de 100, max_cell_tx_power de 10, temos: $A=210$, que é o número total de UEs, e $B=30$ que representa o número de UEs atendidos pela BS outdoor. Logo, $C=180$, com C o número de UEs atendidos pelas BSs indoor.

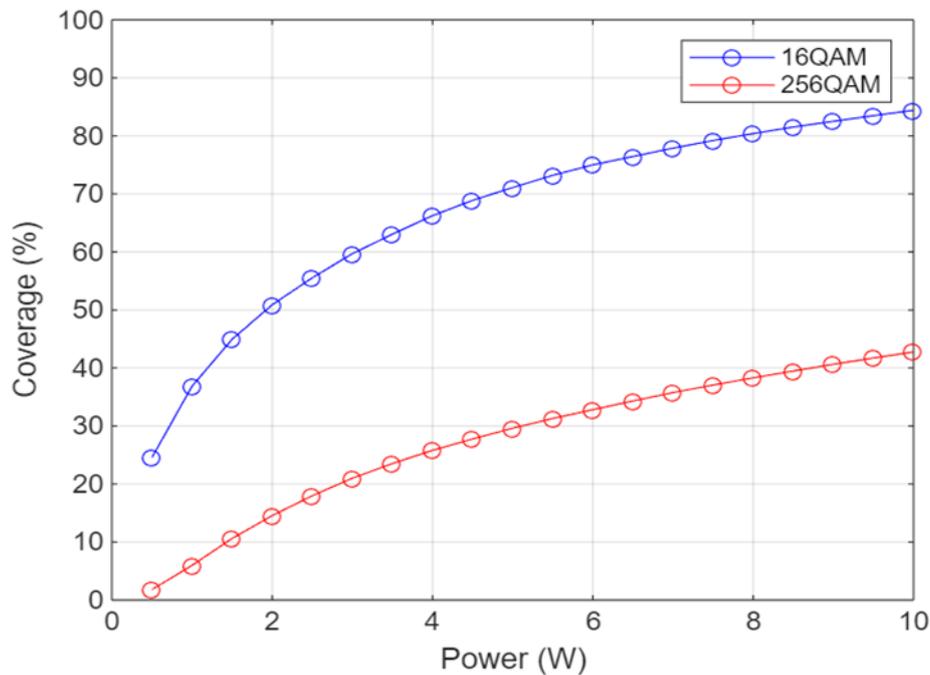
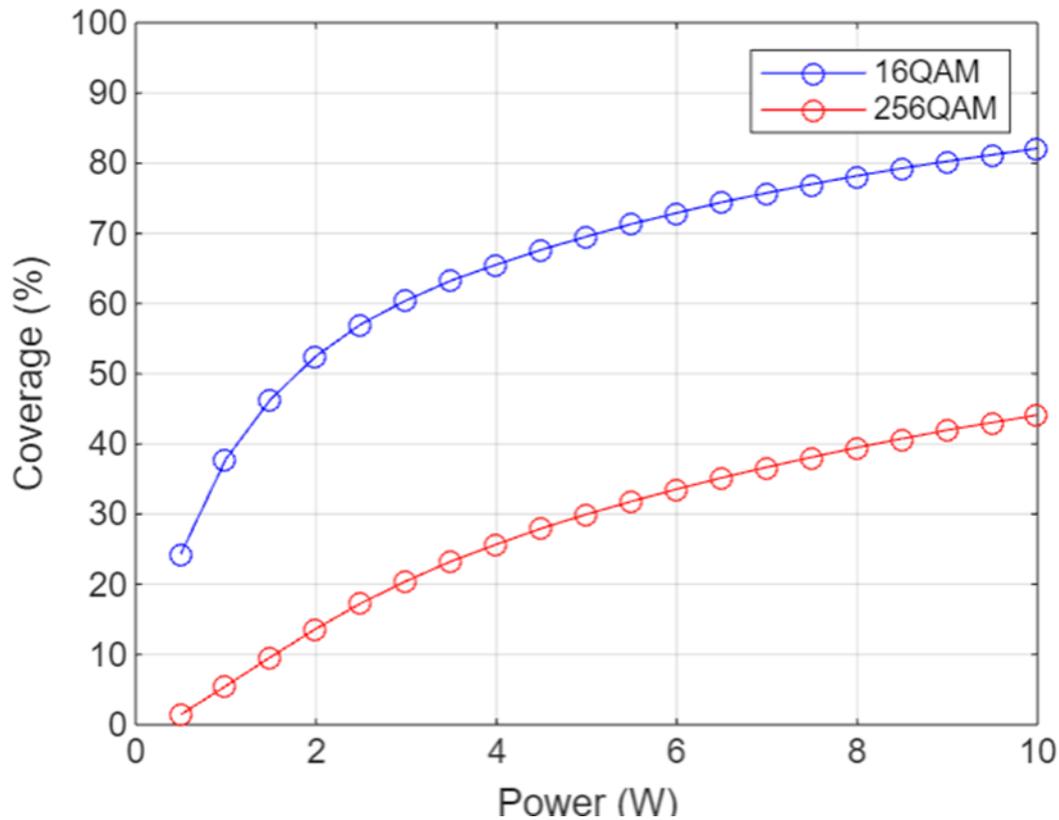


Figura 4.5 - Cobertura vs Potência, modulações 16QAM e 256QAM, $N_u=210$.

A Figura 4.6 refere-se a um NumberOfFlows de 40, NumberOfFlowAPs de 20 e in_power de 100, max_cell_tx_power de 10, temos: $A=480$, que é o número total de UEs, e $B=120$ que representa o número de UEs atendidos pela BS outdoor. $C=360$, sendo C o número de UEs atendidos pelas BSs indoor.



Figuras 4.6- Cobertura vs Potência, modulações 16QAM e 256QAM, Nu=480

Comparando a cobertura das Figuras 4.5 e 4.6 pode-se verificar a sua perfeita identidade. No que diz respeito à modulação, observa-se que, independentemente do cenário implementado, a modulação 16QAM apresenta sempre um melhor desempenho, face à 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.

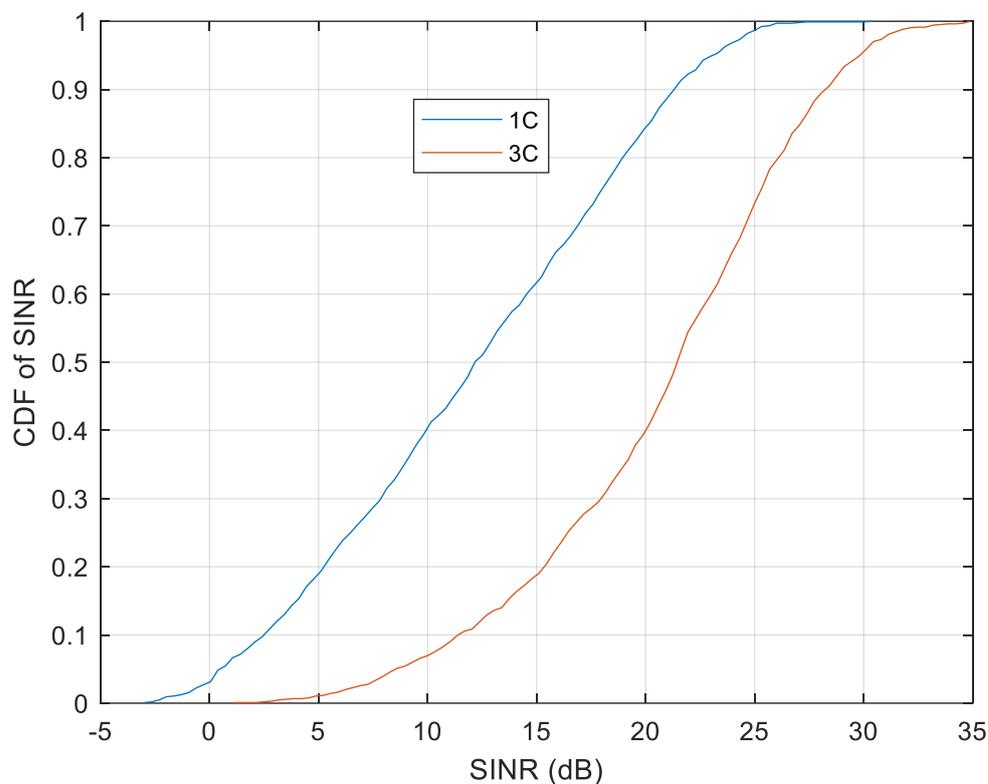
Por outro lado, a modulação 256QAM apresenta uma percentagem de cobertura menor. Isso implica que o sinal modulado em 256QAM tem uma capacidade limitada de alcance e tende a degradar-se mais rapidamente com o aumento da distância, embora possa oferecer maior capacidade de transmissão de dados, acaba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

A modulação 16QAM permite atingir uma taxa de cobertura 82% enquanto a modulação de 256QAM atinge uma taxa de 44% em ambas as figuras analisadas.

4.1.3 Resultados do CDF do SINR e do Throughput

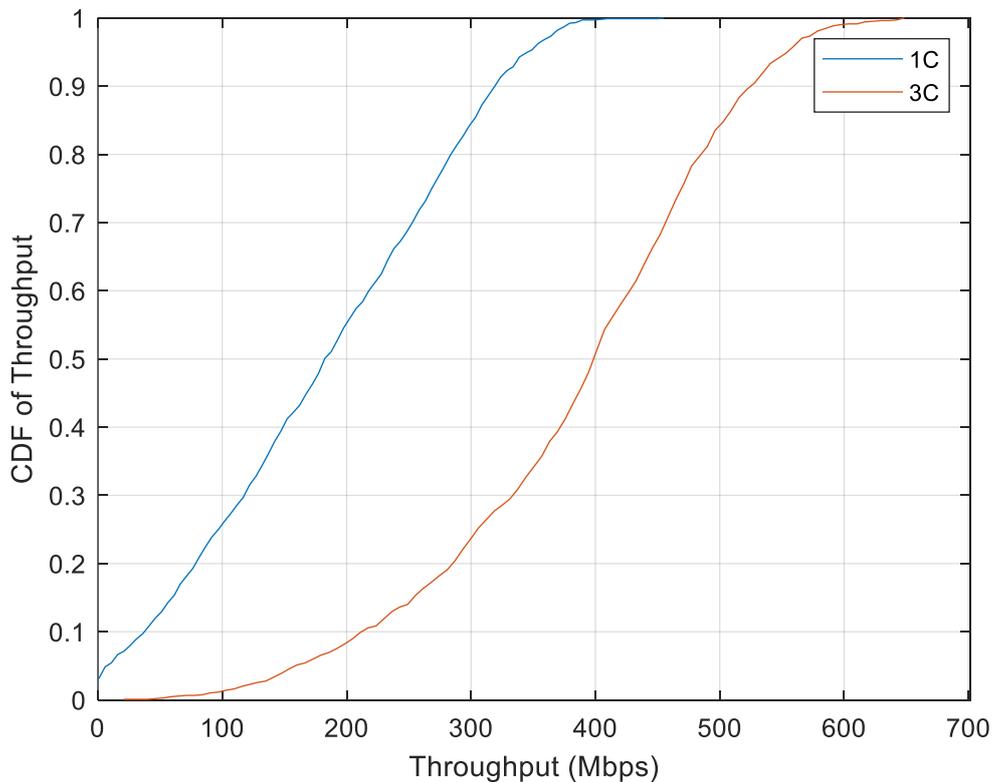
Nesta secção apresenta-se os resultados do CDF (função de distribuição cumulativa) do SINR (razão entre a potência do sinal e a potência do ruído térmico mais a da interferência) e do CDF do Throughput.

A Figura 4.6 diz respeito a um total de utilizadores de $N_u=210$, com 30 utilizadores no exterior e 180 utilizadores dentro do edifício do Ministério das Finanças.



Figuras 4.7- CDF do SINR, 1C e 3C.

Na Figura 4.7 ilustra-se o CDF do SINR para os dois tipos de clustering considerado no simulador de sistema. Observa-se que a curva 3C tem todos os valores de SINR positivos (em dB) o que significa haver uma relação excelente da relação entre a potência de sinal e a soma das potências do ruído e da interferência. O valor de SINR varia entre 0dB e 35dB. Na curva 1C observa-se valores negativos de SINR e há uma distribuição entre -3dB e 28dB. Veremos de seguida a correspondência entre este CDF do SINR e o correspondente CDF do Throughput.



Figuras 4.8- CDF do Throughput, 1C e 3C.

Na Figura 4.8 mostra-se o CDF do Throughput novamente para os dois tipos de clustering considerados neste simulador de nível de Como se estava à espera o desempenho do CDF da curva 3C é sempre superior ao da curva 1C. Para os utilizadores situados nas fronteiras das células onde o SNIR é o mais baixo os utilizadores recebem um valor mínimo de 70 Mbps e para os utilizadores próximos da Bs e dos APs o throughput ultrapassa os 600 Mbps, o que está de acordo com os resultados da Figura 4.3, Da curva 1C concluímos que há cerca de 4% de utilizadores que por estarem localizados na fronteira da célula não recebem qualquer dados transmitidos pela BS ou APs. Já os utilizadores próximos da BS/AP recebem o throughput máximo de 400Mbps, o que está novamente de acordo com a Figura 4.3. Os resultados desta Figura 4.8 indicam que o sistema está bem planeado na escolha da localização das BS/APs.

CAPÍTULO 5

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 o cenário específico de implementação que é o ambiente laboral do Ministério das Finanças da Guiné-Bissau.

Neste contexto, o desempenho do sistema foi analisado através de um simulador de sistema, atualizado de modo a simular uma rede 5G NR específica designada por 'InF', na qual foi implementada o ambiente do Ministério das Finanças da Guiné-Bissau.

Foram executadas simulações considerando ambos os ambientes Indoor e Outdoor que constam do cenário de referência, e foram testadas com número diferente de utilizadores. Foram considerados os dois tipos de modulação, nomeadamente 16QAM e 256QAM, onde também foram implementadas arquiteturas de antenas de grande escala, sistemas M-MIMO com a utilização de $M=256$ antenas ativas por setor para servir os UEs.

No que diz respeito à gama de frequências a utilizar foi utilizada a frequência da portadora 3,6 GHz. A avaliação de desempenho do sistema baseou-se nos resultados obtidos para o throughput, a cobertura da rede e o CDF do throughput e SINR. Foram apresentados resultados de throughput em função do número de utilizadores, exteriores e interiores, além do valor global. Foram apresentados os resultados de throughput e cobertura alcançados em função da potencia transmitida da BS. No âmbito da otimização do sistema, foi incorporada a estratégia denominada "clustering", na qual se permite a um terminal ser servido por mais do que uma BS/AP em simultâneo. Avaliou-se 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), onde cada terminal apenas recebe dados de uma só conexão, e outra, quando o tamanho do cluster é igual a três (3C), na qual a rede é repartida em conjuntos de três sites adjacentes e cada terminal recebe dados em simultâneo de três conexões. 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. Foi evidente que a utilização do clustering 3C superou o clustering 1C, 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 mais complexos com utilizadores exteriores e interiores.

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 à 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 obter um maior raio de cobertura.

5.2 Trabalho futuro

O trabalho futuro será o alargamento do mesmo projeto para outras repartições regionais da rede privada 5G NR, devido à melhoria e vantagens que oferecem em relação às tecnologias anteriores, nomeadamente alta fiabilidade, baixa latência e permite múltiplos dispositivos a funcionarem ao mesmo tempo. Por exemplo quando se fala do IoT, estas são algumas das vantagens que se oferecem em relação ao 4G que está a ser usado neste momento no Ministério das Finanças em Bissau e a infraestrutura existente que suporta essa tecnologia. Sabendo que o Ministério das Finanças é um dos mais importantes e o serviço que oferece aos contribuintes precisa de uma melhoria substancial relativamente à interconexão e à disponibilidade do sistema que permite o pagamento em tempo real não é dos melhores. Assim isto é uma oportunidade para os restantes departamentos governamentais do nosso país visto que a governação eletrónica está a ser nos últimos tempos uma das prioridades do governo da Guiné-Bissau.

Referencias bibliográficas

- [1] Ken Peffers, Tuure Tuunanen, Marcus Rothenberger. “A Design Science Research Methodology for Information Systems Research”
<https://www.researchgate.net/publication/284503626>
- [2] Naranjo, D., Buenaño, D., & Mejía, I. T. (2016). EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA MÓVEL. CAMINHO PARA 5G. Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales.
- [3] Mendoza, a Campoverde, Lima, Jumbo , Conde-Zhingre,IT (2022) . THE 5G MOBILE NETWORK AND ITS CONTRIBUTION TOWARDS SMART CITIES.
- [4] Bowen Hu, Xin Heng. (2022). Pesquisa sobre sistema de proteção de segurança 5G para a indústria.
- [5] M. Wen, Q. Li, K. Kim, D. López-Pérez, O. Dobre, H. Poor, P. Popovski, T. Tsiftsis.(2022) Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape.
- [6] P. Almasan, J. Suárez-Varela, A. Lutu, A. Cabellos-Aparicio, P. Barlet-Ros(2023) . Enhancing 5G Radio Planning with Graph Representations and Deep Learning.
- [7] GSMA Intelligence (Lead author) (2022), Kenechi Okeleke, James Joiner, Emanuel Kolta. 5G in Africa: realising the potential
- [8] Dong Feng Fang;Yi Qian;Rosa Qingyang Hu (2024). Computer Network Security Defense System in 5G.
- [9] ROGER PIQUERAS JOVER, VUK MAROJEVIC (2019). Security and Protocol Exploit Analysis of the 5G Specifications.
- [10] A. Thompson, Army Examines Feasibility of Integrating 4G LTE With Tactical Network, 2012, [online] Available: <http://goo.gl/F60YNA>
- [11] Fabian van den Broek, Roel Verdult, Joeri de Ruiter .Derrotando os coletores IMSI.
- [12] Ghada Arfaoui, Pascal Bisson, Rolf Blom, Ravishankar Borgaonkar, Håkan Englu (2018). A Security Architecture for 5G Networks.
- [13] Ravishankar Borgaonkar, Shinjo Park, Jean-Pierre Seifert (2019). vulnerabilities in 4G and 5G cellular access network protocols: exposing device capabilities.

- [14] 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
- [15] A. Gupta and R. K. Jha. “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies”. *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [16] T. Tsutsui. “5G and It’s Surrounding Situations Until 2020”. *Digest of Technical Papers - Symposium on VLSI Technology*, vol. 2, pp. T2–T6, 2017.
- [17] V. Wong, R. Schober, D. Ng and L.-C. Wang. *Key Technologies for 5G Wireless Systems*. Cambridge University Press, first edition, 2017.
- [18] “REDES 5G Crie redes 5G LTE rápidas” <https://www.5g-networks.net/5g-technology/5g-nsa-and-5g-sa-networks-compared/>
- [19] “Capítulo 3 Soft5G+: explorando a softwarização nas redes 5G” https://www.researchgate.net/publication/344860643_Soft5G_explorando_a_softwarizacao_nas_redes_5G
- [20] AKHIL GUPTA AND RAKESH JHA . “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies” 2015.
- [21] Syed Hussain, Mitziu Echeverria, Imtiaz Karim. (2020) “5GReasoner: A Property-Directed Security and Privacy Analysis Framework for 5G Cellular Network Protocol”.
- [22] Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015) https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf
- [23] “Fatiamento de rede em 5G”, 7 de abril de 2018, <http://www.mplsvpn.info/2018/04/network-slicing-in-5g.html>
- [24] R. Chataut e R. Akl, “Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction,” *Sensors*, 12 maio 2020.
- [24] R. Chataut e R. Akl, “Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction,” *Sensors*, 12 maio 2020.
- [25] Hybrid Beamforming for Massive MIMO, Andreas F. Molisch, Vishnu V. Ratnam, Shengqian Han, Zheda Li, Sinh Le Hong Nguyen, Linsheng Li, and Katsuyuki Haneda

- [26] “Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf.” Accessed: Feb. 06, 2022. [Online]. Disponível: https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf
- [27] Abulfazl Zakeri, Member, IEEE, Narges Gholipoor, Mohsen Tajallifar, Sina Ebrahimi, Mohammad Reza Javan, Senior Member, IEEE, Nader Mokari, Senior Member, IEEE, Ahmad Reza Sharafat, Chair, ITU-D Study Group 2, “E2E Migration Strategies Towards 5G: Long-term Migration Plan and Evolution Roadmap,” p. 10.
- [28] “Redes 5G privadas: conceitos, arquiteturas e cenário de pesquisa”, Miaowen Wen , Qiang Li , Kyeong Jin Kim , David López-Pérez, Octavia A. Dobre , H. Vincent Poor , Petar Popovski , and Theodoros A. Tsiftsis.
- [29] 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.
- [30] M. Norin et al., “5G spectrum for local industrial networks, white paper,” Accessed May 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/whitepapers/5gspectrum-for-local-industrial-networks>
- [31] Evódia E. M. Medina , “Planeamento e Otimização de Redes 5G” https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/29827/1/master_evodia_monteiro_medina.pdf
- [32] Time-sensitivenetworkingtaskgroup. Accessed: May.5,2021. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [33] S. Kimet al., “Demo/poster abstract: Enabling time-critical applications over next-generation 802.11 networks,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. Workshops*, Honolulu, HI, USA, 2018, pp. 1–2.
- [34] H. Wymeersch, J. He, B. Denis, A. Clemente, and M. Juntti, “Radiolocalization and mapping with reconfigurable intelligent surfaces: Challenges, opportunities, and research directions,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 52–61, Dec. 2020.
- [35] 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.

[36] V. B. Nikam1, “Optimal Positioning of Small Cells for Coverage and Cost Efficient 5G Network Deployment: A Smart Simulated Annealing Approach”, 978-1-7281-7299-6/20/\$31.00 ©2020 IEEE

[37] Elias mainetti. “Celulas: 5G Macro e small cell”, desponivel online no seguinte endereço <https://myNETTECH.com.br/wireless/celulas-5g-macro-small-cell/>

[38] Carlos A. Gutierrez,Mauricio Caicedo, Daniel Ulises Campos Delgado,“5G and Beyond: Past,Present and Future of the Mobile Communication”,disponivel online no seguinte endereço: https://www.researchgate.net/publication/350353475_5G_and_Beyond_Past_Present_and_Future_of_the_Mobile_Communications

[39] Lavish Kansal, Vishal Sharmaer, Jagjit Singh. “ Sistema Multiusuário Massive MIMO-OFDM Incorporadocom Transformação Diversificada para Aplicaçõ”, disponivel online no seguinte endereço: https://www.researchgate.net/publication/335275644_Multiuser_Massive_MIMO-OFDM_System_Incorporated_with_Diverse_Transformation_for_5G_Applications

[40] A. Correia, “Ferramentas de Simulação.” 2006.

[41] Hang Li , Zixuan Kong, Yawen Chen , Luhan Wang , Zhaoming Lu ,

Xiangming Wen , Wenpeng Jing , and Wan Xiang , “Slice-Based Service Function Chain Embedding for End-to-End Network Slice Deployment”, disponível online no seguinte endereço: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10056963>

[42] Hiroki Baba ; Shiku Hirai ; “ End-to-end 5G network slice resource management and orchestration architecture”, 2022 IEEE. disponível online no seguinte endereço: Hiroki Baba ; Shiku Hirai ; Takayuki Nakamura ; Sho Kanemaru ; Kensuke Takahashi

[43] Siyi Liao, Jun Wu, Jianhua Li, and Kostromitin Konstantin, “Information-Centric Massive IoT-Based Ubiquitous Connected VR/AR in 6G: A Proposed Caching Consensus Approach” VOL. 8, NO. 7, APRIL 1, 2021

Anexos

Anexo A

Tecnologias Facilitadoras para a Implantação de Redes Privadas 5G

A instalação de redes privadas 5G pode ser simplificada com o uso de diversas tecnologias que garantem um desempenho ideal e ajustado às necessidades particulares de cada empresa ou organização. A seguir, examinaremos essas tecnologias e como elas podem ser aplicadas para atingir os objetivos desejados na implementação de redes privadas 5G.

1) Fatiamento de rede

Como discutido na Seção II, o fatiamento de rede é essencial para integrar redes públicas e privadas 5G, permitindo a criação de múltiplas redes lógicas dentro de uma rede física, cada uma adaptada a um caso de uso específico. Tecnologias como a virtualização de funções de rede (NFV) e redes definidas por software (SDN) facilitam esse processo. Com os benefícios do NFV e do SDN, o fatiamento de rede possibilita a criação de redes privadas 5G que atendem a diferentes requisitos de negócios em diversos setores, como fábricas inteligentes, empresas de logística, hospitais com cirurgias robóticas remotas e estádios desportivos.

2) A computação de borda (MEC)

A computação de borda (Private edge computing) é uma tecnologia importante para redes privadas 5G, pois permite realizar tarefas complexas e armazenar grandes quantidades de dados diretamente na borda da rede, de maneira descentralizada, ao contrário da computação em nuvem tradicional. Isso traz vários benefícios devido à proximidade entre o usuário e os servidores locais, como melhor precisão de localização, maior privacidade e segurança dos dados, menor necessidade de armazenamento em nuvem, economia de energia e redução do tempo de resposta.

Vale ressaltar que a computação de borda e a computação em nuvem podem trabalhar juntas. A computação em nuvem é ideal para processar grandes volumes de dados que não precisam ser analisados em tempo real, enquanto a computação de borda é perfeita para processar tarefas e tomar decisões rapidamente, analisando em tempo real os dados gerados por vários dispositivos.

A utilização da computação de borda privada oferece vários benefícios adicionais, ao fornecer serviços seguros e privados para necessidades locais e configurações de rede. Isso é possível

graças à distribuição rápida de conteúdo e à otimização baseada nas estatísticas locais da RAN. Com essas estatísticas, é possível criar um Ambiente Virtual de Coisas (VEoT) que combina IoT e Realidade Aumentada (AR), integrando também a inteligência artificial. Isso permite um monitoramento, controle e adaptação eficazes em ambientes sem fio em constante mudança, otimizando ao mesmo tempo a utilização dos recursos disponíveis.

A computação de borda privada é distribuída, o que diminui a chance de um único ataque físico ou cibernético comprometer toda a rede. Isso é importante para proteger a área local e informações confidenciais contra ataques digitais. Diferente da computação em nuvem centralizada, a borda privada oferece uma opção mais segura para proteger dados sensíveis.

A combinação das tecnologias 5G e MEC (Mobile Edge Computing) é uma alternativa viável para empresas que precisam de dados em tempo real para decisões rápidas e operações ágeis. Ela fornece uma plataforma de computação dedicada e altamente segura, com baixa latência em grandes áreas. Essa redução de latência abre novas possibilidades para criar aplicações de Realidade Aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR) em eventos e locais como apresentações, jogos em estádios e parques temáticos, proporcionando experiências mais imersivas e interativas para os usuários.[28][31]

3) Gestão de Interferência

Gerenciar a interferência em redes 5G privadas é essencial para garantir que a rede funcione de maneira ideal. Essas redes podem ser usadas em vários setores, como manufatura, saúde e transporte, por isso é fundamental que sejam confiáveis e tenham baixa latência.

Para reduzir a interferência nessas redes, algumas técnicas recomendadas incluem: acesso múltiplo, espalhamento de espectro, controle de potência de transmissão e cancelamento de interferência.

O acesso múltiplo pode ser tanto determinístico quanto aleatório. O espalhamento de espectro pode ser realizado por meio de sequência direta (DSSS) ou salto de frequência (FHSS). O controle de potência de transmissão envolve ajustar dinamicamente a potência de transmissão para diminuir a interferência e aumentar a eficiência do uso do espectro [28][31].

4) Suporte a Redes Sensíveis ao Tempo (TSN)

A versão 16 do 3GPP permite a colaboração dos sistemas 5G com redes TSN, um conjunto de tecnologias e padrões do IEEE 802.1 [32] que garantem transporte de dados com latência limitada e baixa variação de atraso. Originalmente baseado no padrão Ethernet, o TSN agora enfrenta desafios de mobilidade e flexibilidade na Indústria 4.0 [33]. A integração com redes 5G privadas oferece uma solução promissora para comunicação determinística em aplicações industriais em tempo real.

No 5G, a TSN integra-se como uma ponte lógica, com tradutores que mapeiam as configurações TSN para a estrutura de QoS do 5G, permitindo transmissão eficiente via Ethernet. O 5G também beneficia da sincronização precisa da TSN, essencial para novos serviços e tecnologias avançadas.

A integração 5G-TSN está em estágios iniciais, mas é fundamental para reduzir latências e melhorar o controle em tempo real. Em redes 5G privadas, definir claramente a operação e gestão da rede é crucial, com modelos isolados ou integrados sendo aplicáveis conforme as necessidades específicas.[33]

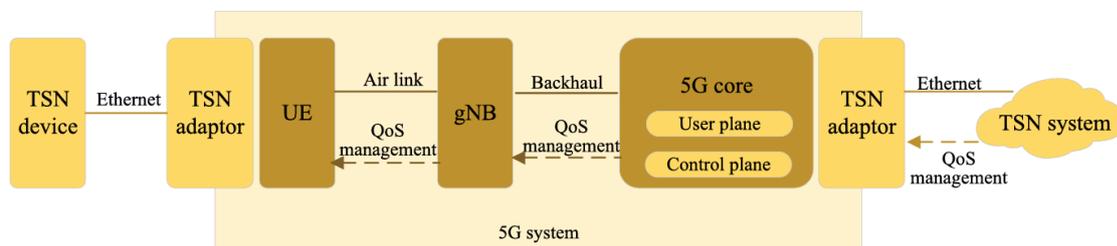


Figura A.1 A integração dos sistemas 5G e TSN [28].

5) Posicionamento e Localização

Sistemas de posicionamento e localização de alta precisão são cruciais para o desenvolvimento e implementação bem-sucedida de aplicações em redes privadas 5G. Muitas dessas aplicações, como veículos guiados automaticamente, robôs móveis, autônomos industriais, cuidados de saúde, rastreamento de ativos e interfaces homem-máquina, envolvem a interação em tempo real entre o mundo digital e físico, o que exige informações de localização muito precisas e oportunas[34].

Como a estimativa de localização baseia-se em medições e processamento estatístico de sinais, as estatísticas locais fornecidas pela rede privada são fundamentais para a localização e rastreamento de objetos.

Em cenários externos, sistemas de navegação por satélite (GNSS) são comuns, mas têm limitações em fornecer posicionamento preciso, especialmente em ambientes internos industriais. Nesses casos, a localização baseada em radiofrequência é essencial para o desempenho das redes 5G privadas. A tecnologia 5G NR oferece funcionalidades avançadas para um posicionamento altamente preciso, como o uso de múltiplas antenas e uma ampla largura de banda, possibilitando uma localização mais precisa e eficiente [28].

Otimização

Principais KPIs a considerar na Otimização 5G NR RAN

Na otimização das redes 5G NR RAN, o processo é dividido em duas fases principais: a otimização inicial e a otimização contínua.

Na otimização inicial, que ocorre antes do lançamento da rede, os engenheiros ajustam fisicamente a infraestrutura e configuram parâmetros para garantir que a rede atinja os objetivos de cobertura e desempenho estabelecidos.

Já na otimização contínua, após o lançamento, a rede é monitorada regularmente. Dados são coletados e analisados, e ajustes são feitos para garantir que o desempenho da rede continue a atender os padrões exigidos.

Os KPIs, em termos simples, funcionam como indicadores da "saúde" da rede. Segundo o padrão 3GPP, existem seis KPIs principais que afetam diretamente o desempenho da rede e a experiência do usuário final [35]:

Acessibilidade: Mede a probabilidade de um usuário conseguir se conectar com sucesso a uma fatia da rede.

Integridade: Verifica se os dados da rede foram alterados sem autorização.

Utilização: Refere-se à eficiência no uso dos recursos da rede sem comprometer a experiência do usuário.

Retenabilidade: Avalia a capacidade da rede de manter conexões de serviço estáveis sob diferentes condições.

Mobilidade: Mede o sucesso das transferências de conexão (handover) dentro da RAN, independentemente da razão, como uma fraca cobertura.

Eficiência energética: Avalia como a energia é utilizada para transferir dados na rede de forma eficiente.

Técnicas de Otimização de Cobertura

O conceito de otimização de cobertura e capacidade tem recebido muita atenção devido à sua complexidade. Esse processo é feito com base em medições, como os testes de campo (Drive Tests), e no uso de ferramentas de planejamento, com o objetivo de melhorar a qualidade das redes celulares.

A otimização de cobertura e capacidade é essencial para garantir que a rede funcione da melhor maneira possível. Isso envolve identificar e corrigir problemas de cobertura, levando em consideração fatores como a densidade da rede, a localização dos dispositivos, as condições ambientais e os padrões de tráfego [36].

As small cells são fundamentais para melhorar a cobertura no 5G. Elas são sistemas de baixa potência, implantados em áreas pequenas, que oferecem alta velocidade de dados e baixa latência.

Existem três tipos principais de small cells: femtocell, picocell e microcell, cada uma com diferentes alcances.

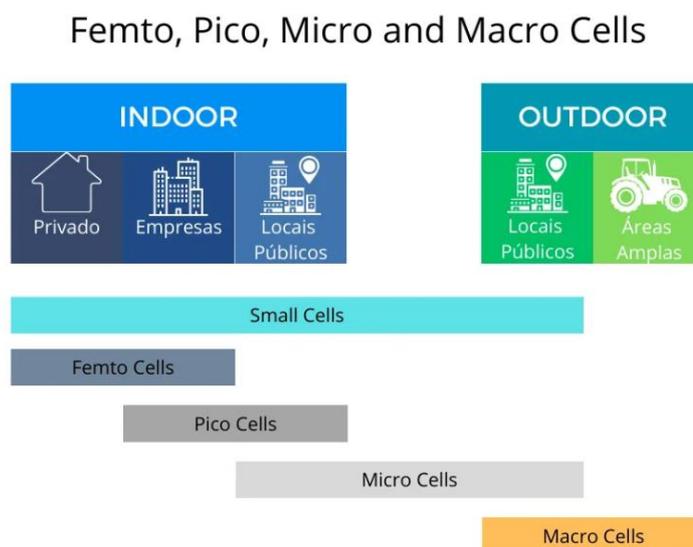


Figura A.2 - Tipos de Small Cell [37]

Essas small cells são vitais para atender às exigências do 5G, como maior largura de banda, comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência (URLLC), conectividade em massa e maior eficiência espectral. Elas são fáceis de instalar, 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.

Anexo B

Planeamento Celular do Cenário InF (Ministério das Finanças – Bissau)

Os resultados teóricos relativos ao Planeamento Celular do Cenário InF vão ser apresentados de seguida. Cada BS/AP tem 2 zonas com diferentes ritmos binários, dependendo da distância à estação de base, sendo que por isso foram utilizadas duas modulações distintas: os símbolos 256QAM possuem uma taxa de codificação (R_c) de 7/8 e o seu alcance é de 24.5 metros da BS, enquanto os símbolos 16QAM possuem uma $R_c=3/4$ e o seu alcance excede os 49.5 metros.

Utilizou-se o 5G NR com M-MIMO, em que cada setor de célula utiliza M-MIMO com $M=256$ antenas, de forma a servir $K=21$ utentes, $M/K=12$ antenas por utente, sendo utilizado o sistema TDD. Uma vez que todas as BSs e APs têm 3 setores, e que neste cenário são utilizadas 1 BSs + 6 APs, logo há no total: $3 \times 7 = 21$ setores.

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

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

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

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

- Cálculo da Potência do Ruído (P_n):

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

$$10 \log(P_n) = 10 \log(kT) + 10 \log(F) + 10 \log(B_t) \quad (2)$$

$$10 \log(P_n) = -174 + 8 + 10 \log(50 \times 10^6) = -174 + 8 + 77 = -89 \text{ dBm}$$

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

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

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

Para a Modulação 256QAM:

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

Para a Modulação 16QAM:

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

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

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

Para a Modulação 256QAM:

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

Para a Modulação 16QAM:

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

- Cálculo da Relação Sinal-Ruído (SNR):

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

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

Para a Modulação 256QAM:

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

Para a Modulação 16QAM:

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

- Cálculo da Sensibilidade (S):

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

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

Para a Modulação 256QAM:

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

Para a Modulação 16QAM:

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

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

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

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

Para a Modulação 256QAM:

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

Para a Modulação 16QAM:

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

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

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

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

Para a Modulação 256QAM:

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

Para a Modulação 16QAM:

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

- Análise da Capacidade do M-MIMO neste cenário *Indoor* do ISCTE-IUL:

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

$$\begin{aligned}\tau_c &= B_c \times T_c \\ \tau_c &= 8 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3} = 200000 \text{ símbolos}\end{aligned}\quad (9)$$

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

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

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

$$\begin{aligned}R_s &= \frac{N_s}{T_c} \\ R_s &= \frac{1 \times 10^5}{25 \times 10^{-3}} = 4 \times 10^6 \text{ sps em cada } B_c\end{aligned}\quad (10)$$

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

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

$$\begin{aligned}R_{st} &= \frac{B_t}{B_c} \times R_s \\ R_{st} &= \frac{50 \times 10^6}{8 \times 10^6} \times 4 \times 10^6 = 2.5 \times 10^7 \text{ sps}\end{aligned}\quad (11)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Para a Zona 1:

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

Para a Zona 2:

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

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

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

Para a Zona 1:

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

Para a Zona 2:

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

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

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

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

- Cálculo da Eficiência Espectral (ϵ):

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

$$\varepsilon = \frac{R_{bc}}{B_t} \quad (20)$$
$$\varepsilon = \frac{217.7 \times 10^7}{50 \times 10^6} = 43.5 \text{ bps/Hz/setor}$$

- Cálculo da Eficiência Espectral por Utilizador (ε_K):

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

$$\varepsilon_K = \frac{\varepsilon}{K} \quad (21)$$
$$\varepsilon = \frac{43.5}{21} = 2.1 \text{ bps/Hz/pedestre}$$

- Cálculo do *Throughput*:

Tendo em conta que no cenário há no total 21 setores, o *throughput* total é obtido através da seguinte equação:

$$\text{Throughput} = R_{bc} \times 21 \quad (22)$$
$$\text{Throughput} = 217.7 \times 10^7 \times 21 = 45.7 \text{ Gbps}$$