



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Planeamento de uma Rede Privada 5G em Linda-a-Velha

David Douglas Tôco Sebastião

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

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

Setembro, 2025



TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação

Planeamento de uma Rede Privada 5G em Linda-a-Velha

David Douglas Tôco Sebastião

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

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

Setembro, 2025

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter-me dado o fôlego de vida e vontade para concluir esta dissertação.

À minha esposa Débora Sebastião, minha companheira de vida, agradeço profundamente pelo amor, apoio incondicional, encorajamento, dedicação e paciência demonstrados em todos os momentos, que sem dúvida foi imprescindível para a concretização desta dissertação, muito obrigado Amor.

Ao meu Pai António Alberto e em memória a minha mãe Esperança Joana Tôco, agradeço também pelo exemplo de dedicação, preocupação e valores transmitidos que levo para toda a vida. Ser-te-ei eternamente grato por tudo o que fizeste e fazes por mim, Pai.

À minha família em geral, madrastra, irmãos, cunhado, cunhadas, sobrinhas e sobrinhos, obrigado pelo suporte, incentivo e confiança.

Ao meu orientador o Professor Doutor Américo Correia, um especial agradecimento pelo acompanhamento dedicado, pelas valiosas instruções e toda a disponibilidade que foram fundamentais para a realização desta dissertação.

A todos vós, o meu mais sincero e profundo Obrigado!

Esta conquista também é vossa!

Resumo

Os objetivos principais desta dissertação são planeamento e análise de desempenho de um sistema 5G NR na freguesia “Linda A Velha” em Oeiras.

A análise concentra-se essencialmente no desempenho, por avaliar o *throughput* e a cobertura, com variação de parâmetros como o número de utilizadores, modulação (4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM), agregados de antenas, incluindo M-MIMO. O simulador de sistema implementa o ambiente urbano com uma diferenciação de utilizadores ($N_u=10$, $N_u=32$ e $N_u=64$) e portadoras (3.6 GHz e 900 MHz), correspondentes às numerologias 1 e 0 do 5G NR.

Os resultados demonstram que o *throughput* aumenta de forma linear com o número de utilizadores, revelando a escalabilidade do sistema. A introdução da estratégia de *clustering* permitiu melhorias significativas no desempenho, com ênfase no *clustering* 2C, que permite melhor cobertura, eficiência espectral e *throughput* mais efetivo. Verificou-se que 4QAM oferece a melhor cobertura, enquanto 256QAM requer mais potência para alcançar cobertura significativa. A comparação entre as frequências evidenciou que 900 MHz oferece melhor cobertura em baixa potência, ao passo que 3.6 GHz proporciona maior capacidade e eficiência espectral. Identificou-se que para diminuir a percentagem de pacotes transmitidos que não chegam a ser corretamente recebidos é necessário haver duas conexões simultâneas entre cada terminal e duas BSs (2C).

Conclui-se que a implementação de uma rede privada 5G em Linda-a-Velha é tecnicamente viável, desde que exista um planeamento equilibrado entre cobertura, capacidade e qualidade de serviço.

Palavras-chave: 5G NR; Rede Privada; Planeamento de Redes Móveis; *Throughput*; Cobertura de Rede.

Abstract

The main objectives of this dissertation are the planning and performance analysis of a 5G N system in Linda A Velha in Oeiras.

The analysis focuses primarily on performance, evaluating *throughput* and coverage, with variations in parameters such as the number of users, modulation (4QAM, 16QAM, 64QAM and 256QAM), and antenna aggregates, including M-MIMO. The system simulator implements the urban environment with a differentiation of users ($N_u=10$, $N_u=32$ and $N_u=64$) and carriers (3.6 GHz and 900 MHz), corresponding to 5G NR numerologies 1 and 0.

The results demonstrate that *throughput* increases linearly with the number of users, revealing the scalability of the system. The introduction of the *clustering* strategy enabled significant improvements in performance, with an emphasis on 2C *clustering*, which allows for better coverage, spectral efficiency, and more effective *throughput*. It was found that 4QAM offers the best coverage, while 256QAM requires more power to achieve significant coverage. The comparison between frequencies showed that 900 MHz offers better coverage at low power, while 3.6 GHz provides greater capacity and spectral efficiency. It was identified that in order to reduce the percentage of transmitted packets that are not correctly received, there must be two simultaneous connections between each terminal and two BSs (2C).

It is conclude that the implementation of a private 5G network in Linda A Velha is technically feasible, provided that there is a balanced plan between coverage, capacity, and service quality.

Keywords: 5G NR; Private Network; Mobile Network Planning; *Throughput*; Network Coverage.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Glossário	xv
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1. Motivação e Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Método de Investigação	2
1.4. Estrutura da Dissertação.....	3
CAPÍTULO 2 Revisão Literária	4
2.1. Princípios básicos	4
2.2. 5G Quinta Geração	4
2.2.1. Diferenças entre a rede 5G e o 4G	6
2.3. Arquitetura da rede 5G.....	7
2.3.1. Rede de acesso via radio (RAN).....	8
2.4. 5G NSA.....	16
2.5. 5G SA.....	16
2.6. Rede Privada 5G.....	16
2.6.1. Tipos de redes privadas 5G.....	18
2.6.2. Benefícios da rede privada 5G.....	22
CAPÍTULO 3 Simulador de Sistema	23
3.1. Descrição do Simulador de Sistema	23
3.2. Cenário de Implementação.....	26
CAPÍTULO 4 Discussão de Resultados	28
4.1. Resultados Teóricos	28
4.2. Resultados das Simulações.....	28
4.2.1. Simulação para 10 Utilizadores	29
Resultados de <i>Throughput</i>	29
4.2.2. Simulação para 32 Utilizadores	34
Resultados de <i>Throughput</i>	34

4.2.3. Simulação para 64 Utilizadores	36
Resultados de <i>Throughput</i>	36
Resultados de CDF	38
4.2.4. Simulação para 10 Utilizadores Menor Raio de cobertura	41
Resultados de <i>Throughput</i>	41
Resultados de CDF	43
4.2.5. Simulação global de <i>Throughput</i> vs Number of Users.....	45
CAPÍTULO 5 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	46
5.1. Conclusões	46
5.2. Trabalhos Futuros	48
Referências Bibliográficas.....	49
Anexos.....	53
Anexo A.....	53
A1. Funções da rede principal CN 5G.....	53
A.2. Software-Defined Networking.....	57
Anexo B.....	60

Índice de Figuras

- Figura 1 - Diagrama do modelo de investigação DSRP [1]
- Figura 2 - Quinta Geração de Redes sem fios (5G) [52]
- Figura 2.1 - Evolução da Comunicação Móvel 1G a 5G [53]
- Figura 2.2.1 - Bandas de espectro 5G Baixas, médias e altas [8]
- Figura 2.3.1 - Antenas antigas VS MIMO Massivo 5G [54]
- Figura 2.3.2 - Formação de feixes analógico [55]
- Figura 2.3.3 - Formação de feixes Digital [56]
- Figura 2.3.4 - Formação de feixes Híbrido [57]
- Figura 2.3.5 - Fatiamento de rede 5G [58]
- Figura 2.3.6 - CRAN – Rede de acesso de rádio Centralizada [59]
- Figura 2.3.7 - VRAN – Rede de acesso de rádio Virtualizada [60]
- Figura 2.3.8 - ORAN – Rede de acesso de rádio aberta [61]
- Figura A.1 - 5G Core Network e 5G “N” Pontos de referência [30]
- Figura A.2.1 - SDN Centralizada [62]
- Figura A.2.2 - SDN Distribuída [63]
- Figura A.2.3 - SDN LC-PD [64]
- Figura 2.6.1.1 - Redes Privadas autónomas [48]
- Figura 2.6.1.2 - Redes privadas autónomas com MNO que fornece RAN [48]
- Figura 2.6.1.3 - Redes privadas integradas em redes públicas que utilizam RAN e partilha de controlo [48]
- Figura 2.6.1.4 - Redes privadas integradas na rede pública que utilizam a divisão da rede de ponto a ponto [48]
- Figura 3.1 - Exemplo de Resultados do Simulador de Ligação
- Figura 3.2 - Interação entre o Simulador de Sistema e o Simulador de Ligação
- Figura 3.3 - Processo de Simulação
- Figura 3.4 - Representação gráfica do cenário de Linda A Velha
- Figura 4.2.1.1 - *Throughput* vs Number of Users (1) com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.1.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.1.3 - *Throughput* vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.1.4 - Coverage vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.1.5 - *Throughput* vs Number of Users com 10 Utilizadores e 900 MHz

Figura 4.2.1.6 - *Throughput* vs Power com 10 Utilizadores e 900 MHz

Figura 4.2.1.7 - Coverage vs Power com 10 Utilizadores e 900 MHz

Figura 4.2.2.1 - *Throughput* vs Number of Users com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.2.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.2.3 - *Throughput* vs Power com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.2.4 - Coverage vs Power com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.3.1 - *Throughput* vs Number of Users com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.3.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.3.3 - *Throughput* vs Power com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.3.4 - Coverage vs Power com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.3.5 - CDF of SINR com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.3.6 - CDF of *Throughput* com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.3.5 - CDF of SINR com 10 Utilizadores e 0.9 GHz

Figura 4.2.3.6 - CDF of *Throughput* com 10 Utilizadores e 0.9 GHz

Figura 4.2.4.1 - *Throughput* vs Number of Users com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.4.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.4.3 - *Throughput* vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.4.4 - Coverage vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.4.5 - CDF of SINR com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.4.6 - CDF of *Throughput* com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Figura 4.2.5.1 - *Throughput* vs Nu com 32 e 64 Utilizadores @ 3.6 GHz

Índice de Tabelas

Tabela 2.4 - Diferenças entre 5G NSA e SA [31]

Tabela 3.1 - Parâmetros gerais de simulação 5GNR

Tabela 3.2 - Parâmetros da Numerologia 1

Tabela 4.1 – Parâmetros para simulações de 900 MHz e 3.6 GHz

Tabela 4.2.4 – Parâmetros para simulações de 3.6 GHz com menor Raio de Cobertura

Glossário

4G – *Fourth Generation*

5G – *Fifth Generation*

5G-EIR – *Fifth Generation Equipment Identity Register*

AF – *Application Function*

AMF – *Access and Mobility Management Function*

API – *Application Programming Interface*

AUSF – *Authentication Server Function*

BBU – *Baseband Unit*

Cloud-RAN – *Cloud Radio Access Network*

CM-Connected – *Connection Management Connected*

CM-Idle – *Connection Management Idle*

CN – *Core Network*

CPRI – *Common Public Radio Interface*

CRAN – *Centralized Radio Access Network*

CRUD – *Create, Read, Update and Delete*

DSS – *Dynamic Spectrum Sharing*

DOI – *Digital Object Identifier*

eMBB – *Enhanced Mobile Broadband*

Gbps – *Gigabits-per-second*

GHz – *Gigahertz*

gNB – *gNodeB*

GSM – *Global System for Mobile Communications*

HTTP2 – *Hypertext Transfer Protocol 2*

IMT-2000 – *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*

LMF – *Location Management Function*

LTE – *Long Term Evolution*

Massive MIMO – *Massive Multiple-Input Multiple-Output*

MEC – *Multi-access Edge Computing*

MIMO – *Multiple-Input Multiple-Output*

ML – *Machine Learning*

mMTC – *Massive Machine-Type Communications*

mmWave – *millimeter-wave*

MNO – *Mobile Network Operator*

MS – *Micro Service*

MU-MIMO – *Multi-User, Multiple-Input Multiple-Output*

N3IWF – *Non-3GPP Interworking Function*

Namf – *AMF Service-based Interface*

NEF – *Network Exposure Function*

NRF – *NF Repository Function*

NSA – *Non-Standalone*

NSSF – *Network Slice Selection Function*

NWDAF – *Network Data Analytics Function*

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

ORAN – *Open Radio Access Network*

PCF – *Policy Control Function*

PDU – *Protocol Data Unit*

PEI – *Permanent Equipment Identifier*

PLMNs – *Public Land Mobile Networks*

RAN – *Radio Access Network*

RRU – *Remote Radio Unit*

RTT – *Round Trip Time*

SA – *Standalone*

SBA – *Service Based Architecture*

SDN – *Software Defined Networking*

SDNC – *Software Defined Networking Controller*

SIMs – *Subscriber Identity Module*

SLA – *Service Level Agreement*

SMF – *Session Management Function*

SMSF – *Short Message Service Function*

TAC – *Tracking Area Code*
TRX – *Transceivers*
UDM – *Unified Data Management*
UDR – *Unified Data Repository*
UDSF – *Unstructured Data Storage Function*
UE – *User Equipment*
UMTS – *Universal Mobile Telecommunications System*
UPF – *User Plane Function*
URLLC – *Ultra-Reliable Low Latency Communications*
VRAN – *Virtual Radio Access Network*
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Motivação e Enquadramento

Este trabalho aborda os pontos principais envolvidos na escolha e desenvolvimento da minha dissertação, que focar-se-á em analisar o planeamento, implementação e otimização das novas redes privadas 5G numa zona suburbana de Lisboa.

A escolha deste tema deve-se à necessidade de acompanhar a evolução das tecnologias de Rede Móvel visto que recentemente foi atribuído o espectro de rádio para as redes 5G em Portugal, surge a necessidade de fazer o planeamento das mesmas.

No que concerne à teoria, as redes 5G têm bastantes diferenças face à geração anterior 4G. As aplicações e os casos críticos de desempenho das redes 5G têm certa diferenciação no que diz respeito a uma gama mais alargada de parâmetros do que tradicionalmente tem sido utilizado. Estes parâmetros incluem disponibilidade, resiliência, recuperabilidade e segurança. É notório uma alteração nos princípios da alocação de recursos estáticos para dinâmicos por parte das Redes Definidas de Software (SDN) e a Virtualização da Função de Rede (NFV). Isto leva a mudanças profundas tanto nos princípios de conceção como na gestão da rede, que precisam de ter em conta a atribuição de recursos dependentes do tempo ou da carga.

A otimização dos recursos significa a redução dos resíduos e, conseqüentemente, o consumo de energia também é reduzido.

Neste sentido, a arquitetura centralizada (ou nuvem) da rede de acesso rádio (C-RAN) poupa muita energia devido ao agrupamento de equipamentos de banda base inativos.

Isto permite a racionalização energética que resulta da otimização em relação a outros critérios. A procura de recursos (incluindo energia) aumenta exponencialmente com o tamanho da tarefa, o que exige o desenvolvimento e utilização de algoritmos eficientes que devido a auto-semelhança e a *big data* têm a sua eficiência desafiada.

Devido à complexidade das redes 5G, tem de se olhar separadamente para diferentes subsistemas, que por sua vez há a possibilidade de otimizados não apenas a topologia, como a colocação de nós e a atribuição de ligação entre eles, mas também políticas de controlo, incluindo encaminhamento, alocação de recursos, agendamento e recuperação de falhas.

1.2. Objetivos

Tendo em conta o tema abordado, será necessário realizar o planeamento de uma nova rede 5G privada para uma união de freguesias, deste modo por meio desta dissertação esperamos obter respostas às seguintes perguntas:

1. Quais as diferenças da rede 5G face ao 4G?
2. Em que se baseia a arquitetura da rede 5G?
3. Quais os aspetos a considerar no planeamento uma rede privada 5G “suburbana”?
4. Como implementar uma rede privada 5G?
5. Quais os fatores de otimização de uma rede privada 5G nomeadamente os pontos mais críticos?

O principal objetivo deste trabalho é o de realizar o planeamento de uma nova rede 5G privada para a freguesia de Linda-a-Velha.

O trabalho visa confrontar aspetos teóricos de uma rede privada 5G com os resultados experimentais e propor a implementação da mesma no cenário em consideração.

1.3. Método de Investigação

O modelo de análise associado a essa investigação será uma metodologia Design Science Research (DSR) representado abaixo na Figura 1, recorre a várias etapas que são:

1. **Definição do problema e motivação:** neste ponto é definido o motivo associado à necessidade de uma rede privada 5G. “Planear e implementar uma rede privada 5G para uma freguesia com residências inteligentes, necessidade de conectividade confiável e de alta velocidade para actividades pessoais e dispositivos inteligentes”;
2. **Definição dos objetivos:** serão definidas um conjunto de objetivos que servirão de guia de investigação para as questões respondidas nesta dissertação;
3. **Planeamento e desenvolvimento da solução:** realização das simulações referentes ao planeamento de redes privadas 5G para uma zona residencial;
4. **Análise de conceitos:** nesta fase vamos analisar os diferentes resultados por meio de um planeamento local;
5. **Análise crítica:** serão efetuadas as respetivas análises estatísticas;
6. **Comunicação:** nesta etapa serão tiradas as conclusões críticas dos resultados e a divulgação dos resultados com possível escrita de Artigo Científico.

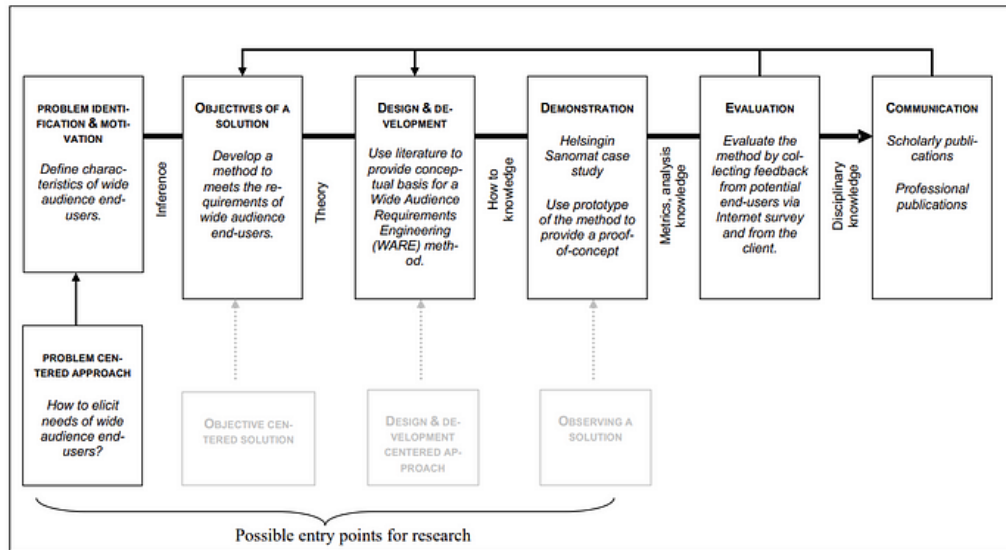


Figura 1 – Diagrama do modelo de investigação DSRP

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos principais, estruturados de forma a proporcionar uma abordagem clara e progressiva sobre o tema “Planeamento de uma Rede Privada 5G em Linda-a-Velha”. Cada capítulo tem um papel concreto na construção do trabalho, desde a contextualização inicial até à análise dos resultados e considerações finais.

No Capítulo 1 é apresentado a motivação e enquadramento geral do tema, objetivos e as questões de investigação. O Capítulo 2 foca-se na revisão da literatura, reúne os principais conceitos para o planeamento de redes privadas 5G abordando os princípios fundamentais da rede 5G, diferenças com a rede 4G e as suas limitações, casos mais relevantes e abordagens existentes. O Capítulo 3 descreve o simulador utilizado no estudo, as suas características, descrição e configuração dos cenários usados. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através das simulações. A discussão incide sobre métricas relevantes como *throughput*, cobertura, latência e eficiência espectral, permitindo uma avaliação crítica dos fatores que influenciam o planeamento da rede. O Capítulo 5 e último, sintetiza os principais contributos do trabalho, destaca as conclusões retiradas e propõem-se linhas de investigação futuras que poderão aprofundar e complementar os resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

Revisão Literária

2.1. Princípios básicos

Uma Rede Privada, é uma rede de comunicação utilizada por uma pessoa, empresa ou organização, que é isolada do acesso público e geralmente apenas um dispositivo ou uma aplicação que tenha passado por um processo de autenticação rigoroso pode aceder e ligar-se à rede privada [2], recorrendo às redes móveis.

Redes móveis são sistemas de comunicação sem fios que permitem a transmissão de dados, voz e outras informações entre dispositivos móveis, como smartphones, tablets, computadores portáteis e torres de células de telecomunicações [3]. Isto permite que os utilizadores comuniquem e acessem a Internet em qualquer lugar onde haja cobertura de sinal.

Elas operam em diferentes padrões de tecnologias, comumente conhecidos por gerações (nomeadamente: 2G, 3G, 4G e o mais recentemente o 5G).

Cada geração envolve uma otimização nas capacidades da rede e velocidade de transmissão de dados.

Para a transmissão de sinais de comunicação entre os dispositivos e as torres são usadas ondas de rádio. Desse modo para garantir a continuidade do sinal quando um dispositivo está em movimento é constantemente transferido para diferentes torres de células dentro da área de cobertura de rede.

O último desenvolvimento das gerações de rádio móvel é a atual tecnologia 5G que impulsiona ainda mais a conectividade e a velocidade de transmissão de dados.

2.2. 5G Quinta Geração

O 5G sendo a quinta geração de rede celular ou tecnologia de comunicação sem fios, começou em 2019 a ter uma larga escala de implementação mundial, sucedendo ao 4G. Com essa nova tecnologia muitos provedores de serviços de telecomunicações estão a atualizar a sua infraestrutura para garantir o funcionamento do 5G [4].

Esta tecnologia representa uma enorme transformação social, porque à medida que a tecnologia cresce a procura por conectividade aumenta, e o 5G possibilita a criação de uma rede ágil e adaptada às diferentes necessidades socioeconómicas.

Setores como o financeiro, transportes, retalho, saúde, novos serviços e empresas são um potencial de colaboração para os provedores do 5G. É uma verdadeira projeção da transformação digital. Permite que máquinas comuniquem sem a ação humana numa Internet das Coisas (IoT) que possibilita uma infinidade

de serviços. Favorece uma rede de transportes mais dinâmica, segura e económica. Tratamentos médicos mais eficientes, havendo uma ligação entre pacientes e médicos de maneira fiável. A nível sensorial uma melhor eficiência, desde o estacionamento inteligente com baixo consumo de energia até às teleconferências holográficas. Uma nova era digital para a sociedade [5].

Ao longo dos últimos 30 anos, as tecnologias 2G, 3G e 4G, demonstraram uma grande capacidade de conectar e transformar as sociedades, daí que o 5G tira uma grande vantagem desse sucesso, fornece uma plataforma de melhoria de serviços existentes e permite novos modelos de negócio.



Figura 2 - Quinta Geração de Redes sem fios (5G)

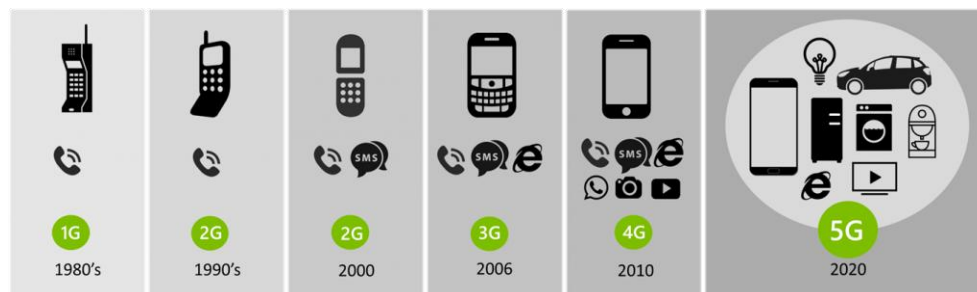


Figura 2.1 - Evolução da Comunicação Móvel 1G a 5G

As redes 5G operam em bandas na gama de sub-6GHz e entre 30 GHz a 100 GHz. Utilizam uma estrutura escalável de multiplexagem por divisão de frequência ortogonal (OFDM), com uma latência mínima de 1 milissegundo, com estimativas de atrasos máximos de 1 a 10 segundos, em aplicações específicas, estimando-se que o 5G seja 60 a 120 vezes mais rápido que a latência média do 4G. Isso deve-se ao uso de uma arquitetura de fatiamento de rede, o que permite que os operadores ofereçam ligações e uma experiência do utilizador melhorada. As antenas de matriz 5G dão informações adicionais de formatação de feixe e combatem os desafios de propagação enfrentados nas gamas de frequência de onda milimétrica, mmWave. O 5G alcança velocidades até 10 Gbps e é configurado para ser 10 vezes mais rápido do que o 4G.

2.2.1. Diferenças entre a rede 5G e o 4G

A tecnologia LTE tem por base o GSM e o UMTS comumente conhecidos como 2G e 3G, tendo sido a comunicação por voz a principal aplicação e posteriormente a adição de dados. Foi concebido para permitir o downlink de 150 Mbps e o uplink de 50 Mbps. A largura de banda de cada utilizador depende do modo como os operadores implementam a sua rede e da largura de banda disponível. Tem uma camada física única pela modulação assimétrica e taxas de dados para *uplink* e *downlink*. O LTE foi concebido para operação full-duplex, com transmissão e receção simultâneas [6].

Na resolução ITU-R 56-2 que envolve a definição dos Sistemas de Telecomunicações Móveis Internacionais-2020 (IMT-2020), estes sistemas incluem novas interfaces de rádio e suportam as novas capacidades de sistemas IMT-2020, tornando-se assim a identificação padronizada do 5G. Entre as suas capacidades abrange-se um sistema mais flexível, fiável e seguro ao fornecer vários serviços que incluem três áreas principais: banda larga móvel melhorada (eMBB), comunicação ultra fiável e de baixa latência (URLLC) e comunicações maciças do tipo máquina (mMTC) [7].

As tecnologias para a IMT-2020 enquadram-se em vários cenários de implementação com suporte a uma série de ambientes, capacidades de serviço e opções tecnológicas.

O 5G utiliza faixas de frequência de espectro de banda baixa, média e alta mediante a aplicação da rede. As frequências mais baixas correm distâncias maiores e penetram melhor nas estruturas, as mais altas têm maior débito e capacidade de dados [8].

- As frequências baixas, com menos de 1GHz proporcionam uma maior cobertura de sinal em zonas urbanas e rurais, no entanto nessas frequências as velocidades de transferência de dados não são tão rápidas como nas frequências de banda alta.
- As frequências médias, variam entre 1 GHz e 6 GHz, o que oferece um bom equilíbrio entre a cobertura e a capacidade, o que permite haver velocidades de transferência de dados mais elevadas do que as frequências baixas e cobrem uma área maior do que as frequências de banda alta.
- As frequências altas, vão de 24 GHz a 100 GHz, atingem velocidades de transferência de dados muito elevadas, baixa latência, elevada capacidade mas com áreas de cobertura limitadas, o que as torna menos eficazes em penetrar edifícios e obstáculos.



Figura 2.2.1 - Bandas de espectro 5G Baixas, médias e altas

São bem notórias as diferenças entre o 4G e o 5G desde a velocidade para downloads e uploads, suporte aplicativo, congestionamento e cobertura de rede [9].

No que concerne à velocidade, o 5G tem uma velocidade média de 10 Gbps, sendo 100 vezes mais rápida que a do 4G e com velocidades médias de download entre 1,4 e 14 vezes mais rápidas do que o 4G e velocidades de upload que podem ser até 30% mais rápidas do que o 4G.

No entanto o 5G quando utiliza o 4G que é o designado por 5G non-standalone (NSA) tem limitação de velocidade. Ao operar sozinho passa a ser designado 5G standalone (SA).

O 5G apresenta uma latência inferior ao 4G sendo capaz de atingir taxas de latência inferiores a 10 milissegundos o que apresenta uma latência 60 a 120 vezes inferior a latência média do 4G.

Devido à velocidade alta e à baixa latência o 5G tem maior capacidade de suportar aplicações em real-time o que inclui a realidade virtual, veículos autônomos e dispositivos ligados à IoT.

Observa-se uma redução de congestionamento nas redes móveis devido à velocidade e à baixa latência. Essa melhoria é refletida em melhorias tecnológicas em toda a rede o que abrange (transporte IP/ótico, edge, core, automação), assim sendo um rádio 5G pode suportar mais dispositivos do que um rádio 4G.

Utiliza menos infraestruturas físicas do que outras redes móveis, com uma cobertura rapidamente levada a qualquer local através de um router 5G.

2.3. Arquitetura da rede 5G

A arquitetura de rede 5G envolve a estrutura geral e organização de uma rede celular de quinta geração (5G), por meio da qual é possível definir como diferentes componentes e entidades de rede estão relacionados, para garantir o envio de dados a alta velocidade, baixa latência e uma enorme diversidade de serviços [10].

Está concebida para suportar uma banda larga móvel melhorada, comunicações massivas do tipo máquina e comunicações ultra-fiáveis de baixa latência entre outros serviços.

Vamos abordar alguns dos principais elementos da arquitetura de rede 5G, que são: Equipamento do Utilizador (UE), Rede de acesso via radio (RAN) e Rede principal (CN).

Equipamento do Utilizador (UE): Representa todos os dispositivos utilizados para se ligar à rede 5G o que inclui: smartphones, computadores portáteis, tablets, dispositivos IoT e os demais dispositivos sem fios que na sua comunicação utilizam o 5G.

2.3.1. Rede de acesso via radio (RAN)

Permite a ligação de vários dispositivos a uma rede através de uma ligação de rádio. No caso do 5G é a mais recente arquitetura de comunicações sem fios e utiliza frequências de rádio 5G na sua conectividade. Neste processo a voz e dados são convertidos em sinais digitais e transmitidos como ondas de rádio para os transdutores (aparelho que combina um emissor e um recetor) RAN que fazem o encaminhamento para a rede principal, daí os dados podem ser enviados para a internet [11],[12].

2.3.1.1. Tecnologias da rede RAN 5G

2.3.1.1.1. Massive MIMO

O MIMO Massivo é neste momento a tecnologia de camada física sub-6GHz mais atrativa para o acesso sem fios. Utiliza grandes conjuntos de antenas nas estações de base para servir simultaneamente muitos terminais autónomos. Essa propagação é feita por um processamento inteligente no conjunto de terminais para obter uma capacidade superior [39].

Principais benefícios do Massive MIMO:

Elevada eficiência espectral

- Utiliza a formação de feixes altamente diretivo para servir vários utilizadores simultaneamente nos mesmos recursos de tempo e frequência.
- Redução significativa da interferência entre utilizadores através da separação espacial dos sinais[40].

Eficiência energética superior

- Redução da potência de transmissão por utilizador devido ao ganho conjunto de antenas.

- Operação eficiente com processamento linear e conversores de baixa precisão, diminuindo o consumo energético global [39].

Melhoria da cobertura e da qualidade de serviço (QoS)

- Capacidade de direcionar energia de forma precisa para utilizadores localizados em zonas de fraca cobertura.
- Aumento da fiabilidade da ligação e da experiência do utilizador, especialmente em ambientes densos [41].

Escalabilidade da rede

- Suporta simultaneamente um elevado número de terminais autónomos, o que torna o sistema adequado para cenários de alta densidade de utilizadores [41].

Ao passo que os dispositivos de rádio tradicionais têm frequentemente apenas dois, quatro ou, no máximo, 8 canais TRX, os dispositivos de rádio alimentados pela tecnologia MIMO Massivo podem ter centenas de canais TRX, com até 256 ou mais elementos de antena, o que pode levar a um ganho de capacidade consideravelmente superior ao do equipamento tradicional. Em contraste com os dispositivos tradicionais que apresentam maioritariamente uma cobertura na dimensão horizontal, o MIMO Massivo proporciona uma flexibilidade muito maior também na dimensão vertical.

Explora em grande medida os recursos na dimensão espacial e permite aos utilizadores sob a mesma estação de base, utilizar os mesmos recursos de tempo e frequência, o que aumenta bastante a capacidade da rede sem estações de base mais densas e uma maior largura de frequência.

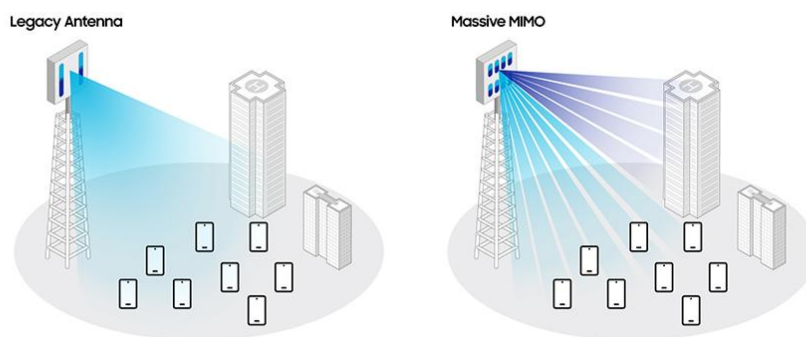


Figura.2.3.1 - Antenas antigas VS MIMO Massivo 5G

2.3.1.1.2. Formação de feixes (Beamforming)

A formação ou formatação de feixes, recorre a diversas antenas para controlar a direção de uma frente de onda, ao ponderar adequadamente a magnitude e a fase dos sinais de antena individuais numa matriz de diversas antenas. Neste sentido o mesmo sinal é transmitido a partir de diversas antenas com espaçamento entre elas de pelo menos meio comprimento de onda, e num determinado ponto o recetor receberá várias cópias do mesmo sinal o que permite haver melhor cobertura em áreas específicas ao longo dos limites das células [41].

O Beamforming pode ser agrupado em três grupos:

Formação de feixes Analógico:

- Utiliza uma única cadeia de RF comum a todos os elementos do conjunto de antenas.
- O Sinal RF é distribuído pelos vários elementos de antena através de divisores de potência, sendo o feixe ajustado por deslocadores de fase analógicos.
- Permite a formatação de apenas um feixe por conjunto de antenas.
- Tem impacto no padrão de radiação e no ganho do conjunto de antenas, o que melhora a cobertura [41,42].

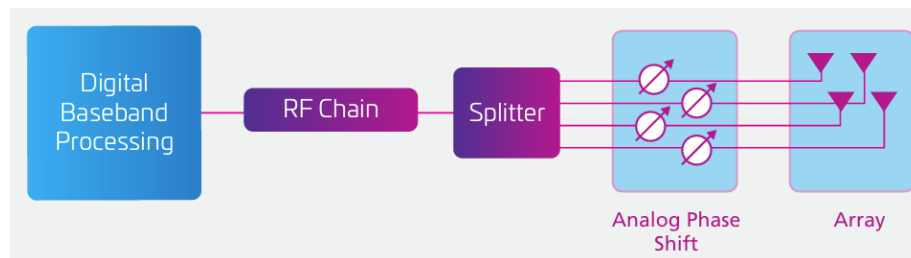


Figura 2.3.2 - Formação de feixes analógico

Formação de feixes Digital:

- Cada antena tem um sinal e um caminho de RF dedicados.
- As fases e amplitudes são controladas digitalmente pelo processamento de banda base, o que permite elevada precisão.
- Permite a formatação simultânea de múltiplos feixes a partir do mesmo conjunto de antenas.
- Requer várias cadeias TRX, uma por cada utilizador servido simultâneo na estação base, usado no LTE Advanced Pro e no 5G NR.
- Apresenta elevado consumo energético e maior sobrecarga de sinalização, devido à complexidade do processamento.

- Melhora capacidade da célula uma vez que os mesmos recursos de frequência/tempo podem ser utilizados para transmitir dados simultaneamente para vários utilizadores [41,42].

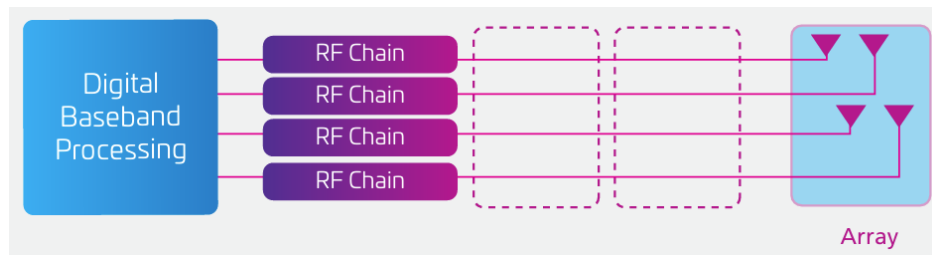


Figura 2.3.3 - Formação de feixes Digital

Formação de feixes Híbrido:

- Combina processamento digital em banda base com controlo analógico em RF.
- Utiliza um número reduzido de cadeias RF, associadas a divisores de potência e deslocadores de fase analógicos.
- Permite a formação de feixes com menor complexidade de hardware, sendo particularmente relevante em sistemas com grandes conjuntos de antenas [41,42].

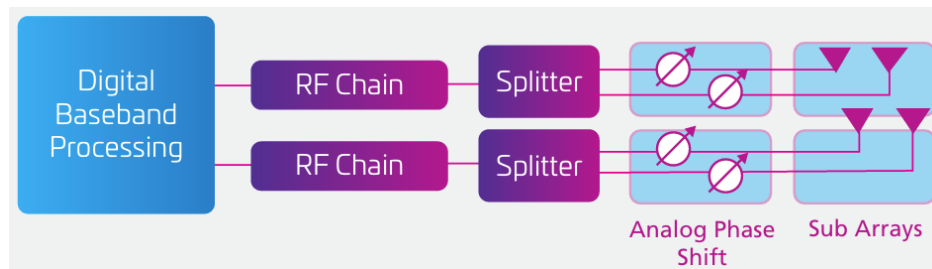


Figura 2.3.4 - Formação de feixes Híbrido

2.3.1.1.3. Fatiamento de rede (Network Slicing)

O fatiamento da rede 5G é uma rede autónoma com os seus próprios recursos virtuais, topologia, fluxo de tráfego e regras de provisionamento que permite a conectividade e o processamento de dados adaptados às necessidades específicas dos utilizadores. As fatias são logicamente isoladas, mas os recursos podem ser partilhados entre elas. Suporta diversos serviços com requisitos de desempenho específicos na mesma infraestrutura do operador móvel [46]. Podem fornecer redes lógicas personalizadas para diferentes serviços ou sectores de forma ágil e adaptável. As principais tecnologias de segmentação da rede de base são a SDN e NFV, onde a SDN é usada para separar o plano de controlo e o plano de dados da rede principal, para que esses planos possam ser implementados de forma independente. O plano de controlo pode ser centralizado para facilitar a gestão e o plano de dados pode ser distribuído. Neste sentido o plano de dados é repartido numa fatia de rede para serviços de baixa latência pode ser distribuído na extremidade da rede em combinação com a tecnologia MEC. E a NFV proporciona as funções de rede virtual necessárias para o

plano de dados das frações de rede principal de acordo com o tipo de serviço. Uma fatia pode ser otimizada para serviços de baixa latência e alta fiabilidade podendo ser usada nos carros autónomos ou aplicações industriais, outra fatia para grandes volumes de dados, streaming de vídeo com alta resolução e outra fatia para IoT, que envolve uma necessidade de conectividade mais simples (ver Figura 8).

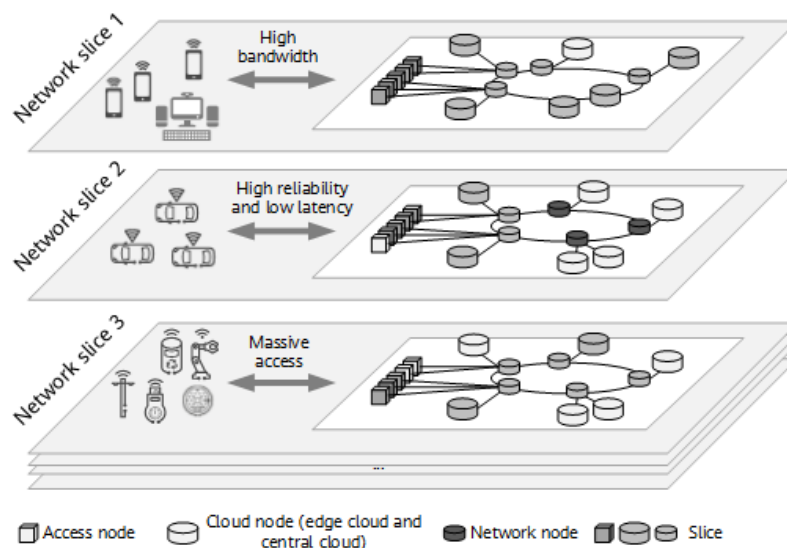


Figura 2.3.5 - Fatiamento de rede 5G

No contexto da RAN 5G encontramos as antenas, que desempenham um papel fundamental para concretizar os requisitos de desempenho impostos pelos novos serviços e casos de uso do 5G. Servem como elemento físico responsável pela transmissão e receção dos sinais de rádio entre os UE e as estações de base (gNB), sendo determinantes para a cobertura, capacidade, eficiência espectral e qualidade de serviço da rede.

A evolução da RAN 5G introduz arquiteturas de antenas mais avançadas, integradas com tecnologias como Massive MIMO, Beamforming. Estas antenas permitem uma utilização mais eficiente do espectro radioelétrico, suportam comunicações direcionais e adaptativas e viabilizam a coexistência de múltiplos utilizadores e serviços com requisitos heterogêneos na mesma infraestrutura de acesso rádio.

Vamos abordar dois tipos de antenas as Macro e as Small Cells:

Macro Cells – Cobrem grandes áreas e são instaladas em torres ou no alto dos prédios, têm ampla cobertura e dá para conectar um grande número de dispositivos simultaneamente [43].

Small Cells – São pequenas estações de base, que cobrem pequenas áreas geográficas ou espaços interiores e exteriores de pequena proximidade. Podem lidar com altas taxas de dados em banda larga móvel e de consumidores, bem como altas concentrações de dispositivos de baixa velocidade com baixo consumo de energia para o IoT. Isso dá a tecnologia 5G a capacidade das suas células atingirem velocidades ultraelevadas, um milhão de dispositivos por metro quadrado e latência na ordem dos milissegundos [43].

Existem 3 tipos de Small Cells [44]:

- **Femtocell** – São as menores Small Cells, abrange a área de cobertura mais pequena que varia entre 10 a 50 metros, sendo ideal para casas e pequenas empresas. Essas células em miniatura com potência de emissão 100mW dependem de redes de fibra ou de rede de backhaul com fios. Suportam um número limitado de utilizadores entre 6 a 18.
- **Picocell** – Têm uma cobertura maior, mais capacidade e potência de transmissão do que as Femtocells. Também usam fibra ou rede de backhaul com fios para a transmissão de dados. Podem usar 250mW em áreas interiores e exteriores de apartamentos, escolas, hotéis e edifícios de escritórios, com uma cobertura que varia entre 100 a 250 metros. Para um melhor aproveitamento é ideal para 32-64 utilizadores simultâneos.
- **Microcell** – Abrangem a maior área de cobertura das Small Cells, normalmente cerca de 500-2500 metros. Usam de 2-5W e para o 5G funcionam com a rede de backhaul com fios, fibra ou micro-ondas para a transmissão de dados. É especialmente usada em ambientes urbanos para satisfazer a elevada procura de dados móveis [43]. Permite 200 utilizadores simultâneos.

No 5G as Small Cells apresentam as seguintes características [44]:

- **Equipamento de rádio e transmissão de sinais:** Responsável pela emissão e receção de dados, assegurando uma comunicação sem fios eficiente, fiável e com elevada qualidade de serviço (QoS).
- **Agregação lógica de múltiplas Small Cells:** Permite a integração de várias células de pequena dimensão numa única entidade lógica de rede, aumentando significativamente a capacidade total e a cobertura radioelétrica.
- **Suporte a velocidades de transmissão elevadas:** Projetado para sustentar débitos de dados muito elevados, possibilitando downloads, uploads e fluxos de dados mais rápidos e consistentes.
- **Latência ultrabaixa:** Essencial para o funcionamento estável das redes 5G, viabilizando aplicações sensíveis ao atraso, como comunicações em tempo real, IoT crítico e serviços industriais.
- **Otimização do desempenho da rede de acesso rádio (RAN):** Contribui para uma utilização mais eficiente dos recursos radioelétricos, melhorando a experiência do utilizador e a escalabilidade da rede.

Para a arquitetura de rede, permitem a implementação de muitas estações rádio-base de baixa potência em áreas concentradas.

As redes 5G usam bandas de frequência mmWave, que são conhecidas pelas suas elevadas taxas de dados e alcance limitado, no entanto as Small Cells 5G aumentam a intensidade do sinal para os utilizadores, ultrapassam as limitações causadas pelo curto alcance e pelos obstáculos. Resolvem também o problema do sinal fraco em ambientes interiores, com uma cobertura e capacidade aprimoradas.

As Small Cells são muito simples de se instalar o que permite dar uma melhor cobertura de rede em casas inteligentes, escritórios, estações de comboios, estádios e indústrias.

As **RAN** distinguem-se em vários tipos de redes e algumas delas são: **CRAN**, **VRAN** e **ORAN**.

CRAN: RAN Centralizada – É também designada como Cloud-RAN, por utilizar a computação em nuvem como espinha dorsal da sua rede e o processamento de dados para sinais celulares. Rege-se pela norma CPRI [65] que com segurança permite uma transmissão a longas distâncias a partir de uma torre centralizada. O seu principal objetivo é o de aumentar a cobertura, a capacidade e a fiabilidade da rede. Os seus três principais componentes são: RRUs, rede de transportes e um conjunto centralizado de BBU.

O RRU tal como as torres RAN normais, liga os dispositivos sem fios à internet, o BBU centralizado funciona como uma nuvem, ou seja fornece às RRUs os recursos necessários baseado nos requisitos de rede, como uma nuvem faz para os dispositivos ligados a ela. As redes de transportes suportam ligações que incluem fibra ótica, comunicações celulares e frequências de rádio de ondas milimétricas (mmWave). Entre o BBU e os RRU's observa-se a camada de comunicação de largura de banda mais elevada.

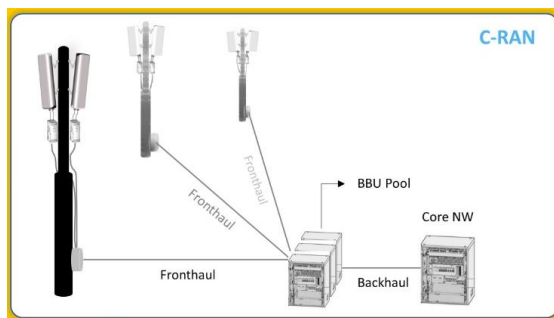


Figura 2.3.6 - CRAN – Rede de acesso de rádio Centralizada

VRAN: RAN Virtualizada – As VRANs espelham a virtualização observada nas CRANs para acomodar o 5G. Permite maior interoperabilidade e comunicação entre dispositivos e redes de vários fornecedores, remove restrições de hardware entre as RANs. Aquando da transmissão dos sinais, as VRANs beneficiam toda a rede, visto que todos os fornecedores podem interagir e alterar os recursos celulares para otimizar a experiência do utilizador. Uma VRAN é uma ótima solução para implementação e administração

de RAN que garante às operadoras maior eficiência operacional e flexibilidade para responder à demanda dos clientes corporativos 5G.

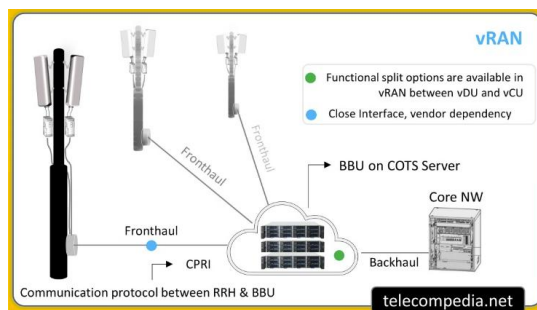


Figura 2.3.7 - vRAN – Rede de acesso de rádio Virtualizada

ORAN: RAN Aberta – Tem por objetivo melhorar as RAN através da desagregação das partes da RAN e da implementação em software utilizando tecnologias de código fonte aberto e normas abertas. Normalmente o hardware das RAN é único de cada fornecedor, o que leva ao aumento de custo de uma RAN e limita a sua capacidade de adaptar a rede às necessidades específicas. Com o intuito de minimizar os custos e aumentar a flexibilidade, a ORAN sugere a utilização de partes definidas por software distribuídas em servidores comuns. Daí que redes privadas em grande escala para dispositivos IoT, carros sem condutor e cidades inteligentes são agora uma realidade graças ao 5G que gere o ecossistema das telecomunicações, por ligar praticamente tudo, com o acesso de dados em tempo real a taxas elevadas com latência quase nula.

A ORAN é compatível com todas as gerações das tecnologias móveis, o que inclui o 2G, 3G, 4G, 5G e futuras gerações.

No entanto para a redução de custos de desenvolvimento e manutenção de rede, os operadores de redes móveis têm adotado o conceito de ORAN para reconstruir o seu ambiente de rede. Comparado com as redes de acesso via rádio típicas, a ORAN garante mais flexibilidade. Referente ao hardware é independente do fornecedor e as tecnologias SDN são utilizadas para implementar o ORAN, que é baseado em interfaces abertas, protocolos e normas padrão.

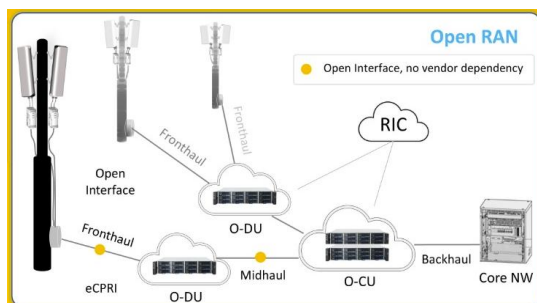


Figura 2.3.8 - ORAN – Rede de acesso de rádio aberta

2.4. 5G NSA

O 5G NSA e SA diferem na sua estrutura, uma vez que o seu núcleo de rede pode ser dedicado ou compartilhado com o 4G [31].

O 5G NSA é a versão mais utilizada da quinta geração móvel, no entanto utiliza infraestrutura compartilhada de núcleo de rede com a tecnologia 4G LTE. Apesar disso, exige antenas próprias e equipamentos de transmissão dedicados para a mesma e não funciona com as antenas 4G/LTE.

2.5. 5G SA

O 5G SA por sua vez é a versão mais avançada das gerações de rede móvel e utiliza um núcleo de rede próprio dedicado para a gestão das conexões. Permite menor latência e possibilita a criação de várias sub-redes através da técnica de fatiamento (*slicing*). O 5G SA é visto com “5G puro”, por utilizar frequências dedicadas e não depende da tecnologia DSS (*Dynamic Spectrum Sharing*), que compartilha o espectro com 4G, 3G e 2G.

Diferenças entre 5G NSA e SA

Ambos apresentam diferenças em velocidade, latência, confiabilidade, consumo de energia, infraestrutura, implementação, compatibilidade e planos que são detalhados na Tabela 2.4.

Tecnologia	5G SA	5G NSA
Versão	Mais moderna	Mais antiga
Velocidade	Até 20 Gb/s	Até 20 Gb/s
		Permite agregar velocidades do 4G
Latência	Menor	Maior
Confiabilidade da rede	Maior	Menor
Consumo de energia	Menor	Maior
Infraestrutura	Utiliza núcleo de rede dedicado	Utiliza núcleo da rede 4G
Implementação	Mais lenta e com maior custo	Mais rápida e com menor custo
Compatibilidade de aparelhos	Menor	Maior

Tabela 2.4 - Diferenças entre 5G NSA e SA

2.6. Rede Privada 5G

Uma rede privada consiste numa rede celular logicamente discreta (*ou seja a rede é isolada ou separada de outras redes*), apresenta elementos de rede dedicados, que inclui operações, infraestrutura e/ou espectro, customizados para dar uma resposta as necessidades de um utilizador ou grupo de utilizadores [32].

A mesma apresenta as seguintes particularidades:

- **Recursos dedicados:** O que inclui a infraestrutura de rede, a plataforma e/ou o espectro. Os recursos não são apenas fisicamente dedicados, podem ser logicamente dedicados, o que acontece no fracionamento da rede.
- **Grupos de utilizadores/SIMs dedicados:** O acesso é controlado e está restringido a determinados grupos de utilizadores. Os utilizadores usam SIMs logicamente dedicados, que em alguns casos, podem ser virtuais.
- **KPI's personalizados:** A rede privada é concebida e personalizada para corresponder requisitos de casos de utilização que não podem ser correspondidos por redes públicas.

Proporcionam um modo de conectividade sem fio, com recursos únicos que as tecnologias alternativas, como, Wi-Fi, Bluetooth e Ethernet, não conseguem garantir.

Esse tipo de iniciativas de implementação de redes privadas é muito usado pelas empresas para garantir a transformação digital que é um dos requisitos fundamentais para o sucesso e implantação de redes de dados seguras que possam ser fiáveis com tarefas críticas para o negócio, especialmente para aplicações IoT industriais [33].

Recorrem a redes privadas porque frequentemente as redes Wi-Fi estão congestionadas e propensas a interferências, não tendo a fiabilidade, a segurança e o desempenho necessários para as novas aplicações IoT.

Mas o fator principal é o interesse das empresas possuírem as suas próprias redes e terem um controlo local e seguro dos seus dados.

Os principais pilares de uma rede privada 5G consistem numa maior capacidade e conectividade o que permite o acesso à internet disponível em todo o lado, maior mobilidade dos utilizadores o que garante ligação presente nos comboios de alta velocidade e nos hotspots móveis, comunicações com latência ultrabaixa, o que tornará uma realidade as máquinas autónomas o que levará ao aumento da produtividade e das receitas graças à automatização das fábricas, comunicação massiva, com recurso a sensores que permitem o intercâmbio de dados entre objetos o que possibilita haver otimização de processos [34].

No entanto apesar de haver redes públicas, algumas empresas e utilizadores têm recorrido a redes privadas. As suas principais diferenças estão no acesso restrito e isolamento.

As redes públicas por norma são disponibilizadas por provedores de serviços que oferecem os mesmos direitos de acesso a todos os utilizadores [36], o que pode por em causa a segurança dos utilizadores e quando a rede está ocupada isso pode ter um impacto igual em todos os utilizadores. Em contrapartida a rede 5G privada pode ser reconfigurada para conceder níveis diferentes de acesso quando determinadas

atividades forem consideradas mais críticas para o negócio do que outras ou em situações de maior tráfego [35].

Em suma a rede 5G privada permite ao cliente ter mais segurança e controlo [34].

2.6.1. Tipos de redes privadas 5G

As quatro principais redes 5G privadas são:

- Redes privadas autónomas;
- Redes privadas autónomas com MNO que fornece RAN partilhada;
- Redes privadas integradas em redes públicas que utilizam RAN e partilha de controlo;
- Redes privadas integradas na rede pública que utilizam a divisão da rede de ponto a ponto.

Dentre as várias redes privadas 5G do ponto de vista da entidade que pretenda implementá-la, a rede privada autónoma é a que garante maior flexibilidade na sua configuração e gestão da rede no entanto requer maiores competências técnicas de manutenção e tem custos de instalação mais elevados.

Redes privadas autónomas ou 5G SA, envolvem uma infraestrutura celular construída para serviços 5G por meio da implementação de normas e protocolos 5G na rede de rádio e no núcleo do controlador da rede. O 5G SA usa uma RAN e núcleo compatíveis com 5G que é uma combinação de infraestruturas tradicionais de núcleo e de extremidade. Os diversos dispositivos 5G utilizam rádio em gamas de frequência especificadas nas normas 5G para estabelecer ligações a pontos de acesso 5G (APs) por meio de novas gerações de antenas que possibilitam melhorias no alcance do sinal, rendimento e densidade dos dispositivos. As normas do 5G baseiam-se em princípios como a virtualização e uma arquitetura de micro serviços que inclui contentores e uma plataforma de orquestração de contentores [47] (ver Figura 2.6.1.1).

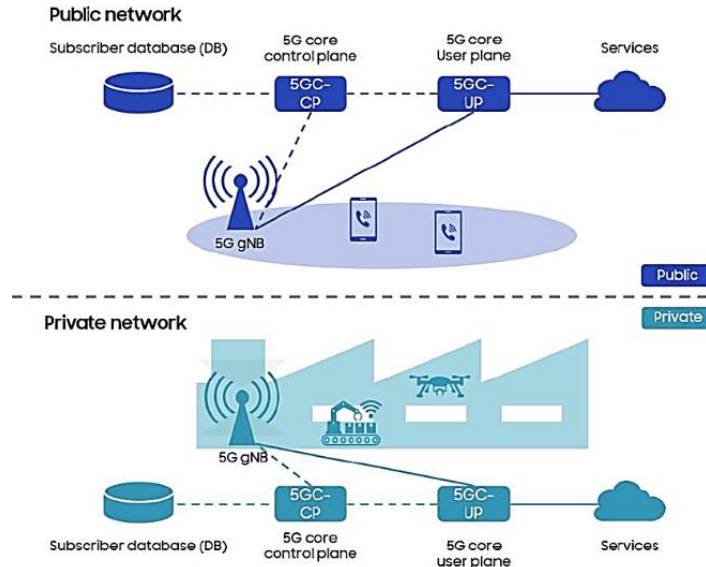


Figura 2.6.1.1 - Redes Privadas autônomas

Redes privadas autônomas com MNO que fornece RAN partilhada, onde a rede privada e a rede pública partilham partes da RAN. Neste caso o tráfego de dados da rede privada é encaminhado para o plano de utilizador do núcleo 5G privado na empresa, enquanto o tráfego de dados da rede pública é encaminhado para o plano de utilização do núcleo 5G na rede pública do operador móvel. O plano de controlo do núcleo 5G privado está implantado na empresa, para que as informações dos assinantes e de funcionamento da rede privada não sejam divulgadas para o exterior. A segurança e a privacidade da rede privada podem continuar a ser garantidas, apesar de partes da RAN não estarem totalmente separadas. Uma vez que todas as funções de rede estão localizadas nas instalações da empresa isso proporciona comunicações de latência ultrabaixa [48] (ver Figura 2.6.1.2).

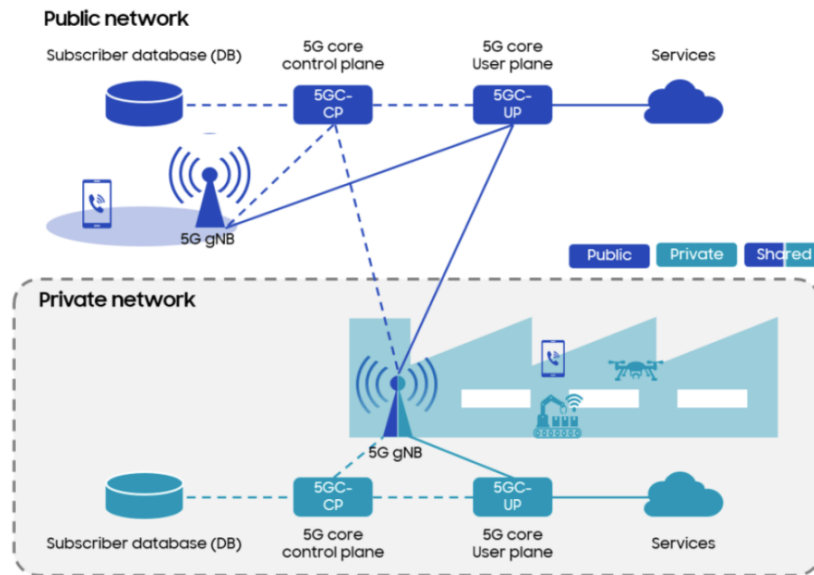


Figura 2.6.1.2 - Redes privadas autônomas com MNO que fornece RAN partilhada

Nas redes privadas integradas em redes públicas que utilizam RAN e partilha de controlo, a rede privada e a rede pública partilham a mesma RAN, ao passo que o controlo de rede é garantido pela rede pública. As funções do plano de controlo para os assinantes de uma rede privada, como a autenticação ou a mobilidade, são executadas no domínio de controlo da rede do operador móvel, juntamente com o controlo dos assinantes da rede pública. Isto permite que os dispositivos da rede privada acedam diretamente aos serviços da rede pública e proporciona a continuidade do serviço por meio dos itinerários quando os dispositivos da rede privada se deslocam entre a rede privada e a rede pública. Ainda assim esse interfuncionamento e a sua gestão levantam preocupações de segurança, dado que as informações operacionais e as informações de subscrição dos dispositivos da rede privada são armazenadas no servidor de um operador móvel, em vez de serem armazenadas num servidor local. No entanto o tráfego da dados entre as redes pode ser separado através do fracionamento da rede. Essa divisão entre as redes é feita por meio de diferentes identificadores de fatias de rede. Ou seja o tráfego da rede privada é entregue ao plano de utilizador do núcleo 5G na empresa com o seu identificador, enquanto o tráfego de dados na rede pública é entregue ao plano de utilizador do núcleo 5G na rede pública do operador móvel (ver Figura 2.6.1.3).

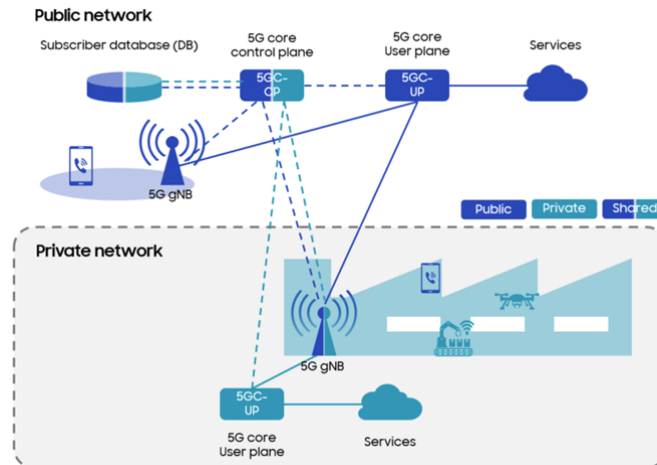


Figura 2.6.1.3 - Redes privadas integradas em redes públicas que utilizam RAN e partilha de controlo

Redes privadas integradas na rede pública que utilizam a divisão da rede de ponto a ponto, apenas o gNB é implementado no terreno da empresa e todas as outras funções de rede são partilhadas com a rede pública. Todo o tráfego de dados das redes privada e pública circula ao longo da rede pública no exterior da empresa, mas o tráfego de cada rede pode ser logicamente independente um do outro, devido à separação que utiliza a segmentação da rede de ponto a ponto. O fornecedor de serviços tem o controlo total da segurança e da privacidade, visto que a implementação está completamente dependente da rede pública e a falha da rede pública provoca automaticamente a falha da rede privada. Isso condiciona também serviços de baixa latência, como o URLLC. Tendo em conta que o MEC [49] (é uma tecnologia das redes 5G que aproxima as capacidades de computação em nuvem da borda da rede, reduz a latência e melhora o desempenho) está limitado à rede do operador móvel, o RTT da rede pode aumentar muito dependendo da distância entre a empresa e a nuvem do operador onde o MEC está localizado. Este tipo de rede está alojada na rede do operador, o que torna a solução uma despesa operacional para a empresa, em comparação com outras redes em que as funções de rede têm de ser construídas dentro da empresa (ver Figura 2.6.1.4).

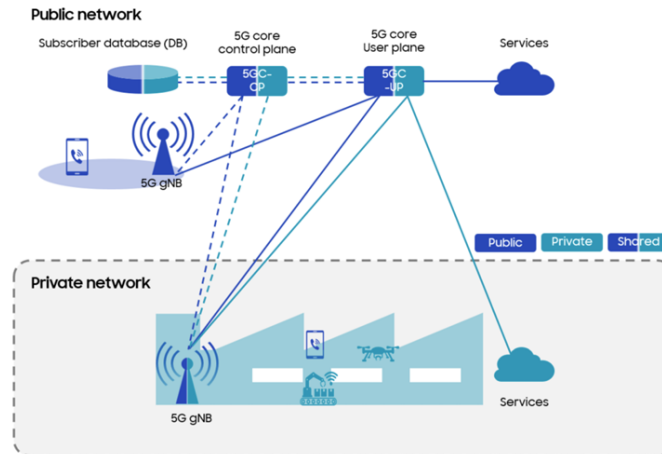


Figura 2.6.1.4 - Redes privadas integradas na rede pública que utilizam a divisão da rede de ponto a ponto

2.6.2. Benefícios da rede privada 5G

As principais componentes de rede móvel são a rede principal e a rede de acesso via rádio, na qual a rede principal atua como infraestrutura física onde a maior parte dos dados de rede são armazenados, encaminhados e processados a partir de uma localização centralizada, já a RAN envolve as torres de telemóveis entre outros sistemas que ligam o utilizador final e outros dispositivos à rede principal [37].

As redes privadas 5G têm um papel significativo em vários domínios por responderem aos requisitos de comunicações em operações em tempo real. No entanto as empresas procuram respostas às suas necessidades no que diz respeito às comunicações, principalmente em necessidades como o aumento das capacidades de cobertura e controlo, o aumento do desempenho, a fiabilidade e a flexibilidade das suas redes de comunicação [38].

Com o uso de redes privadas as entidades conseguem atingir objetivos cruciais tais como:

- Minimizar o tempo de inatividade da produção na qual tiram proveito de redes altamente escaláveis e fiáveis bem como acordos de nível de serviço (SLA) de disponibilidade;
- Maior flexibilidade em maximização da produtividade/qualidade com o benefício da conectividade sem fios de elevada largura de banda garantida em todos os ambientes empresariais;
- Infraestrutura de rede com latência ultra baixa e capacidades de processamento de ponta;
- Proteção contra riscos à segurança e à privacidade das redes, garantida por tecnologias de comunicações móveis sem fios de nova geração, com recursos de segurança elevada.

A tecnologia 5G permite, por exemplo, através do fracionamento da rede, que um operador dedique recursos de uma rede pública 5G a uma determinada empresa para criar uma rede privada “virtual” ou, por exemplo, subarrendar uma parte do seu espetro a um terceiro para que este possa implantar e gerir a sua própria rede privada isolada.

CAPÍTULO 3

Simulador de Sistema

3.1. Descrição do Simulador de Sistema

Na realização do planeamento celular de uma rede privada 5G para Linda A Velha e avaliação do comportamento do sistema, foi usado um simulador em JAVA, onde ajustou-se o simulador com novas funcionalidades do 5G NR e o cenário de estudo em Linda a Velha.

Para a realização de simulações levou-se em consideração diferentes bandas de frequência 5G, 3.6 GHz e 900 MHz. A frequência portadora de 3.6 GHz, é designada como numerologia 1. Nessa configuração, a largura de banda foi fixada em 100 MHz, o espaçamento entre as sub-portadoras é de 30 KHz e OFDM com 28 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1 ms. A outra frequência portadora considerada é de 0.9 GHz, designada como numerologia 0. Nessa configuração, a largura de banda é de 50 MHz, o espaçamento entre as sub-portadoras é de 15 KHz e OFDM com 14 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1 ms.

Parâmetros	Numerologia 1	Numerologia 0
Frequência de Portadora [GHz]	3.6	0.9
Largura de banda [MHz]	100	50
Espaçamento entre sub-portadoras [KHz]	30	15
TTI [ms]	1	1

Tabela 3.1 - Parâmetros gerais de simulação 5GNR

É um simulador em 3D que visa aproveitar os resultados da simulação ao nível da ligação e fazer a sua integração ao nível do sistema de forma direta. O ideal seria uma única abordagem, mas a complexidade de tal simulador seria muito exigente em termos de recursos de processamento e tempos de simulação. Devido ao facto de o simulador estar dividido em duas partes, foi necessário definir um método para ligar essas duas partes. A informação obtida ao nível da ligação é inserida no simulador ao nível do sistema através de uma interface com dados que descrevem a performance em termos de uma taxa de erro de bloco desejada (BLER/BER) que corresponde a uma dada relação sinal-ruído (SNR) estimada no UE ou estação de base. O simulador de nível de ligação permite determinar os valores da relação sinal-ruído (SNR) que uma conexão entre uma BS e um determinado UE alcança uma taxa de erro de bloco desejada (BLER) para um bloco de bits transmitido. Com base nos resultados da simulação do nível de conexão, é realizada a parametrização do nível do sistema. O simulador do sistema, por sua vez, avalia o comportamento da rede 5G NR, analisando como os terminais móveis interagem com as estações base em diferentes situações de transmissão e receção.

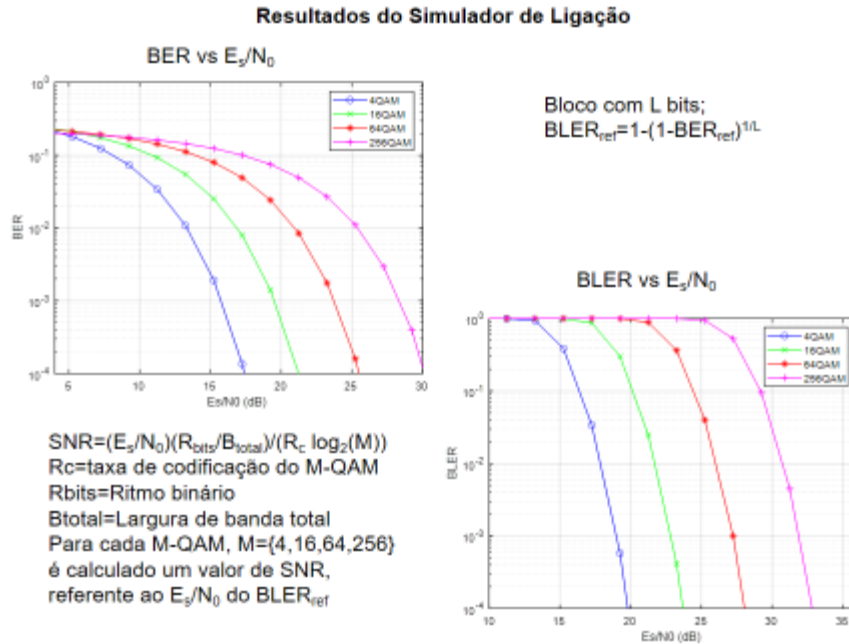


Figura 3.1 - Exemplo de Resultados do Simulador de Ligação

Com base nas curvas de BLER vs E_s/N_0 obtidas do simulador de ligação na Figura 3.1 o simulador de sistema calcula a relação sinal ruído SNR para cada modulação M-QAM, $M = \{4, 16, 64, 256\}$ e são estes valores de SNR que indicam quais são os pacotes transmitidos que são corretamente recebidos pelos utilizadores UE. Os utilizadores próximos da BS com os valores de SNR mais elevados conseguem decodificar pacotes de grande dimensão com modulação 256QAM. Por outro lado, os utilizadores mais afastados da BS com valores de SNR mais baixos apenas conseguem decodificar pacotes de pequena dimensão com modulação 4QAM.

Podemos ver a estrutura de ligação e interação entre o Simulador de Sistema e o Simulador de Ligação na Figura 3.2.

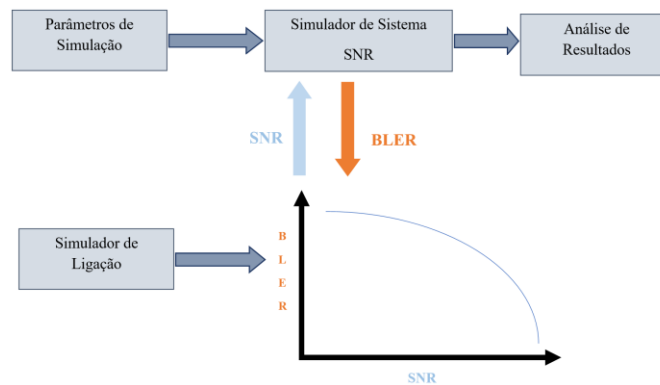


Figura 3.2 - Interação entre o Simulador de Sistema e o Simulador de Ligação

O processo de simulação consiste em três fases distintas, nomeadamente: Configuração, Simulação e Análise do desempenho do sistema, podemos vê-lo representado na Figura 3.3.

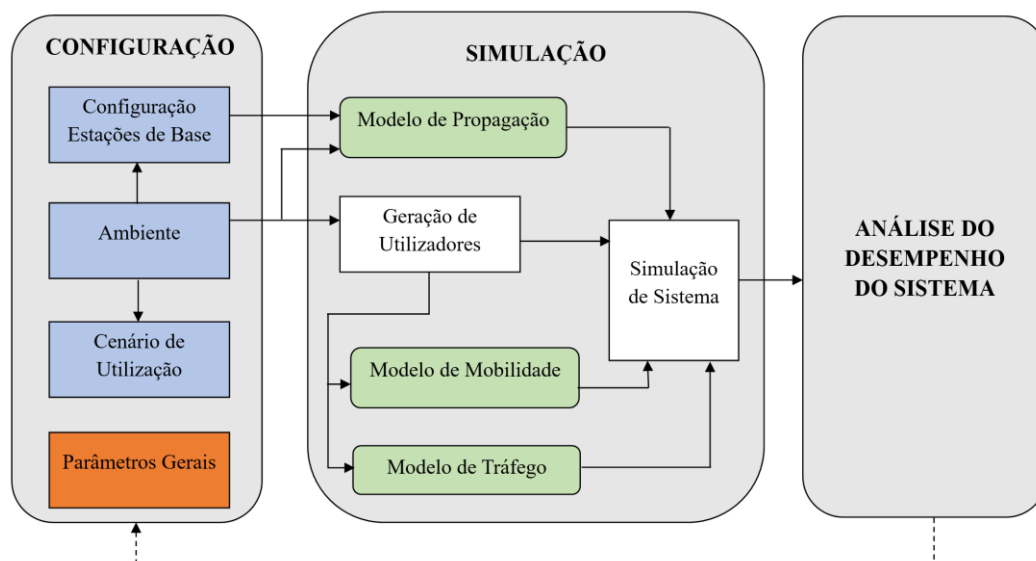


Figura 3.3 - Processo de Simulação

Na fase de configuração é definido o dimensionamento e caracterização do sistema que consiste na determinação da localização das estações de base, definição dos modelos de propagação e mobilidade, cenário de simulação, parâmetros gerais. A fase de simulação é considerada o núcleo da ferramenta de simulação, é nesta fase que são simulados os modelos de simulação que incluem a propagação a mobilidade e outros algoritmos específicos para gestão dos recursos rádio. A fase final de análise do desempenho do sistema permite obter resultados de *throughput*, cobertura, carga nas células, níveis de interferência, QoS dos serviços, performance dos algoritmos de gestão dos recursos rádio, ganhos no sistema.

O Simulador ao nível do sistema tem por objetivo avaliar o comportamento da rede de acesso rádio (5G NR) desse modo pode ser reduzido para um simulador de sub-sistema, onde apenas os nós que compoñham o Radio Network Subsystem são considerados. O Radio Network Subsystem engloba terminais móveis (UE), estações de base (gNB no 5G NR) e ligação à 5G Core Network.

O simulador de sistema é composto por várias classes java. O “simulador_UMTS.java” define e corre as principais funções do Simulador de Sistema, gera os desvanecimentos de pequena escala (devido aos múltiplos percursos) e grande escala (devido à presença dos obstáculos) de rádio móvel. Nesta classe é criada a topologia (Mapa das BS), as BS e setores de cada célula. Também é criado o cenário incluindo todos os terminais UE situados em cada setor, e na mesma classe é corrida a simulação. No fim faz-se a análise dos resultados obtidos criando diversos ficheiros de saída.

O “Global.java” define todos os parâmetros globais que são usados pelos outros programas. No que concerne ao cenário de propagação, é estabelecido por meio de quatro classes em java. A “Topology.java”, caracteriza o cenário em avaliação, topologia do cenário indicada por: posição e altura das antenas das diferentes BSs e/ou APs e potência relativa das BSs e/ou APs. A classe “UE.java”, caracteriza os diferentes tipos de terminais que envolve: altura e localização, velocidade e tipo de movimento. A “Hata3GPP.java”, caracteriza o ambiente de propagação em avaliação o que define as probabilidades P_{Los} e P_{Nlos} dos diferentes terminais. Define também as perdas de propagação em função da distância entre Tx e Rx e define as perdas de penetração nos edifícios com terminais interiores. A “Multiple_Objectives_HQAM.java”, caracteriza as relações SNR das diferentes modulações/codificações, considera as diferentes modulações hierárquicas HQAM e apresenta os respetivos valores de SNR.

3.2. Cenário de Implementação

Foi implementado um cenário considerando uma localidade a freguesia de Linda A Velha em Oeiras. A simulação foi feita com parâmetros à medida e na frequência de portadora de 3.6 GHz (numerologia 1) descrito na secção 3.1. Está a ser usada a tecnologia 5G NR, com uma configuração em que cada setor de célula usa uma antena mMIMO composta por 576 antenas num total de 33 setores (11 sítios com antenas tri-sectoriais). Cada setor acomoda um total de utilizadores variável. Usamos uma modulação de M-QAM, $M=\{4,16,64,256\}$. Os parâmetros específicos do cenário estão descritos na Tabela 3.2.

Parâmetros	Numerologia 1
Número de BSs	11
Nº total de sectores	33
Nº total de UEs	Variável
Esquema de modulação	MQAM
Esquema de transmissão (Downlink)	mMIMO
Modo de transmissão	<i>Full-Buffer</i>

Tabela 3.2 - Parâmetros da Numerologia 1

A Figura 3.4 representa a interface gráfica do simulador de sistema para o nosso cenário, ilustrando a disposição das diversas BS, representadas pelos pontos amarelos, e a localização dos utilizadores representados pelos pontos vermelhos. A própria rede encarrega-se de escolher a BS que atende a um utilizador específico.

O nosso cenário, representa uma zona residencial, onde os utilizadores encontram-se dentro das suas habitações e na via pública. Considera-se que 80% dos utilizadores estão dentro das casas e os restantes 20% estão no exterior. Do total das 11 BS no cenário há a seguinte correspondência; 6 são macro células e as restantes 5 são micro células, estas últimas situadas na zona norte do mapa.

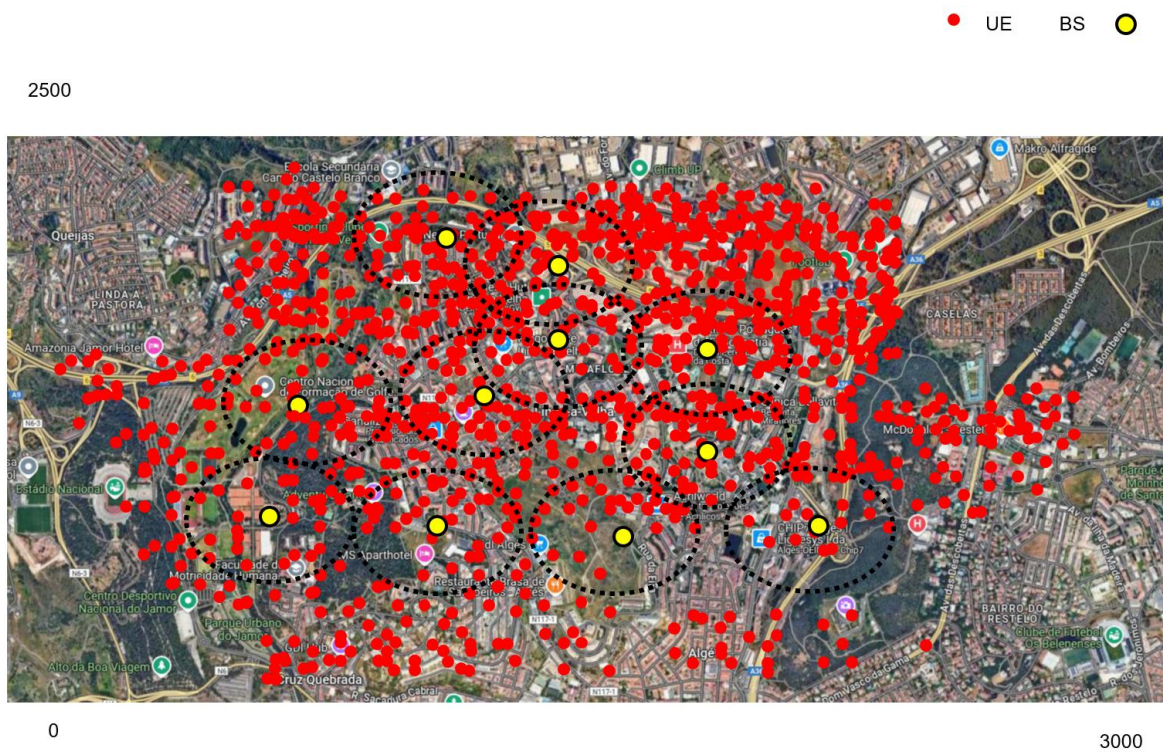


Figura 3.4 - Representação gráfica do cenário de Linda A Velha

CAPÍTULO 4

Discussão de Resultados

Representação de resultados das simulações com destaque para o desempenho do sistema 5G NR. Os resultados são apresentados de forma numérica e gráfica.

4.1. Resultados Teóricos

Os resultados teóricos relativos ao planeamento, encontra-se no [Anexo B](#).

4.2. Resultados das Simulações

Neste ponto são descritos os resultados das simulações a nível de sistema, baseadas no planeamento celular de uma rede privada 5G considerando o cenário da freguesia de Linda A Velha.

A discussão e análise dos resultados concentram-se na avaliação do sistema com foco no *throughput* e na cobertura com a finalidade de avaliar o desempenho em relação ao cenário implementado, conforme descrito na Secção 3.2. Adicionalmente analisaremos o impacto dos diversos parâmetros levados em consideração nas simulações de diferentes frequências, 3.6 GHz e 900 MHz. Os parâmetros específicos do cenário estão descritos na Tabela 4.1.

Na simulação foram consideradas as modulações 4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM.

Parâmetros				
Nº de Utilizadores	10		32	64
Frequência	900 MHz	3.6 GHz	3.6 GHz	3.6 GHz
Esquema de Modulação	4QAM;16QAM	4QAM;16QAM;64QAM;256QAM	4QAM;16QAM;64QAM;256QAM	4QAM;16QAM;64QAM;256QAM
Nº antenas das BSs	144	576	576	576
Nº antenas dos UEs	9	36	36	36
Raio de Cobertura Macro	350			
Raio de Cobertura Micro	250			
Largura de Banda	50 MHz	100 MHz	100 MHz	100 MHz

Tabela 4.1 – Parâmetros para simulações de 900 MHz e 3.6 GHz

Para a rede de acesso rádio virtualizada implementada recorreu-se à técnica de agrupamento (*clustering*) estático, tal técnica tem como principal objetivo aprimorar o desempenho global do sistema,

por melhorar a eficiência espectral e reduzir a interferência entre as BSs. No âmbito da nossa análise, a rede está repartida em três conjuntos adjacentes de BSs, onde cada utilizador é servido por no mínimo uma BS.

Relativo ao tamanho do cluster da RAN implementado nesta configuração, o valor “1C” indica a ausência de *clustering* ou seja os utilizadores são atendidos exclusivamente por uma BS.

No entanto quando o tamanho do cluster é definido como “2C”, a rede é segmentada em dois conjuntos de sites adjacentes, o que permite que cada utilizador seja servido simultaneamente por dois sites, e quando o tamanho do cluster é definido como “3C”, a rede é segmentada em três conjuntos de sites adjacentes, o que permite que cada utilizador seja servido simultaneamente por três sites. Com isto observa-se uma redução significativa e interferência entre utilizadores o que contribui para melhorar a qualidade do serviço e o desempenho geral da rede.

4.2.1. Simulação para 10 Utilizadores

Resultados de *Throughput*

Os gráficos apresentados nesta secção, espelham a variação do *throughput* em relação ao número de utilizadores, a variação do *throughput* em relação à potência e o *throughput* médio em função do tempo.

- 3.6 GHz, Nu=10:

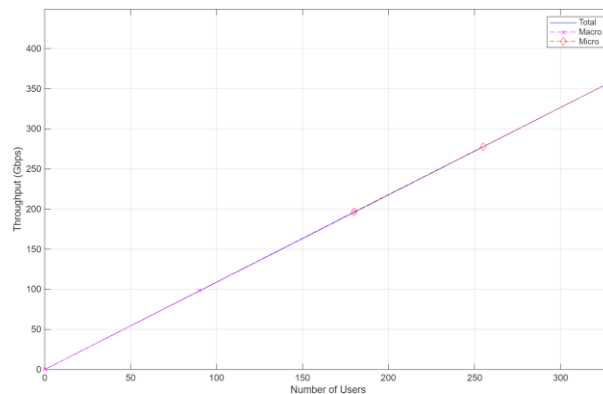


Figura 4.2.1.1 - *Throughput* vs Number of Users (1) com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

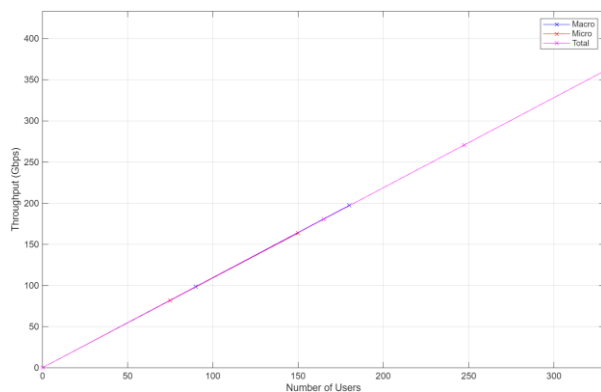


Figura 4.2.1.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Por meio destes gráficos observa-se que o *throughput* para o Total, Macro e Micro aumentam de forma aproximadamente linear com o número de utilizadores. Aparenta ter uma taxa de crescimento média em torno de 1,2 a 1,3 Gbps por utilizador adicionado, alcançando mais de 350 Gbps para 330 utilizadores. Nesta rede o cenário consiste em 11 células, sendo 6 Macro e 5 Mico. As células Macro são o principal componente da capacidade da rede representam 55 % do *throughput* total, a diferença de 45% pode ser atribuída às Micro. Observa-se uma boa escalabilidade até 330 utilizadores, com um aumento proporcional do *throughput* o que significa que o sistema é robusto a esse nível.

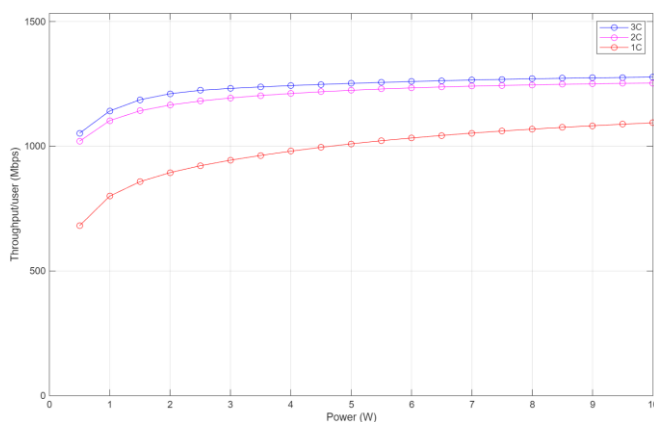


Figura 4.2.1.3 - *Throughput* vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico apresenta o *throughput* médio por utilizador em função da potência para um cenário de agregação de portadoras, mais especificamente 3 portadoras designadas por {1C, 2C, 3C}. Tendo em consideração apenas uma portadora 1C verifica-se um *throughput* baixo ou seja para 1W temos cerca de 600 Mbps e com o aumento da potência ao máximo de 10W, 1C alcança 1050 Mbps. Para 2C ou seja 2 portadoras agregadas, observamos um aumento significativo face a 1C com uma potência de 1W e com o aumento da potência ao máximo de 10W, 2C alcança mais de 1200 Mbps. O 3C ou 3 portadoras agregadas inicia em cerca de 1100 Mbps a 1W e sobe até 1300 Mbps a 10W. 2C é mais eficiente que 1C, aproveita melhor a potência o que permite melhor cobertura, eficiência espectral e *throughput* mais efetivo. O maior

ganho ocorre na passagem de 1C para 2C e o ganho reduz-se no incremento de 2C para 3C. A proximidade entre os resultados de 2C e 3C acontece porque, após a agregação de duas portadoras, o sistema já está perto do seu limite de eficiência. O maior ganho de *throughput* verifica-se na passagem de 1C para 2C, enquanto a adição da terceira portadora traz apenas um aumento reduzido.

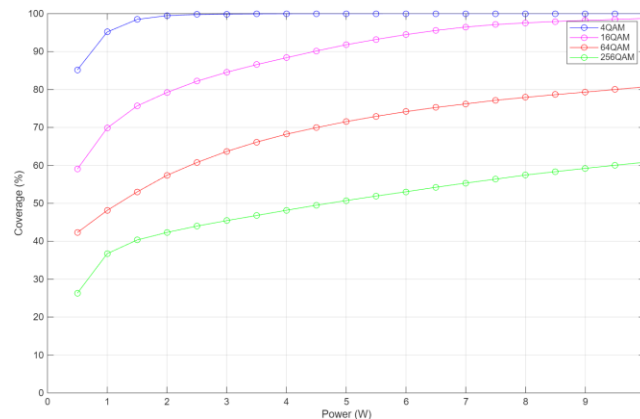


Figura 4.2.1.4 - Coverage vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico descreve a percentagem de cobertura de rede em função da potência de transmissão. Podemos verificar a cobertura das 4 diferentes modulações, {4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM} na qual a 1W já se observa uma cobertura de 85% da área para a modulação 4QAM. A medida que a potência aumenta verifica-se igualmente um aumento da cobertura subindo para os 100% com a potência de 10W. Com a modulação de 16QAM a 1W é coberta 60% da área atingindo os 95% com a potência de 10 W. Para 64 QAM com a potência de 1W observa-se pouco mais de 40% de cobertura da área cobrindo cerca de 80% com potência de 10W. Ainda dentro desta observação de cobertura em função da potência, para a modulação de 256QAM a 1W observa-se uma cobertura de 25% da área chegando em 60% da cobertura com a potência de 10W. Verificou-se que 4QAM oferece a melhor cobertura, enquanto 256QAM requer mais potência para alcançar cobertura significativa. A cobertura aumenta com a potência, mas com rendimentos decrescentes.

- 900 MHz, Nu=10:

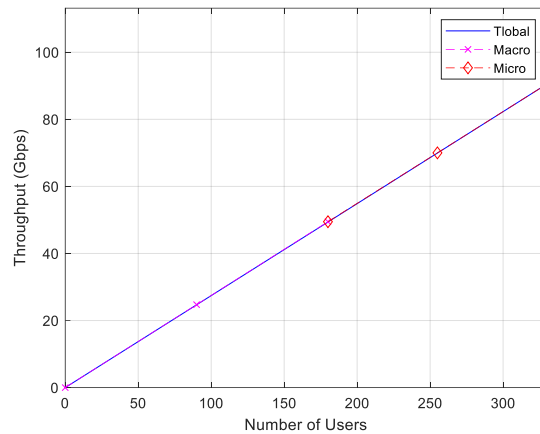


Figura 4.2.1.5 - *Throughput* vs Number of Users com 10 Utilizadores e 900 MHz

Por meio deste gráfico observa-se que o *throughput* para as 3 curvas Total, Macro e Micro aumentam de forma aproximadamente linear com o número de utilizadores. Tal como nos gráficos anteriores não existe diferença no desempenho das Macro e Micro células. Aparenta ter uma taxa de crescimento média em torno de 270 Mbps por utilizador adicionado, alcançando cerca de 90 Gbps para os 330 utilizadores. Comparando com a simulação equivalente a 3.6 GHz observa-se uma redução de cerca de 75%. Isso é devido à redução para metade da largura de banda e eliminação das modulações 64QAM e 256QAM. Logo, o tamanho dos pacotes transmitidos e recebidos diminuiu significativamente.

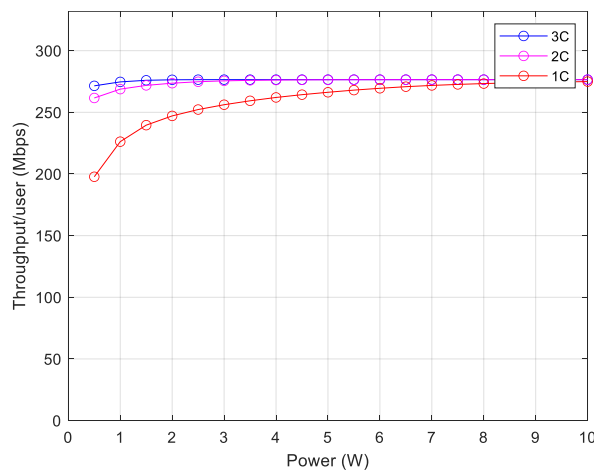


Figura 4.2.1.6 - *Throughput* vs Power com 10 Utilizadores e 900 MHz

Este gráfico apresenta a análise do *throughput* em função da potência para um cenário de agregação de portadoras, mais especificamente 3 portadoras designadas por {1C, 2C, 3C}. Tendo em consideração apenas uma portadora 1C verifica-se um *throughput* baixo ou seja para 1W temos 225 Mbps e mesmo com

o aumento da potência o máximo de 10W, 1C alcança cerca de 275 Mbps. Para 2C ou seja 2 portadoras agregadas, observamos um início de mais de 250 Mbps o que reflete um aumento face a 1C com uma potência de 1W e com o aumento da potência até 10W 2C alcança também 275 Mbps. O 3C ou 3 portadoras agregadas não tem praticamente ganho relativo ao 2C. As portadoras de 2C e 3C igualam-se nos 3 W porque, a partir desse valor, o sistema deixa de estar limitado pela potência e passa a ser limitado pela eficiência espectral. O SINR já é suficiente para utilizar esquemas de modulação elevados, pelo que o aumento de potência e a adição da terceira portadora não resultam em ganhos significativos de *throughput*. Entra-se assim numa região de saturação, onde ambos os cenários apresentam desempenhos semelhantes.

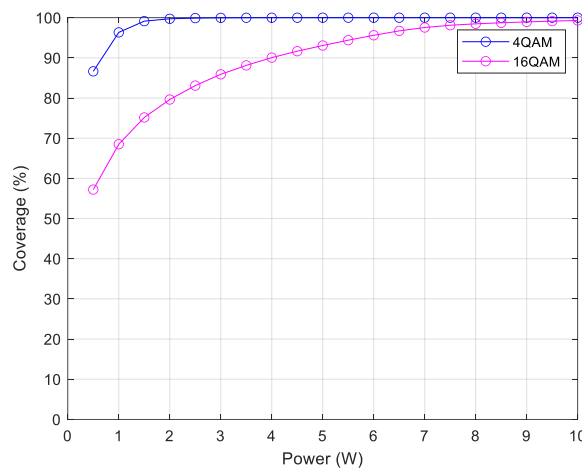


Figura 4.2.1.7 - Coverage vs Power com 10 Utilizadores e 900 MHz

Este gráfico descreve a percentagem de cobertura de rede em função da potência de transmissão. Podemos observar duas diferentes modulações, {4QAM, 16QAM} onde a 1W já se observa uma cobertura de 95% da área para a modulação 4QAM. A medida que a potência aumenta verifica-se igualmente um aumento da cobertura subindo para 100% com a potência de 10W. Com a modulação de 16QAM a 1W a cobertura é 68% da área atingindo os 98% com a potência de 10 W. Verificamos que 4QAM oferece a melhor cobertura, enquanto 16QAM requer mais potência para alcançar cobertura significativa. Comparando com os 3.6 GHz a cobertura sobe para as duas modulações transmitidas 4QAM e 16QAM, devido à menor perda de atenuação aos 900 MHz.

4.2.2. Simulação para 32 Utilizadores

Resultados de *Throughput*

Os gráficos apresentados nesta secção, espelham a variação do *throughput* em relação ao número de utilizadores, a variação do *throughput* em relação à potência e o *throughput* médio em função do tempo.

- 3.6 GHz, Nu=32:

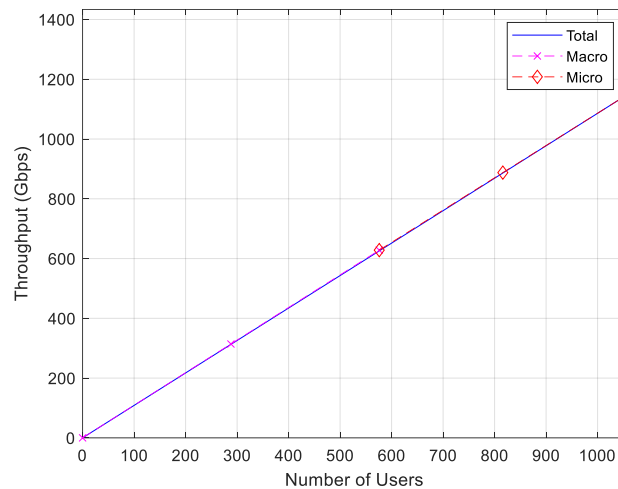


Figura 4.2.2.1 - *Throughput* vs Number of Users com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

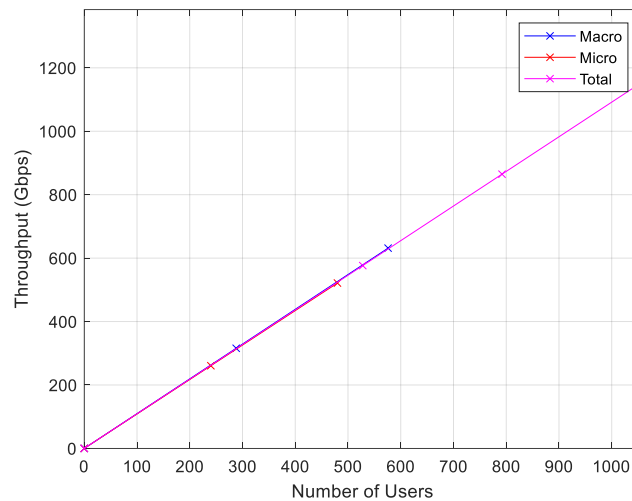


Figura 4.2.2.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Por meio destes gráficos observa-se que o *throughput* para as curvas Total, Macro e Micro aumentam de forma aproximadamente linear com o número de utilizadores. Aparece ter uma taxa de crescimento média em torno de 1 Gbps por utilizador adicionado, alcançando cerca de 1100 Gbps para 1056 utilizadores. O crescimento aproximadamente linear do *throughput* ocorre porque o *throughput* total resulta da soma do *throughput* médio de cada utilizador. Como o sistema dispõe de recursos suficientes e não entra

em congestão, cada novo utilizador acrescenta uma taxa quase constante. Assim, as curvas Total, Macro e Micro aumentam de forma linear com o número de utilizadores.

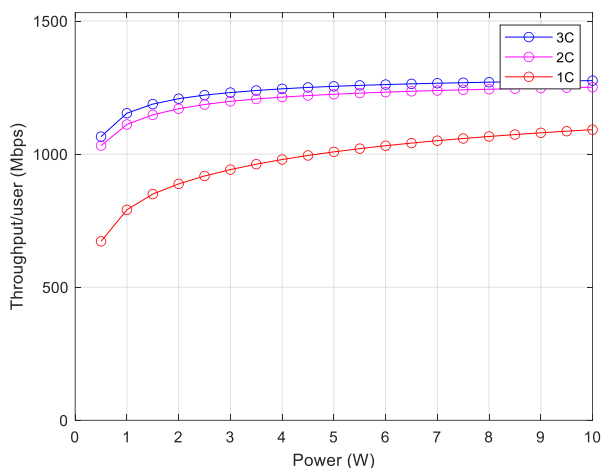


Figura 4.2.2.3 - *Throughput* vs Power com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico apresenta a análise do *throughput* em função da potência para um cenário de agregação de portadoras, mais especificamente 3 portadoras designadas por {1C, 2C, 3C}. Tendo em consideração apenas uma portadora 1C verifica-se um *throughput* baixo ou seja para 1W temos 750 Mbps, com o aumento da potência ao máximo de 10W, 1C alcança 1000 Mbps. Para 2C ou seja 2 portadoras agregadas, observamos um início de pouco mais de 1000 Mbps o que reflete um aumento significativo face a 1C quando a potência é de 1W e com o aumento da potência até 10W 2C alcança quase 1200 Mbps. O 3C ou 3 portadoras agregadas inicia e mantém-se um pouco acima da curva 2C ao longo de todo o intervalo de potência. Tal como anteriormente o maior ganho ocorre na passagem de 1C para 2C. O ganho de *throughput* ao passar de 2C para 3C é mínimo.

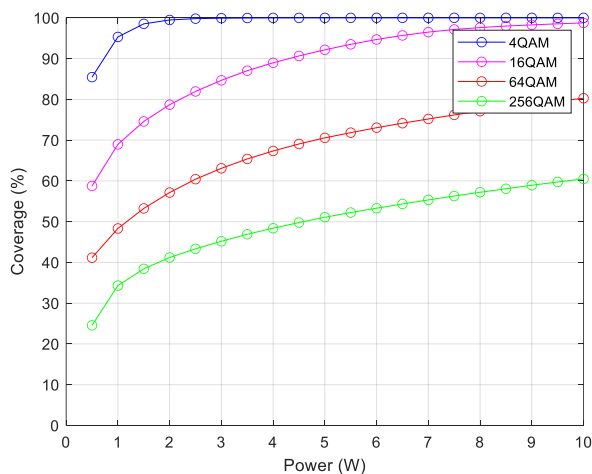


Figura 4.2.2.4 - Coverage vs Power com 32 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico descreve a percentagem de cobertura de rede em função da potência de transmissão. Podemos verificar 4 diferentes modulações, {4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM} na qual para 1W já se observa uma cobertura de 80% da área para a modulação 4QAM. A medida que a potência aumente verifica-se igualmente um aumento da cobertura subindo para os 100% com a potência dos 10W. Com a modulação de 16QAM a 1W a cobertura está em torno de 50% da área atingindo os 90% com a potência de 10 W. A 64 QAM com a potência de 1W observa-se 40% de cobertura da área cobrindo cerca de 70% com potência de 10W. Para a modulação de 256QAM a 1W observa-se uma cobertura de 10% da área chegando em pouco mais de 50% da cobertura com a potência a 10W. Verificamos que 4QAM oferece a melhor cobertura, enquanto 256QAM requer mais potência para alcançar cobertura significativa. A cobertura aumenta com a potência, mas com rendimentos decrescentes. Estes resultados são muito idênticos aos observados quando o número de utilizadores por setor era de 10.

4.2.3. Simulação para 64 Utilizadores

Resultados de *Throughput*

Os gráficos apresentados nesta secção, espelham a variação do *throughput* em relação ao número de utilizadores, a variação do *throughput* em relação à potência e o *throughput* médio em função do tempo, quando existem 64 utilizadores por setor.

- 3.6 GHz, Nu=64:

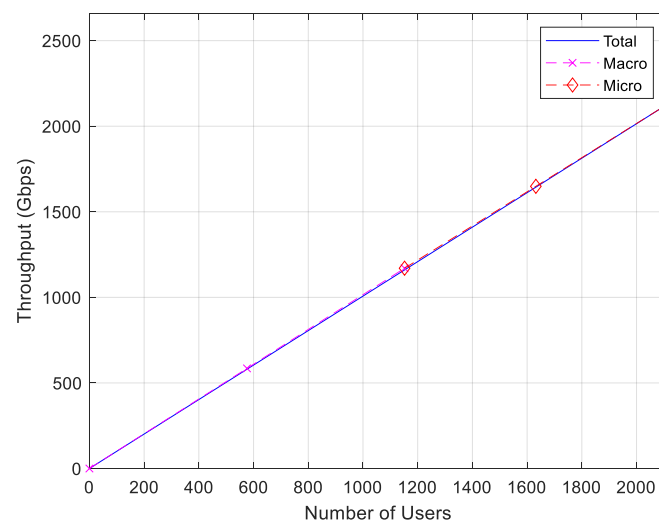


Figura 4.2.3.1 - *Throughput* vs Number of Users com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

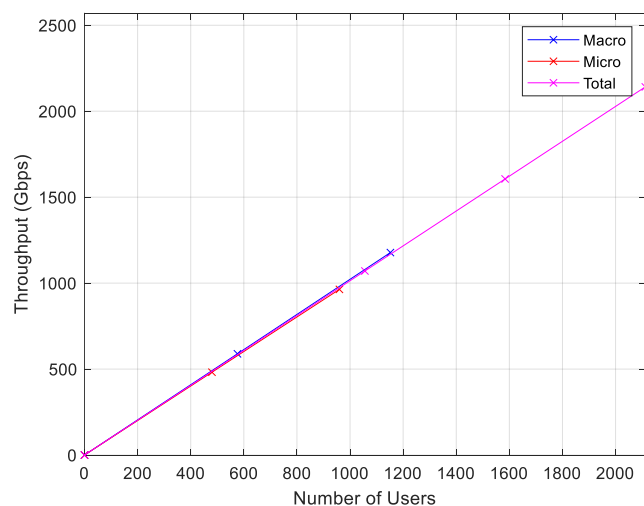


Figura 4.2.3.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Por meio destes gráficos observa-se que o *throughput* das curvas Total, Macro e Micro aumentam de forma aproximadamente linear com o número de utilizadores. Aparenta haver uma taxa de crescimento média de quase 1.0 Gbps por utilizador adicionado, alcançando 2100 Gbps para o máximo de 2112 utilizadores.

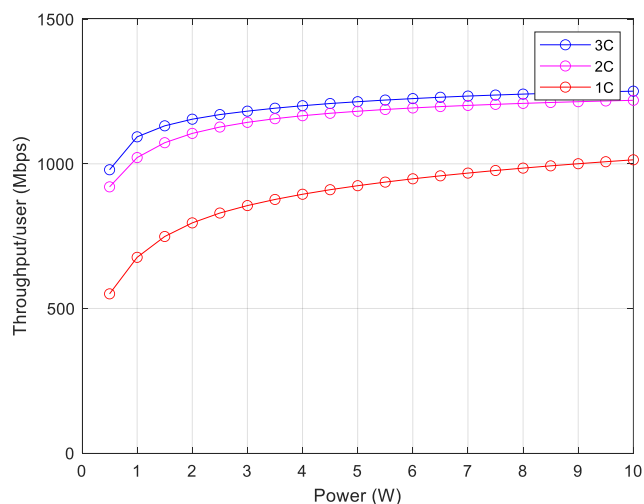


Figura 4.2.3.3 - *Throughput* vs Power com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico apresenta a análise do *throughput* em função da potência para um cenário de agregação de portadoras, mais especificamente 3 portadoras designadas por {1C, 2C, 3C}. Tendo em consideração apenas uma portadora 1C verifica-se um *throughput* baixo ou seja para 1W temos 650 Mbps, com o aumento da potência no máximo de 10W, 1C alcança 1000 Mbps. Para 2C ou seja 2 portadoras agregadas, observamos um aumento significativo face a 1C com uma potência de 1W alcança 1000 Mbps e com o

aumento da potência até 10W 2C alcança 1200 Mbps. O 3C ou 3 portadoras agregadas tem um ganho de *throughput* relativo ao 2C muito reduzido em todo o intervalo de potência de transmissão.

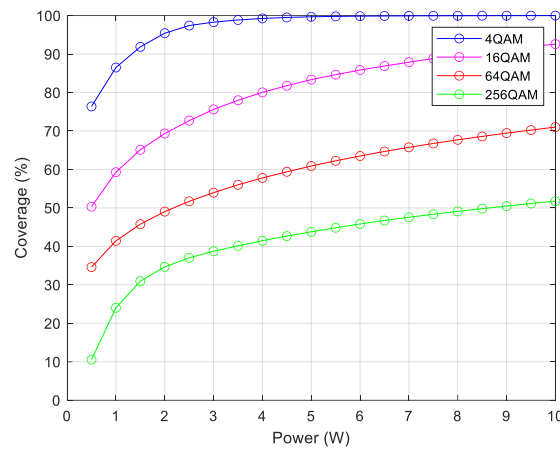


Figura 4.2.3.4 - Coverage vs Power com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico descreve a percentagem de cobertura de rede em função da potência de transmissão. Podemos observar 4 diferentes modulações, {4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM} onde tal como anteriormente a maior cobertura diz respeito ao 4QAM, segue-se o 16QAM, 256QAM e finalmente 256QAM. Comparativamente ao caso de 32 utilizadores por setor nota-se sensivelmente a mesma cobertura para quase todas as modulações exceto a 256QAM onde se observa uma redução de quase 10%.

Resultados de CDF

Os gráficos apresentados nesta secção, são os resultados obtidos para a função de distribuição cumulativa CDF do SINR vs SINR e do CDF do *Throughput* vs *Throughput*. Através dos CDF podemos relacionar com os resultados já obtidos sobre o *Throughput* e também com a cobertura. O CDF da relação entre a potência do sinal recebido S sobre a potência da interferência I mais o ruído N, SINR permite indicar em termos percentuais quais os utilizadores que usufruem de determinados valores de SINR e de *Throughput*. Observando o gráfico constata-se que apenas nas curvas 1C, Total, Macro e Micro existem valores com $\text{SINR} \leq 0$ dB. Estes valores de SINR correspondem aos utilizadores nas fronteiras das células. Em termos da % dos utilizadores que estão na fronteira das células existem 5%. Estes valores $\text{SINR} \leq 0$ dB impossibilitam a correta receção dos pacotes transmitidos. Logo são utilizadores fora de cobertura da rede. Para diminuir a percentagem de pacotes transmitidos que não chegam a ser recebidos é necessário haver duas conexões simultâneas entre cada terminal e duas BSs (2C). Pode-se observar no gráfico que todas as curvas 2C, Total, Macro e Micro têm uma percentagem nula de $\text{SINR} \leq 0$ dB. Logo, existe um aumento de cobertura e também de *throughput* associado às curvas 2C tal como já se tinha concluído anteriormente nos *clustering* utilizados (1C e 2C).

- 3.6 GHz, Nu=64:

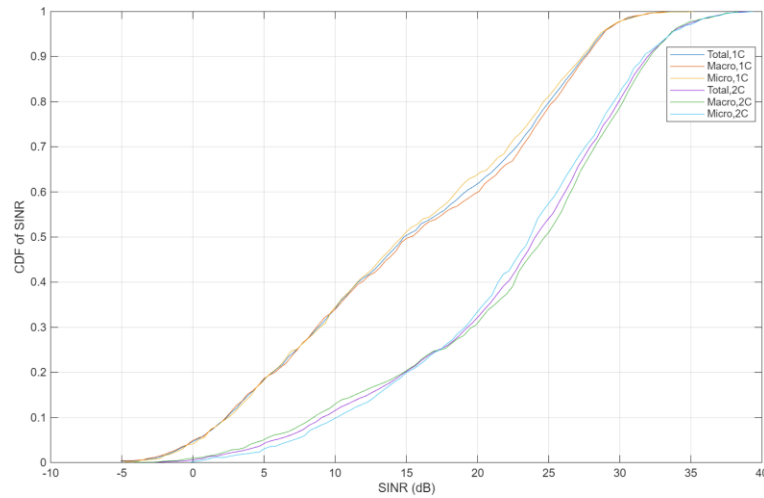


Figura 4.2.3.5 - CDF of SINR com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

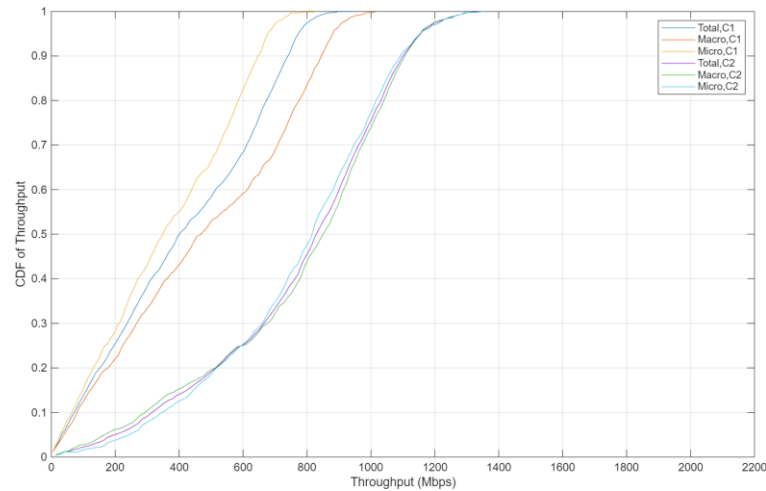


Figura 4.2.3.6 - CDF of *Throughput* com 64 Utilizadores e 3.6 GHz

No gráfico do CDF do *Throughput* observamos através da curva Total C1 que o *throughput* máximo é de cerca de 900 Mbps, havendo utilizadores nas Micro que não vão além de 800 Mbps e nas Macro quase se alcança os 1000 Mbps. No caso de haver duas conexões C2 as três curvas Total, Macro e Micro passam a estar concentradas e alcança-se os 1250 Mbps. Estes valores estão de acordo com os resultados de *throughput* médio por utilizador versus potência transmitida no caso particular da máxima potência de transmissão 10 W.

- 900 MHz, Nu=10:

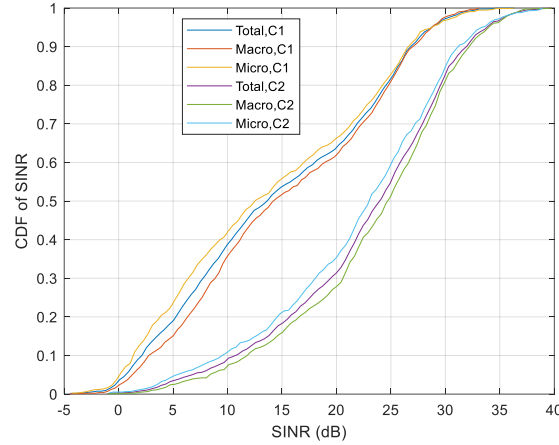


Figura 4.2.3.5 - CDF of SINR com 10 Utilizadores e 0.9 GHz

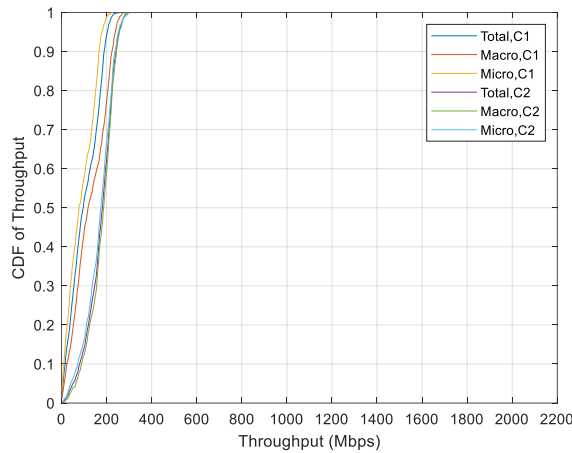


Figura 4.2.3.6 - CDF of *Throughput* com 10 Utilizadores e 0.9 GHz

Observando o gráfico do CDF do SINR constata-se que apenas nas curvas 1C, Total, Macro e Micro existem valores com $\text{SINR} \leq 0$ dB. Estes valores de SINR correspondem aos utilizadores nas fronteiras das células. Em termos da percentagem dos utilizadores que estão na fronteira das células existem 3%. Estes valores $\text{SINR} \leq 0$ dB são de utilizadores fora de cobertura da rede. Para diminuir a percentagem de pacotes transmitidos que não chegam a ser recebidos é necessário haver duas conexões 2C simultâneas entre BS e UEs. Observa-se no gráfico que todas as curvas 2C, Total, Macro e Micro têm uma percentagem nula de $\text{SINR} \leq 0$ dB. Pelo que existe um aumento de cobertura e também de *throughput* associado às curvas 2C tal como já se tinha concluído anteriormente nos *clustering* utilizados (1C e 2C).

No gráfico do CDF do *Throughput* observamos através da curva Total C1 que o *throughput* máximo é de cerca de 250 Mbps, havendo utilizadores nas Micro que não vão além de 200 Mbps e nas Macro quase se alcança os 300 Mbps. No caso de haver duas conexões C2 as três curvas Total, Macro e Micro passam a estar concentradas e alcança-se os 300 Mbps. Estes valores estão de acordo com os resultados de *throughput*

médio por utilizador versus potência transmitida no caso particular da máxima potência de transmissão ser de 10 W.

Para 3C a CDF do *throughput* seria muito semelhante à de 2C, com apenas um ligeiro deslocamento para a direita. Este pequeno ganho deve-se à saturação da eficiência espectral e aos ganhos marginais decrescentes da agregação de portadoras. Assim, a terceira portadora melhora ligeiramente o *throughput*, mas não altera de forma significativa a distribuição global.

4.2.4. Simulação para 10 Utilizadores Menor Raio de cobertura

Parâmetros	
Nº de Utilizadores	10
Frequência	3.6 GHz
Esquema de Modulação	4QAM;16QAM;64QAM;256QAM
Nº antenas das BSs	576
Nº antenas dos UEs	36
Raio de Cobertura Macro	250
Raio de Cobertura Micro	150
Largura de Banda	100 MHz

Tabela 4.2.4 – Parâmetros para simulações de 3.6 GHz com menor Raio de Cobertura

Resultados de *Throughput*

- 3.6 GHz, Nu=10:

Os gráficos apresentados nesta secção, mostram a variação do *throughput* em relação ao número de utilizadores, a variação do *throughput* em relação à potência e o *throughput* médio em função do tempo.

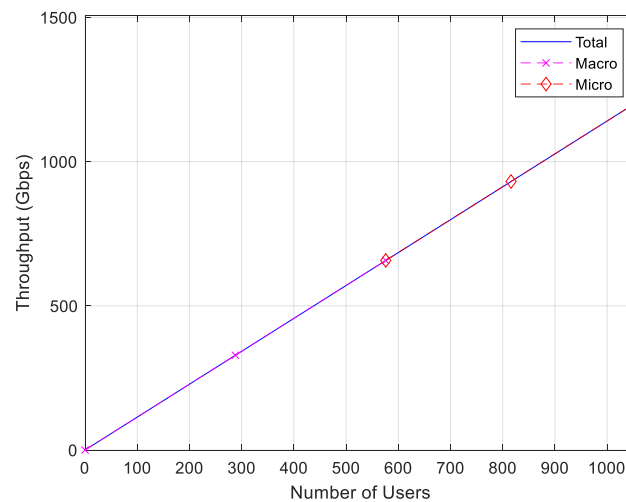


Figura 4.2.4.1 - *Throughput* vs Number of Users com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

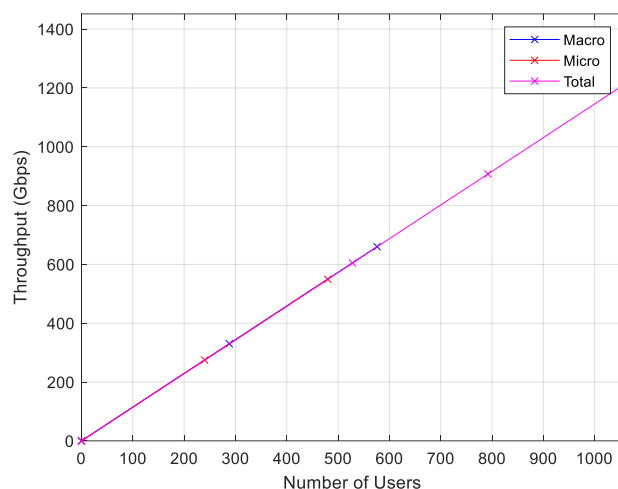


Figura 4.2.4.2 - *Throughput* vs Number of Users (2) com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Por meio destes gráficos observa-se que o *throughput* para as curvas Total, Macro e Micro aumentam de forma linear com o número de utilizadores como observado nos outros exemplos. Alcança-se 1200 Mbps para o máximo de 1056 utilizadores. Este valor é ligeiramente superior ao observado no caso de haver maiores raios de cobertura. Está a usar uma modelação de 256QAM.

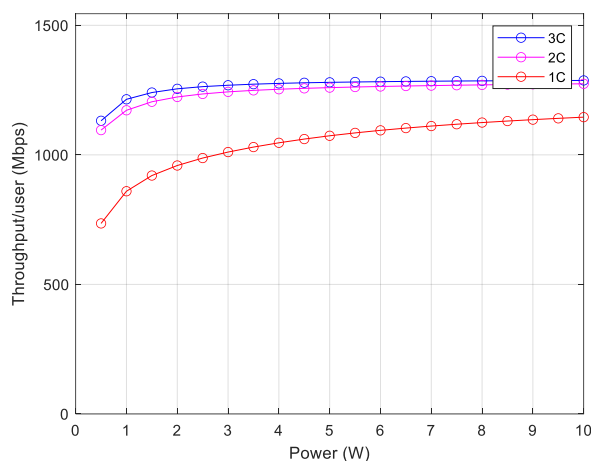


Figura 4.2.4.3 - *Throughput* vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico apresenta o *throughput* em função da potência para um cenário de agregação de portadoras, mais especificamente 3 portadoras designadas por {1C, 2C, 3C}. Tendo em consideração apenas uma portadora 1C verifica-se um *throughput* baixo ou seja para 1W temos cerca de 800 Mbps e com o aumento da potência ao máximo de 10W, 1C alcança 1100 Mbps. Para 2C ou seja 2 portadoras agregadas, observa-se um aumento de *throughput*, 1050 Mbps para 1 W e na potência de 10W 2C alcança 1250 Mbps. O 3C ou 3 portadoras agregadas está muito próximo da curva 2C indicando um ganho muito pequeno comparativamente a 2C.

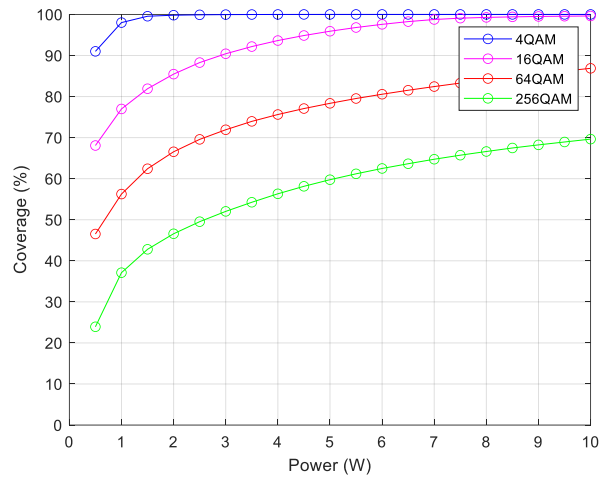


Figura 4.2.4.4 - Coverage vs Power com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Este gráfico descreve a percentagem de cobertura de rede em função da potência de transmissão. Para as 4 diferentes modulações, {4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM} observa-se uma cobertura superior à observada no caso de haver maiores raios de cobertura em particular para a modulação dos 256QAM. Verificamos que 4QAM oferece a maior cobertura, seguida de 16QAM e 64QAM que requerem mais potência para alcançar cobertura significativa. A cobertura aumenta com a potência, mas de forma não linear.

Resultados de CDF

Os gráficos apresentados nesta secção, apresentam os resultados obtidos em termos de percentagem dos utilizadores que estão na fronteira das células e cobertura em função da percentagem da potência de transmissão para os diferentes tamanhos de *clustering* utilizados (1C e 2C).

- 3.6 GHz, $N_u=10$:

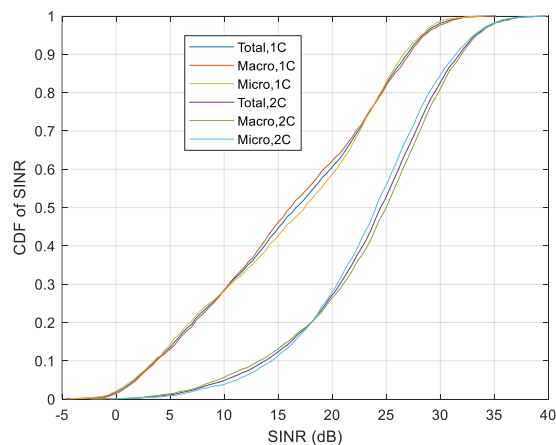


Figura 4.2.4.5 - CDF of SINR com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Por meio deste gráfico podemos observar que tal como se esperava as curvas Total,1C, Macro,C1 e Micro,C1 estão todas situadas à esquerda das curvas Total,C2, Macro,C2 e Micro,C2 indicando uma melhoria significativa de SINR quando se aumenta o número de portadoras ou conexões de uma para duas entre as BS e os terminais UE. Há apenas uma % muito reduzida de terminais com SINR negativo quando se tem uma só ligação C1. Este gráfico representa uma melhoria comparativamente ao caso de haver maiores raios de cobertura.

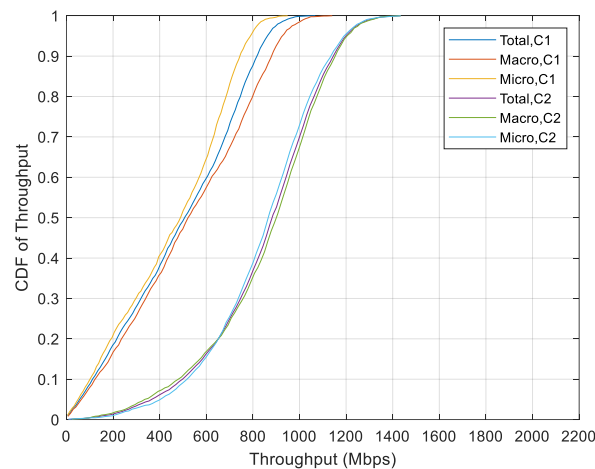


Figura 4.2.4.6 - CDF of *Throughput* com 10 Utilizadores e 3.6 GHz

Neste gráfico podemos observar como se esperava as curvas Total,1C, Macro,C1 e Micro,C1 estão todas situadas à esquerda das curvas Total,C2, Macro,C2 e Micro,C2 indicando uma melhoria significativa de *Throughput* quando se aumenta o número de portadoras ou conexões de C1 para C2. Para a curva Total, C1 obtém-se no máximo 1000 Mbps e para Total,C2 alcança-se 1300 Mbps. Este gráfico representa uma melhoria comparativamente ao caso de haver maiores raios de cobertura.

4.2.5. Simulação global de *Throughput* vs Number of Users

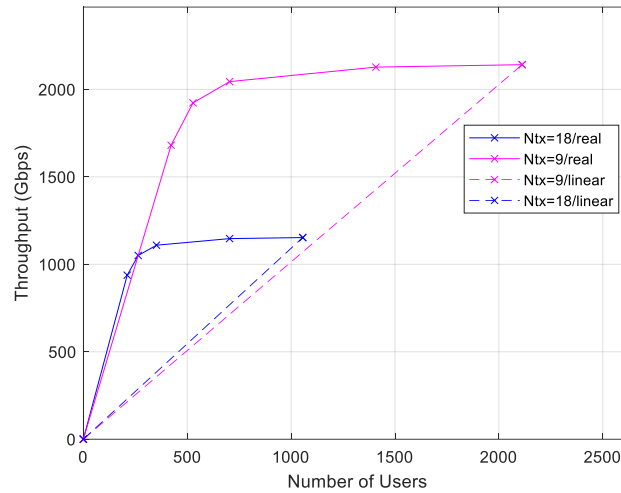


Figura 4.2.5.1 - *Throughput* vs Nu com 32 e 64 Utilizadores @ 3.6 GHz

Neste gráfico apresenta-se a combinação do *throughput* obtido em função do número de utilizadores, i.e., número de antenas de transmissão por utilizador e da potência de transmissão da estação de base. Podemos observar, como se esperava, que o *throughput* máximo é alcançado na situação de haver $N_{tx}=M/K=9$ antenas a transmitir para cada terminal. Neste caso sendo $M=576$, há $K=M/9=64$ utilizadores por setor e o máximo de $3 \times 11 \times 64=2112$ utilizadores a serem constantemente servidos no cenário. As curvas designadas por ‘real’ estão associadas à potência de transmissão da BS onde se usa amplificadores de potência não lineares que saturam na potência máxima de 10W. As curvas designadas por ‘linear’ dizem respeito a um incremento linear de potência de transmissão associada ao número de utilizadores. Isto é, quanto mais utilizadores estiverem a ser cobertos maior será a potência de transmissão. As curvas com legenda $N_{tx}=18$ dizem respeito ao caso de haver $K=M/18=32$ utilizadores por setor. Neste caso é óbvia a redução no *throughput* total alcançado. Tal como no caso anterior existe a curva ‘real’ e a ‘linear’ relacionadas com modo de operação do amplificador de potência.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo analisar e avaliar o planeamento de uma rede privada 5G para a freguesia de Linda-a-Velha, considerando diferentes cenários de utilização, parâmetros de configuração e técnicas de otimização. Através das simulações realizadas, foi possível compreender o comportamento da rede em função do número de utilizadores, da potência de transmissão, da frequência de operação, das modulações utilizadas e da aplicação de *clustering* na rede de acesso rádio.

Os resultados evidenciaram, em primeiro lugar, que o *throughput* médio e total da rede cresce de forma aproximadamente linear com o número de utilizadores, revelando uma escalabilidade consistente até milhares de utilizadores. Em média, verificou-se um aumento entre 1,1 e 1,2 Gbps por utilizador adicional, confirmando que a rede é robusta e capaz de responder a cenários de elevada densidade de acessos. Observou-se ainda que as células macro foram responsáveis por 55% da capacidade da rede, desempenhando um papel central na infraestrutura, enquanto as células Micro assumiram um papel complementar (45%). Este resultado confirma a robustez do sistema e a sua capacidade de acomodar um elevado número de utilizadores.

No que respeita ao impacto no *throughput* da potência de transmissão, verificou-se que a agregação de portadoras (1C, 2C e 3C) constitui um fator determinante para o aumento da eficiência espectral. A agregação em 2C demonstrou-se particularmente eficaz, garantindo um melhor aproveitamento da potência e resultando em maiores ganhos de *throughput* relativamente ao cenário de apenas uma portadora ou seja a utilização de duas ou três portadoras (2C e 3C) proporciona ganhos substanciais face à configuração com apenas uma portadora (1C), sobretudo quando a potência é baixa, refletindo ganhos em termos de eficiência espectral e cobertura.

A análise da cobertura em função das modulações reforçou a importância da escolha do esquema de modulação adequado. Modulações de baixa ordem, como 4QAM, revelaram maior robustez e melhor cobertura sobretudo quando a potência é baixa em que a prioridade é a abrangência do sinal, alcançando até 100% da área simulada com potências reduzidas. Por outro lado, modulações de elevada ordem, como 256QAM, apresentaram desempenho superior em termos de *throughput*, mas exigiram níveis mais elevados de potência para atingir percentagens satisfatórias de cobertura, no entanto proporcionam melhor eficiência espectral.

Relativamente à comparação entre as frequências de 900 MHz e 3.6 GHz, os resultados demonstraram vantagens e limitações distintas, dado que a banda de 900 MHz garante melhor cobertura e maior estabilidade em baixa potência, sendo uma alternativa viável para assegurar penetração em ambientes urbanos exteriores e interiores. Já a banda de 3.6 GHz destacou-se pela maior capacidade e eficiência espectral, permitindo valores de *throughput* mais elevados chegando a atingir picos de 1400 Mbps, com quase o mesmo alcance por célula, implicando a necessidade de uma maior densificação da rede para garantir homogeneidade de serviço, ainda assim torna-se particularmente adequada para ambientes com elevada densidade de tráfego.

Um dos aspetos mais relevantes do estudo foi a análise do impacto do *clustering*. Verificou-se que a passagem de configurações 1C para 2C e 3C permitiu reduzir significativamente a interferência intercelular, resultando em melhorias no SINR e em aumentos expressivos do *throughput* global. A aplicação desta técnica mostrou-se crucial para a melhoria da qualidade de serviço, revelando o seu potencial como solução eficaz para maximizar o desempenho em cenários de elevada densidade de utilizadores. Com isso percebe-se que o *clustering* reduz a interferência intercelular e melhora a distribuição dos recursos entre utilizadores.

Confirma-se que o reuso da frequência da portadora associada aos esquemas de modulação disponíveis deve estar alinhada com os objetivos do operador: maior capacidade e eficiência espectral permitindo ao operador funcionar em simultâneo nas duas bandas com maior alcance de cobertura e maior *throughput*.

Em suma, os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica da implementação de uma rede privada 5G em Linda-a-Velha, destacando-se que a sua eficácia depende da escolha criteriosa da frequência, potência, esquema de modulação e configuração de *clustering*. Esta análise fornece, assim, um contributo relevante para o planeamento de redes móveis privadas no exterior, orientando decisões de engenharia que maximizem o desempenho e a qualidade do serviço tendo em consideração o equilíbrio entre a cobertura, *throughput* e a capacidade.

5.2. Trabalhos Futuros

Apesar da obtenção de resultados satisfatórios, abrem-se também novas linhas de investigação que poderão aprofundar e complementar este estudo. Podem ser analisados cenários em que os utilizadores se encontram em movimento, de modo a estudar-se o impacto de handovers entre células no *throughput*, na latência e na continuidade de serviço. Também há a possibilidade de investigar a aplicação de algoritmos de machine learning recorrendo a IA (Inteligência Artificial) para gerir de forma adaptativa os clusters, permitindo otimizar a alocação de recursos em tempo real em função da carga da rede.

Existindo a viabilidade de se realizar testes práticos em ambiente real por implementar protótipos em Linda-a-Velha para validar os resultados obtidos por simulação, tendo em conta interferências externas, obstáculos físicos, topografia e densidade populacional real. Podemos ainda fazer a comparação com tecnologias alternativas no intuito de analisar comparativamente o desempenho da rede privada 5G face a outras tecnologias emergentes, como Wi-Fi 6/6E e 5G-Advanced, para avaliar vantagens, limitações e custo-benefício em diferentes cenários de aplicação.

Levando em consideração os desperdícios de recursos naturais, será também oportuno analisar a gestão energética e sustentabilidade e investigar o impacto do consumo energético em diferentes configurações de potência e densificação da rede, propondo soluções que conciliem eficiência energética com elevados níveis de qualidade de serviço.

Referências Bibliográficas

- [1] K. Peffers, T. Tuunanen, C. E. Gengler, et al., “Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research,” 2020. arXiv: 2006.02763 [cs.SE] [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.02763>. (accessed Sep.2024.)
- [2] “What is Private Network?” ovhcloud, Sep.2024. <https://www.ovhcloud.com/pt/learn/what-is-private-network/> (accessed Sep.2024.)
- [3] “Redes móveis: Tipos e características”, tecnologia do mundo, Jul 14, 2023, <https://tecnologianomundo.com.br/redes-moveis-tipos-e-caracteristicas/>
- [4] Navid Fazle Rabbi, “Introduction to 5G”, DOI:10.13140/RG.2.2.14027.00804 (accessed Sep.2024.)
- [5] Emeka Obiodu, Editor and Project Lead, GSMA 5G Task Force, “The 5G Guide A Reference for Operators”, April 2019, (accessed Sep.2024.)
- [6] Freescale Semiconductor, Inc., “Long Term Evolution Protocol Overview” White Paper. <https://www.nxp.com/>, (accessed Sep.2024.)
- [7] Electronic Publication Geneva, ITU-R, “Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)”, Report ITU-R M.2410-0 Nov.2017.
- [8] Nokia, “5G spectrum bands explained - low, mid and high band”<https://www.nokia.com/thought-leadership/articles/spectrum-bands-5g-world/>, Available: <https://www.nokia.com/thought-leadership/articles/spectrum-bands-5g-world/>, (accessed Sep.2024.)
- [9] Cisco, “What Are 5G Speeds?”, Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/what-is-5g/what-are-5g-speeds.html>, (accessed Sep.2024.)
- [10] <https://telcomaglobal.com/p/5g-network-architecture>, (accessed Sep.2024)
- [11] arm, “5G RAN”, Available: <https://www.arm.com/glossary/5g-ran>, (accessed Sep.2024)
- [12] Rajashiri Kanade and Poonam Katore, Mr.Hrishikesh Mogare Assistant Professor, “5G Radio Access Network”, Jun.2022, Available: (accessed Oct.2024)
- [13] Stefan Rommer, Peter Hedman, Magnus Olsson, Lars Frid, Shabnam Sultana, Catherine Mulligan, “5G Core Networks Powering Digitalization, Chapter 13 – Network Functions and services, Pages 287-336”, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01335-3> (accessed Oct.2024)
- [14] ShareTechnote, “5g/NR – Network Architecture – AMF”, Available: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Core_AMF.html, (accessed Oct.2024)
- [15] Nicole Singh, “What is the 5G Session Management Function (SMF)?”, Available: <https://techcommunity.microsoft.com/blog/telecommunications-industry-blog/what-is-the-5g-session-management-function-smf/3693852>, 29 Dec.2022, (accessed Oct.2024)
- [16] Cisco, “Cisco 5G Ultra Cloud Core - User Plane Function (UPF)”, Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/packet-core/datasheet-c78-744628.html?dtid=ossdc000283&linkclickid=srch>, 21 Jan. 2021, (accessed Oct.2024)
- [17] Titanium, “Network Repository Function Overview”, Available: <https://titaniumplatform.com/network-repository-function>, (accessed Oct.2024)
- [18] ENEA 5G Data Management, “Unified Data Management Critical to 5G Success”, Available: <https://www.enea.com/solutions/data-management-applications/5g-data-insights/>, (accessed Oct.2024)
- [19] Oracle Communications, “Unified Data Repository Cloud Native User's Guide”, Available: https://docs.oracle.com/communications/F25557_01/docs.10/UDR/title.htm, Nov.2019, (accessed Oct.2024)
- [20] Jio SDM- Subscriber Data Management, “Subscriber Database for 5G Core”, Available: <https://jep-asset.akamaized.net/jiostaticresources/5g-pdfs/Jio-SDM-Product-Brochure-AUSF-UDM-UDR-EIR-UDSF.pdf>, (accessed Oct.2024)
- [21] ETSI, “5G ; 5G System; Authentication Server Services; Stage 3 (3GPP TS 29.509 version 16.10.0 Release 16)”, Available:

- https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=66477, 13 Jul.2022, (accessed Oct.2024)
- [22] ETSI, “5G; 5G System; Network Exposure Function Northbound APIs; Stage 3 (3GPP TS 29.522 version 15.9.0 Release 15)”, Available: https://portal.etsi.org/webapp/workProgram/Report_WorkItem.asp?wki_id=63696, 30 Sep. 2021, (accessed Oct.2024)
- [23] Titanium, “5G Network Slice Selection Function (NSSF)”, Available: <https://titaniumplatform.com/network-slice-selection-function>, (accessed Oct.2024)
- [24] Capgemini Engineering, “Harness the Power of the Capgemini Engineering NWDAF Framework for your 5G Ecosystem”, Available: https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2022/03/harness-the-power-of-the-capgemini-engineering-nwdaf-framework-for-your-5g-ecosystem-brochure_february-2022-1.pdf, 2022, (accessed Oct.2024)
- [25] Titanium, “5G Security Edge Protection Proxy (SEPP)”, Available: <https://titaniumplatform.com/security-edge-protection-proxy>, (accessed Oct.2024)
- [26] Cisco, “N3IWF for Non-3GPP Access”, Available: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/ucc/smf/2025-02/config-and-admin/b-ucc-5g-smf-config-and-admin-guide-release-2025-02/m_n3iwf_for_non_3gpp_access.html?dtid=ossdc000283&linkclickid=srch, Jan. 2024, (accessed Oct.2024)
- [27] ETSI, “5G; 5G System; Application Function Event Exposure Service; Stage 3 (3GPP TS 29.517 version 16.6.0 Release 16)”, Available: https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=73186, 24 Sep.2024, (accessed Oct.2024)
- [28] Enghouse Networks, “SMSF for 5G Networks Product Overview”, Available: <https://www.enghousenetworks.com/enghouse-resources/product-overview/smsf-for-5g-networks-product-overview/>, (accessed Oct.2024)
- [29] ETSI, “5G; 5G System; Location Management Services; Stage 3 (3GPP TS 29.572 version 16.11.0 Release 16)”, Available: https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=72301, 25 Jul.2024, (accessed Oct.2024)
- [30] Gaurav Gangwall, Kevin Gray, Available: <https://infohub.delltechnologies.com/en-us/p/the-5g-core-network-demystified/>, 17 Aug.2023, (accessed Oct.2024)
- [31] Lucas Braga, Ana Marques, Tecnoblog, “5G SA vs 5G NSA: entenda as diferenças, vantagens e limitações de cada rede”, Available: <https://tecnoblog.net/responde/diferencas-5g-standalone-sa-vs-nsa/>, (accessed Nov.2024)
- [32] Olly Murphy, STL Partners, “What is a private network?”, Available: <https://stlpartners.com/articles/private-cellular/what-is-a-private-network/>, (accessed Nov.2024)
- [33] Betacom, “Private Wireless Networks”, Available: <https://www.betacom.com/wp-content/uploads/2021/11/Private-Network-Overview.pdf>, 2021, (accessed Nov.2024)
- [34] EU4Digital, Funded by the European Union, “5G private networks development”, Available: <https://eufordigital.eu/wp-content/uploads/2024/03/EU4D-Telecom-Rules-Report-on-5G-private-network-development.pdf>, Mar.2024, (accessed Nov.2024)
- [35] RedHat, “O que é 5G privado?”, Available: <https://www.redhat.com/pt-br/topics/5g-networks/what-is-private-5g>, 06 Sep.2023, (accessed Nov.2024)
- [36] Jeff Kagan, rcrwireless, “Kagan: Public 5G vs. private 5G vs. hybrid 5G networks”, Available: <https://www.rcrwireless.com/20220628/analyst-angle/kagan-public-5g-vs-private-5g-vs-hybrid-5g-networks>, 28 Jun.2022, (accessed Nov.2024)
- [37] Professor Chris Alden, Kendrick Chan, LSE “The Infrastructures of Global Connectivity: 5G Networks”, Available: <http://eprints.lse.ac.uk/110839/>, 11 Jun.2021, (accessed Nov.2024)

- [38] Altice Labs, White paper, “Enabling 5G private mobile networks”, Available: https://www.alticelabs.com/wp-content/uploads/2022/06/whitepaper_Enabling-5G-private-mobile-networks.pdf, Jun.2022, (accessed Nov.2024)
- [39] Erik G. Larsson, Linköping University, IEEE 5G Tech Focus “Massive MIMO for 5G”, Available: https://futurenetworks.ieee.org/images/files/Tech_Focus_Articles/PDFs/Massive-MIMO-for-5G-FINAL.pdf, Mar.2017, (accessed Dez.2024)
- [40] Felipe Augusto Pereira de Figueiredo, “An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G”, Available: DOI:10.1109/TLA.2022.9757375, Pages 931 – 940, 14 Apr.2022, (accessed Dez.2024)
- [41] Devasis Pradhan, Mr. A Dash, “An Overview of Beam Forming Techniques Toward the High Data Rate Accessible for 5G Networks”, Available: https://www.worldresearchlibrary.org/up_proc/pdf/4024-160576372474-78.pdf, 26 Oct.2020, (accessed Dez.2024)
- [42] Dr. Mohamed Nadder Hamdy, PhD., Andrew an Amphenol company, White Paper “Beamformers Explained”, <https://zh.andrew.com/globalassets/digizuite/1007447-beamformer-explained-wp-119534-en.pdf>, Jan.2025, (accessed Jan.2025)
- [43] Safi Khan, Telit Cinterion, “The 5G Network Backbone: A Guide to Small Cell Technology”, Available: <https://www.telit.com/blog/5g-networks-guide-to-small-cell-technology/>, 24 Oct.2022, (accessed 2024)
- [44] John Gieske, Nybsys, “What Are 5G Small Cells? We Explain Everything!”, Available: <https://nybsys.com/what-are-5g-small-cells/>, 12 Jun.2024, (accessed Dez.2024)
- [45] NTTDATA, “5G Network slicing”, Available: <https://5g.nttdata.com/5g-network-slicing-white-paper-direct/>, Oct.2023, (accessed Jan.2025)
- [46] Xin Li, Mohammed Samaka, H. Antony Chan, Deval Bhamare, Lav Gupta, Chengcheng Guo, Raj Jain, “Network Slicing for 5G: Challenges and Opportunities”, Available: DOI: 10.1109/MIC.2017.3481355, Pages 20 – 27, 18 Sep.2017, (accessed Jan.2025)
- [47] John Burke, TechTarget, “5G standalone (5G SA)”, Available: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/5G-standalone-5G-SA>, Nov.2023, (accessed Jan.2025)
- [48] Samsung, “Private Networks Vol.2 : Architectures and Features for Industrial Scenarios”, Available: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/white-papers/1026-private-networks-vol-2-architectures-and-features-for-industrial-scenarios/>, 28 Oct.2021, (accessed Jan.2025)
- [49] Wikipedia, “Multi-access edge computing”, Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-access_edge_computing, (accessed Fev.2025)
- [50] Maede Zolanvari, WashU, “SDN for 5G”, Available: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse570-15/ftp/sdnfor5g.pdf>, Oct.2015, (accessed Fev.2025)
- [51] Catherine Nayer Tadros, Mohamed R. M. Rizk, Bassem Mahmoud Mokhtar, “Software Defined Network-Based Management for Enhanced 5G Network Services”, Available: DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2980392, Pages 53997 – 54008, 12 Mar.2020, (accessed Fev.2025)
- [52] Figura 1.1 - <https://www.eetasia.com/pushing-the-limits-of-5g/> (accessed Sep.2024.)
- [53] Figura 2 - <https://peteel.ufsc.br/2020/08/17/tecnologia-5g-o-que-vai-mudar/> (accessed Sep.2024.)
- [54] Figura 4 - <https://pplware.sapo.pt/tutoriais/networking/afinal-o-que-faz-do-5g-uma-rede-ao-eficaz-conheca-as-tecnologias/> (accessed Sep.2024.)
- [55] Figura 5 - <https://www.kaizen-tech.net/post/deep-dive-into-beamforming-and-massive-mimo-part-1-beamforming> (accessed Dez.2024.)
- [56] Figura 6 - <https://www.kaizen-tech.net/post/deep-dive-into-beamforming-and-massive-mimo-part-1-beamforming> (accessed Dez.2024.)
- [57] Figura 7 - <https://www.kaizen-tech.net/post/deep-dive-into-beamforming-and-massive-mimo-part-1-beamforming> (accessed Dez.2024.)

- [58] Figura 8 - <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/Network+Slicing.html> (accessed Jan.2025)
- [59] Figura 9 - <https://telecompedia.net/ran/> (accessed Oct.2024)
- [60] Figura 10 - <https://telecompedia.net/ran/> (accessed Oct.2024)
- [61] Figura 11 - <https://telecompedia.net/ran/> (accessed Oct.2024)
- [62] Figura 13 - https://www.researchgate.net/figure/Centralized-control-plane-architecture-implemented_fig2_339889233 (accessed Oct.2024)
- [63] Figura 14 - https://www.researchgate.net/figure/Distributed-control-plane-architecture-implemented-Unlike-the-distributed-control-plane_fig3_339889233 (accessed Oct.2024)
- [64] Figura 15 - https://www.researchgate.net/publication/339889233_Software_Defined_Network-Based_Management_for_Enhanced_5G_Network_Services#pf9 (accessed Feb.2025)
- [65] IEEE, “Common Public Radio Interface” Available: https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2015/liaison-CPRI_Tdoc_1124_presentation-0315.pdf, (accessed Dez.2025)

Anexos

Anexo A

Rede principal (CN)

O núcleo do 5G é uma malha de serviços interligados cada um com a sua função de rede na rede. Este serviços são disponibilizados através de interfaces usando uma arquitetura baseada em serviços (SBA). Ou seja a funcionalidade suportada numa função de rede específica é disponibilizada e acessível através de uma API [13].

A1. Funções da rede principal CN 5G

AMF - Função de gestão do acesso e da mobilidade: Gere funções do plano de controlo, como a gestão do registo, ligação, acessibilidade, mobilidade e autenticação do acesso. Usa interfaces baseadas em serviços, como o Namf para interagir com outras funções da rede principal e entidades externas. Ao analisarmos o AMF na perspetiva de gestão do registo, ligação, acessibilidade, mobilidade e autenticação do acesso, encontramos os seguintes processos [14]:

Gestão do registo:

Deixa que o UE registe e cancele o registo na rede 5G; Lida com o registo inicial para autorizar o UE e criar o contexto do UE; Gere as atualizações periódicas do registo para verificar o estado do UE;

Gestão de ligação:

Define e possibilita conexões de sinalização N1 do plano de controlo com o UE. Controla as transições entre os estados CM-Idle e CM-Connected.

Gestão de acessibilidade:

Certifica-se de que o UE seja alcançável para conexões celulares; Recorre ao paging para acionar UEs para estabelecer conexões;

Gestão da mobilidade:

Salvaguarda a localização do UE na rede; Controla as atualizações da área de seguimento da mobilidade; Suporta as transferências Xn entre as estações de base gNB;

SMF - Função de gestão de sessões [15]:

Gere sessões de protocolo de unidade de dados (PDU) o que consiste em:

Configurar, modificar e terminar as sessões PDU, ou seja o SMF estabelece, atualiza e encerra as sessões conforme necessário.

UPF - Função de plano do utilizador [16]:

Responsável pelo encaminhamento e inspeção de pacotes, tratamento de QoS e sessão de PDU externa para interligações de dados de rede no 5G.

NRF - Função de repositório de rede [17]:

Corredor central de descoberta de serviços para todas as funções de rede no núcleo do 5G. Assim, os produtores de serviços de rede anunciam as suas capacidades por registarem dinamicamente os seus perfis no NRF para que os consumidores possam utilizar os serviços necessários que procuram.

UDM - Função de gestão de dados unificada [18]:

Comunica com diferentes camadas e funções de rede para partilhar dados do utilizador em toda a rede, cria uma plataforma através da qual diferentes partes da rede podem recorrer a uma fonte de dados centralizada. São capazes de enviar e armazenar as informações dos subscritores. O UDM é nativo da Cloud.

UDR - Repositório de dados unificado [19]:

É um repositório convergente, usado por outras funções da rede 5G para armazenar dados. Suporta operações CRUD sobre HTTP2 o que permite aos elementos 5G ter os seus dados de assinantes provisionados e recuperá-los facilmente, por meio dos serviços restful.

UDSF - Função de armazenamento de dados não estruturados [20]:

A UDSF fornece uma interface REST sobre http2 para criar, recuperar, atualizar e eliminar dados não estruturados para a NF consumidora. Com base nos requisitos do operador de rede, a UDSF e a UDR são alojadas em conjunto ou separadamente. A UDSF é constituída por um MS front-end e por um MS back-end de armazenamento de dados em memória. Os micro-serviços front-end e back-end podem ser escalados de forma independente para satisfazer os requisitos de tráfego.

AUSF - Função de servidor de autenticação [21]:

É responsável por suportar as seguintes funcionalidades:

Autenticar o UE para a NF requerente; Fornecer material de codificação à NF requerente; Protege a lista de informações sobre a direção para a NF requerente; Protege os dados de atualização dos parâmetros de UE para a NF requerente.

5G-EIR - Registo de identidade dos equipamentos 5G [20]:

Durante a identificação do assinante, a rede central 5G faz a verificação da identidade do equipamento físico (PEI). O EIR mantém o estado dos dispositivos na lista negra e na lista cinzenta e fornece-os quando solicitado pela NF do consumidor. O 5G-EIR fornece recursos para manter o estado do equipamento de todo o Código de Atribuição de Tipo (TAC), bem como de PEIs individuais. Além disso, também suporta a ligação da identidade do assinante ao PEI/TAC. O EIR funciona como um MS separado e pode ser auto-escalonado de acordo com os requisitos de tráfego.

PCF - Função de controlo de políticas [22]:

Suporta interações com a aplicação de política de acesso e mobilidade na AMF, através de interfaces baseadas em serviços. Deve poder fornecer à AMF políticas relacionadas com a gestão de acesso e da mobilidade e avaliar as políticas do operador que são acionadas por eventos recebidos da AMF.

NSSF - Função de seleção de fatia de rede [23]:

API de seleção de fatias de rede para AMF, que envolve acesso e mobilidade para registo, atualização da configuração do UE e estabelecer sessões PDU. Para tal tem em conta a disponibilidade de fatias, bem como as políticas do operador em questões de restrições, mapeamento de fatias e configuração.

NEF - Função de exposição de rede [22]:

Expõe com segurança as capacidades e eventos de rede fornecidos pelos NFs 3GPP ao AF. Fornece um meio para o AF fornecer disponibilizar informações de modo seguro à rede 3GPP e pode autenticar, autorizar e ajudar a limitar o AF.

É igualmente capaz de traduzir a informação recebida da AF para a enviada às NF internas do 3GPP e vice-versa. Suporta a exposição da informação (recolhida de outras NF 3GPP) ao AF.

NWDAF - Função de análise de dados de rede [24]:

É uma estrutura de software nativa da Cloud, que usa técnicas avançadas de aprendizagem automática para fornecer inteligência operacional preditiva e em tempo real no núcleo 5G para impulsionar a automatização inteligente da rede. No seu processo, recolhe dados das NFs do 5G, dos sistemas de operações, administração e gestão e do UE através de interfaces padrão definidas pelo 3GPP.

O NWDAF processa os dados, e o resultado da análise é fornecido em análises estatísticas e previsões de ML. Essa informação analítica permite que outras NFs do núcleo do 5G tomem decisões inteligentes e realizem ações autónomas.

SEPP - Proxy de proteção dos limites de segurança [25]:

Para garantir a segurança na comunicação foi desenvolvido o SEPP que desempenha algumas funções tais como:

Atuar como um retransmissor de sinalização segura entre PLMNs;

Providenciar um caminho de comunicação seguro mutuamente autenticado entre redes; Atuar como um proxy reverso, fornecendo um ponto único de acesso a todas as funções de rede; Fornecer ocultação de topologias inter-PLMN; Filtrar o tráfego, policiar e proteger contra sobrecarga.

N3IWF - Função interfuncional não-3GPP [26]:

É implementado na infraestrutura do fornecedor de serviços. Interage com vários componentes da rede de 5G, tais como AMF, SMF e UPF, sendo responsável pelo interfuncionamento entre redes não-3GPP não fiáveis e o núcleo 5G, fornece os protocolos de acesso e autenticação de rede Wi-Fi não-3GPP para interagir sem problemas com a rede central 5G.

AF - Função de aplicação [27]:

É um elemento funcional que fornece informações relacionadas com o serviço ou a aplicação ao consumidor do serviço NF. Permite ao consumidor do serviço NF inscrever e anular a subscrição de uma notificação periódica e/ou de uma notificação quando é detetado um evento subscrito e notifica os consumidores de serviços da NF com uma subscrição correspondente sobre os eventos observados na AF.

SMSF - Função de serviço de mensagens curtas [28]:

É responsável pela transmissão de mensagens SMS entre os utilizadores e dispositivos da rede 5G e os de outras redes como (2G/3G/4G). Interage com o AMF e o UDM através das interfaces N20 e N21.

LMF - Função de gestão de localização [29]:

Suporta a determinação da localização geográfica de um dispositivo móvel;

Obtém com base em saídas de rádio de medição da localização de ligação descendente e ascendente ou uma estimativa de localização do dispositivo móvel a partir do RAN NG;

Fornecer dados de assistência de difusão às UEs e encaminha as chaves de cifra associadas a um AMF.

Na Figura 12 ilustram-se todas as NFs da 5G Core Network

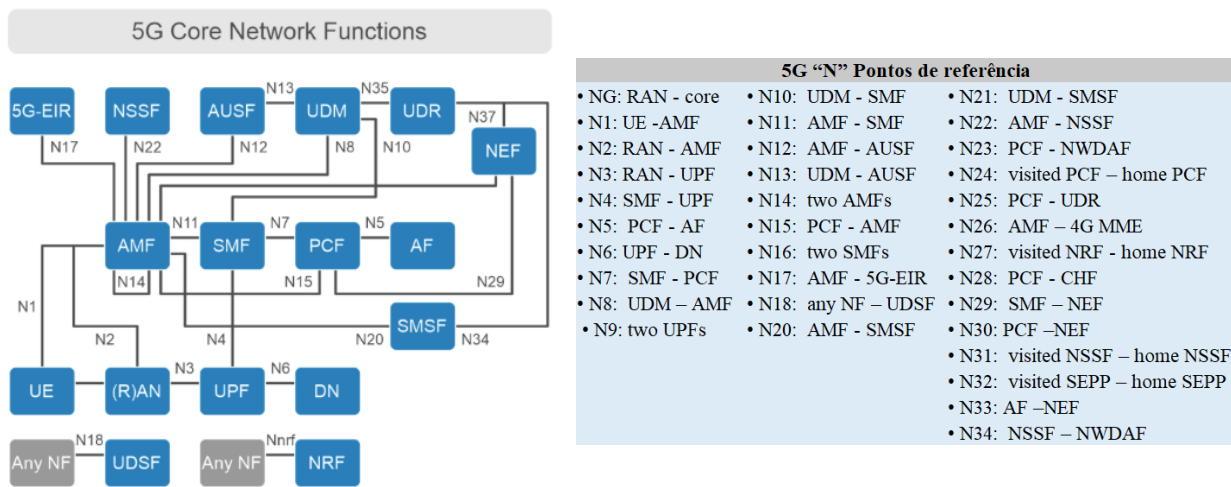


Figura A.1 - 5G Core Network e 5G "N" Pontos de referência

A.2. Software-Defined Networking

Refere-se a rede baseada em software que tem por objetivo reduzir as limitações do hardware [50]. O seu modo de funcionamento passa por separar o plano de controlo fora dos computadores e permitir o controlo externo dos dados por meio de um componente lógico de software, o controlador. O SDN disponibiliza recursos para descrever os componentes, as funções desempenhadas e os protocolos para administrar o plano de encaminhamento com o IP móvel a partir de um controlador remoto através de um canal seguro. Os dispositivos já não precisam de compreender e processar uma infinidade de normas de protocolo, mas devem ser capazes de compreender as instruções dos controladores SDN. [51]O plano de controlo SDN é habitualmente composto por uma unidade centralizada conhecida com SDNC que é o gestor de toda a rede e a sua localização afeta o desempenho da rede. Existem 3 tipos de arquiteturas: centralizada, distribuída e a arquitetura de plano de controlo logicamente centralizada – fisicamente distribuída LC-PD.

Na arquitetura centralizada (ver Figura 13) apenas um único controlador é usado para administrar toda a rede, dá uma visão geral da rede o que permite uma decisão mais informada e melhor. Ainda assim apresenta uma vulnerabilidade, por ser o ponto único de falha sem redundância. A arquitetura enfrenta problemas de fiabilidade, congestionamento, escalabilidade e degradação do desempenho devido à grande distância entre o controlador e os dispositivos do plano de dados. Sendo assim recomendável para uma rede de pequena escala.

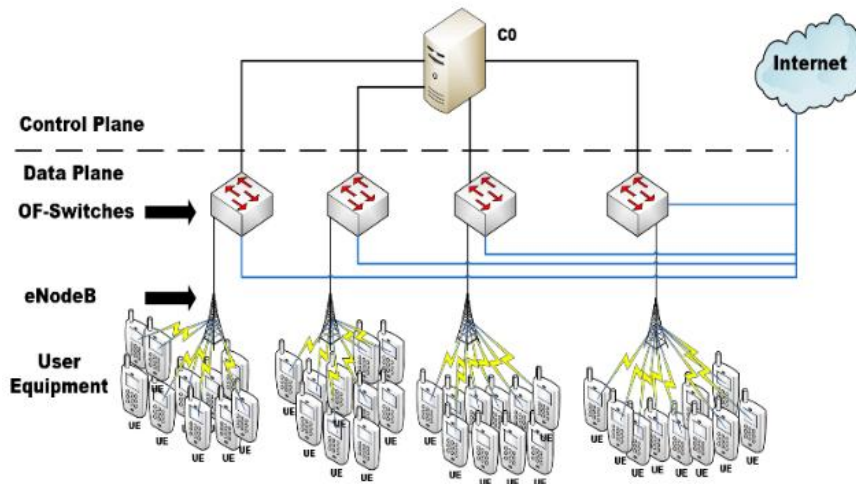


Figura A.2.1 - SDN Centralizada

A arquitetura distribuída (ver Figura 14) consiste na utilização conjunta de vários controladores distribuídos sendo a arquitetura baseada em clusters. Cada cluster com um controlador é conhecido como domínio SDN. Tem por objetivo reduzir a dimensão da rede em domínios SDN, o que assegura a escalabilidade devido à simplicidade da troca de controles entre domínios diferentes. Exibe uma elevada rapidez de resposta às decisões fruto da disponibilidade de muitos controladores na rede. No entanto é uma solução dispendiosa dado à utilização de muito controladores na rede.

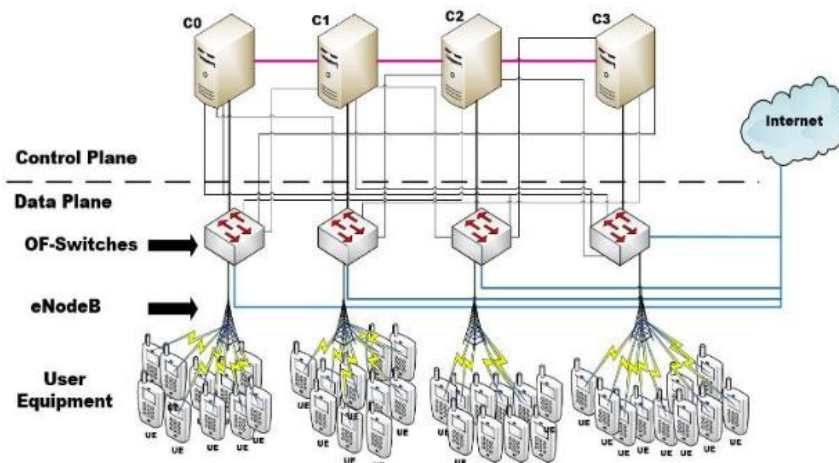


Figura A.2.2 - SDN Distribuída

Na arquitetura do plano de controlo LC – PD (ver Figura 15), encontra-se uma combinação de vantagens, o uso de vários controladores da arquitetura distribuída mas ao mesmo tempo considera logicamente a presença de um único controlador. Ou seja, é como se existisse apenas um controlador que comanda toda a rede e recorre a um controlador multicore para melhorar o desempenho. Nesta arquitetura todos os controladores distribuídos têm as mesmas responsabilidades e as mesmas informações devido à

sincronização da rede. Ao contrário da arquitetura distribuída em que vários controladores estão fisicamente na mesma área, nesta arquitetura “híbrida” cada controlador toma decisões com base na visão geral da rede.

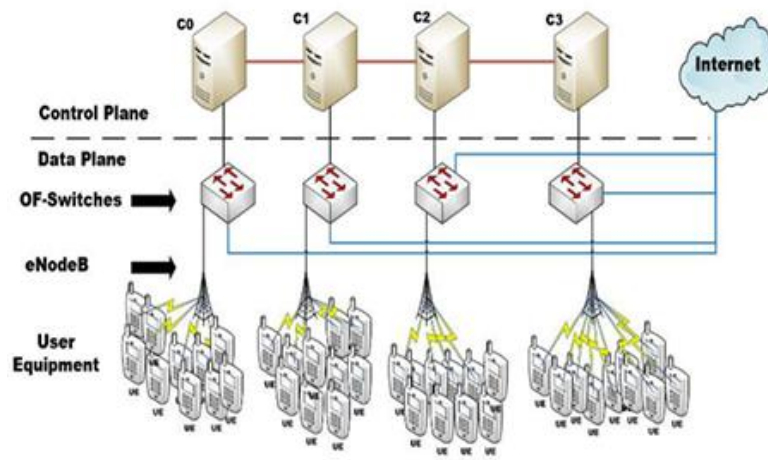


Figura A2.3 - SDN LC-PD

Anexo B

Pretende-se fazer o planeamento celular considerando um cenário hipotético outdoor com 11 BS/AP e 33 setores no total. Neste cenário cada BS tem 4 zonas com diferentes ritmos binários dependendo da distância à BS. Símbolos 256QAM com $R_c=7/8$, símbolos 64QAM com $R_c=5/6$, símbolos 16QAM com $R_c=3/4$ e símbolos 4QAM com $R_c=1/2$.

Considera-se 5G NR com MIMO Massivo em que em cada setor de célula tem mMIMO com $M=576$ antenas, para servir $K=[32,64]$ utentes, $M/K=[18,9]$ antenas por utente, sendo o sistema TDD. Há no total $3 \times 10 = 30$ setores.

- Considera-se $f_c=3.6\text{GHz}$ com numerologia 1, largura de banda total 100MHz, $\Delta f=30\text{KHz}$, OFDM com 28 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1.0ms.

- Considera-se $f_c=28\text{GHz}$ com numerologia 2, largura de banda total 200MHz, $\Delta f=60\text{KHz}$, OFDM com 56 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1.0ms.

O tempo de coerência do canal é de $T_c=25\text{ms}$ e a largura de banda de coerência do canal $B_c=4\text{MHz}$. Usa-se TDD, com tempo de transmissão do DL igual ao do UL mais a duração dos pilotos. Outros dados: $M/K=9$;

$$L_{\text{path}}=43.6+32\log(d)\text{dB}(@f_c=3.6\text{GHz}); \text{EIRP}_{\text{TX}}=44\text{dBm};$$

$$L_{\text{path}}=61.4+32\log(d)\text{dB}(@f_c=28\text{GHz}); \text{EIRP}_{\text{TX}}=24\text{dBm};$$

$$10\log(E_{\text{sc}}/N_0)=10\log(E_{\text{b}}/N_0)+10\log(R_c \times \log_2(M)); 10\log(E_{\text{b}}/N_0)=10\log(E_{\text{sc}}/N_0)-10\log(R_c \times \log_2(M));$$

$$10\log(E_{\text{sc}}/N_0)=13.6\text{dB}, \quad R_c=7/8 \quad (256\text{QAM}); \quad 10\log(E_{\text{sc}}/N_0)=8.9\text{dB}, \quad R_c=5/6 \quad (64\text{QAM}); \\ 10\log(E_{\text{sc}}/N_0)=4.9\text{dB}, \quad R_c=3/4 \quad (16\text{QAM}); \quad 10\log(E_{\text{sc}}/N_0)=-2.4\text{dB}, \quad R_c=1/2 \quad (4\text{QAM}); \quad 10\log(E_{\text{b}}/N_0)=5.1\text{dB} \quad (256\text{QAM}); \\ 10\log(E_{\text{b}}/N_0)=1.9\text{dB} \quad (64\text{QAM}). \quad 10\log(E_{\text{b}}/N_0)=0.1\text{dB} \quad (16\text{QAM}); \quad 10\log(E_{\text{b}}/N_0)=-2.4\text{dB} \quad (4\text{QAM}). \quad T_c=25\text{ms}; \quad B_c=4\text{MHz}; \quad 10\log(F)=8\text{dB}; \quad M_f=13\text{dB}; \quad 10\log(kT)=-174\text{dBm}; \quad G_{\text{rx}}=2\text{dB}; \quad L_{\text{rx}}=0\text{dB}; \\ N_{\text{sc}}=3300\text{subportadoras com dados. } T_s=1\text{ms}.$$

Calculo da sensibilidade (para a numerologia 1, $f_c=3.6\text{GHz}$, $B_t=100\text{MHz}$);

$$10\log(S)=10\log(\text{SNR})+10\log(P_n);$$

$$10\log(P_n)=10\log(kT)+10\log(F)+10\log(B_t)=-174+8+80=-86.0\text{dBm};$$

$$N_b = N_{\text{simb.}} \times N_{\text{sc}} \times \log_2(M) \times R_c$$

$$N_{b1} = 28 \times 3300 \times 8 \times 7/8 = 646800\text{bits}; \quad R_{b1}=N_{b1}/T_s; \quad R_{b1}=646.8\text{Mbps} \quad (256\text{QAM})$$

$$N_{b2} = 28 \times 3300 \times 6 \times 5/6 = 462000\text{bits}; \quad R_{b2}=N_{b2}/T_s; \quad R_{b2}=462.0\text{Mbps}; \quad (64\text{QAM})$$

$$N_{b3} = 28 \times 3300 \times 4 \times 3/4 = 277200\text{bits}; \quad R_{b3}=N_{b3}/T_s; \quad R_{b3}=277.2\text{Mbps} \quad (16\text{QAM})$$

$$N_{b4} = 28 \times 3300 \times 2 \times 1/2 = 92400\text{bits}; \quad R_{b4}=N_{b4}/T_s; \quad R_{b4}=92.4\text{Mbps}; \quad (4\text{QAM})$$

$$10\log(\text{SNR})=10\log(E_{\text{b}}/N_0)+10\log(R_b/B_t);$$

$$10\log(\text{SNR}_1)=5.1\text{dB}+10\log(646.8/100)=13.2\text{dB}; \quad (256\text{QAM})$$

$$10\log(\text{SNR}_2)=1.9\text{dB}+10\log(462.0/100)=8.6\text{dB}; \quad (64\text{QAM})$$

$$10\log(\text{SNR}_3)=0.1\text{dB}+10\log(277.2/100)=4.5\text{dB}; (16\text{QAM})$$

$$10\log(\text{SNR}_4)=-2.4\text{dB}+10\log(92.4/100)=-2.7\text{dB}; (4\text{QAM})$$

$$10\log(S)=10\log(\text{SNR})+10\log(P_n);$$

$$10\log(S_1)=13.2-86.0=-72.8\text{dBm}; (256\text{QAM});$$

$$10\log(S_2)=8.6-86.0=-77.4\text{dBm}; (64\text{QAM});$$

$$10\log(S_3)=4.5-86.0=-81.5\text{dBm}; (16\text{QAM});$$

$$10\log(S_4)=-2.7-86.0=-88.7\text{dBm}; (4\text{QAM});$$

Calculo do raio de cobertura no cenário genérico;

$$L_{\text{path}}=\text{EIRP}_{\text{TX}}+\text{Gr}_x-\text{Lrx}-\text{Mf}-10\log(S); L_{\text{path}}=44+2-0-13-10\log(S)=33-10\log(S);$$

$$L_{\text{path}1}=33+72.8=105.8\text{dB};$$

$$L_{\text{path}2}=33+77.4=110.4\text{dB};$$

$$L_{\text{path}3}=33+81.5=114.5\text{dB};$$

$$L_{\text{path}4}=33+88.7=121.7\text{dB};$$

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

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path}1} \Rightarrow R_1=10^{(105.8-43.6)/32}=87.9\text{m} (256\text{QAM})$$

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path}2} \Rightarrow R_2=10^{(110.4-43.6)/32}=122.3\text{m} (64\text{QAM})$$

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path}3} \Rightarrow R_3=10^{(114.5-43.6)/32}=164.3\text{m} (16\text{QAM})$$

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path}4} \Rightarrow R_4=10^{(121.7-43.6)/32}=271.9\text{m} (4\text{QAM})$$

Vamos analisar a capacidade do mMIMO deste cenário hipotético com $M/K=9$ antenas/utente.

$$T_c=25\text{ms}; B_c=4\text{MHz}; \tau_c=B_c T_c=2.5 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^6=10^5=100000 \text{ (nº máximo de símbolos para transmitir no canal com mMIMO)}$$

$$M=576; K=64; M/K=9 \text{ (antenas/pedestre); } \tau_p=K=64 \Rightarrow \tau_c-\tau_p=100000-64 \Rightarrow$$

$$\text{No DL transmite-se em cada } T_c, N_s=50000 \text{ símbolos};$$

$$\text{No UL transmite-se em cada } T_c, N_s=50000-64 \text{ símbolos.}$$

$$\text{A taxa de símbolos no DL é } R_s=N_s/T_c=5 \times 10^4/2.5 \times 10^{-2}=0.2 \times 10^7 \text{ sps em cada } B_c.$$

-Caso da Numerologia 1

$$B_t=100\text{MHz} \Rightarrow R_{st} = B_t/B_c \times R_s = 100/4 \times 0.2 \times 10^7 = 5 \times 10^7 \text{ sps.}$$

$$\text{Na zona 1 com } R_c = 7/8 \text{ (256QAM)} \Rightarrow R_{st1} = 5 \times 10^7 \times 7/8 \text{ sps. } A_1=\pi \times 87.9^2; A_1/A_T=10.5\%$$

Na zona 2 com $R_c = 5/6$ (64QAM) $\Rightarrow R_{st2} = 5 \times 10^7 \times 5/6$ sps. $A_2 = \pi \times (122.3^2 - 87.9^2)$; $A_2/AT = 9.8\%$

Na zona 3 com $R_c = 3/4$ (16QAM) $\Rightarrow R_{st3} = 5 \times 10^7 \times 3/4$ sps. $A_3 = \pi \times (164.3^2 - 122.3^2)$; $A_3/AT = 16.2\%$

Na zona 4 com $R_c = 1/2$ (4QAM) $\Rightarrow R_{st4} = 5 \times 10^7 \times 1/2$ sps. $A_4 = \pi \times (271.9^2 - 164.3^2)$; $A_4/AT = 63.5\%$

Em cada setor da célula há $K=64$ pedestres/setor $\Rightarrow R_{sc} = R_{st} \times K$

Zona 1 $R_{sc1} = 64 \times 5 \times 10^7 \times 7/8 \times (A_1/AT)$ sps $\Rightarrow R_{bc1} = 235.2 \times 10^7$ bps; (8bits/simbolo)

Zona 2 $R_{sc2} = 64 \times 5 \times 10^7 \times 5/6 \times (A_2/AT)$ sps $\Rightarrow R_{bc2} = 156.8 \times 10^7$ bps; (6bits/simbolo)

Zona 3 $R_{sc3} = 64 \times 5 \times 10^7 \times 3/4 \times (A_3/AT)$ sps $\Rightarrow R_{bc3} = 155.52 \times 10^7$ bps; (4bits/simbolo)

Zona 4 $R_{sc4} = 64 \times 5 \times 10^7 \times 1/2 \times (A_4/AT)$ sps $\Rightarrow R_{bc4} = 203.2 \times 10^7$ bps; (2bits/simbolo)

Somatório dos ritmos binários nas 4 zonas; $R_{bc} = R_{bc1} + R_{bc2} + R_{bc3} + R_{bc4} = 750.72 \times 10^7$ bps

$\varepsilon = R_{bc}/B_t = 750.72 \times 10^7 / 10^8 = 75.07$ bps/Hz $\Rightarrow \varepsilon = 75.07$ bps/Hz/sector

$\varepsilon/K = 1.173$ bps/Hz/pedestre

Considerando que há 33 setores (11 BS) no cenário hipotético dá um *Throughput* total = 247.7 Gbps

De seguida vamos considerar o caso de $M/K=18$.

$10\log(E_{sc}/N_o) = 10\log(E_b/N_o) + 10\log(R_c \times \log_2(M))$; $10\log(E_b/N_o) = 10\log(E_{sc}/N_o) - 10\log(R_c \times \log_2(M))$;

$10\log(E_{sc}/N_o) = 10.6$ dB, $R_c = 7/8$ (256QAM); $10\log(E_{sc}/N_o) = 5.9$ dB, $R_c = 5/6$ (64QAM);
 $10\log(E_{sc}/N_o) = 1.9$ dB, $R_c = 3/4$ (16QAM); $10\log(E_{sc}/N_o) = -5.4$ dB, $R_c = 1/2$ (4QAM); $10\log(E_b/N_o) = 2.1$ dB (256QAM); $10\log(E_b/N_o) = -1.1$ dB (64QAM). $10\log(E_b/N_o) = -2.9$ dB (16QAM); $10\log(E_b/N_o) = -5.4$ dB (4QAM). $10\log(F) = 8$ dB; $M_f = 13$ dB; $10\log(kT) = -174$ dBm; $G_{rx} = 2$ dB; $L_{rx} = 0$ dB; $T_c = 25$ ms; $B_c = 4$ MHz; $N_{sc} = 3300$ subportadoras. $T_s = 1$ ms. $M/K = 18$

Calculo da sensibilidade (para a numerologia 1, $f_c = 3.6$ GHz, $B_t = 100$ MHz);

$10\log(S) = 10\log(SNR) + 10\log(P_n)$;

$10\log(P_n) = 10\log(kT) + 10\log(F) + 10\log(B_t) = -174 + 8 + 80 = -86.0$ dBm;

$N_b = N_{simb.} \times N_{sc} \times \log_2(M) \times R_c$

$N_{b1} = 28 \times 3300 \times 8 \times 7/8 = 646800$ bits; $R_{b1} = N_{b1}/T_s$; $R_{b1} = 646.8$ Mbps (256QAM)

$N_{b2} = 28 \times 3300 \times 6 \times 5/6 = 462000$ bits; $R_{b2} = N_{b2}/T_s$; $R_{b2} = 462.0$ Mbps; (64QAM)

$N_{b3} = 28 \times 3300 \times 4 \times 3/4 = 277200$ bits; $R_{b3} = N_{b3}/T_s$; $R_{b3} = 277.2$ Mbps (16QAM)

$N_{b4} = 28 \times 3300 \times 2 \times 1/2 = 92400$ bits; $R_{b4} = N_{b4}/T_s$; $R_{b4} = 92.4$ Mbps; (4QAM)

$10\log(SNR) = 10\log(E_b/N_o) + 10\log(R_b/B_t)$;

$$10\log(\text{SNR1})=2.1\text{dB}+10\log(646.8/100)=10.2\text{dB}; (256\text{QAM})$$

$$10\log(\text{SNR2})=-1.1\text{dB}+10\log(462.0/100)=5.6\text{dB}; (64\text{QAM})$$

$$10\log(\text{SNR3})=-2.9\text{dB}+10\log(277.2/100)=1.5\text{dB}; (16\text{QAM})$$

$$10\log(\text{SNR4})=-5.4\text{dB}+10\log(92.4/100)=-5.7\text{dB}; (4\text{QAM})$$

$$10\log(S)=10\log(\text{SNR})+10\log(P_n);$$

$$10\log(S1)=10.2-86.0=-75.8\text{dBm}; (256\text{QAM});$$

$$10\log(S2)=5.6-86.0=-80.4\text{dBm}; (64\text{QAM});$$

$$10\log(S3)=1.5-86.0=-84.5\text{dBm}; (16\text{QAM});$$

$$10\log(S4)=-5.7-86.0=-91.7\text{dBm}; (4\text{QAM});$$

Calculo do raio de cobertura no cenário genérico;

$$L_{\text{path}}=\text{EIRP}_{\text{TX}}+\text{Grx}-\text{Lrx}-\text{Mf}-10\log(S); L_{\text{path}}=44+2-0-13-10\log(S)=33-10\log(S);$$

$$L_{\text{path1}}=33+75.8=108.8\text{dB};$$

$$L_{\text{path2}}=33+80.4=113.4\text{dB};$$

$$L_{\text{path3}}=33+84.5=117.5\text{dB};$$

$$L_{\text{path4}}=33+91.7=124.7\text{dB};$$

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

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path1}} \Rightarrow R1=10^{(108.8-43.6)/32}=109.0\text{m} (256\text{QAM})$$

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path2}} \Rightarrow R2=10^{(113.4-43.6)/32}=151.8\text{m} (64\text{QAM})$$

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path3}} \Rightarrow R3=10^{(117.5-43.6)/32}=203.9\text{m} (16\text{QAM})$$

$$L_{\text{path}}=L_{\text{path4}} \Rightarrow R4=10^{(124.7-43.6)/32}=342.3\text{m} (4\text{QAM})$$

Vamos analisar a capacidade do mMIMO neste cenário hipotético com $M/K=18$ antenas/utente.

$T_c=25\text{ms}$; $B_c=4\text{MHz}$; $\tau_c=B_c T_c=2.5 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^6=10^5=100000$ (nº máximo de símbolos para transmitir no canal com mMIMO)

$$M=576; K=32; M/K=18 \text{ (antenas/pedestre)}; \tau_p=K=32 \Rightarrow \tau_c-\tau_p=100000-32 \Rightarrow$$

No DL transmite-se em cada T_c , $N_s=50000$ símbolos;

No UL transmite-se em cada T_c , $N_s=50000-32$ símbolos.

A taxa de símbolos no DL é $R_s=N_s/T_c=5 \times 10^4/2.5 \times 10^{-2}=0.2 \times 10^7 \text{sps}$ em cada B_c .

-Caso da Numerologia 1

$$B_t=100\text{MHz} \Rightarrow R_{st} = B_t/B_c \times R_s = 100/4 \times 0.2 \times 10^7 = 5 \times 10^7 \text{ sps.}$$

$$\text{Na zona 1 com } R_c = 7/8 \text{ (256QAM)} \Rightarrow R_{st1} = 5 \times 10^7 \times 7/8 \text{ sps. } A_1 = \pi \times 109.0^2; A_1/AT=10.1\%$$

$$\text{Na zona 2 com } R_c = 5/6 \text{ (64QAM)} \Rightarrow R_{st2} = 5 \times 10^7 \times 5/6 \text{ sps. } A_2 = \pi \times (151.8^2 - 109.0^2); A_2/AT=9.5\%$$

$$\text{Na zona 3 com } R_c = 3/4 \text{ (16QAM)} \Rightarrow R_{st3} = 5 \times 10^7 \times 3/4 \text{ sps. } A_3 = \pi \times (203.9^2 - 151.8^2); A_3/AT=14.9\%$$

$$\text{Na zona 4 com } R_c = 1/2 \text{ (4QAM)} \Rightarrow R_{st4} = 5 \times 10^7 \times 1/2 \text{ sps. } A_4 = \pi \times (342.3^2 - 203.9^2); A_4/AT=64.5\%$$

$$\text{Em cada setor da célula há } K=32 \text{ pedestres/setor} \Rightarrow R_{sc} = R_{st} \times K$$

$$\text{Zona 1 } R_{sc1} = 32 \times 5 \times 10^7 \times 7/8 \times (A_1/AT) \text{ sps} \Rightarrow R_{bc1} = 113.12 \times 10^7 \text{ bps; (8bits/simbolo)}$$

$$\text{Zona 2 } R_{sc2} = 32 \times 5 \times 10^7 \times 5/6 \times (A_2/AT) \text{ sps} \Rightarrow R_{bc2} = 76.0 \times 10^7 \text{ bps; (6bits/simbolo)}$$

$$\text{Zona 3 } R_{sc3} = 32 \times 5 \times 10^7 \times 3/4 \times (A_3/AT) \text{ sps} \Rightarrow R_{bc3} = 71.52 \times 10^7 \text{ bps; (4bits/simbolo)}$$

$$\text{Zona 4 } R_{sc4} = 32 \times 5 \times 10^7 \times 1/2 \times (A_4/AT) \text{ sps} \Rightarrow R_{bc4} = 103.2 \times 10^7 \text{ bps; (2bits/simbolo)}$$

$$\text{Somatório dos ritmos binários nas 4 zonas; } R_{bc} = R_{bc1} + R_{bc2} + R_{bc3} + R_{bc4} = 363.84 \times 10^7 \text{ bps}$$

$$\epsilon = R_{bc}/B_t = 363.84 \times 10^7 / 10^8 = 36.384 \text{ bps/Hz} \Rightarrow \epsilon = 36.384 \text{ bps/Hz/sector}$$

$$\epsilon/K = 1.137 \text{ bps/Hz/pedestre}$$

Considerando que há 33 setores (11 BS) no cenário hipotético dá um *Throughput* total = 120.1 Gbps

Para fazer uma comparação mais justa entre os dois casos de $M/K=[18,9]$ deve-se considerar a área total onde se recebe os dados. No caso de $M/K=18$ a área total AT é maior $(342.3/271.9)^2=1.585$ maior do que no caso $M/K=9$. Pelo que se deve multiplicar este valor do *throughput* total inicialmente obtido. Isto é:

$$\text{Throughput total} = 120.1 \times 1.585 = 190.4 \text{ Gbps.}$$