



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Planeamento de uma Rede 5G no Passeio Marítimo de Algés

Francisco Gonçalves Faia Branquinho

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,
Iscte – Instituto Universitário de Lisboa

Outubro, 2025



TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Planeamento de uma Rede 5G no Passeio Marítimo de Algés

Francisco Gonçalves Faia Branquinho

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,
Iscte – Instituto Universitário de Lisboa

Outubro, 2025

Agradecimento

Em primeiro lugar, gostaria de começar por agradecer à minha família, especialmente aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo e carinho ao longo de toda a minha vida académica.

Aos meus colegas de mestrado Ricardo, Badro, Bernardo e Pedro que se tornaram verdadeiros parceiros e amigos para a vida, agradeço pelas discussões construtivas, pelo apoio mútuo e pelas longas horas de estudo e trabalhos que tanto contribuíram para o meu crescimento, tanto pessoal como académico.

À minha namorada, agradeço pela paciência, compreensão e incentivo nos momentos mais exigentes deste processo, e por ter sido uma presença constante de apoio e motivação.

Por último, ao Professor Américo Correia, deixo o meu sincero agradecimento pela orientação, disponibilidade imediata, paciência e partilha de conhecimento ao longo de todo o desenvolvimento desta dissertação, o seu contributo foi uma peça fundamental para a concretização deste trabalho.

Resumo

A presente dissertação centra-se no planeamento estratégico e avaliação de desempenho de uma rede 5G NR (New Radio) outdoor implementada no Passeio Marítimo de Algés, através do desenvolvimento de um simulador a nível de sistema concebido para representar com precisão o comportamento da infraestrutura de comunicação em diferentes condições operacionais.

Foram considerados dois cenários distintos: um com 14 estações base e outro com 7, analisando o impacto da densidade celular na cobertura e capacidade da rede. As simulações variaram parâmetros técnicos essenciais como raio de cobertura (50, 100 e 200 metros), esquemas de modulação QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 4, 16, 64 e 256, estratégias de agrupamento de células (1C, 2C e 3C) e potência de transmissão (1W a 10W). Esta abordagem permitiu estudar o comportamento da rede sob diferentes condições de carga e requisitos de qualidade de serviço.

Foram avaliados o *throughput* agregado em função do número de utilizadores e o *throughput* por utilizador em função da potência de transmissão, realizou-se caracterização detalhada da área de cobertura e análise das distribuições cumulativas do SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) e *throughput*, permitindo apreciação crítica sobre a eficiência e robustez das diferentes configurações implementadas.

O cenário com 14 estações base apresentou *throughput* agregado superior, suportando maior número de utilizadores com distribuição mais equilibrada do tráfego. O cenário com 7 estações base revelou cobertura mais ampla, mas com degradação do *throughput* médio por utilizador, consequência da maior distância entre células e aumento da interferência intercelular.

Palavras-Chave: Planeamento de Redes 5G; Simulação a Nível de Sistema; SINR; *Throughput*; Cobertura.

Abstract

This dissertation focuses on strategic planning and performance evaluation of an outdoor 5G NR network implemented at Passeio Marítimo de Algés, through the development of a system-level simulator designed to accurately represent communication infrastructure behavior under different operational conditions.

Two distinct scenarios were considered: one with 14 base stations and another with 7, analyzing the impact of cell density on network coverage and capacity. Simulations varied essential technical parameters such as coverage radius (50, 100, and 200 meters), modulation schemes (4QAM, 16QAM, 64QAM, and 256QAM), cell clustering strategies (1C, 2C, and 3C), and transmission power (1W to 10W). This approach enabled studying network behavior under different load conditions and quality of service requirements.

Aggregate *throughput* as a function of user number and per-user *throughput* as a function of transmission power were evaluated, detailed coverage area characterization and analysis of SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) and *throughput* cumulative distributions were performed, enabling critical assessment of efficiency and robustness of different implemented configurations.

The 14 base station scenario presented superior aggregate throughput, supporting a greater number of users with more balanced traffic distribution. The 7 base station scenario revealed broader coverage but with degraded average per-user throughput, consequence of greater inter-cell distances and increased intercellular interference.

Keywords: 5G Network Planning; System-Level Simulation; SINR; Throughput; Coverage.

Índice

AGRADECIMENTO	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
GLOSSÁRIO DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XIII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Enquadramento e Motivação</i>	1
1.2 <i>Questões de investigação</i>	2
1.3 <i>Objetivos</i>	2
1.4 <i>Método de Investigação</i>	2
CAPÍTULO 2.....	5
REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 <i>Evolução das Redes Móveis</i>	5
2.1.1 Evolução das Redes Móveis (1G a 5G)	5
2.1.2 Principais Características do 5G	6
2.1.3 Desafios da Implementação do 5G	9
2.2 <i>Arquitetura das Redes 5G</i>	10
2.2.1 Modos de Implementação do 5G	11
2.2.1.1 Standalone (SA)	12
2.2.1.2 Non-Standalone (NSA)	12
2.3 <i>Tecnologias Fundamentais do 5G</i>	13
2.3.1 Massive MIMO	13
2.3.2 Beamforming	14
2.3.3 Ondas Milimétricas (mmWave) e Small Cells	15
2.3.4 Fatiamento de Rede (Network Slicing)	15
2.3.5 Computação em Borda (Edge Computing)	16
2.3.6 Segurança e Privacidade no 5G	16
2.4 <i>Redes 5G Privadas</i>	17
2.4.1 Modos de Implementação	17
2.4.1.1 Standalone Non-Public Network (SNPN)	17
2.4.1.2 Public Network Integrated Non-Public Network (PNI-NPN)	18
CAPÍTULO 3.....	19
IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR DE SISTEMA	19
3.1 <i>Descrição do simulador de sistema</i>	19
3.2 <i>Cenários de Implementação</i>	22
CAPÍTULO 4.....	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO	25

<i>4.1 Resultados Teóricos</i>	25
<i>4.2 Resultados das Simulações.....</i>	25
<i>4.2.1 Resultados de Throughput.....</i>	26
<i>4.2.1.1 Throughput vs Number of users</i>	26
<i>4.2.1.2 Throughput/user vs Power (W)</i>	34
<i>4.2.2 Resultados de Cobertura</i>	39
<i>4.2.3 Resultados de CDF do SINR vs SINR</i>	42
<i>4.2.4 Resultados de CDF Throughput vs Throughput</i>	46
CAPÍTULO 5.....	50
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	50
<i>5.1 Conclusões</i>	50
<i>5.2 Trabalhos Futuros.....</i>	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS	56
ANEXO A.....	56

Índice de figuras

FIGURA 1.1 - MODELO DSR UTILIZADO, ADAPTADA DE [8].....	3
FIGURA 2.1 – 3 PRINCIPAIS CASOS DE USO 5G	7
FIGURA 2.2 - ARQUITETURA 5G [12]	11
FIGURA 2.3 - REDE 5G NSA VS SA	12
FIGURA 2.4 - BEAMFORMING EM 4G VS 5G [13]	15
FIGURA 2.5 - FUNCIONAMENTO DE UMA STANDALONE NON-PUBLIC NETWORK (SNPN)	17
FIGURA 2.6 - PUBLIC NETWORK INTEGRATED NON-PUBLIC NETWORK (PNI-NPN)	18
FIGURA 3.1 - EXEMPLO DA LIGAÇÃO ENTRE SIMULADORES.....	20
FIGURA 3.2 - EXEMPLO DE RESULTADOS DO SIMULADOR DE LIGAÇÃO	21
FIGURA 3.3 - VISÃO GERAL DO SIMULADOR DE SISTEMA	22
FIGURA 3.4 - CENÁRIO COM 7 BS	23
FIGURA 3.5 - CENÁRIO COM 14 BS	23
FIGURA 4.1 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 1, NTX=9, RAIO=50M	27
FIGURA 4.2 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 2, NTX=9, RAIO=100M	27
FIGURA 4.3 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 3, NTX=9, RAIO=200M	28
FIGURA 4.4 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 4, NTX=9, RAIO=100M, Pt=10W	28
FIGURA 4.5 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 5, NTX=18, RAIO=100M	30
FIGURA 4.6 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 6, NTX=18, RAIO=200M	31
FIGURA 4.7 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 7, NTX=9, RAIO=100M	32
FIGURA 4.8 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 8, NTX=9, RAIO=200M	33
FIGURA 4.9 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 9, NTX=18, RAIO=100M	33
FIGURA 4.10 - THROUGHPUT VS NUMBER OF USERS – SIMULAÇÃO 10, NTX=18, RAIO=200M	34
FIGURA 4.11 - THROUGHPUT VS POWER (W) – SIMULAÇÃO 2, 1W, RAIO=100M	35
FIGURA 4.12 - THROUGHPUT VS POWER (W) – SIMULAÇÃO 4-10W, RAIO=100M	36
FIGURA 4.13 - THROUGHPUT VS POWER (W) – SIMULAÇÃO 9-1W, RAIO=100M.	37
FIGURA 4.14 - THROUGHPUT VS Nu COM NTX=9 E NTX=18, 14 BSs, RAIO=200M.....	38
FIGURA 4.15 - COVERAGE VS POWER (W) – SIMULAÇÃO 2-1W, RAIO=100M.....	40
FIGURA 4.16 - COVERAGE VS POWER (W) – SIMULAÇÃO 4-10W, RAIO=100M.....	41
FIGURA 4.17 - COVERAGE VS POWER (W) – SIMULAÇÃO 9-1W, RAIO=100M	42
FIGURA 4.18 - CDF OF SINR VS SINR – SIMULAÇÃO 1	43
FIGURA 4.19 - CDF OF SINR VS SINR – SIMULAÇÃO 2	44
FIGURA 4.20 - CDF OF SINR VS SINR – SIMULAÇÃO 4	45
FIGURA 4.21 - CDF OF SINR VS SINR – SIMULAÇÃO 7	45
FIGURA 4.22 - CDF OF SINR VS SINR – SIMULAÇÃO 8	46
FIGURA 4.23 - CDF OF THROUGHPUT VS THROUGHPUT – SIMULAÇÃO 1.....	47
FIGURA 4.24 - CDF OF THROUGHPUT VS THROUGHPUT – SIMULAÇÃO 2.....	47
FIGURA 4.25 - CDF OF THROUGHPUT VS THROUGHPUT – SIMULAÇÃO 5.....	48
FIGURA 4.26 - CDF OF THROUGHPUT VS THROUGHPUT – SIMULAÇÃO 6.....	49

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 - CARACTERISTICAS PRINCIPAIS DO 5G	9
TABELA 3.1 - VALORES DAS SIMULAÇÕES.....	19

Glossário de Siglas e Abreviaturas

- 1G – Primeira Geração
2G – Segunda Geração
3G – Terceira Geração
3GPP – Third Generation Partnership Project
4G – Quarta Geração
5G – Quinta Geração
AR – Realidade Aumentada
BS – Base Station
C-RAN – Centralized Radio Access Network
CUPS – Control Plane – User Plane Separation
D2D – Device-to-Device
DL – Downlink
DSRM - Design Science Research Methodology
gNB – generation NodeB ou next generation NodeB
IoT – Internet of Things
ITU – International Telecommunication Union
LTE – Long Term Evolution
MIMO – Multiple-Input-Multiple-Output
M-MIMO – Massive MIMO
mMTC – massive Machine Type Communications
mmWave – millimeter Wave
NFV – Network Function Virtualization
NPN – Non-Public Networks
NR – New Radio
NSA – Non-Standalone
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QoS – Quality of Service
RAN – Radio Access Network
SBA – Service-Based Architecture
SDN – Software Defined Networks
SA – Standalone
SNPN – Standalone Non-Public Network
SNR – Signal-to-Noise Ratio

UE – User Equipment

UL – Uplink

UPF – User Plane Function

URLLC – Ultra-Reliable Low Latency Communications

VR – Realidade virtual

CAPÍTULO 1

Introdução

Este capítulo consiste numa breve descrição do tema da dissertação apresentando os objetivos, motivação, enquadramento e respetivas questões de investigação. Aqui é também definido e detalhado todo o processo de investigação, empregue na realização do presente trabalho de dissertação.

1.1 Enquadramento e Motivação

A evolução das comunicações móveis tem sido um dos pilares do progresso tecnológico das últimas décadas, desde os sistemas analógicos de primeira geração, focalizados exclusivamente na transmissão de voz, até aos atuais sistemas de quinta geração, cada avanço tecnológico introduziu novas possibilidades de interconexão entre indivíduos, equipamentos e aplicações.

A tecnologia Quinta Geração (5G) representa um marco evolutivo significativo, projetada para atender às exigências crescentes de conectividade numa sociedade progressivamente digitalizada, onde os sistemas precedentes, particularmente a Quarta Geração (4G), evidenciavam constrangimentos operacionais, nomeadamente na gestão eficiente de elevadas concentrações de dispositivos conectados, especialmente em contextos urbanos de alta densidade populacional ou durante eventos de grande afluência, como eventos culturais ou competições desportivas de larga escala [1].

A arquitetura 5G foi desenvolvida para disponibilizar velocidades de transmissão superiores, latência minimizada e capacidade de suporte a volumes massivos de dispositivos, possibilitando aplicações diversificadas que se estendem desde ecossistemas internet das coisas (IoT) até implementações de cidades inteligentes e sistemas de mobilidade autónoma [5].

No contexto nacional, a tecnologia 5G tem assumido relevância crescente como elemento estratégico na digitalização do país. Em maio de 2021, realizou-se a primeira intervenção cirúrgica oncológica mamária assistida por tecnologia 5G na Fundação Champalimaud. Numa vertente distinta, a iniciativa "Banana Sensing" na Região Autónoma da Madeira demonstra a aplicabilidade do 5G no setor agrícola, onde sensores implementados em cultivos de banana monitorizam parâmetros ambientais e edáficos, transmitindo informação em tempo real através da infraestrutura 5G.

O Passeio Marítimo de Algés, regularmente utilizado para eventos musicais e manifestações de grande dimensão, apresenta-se como um ambiente adequado e desafiante para investigar o comportamento operacional de redes 5G em contextos exteriores. A flutuação na densidade populacional, as interferências inter-celulares e as condicionantes espaciais conferem a este local características ideais para estudos de planeamento de rede.

Consequentemente, o presente trabalho surge da necessidade de avaliar o desempenho e otimizar as configurações de redes 5G NR em ambientes exteriores de elevada carga, recorrendo a metodologias de simulação e análise comparativa.

1.2 Questões de investigação

Este estudo pretende responder às seguintes questões de investigação:

- Com tecnologias *beamforming* e *massive MIMO* podem ser utilizadas para melhorar a experiência do utilizador em eventos com milhares de participantes?
- De que forma, a alteração do raio das estações base influenciam o desempenho do *throughput* e o *SINR* da rede 5G estudada?

1.3 Objetivos

A realização deste trabalho tem como objetivo o planeamento estratégico de uma rede 5G NR para o Passeio Marítimo de Algés, tendo em especial atenção a avaliação do desempenho do sistema em termos de cobertura e capacidade de transmissão de dados (*throughput*). Verificar como o recurso *massive MIMO* permite a disponibilização de recursos de rádio para milhares de utilizadores em eventos de grande escala.

Para tal, será implementado um simulador em Java, considerando todos os aspetos definidos pela 3rd Generation Partnership Project (3GPP) para produção de resultados, que serão analisados e discutidos, com vista a fornecer recomendações, possíveis compromissos e estratégias de otimização.

1.4 Método de Investigação

Esta dissertação adota a metodologia de pesquisa em *Design Science* (DSRM), tal como se encontra representado na Figura 1.1, nesta perspetiva, este método é composto por seis etapas distintas, tal como se encontra descrito abaixo.

1^a Etapa– Identificação e motivação do problema de análise que se encontra na secção 1.1 Enquadramento e Motivação.

2ª Etapa – Identificar e definir os objetivos da solução. Esta etapa remete para o desenvolvimento anteriormente apresentado na secção 1.3. Foram identificados e analisados os objetivos do presente trabalho, com vista a determinar as tecnologias, metodologias e plataformas mais adequadas à sua implementação.

3ª Etapa – Desenvolvimento do sistema, tendo como base os objetivos definidos na etapa anterior, esta etapa é onde se realiza o planeamento e desenvolvimento da solução, que neste contexto é obtido por meio da implementação de um simulador JAVA para o planeamento da rede 5G.

4ª Etapa – Implementação e análise do desempenho do sistema, corresponde à execução e verificação do sistema desenvolvido. Onde é feito uma análise rigorosa de desempenho com base nos testes feitos ao simulador, é possível determinar se o desempenho dele está de acordo com o pretendido, caso contrário, deverão efetuar-se alterações para atingir o resultado esperado.

5ª Etapa – Testes e avaliação do sistema, diferente da fase anterior que se foca no funcionamento técnico do simulador. Esta etapa envolve uma avaliação mais abrangente, onde o sistema é testado em diversos cenários para que se possa verificar se cumpre os objetivos e expectativas definidos.

6ª Etapa – Comunicação e Divulgação dos Resultados, com base em todas as etapas anteriores, desde a identificação do problema, passando pelos objetivos desenvolvimento e testes, aqui é elaborado o trabalho final da dissertação, os resultados alcançados e as conclusões retiradas do estudo.

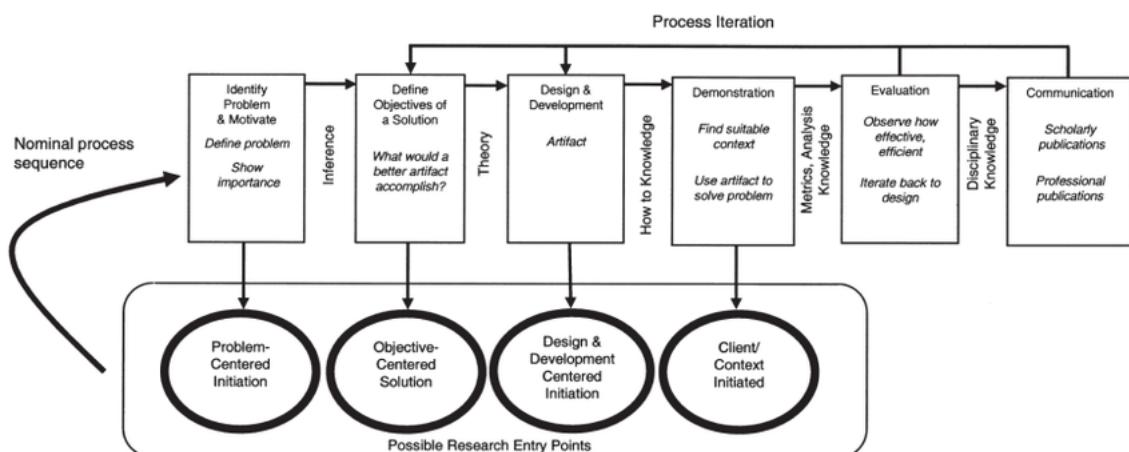


Figura 1.1 - Modelo DSR utilizado, adaptada de [8].

Através do esquema apresentado, verifica-se que o modelo adotado constitui um processo iterativo, possibilitando o retorno a etapas precedentes sempre que necessário. Esta flexibilidade permite a correção de eventuais falhas identificadas durante o desenvolvimento, assegurando o cumprimento eficaz dos objetivos propostos.

CAPÍTULO 2

Revisão da Literatura

2.1 Evolução das Redes Móveis

2.1.1 Evolução das Redes Móveis (1G a 5G)

A evolução das redes móveis, caracterizada por sucessivas gerações tecnológicas, reflete não apenas progressos em engenharia e ciência da computação, mas também transformações profundas nos domínios social, económico e cultural. Cada nova geração de rede ampliou a capacidade de comunicação interpessoal e redefiniu paradigmas de conectividade, mobilidade e acesso à informação à escala global. Este processo promoveu uma revolução nos modos de vida, trabalho e interação social, simultaneamente impondo desafios regulatórios, exigindo adaptações infraestruturais e fomentando o surgimento de novos mercados e modelos de negócio.

A Primeira Geração (1G), surgida nos anos 1980, foi caracterizada por sistemas analógicos como o AMPS nos Estados Unidos e o NMT na Europa, apesar de inaugarem a era da comunicação móvel, apresentavam limitações severas em termos de qualidade de sinal, segurança, interoperabilidade internacional e, sobretudo, ausência de suporte para qualquer tipo de transmissão de dados. Restringindo-se à voz, o que, à época, já representava uma revolução, mas rapidamente se mostrou insuficiente diante das crescentes necessidades da sociedade moderna por mobilidade e flexibilidade, sendo também marcada por uma regulação incipiente e por desafios logísticos na expansão da cobertura, especialmente em regiões rurais e periféricas [1].

A Segunda Geração (2G), implementada nos anos 1990, introduziu a digitalização das comunicações móveis, com o GSM consolidando-se como padrão global. Permitiu não apenas melhorias substanciais na qualidade da voz e na eficiência espectral, mas também a introdução de serviços inovadores como o SMS e o acesso a dados em baixa velocidade, o que abriu caminho para a popularização de novos modelos de negócios, como a comunicação assíncrona e os primeiros serviços de internet móvel, ainda que de forma bastante limitada [1],[2].

A Terceira Geração (3G), lançada nos anos 2000, respondeu à crescente necessidade por conectividade de dados, impulsionada pela massificação da internet e pela emergência de dispositivos móveis multifuncionais, como smartphones e tablets. Foram implementadas tecnologias como o UMTS na Europa e o CDMA2000 na América do Norte, que permitiram velocidades de transmissão significativamente superiores, viabilizando aplicações multimédia, chamadas de vídeo, navegação web e o surgimento de ecossistemas de aplicativos móveis, ao mesmo tempo em que impuseram desafios de interoperabilidade [1],[2].

A Quarta Geração (4G), consolidada a partir do ano de 2010, representou a transição definitiva para redes totalmente baseadas em IP, com o LTE e o LTE-Advanced a proporcionarem velocidades de até 1 Gbit/s, latências reduzidas e suporte aprimorado para aplicações em tempo real, como transmissão de vídeo em alta-definição, jogos online e conectividade para dispositivos IoT. Promovendo, assim, a convergência entre telecomunicações e tecnologia da informação, enquanto ampliou os desafios relacionados com a segurança cibernética, a gestão de grandes volumes de dados e a necessidade de atualização constante das infraestruturas de rede. [2]

A Quinta Geração (5G) foi desenvolvida para oferecer uma arquitetura unificada e escalável, capaz de suportar casos de uso muito distintos, desde comunicações massivas de IoT até aplicações críticas de baixa latência [10]. A sua implementação intensificou-se a partir de 2019 e representa não apenas um salto tecnológico, mas uma mudança de paradigma, ao oferecer velocidades médias por utilizador de até 20 Gbit/s, latências inferiores a 1 ms e suporte massivo para dispositivos conectados simultaneamente. Esta tecnologia introduziu conceitos inovadores como *network slicing*, Massive MIMO e comunicações em ondas milimétricas (mmWave), tornando possíveis aplicações disruptivas como realidade aumentada, cidades inteligentes, veículos autónomos, automação industrial e telemedicina. Simultaneamente, o 5G impõe desafios inéditos em termos de densificação de infraestrutura, eficiência energética, segurança, privacidade e regulação, exigindo uma abordagem colaborativa entre governos, indústria e academia para garantir a plena realização do seu potencial transformador, bem como a inclusão digital e a sustentabilidade do ecossistema de comunicações móveis [2],[6].

2.1.2 Principais Características do 5G

O 5G traz avanços significativos em relação às gerações anteriores, oferecendo velocidades até 20 Gbit/s, possibilitando downloads instantâneos, *streaming* de vídeo em alta qualidade e experiências imersivas em Realidade Virtual (VR) e Aumentada (AR).

O crescimento exponencial de aplicações tecnológicas, como IoT, D2D, M2M e *streaming* de vídeo, impõe à infraestrutura de rede requisitos cada vez mais exigentes, nomeadamente a necessidade de latências extremamente baixas e velocidades de transmissão de dados elevadas. Estes novos paradigmas de utilização tornam imprescindível a implementação de capacidades de rede avançadas, capazes de responder de forma eficiente e fiável às crescentes expectativas dos utilizadores e às exigências dos serviços críticos.

O 5G, ao suportar até um milhão de dispositivos por quilómetro quadrado, revela-se fundamental para a concretização de cenários como cidades inteligentes e a proliferação massiva de dispositivos IoT, assegurando não só a escalabilidade, mas também a robustez e a qualidade das ligações. Para além disso, a sua eficiência espectral otimizada contribui para a redução de interferências e para a melhoria global da experiência de utilização, promovendo uma conectividade mais estável e de maior qualidade em ambientes densamente povoados ou tecnologicamente avançados [1],[2].

A rede 5G foi concebida tendo em conta três principais casos de uso, cada um projetado para atender a diferentes necessidades de conectividade e desempenho, estes representam os pilares fundamentais do 5G, permitindo novas aplicações e avanços tecnológicos, conforme definido pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) [2].

Na Figura 2.1 é possível observar os três principais casos de uso do 5G: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) e Massive Machine Type Communications (mMTC). Representados num diagrama triangular, onde as interligações demonstram a complementaridade entre estes cenários e a capacidade do 5G de suportar simultaneamente diferentes requisitos de desempenho.

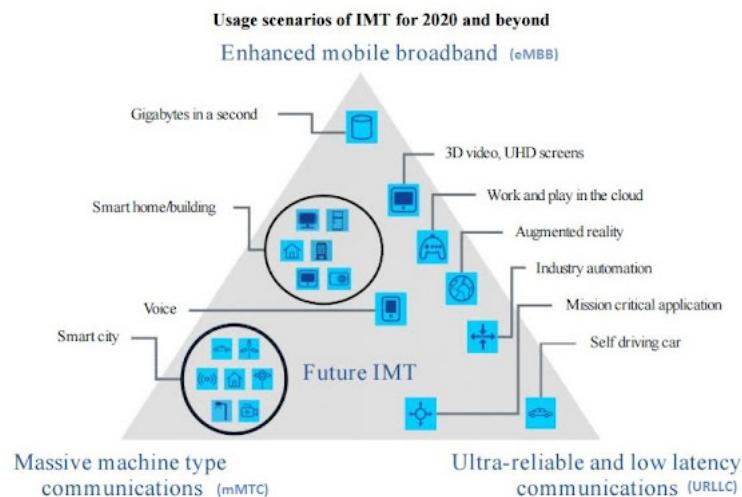


Figura 2.1 – 3 principais casos de uso 5G

O **eMBB** (*Enhanced Mobile Broadband*) constitui um dos pilares fundamentais dos serviços 5G, representando a evolução natural da banda larga móvel introduzida pelo 4G *LTE-Advanced*. O principal objetivo do eMBB é proporcionar taxas de dados significativamente superiores, assegurando uma vasta área de cobertura e mantendo elevados níveis de desempenho mesmo em cenários de alta mobilidade, suportando velocidades que podem variar entre 5 e 20 Gbit/s. Segundo a 3GPP (3rd Generation Partnership Project), considera-se alta mobilidade quando utilizadores ou dispositivos se deslocam a velocidades até 500 km/h, o que exige que a rede mantenha a conectividade sem degradação significativa do desempenho.

Neste contexto, o eMBB foi concebido para responder a serviços e aplicações com requisitos particularmente exigentes, como a transmissão de vídeo em ultra alta definição (4K/8K), atualizações remotas de software (OTA), jogos online e aplicações de Realidade Virtual e Realidade Aumentada, tornando estas experiências mais acessíveis e imersivas graças à baixa latência proporcionada.

Em ambientes como eventos desportivos, festivais ou grandes conferências, onde o congestionamento de rede é frequente, o eMBB garante uma conectividade estável e rápida, permitindo transmissões em direto, chamadas de vídeo e partilha de conteúdos nas redes sociais sem interrupções, contribuindo assim para uma experiência de utilizador superior e para a democratização do acesso a serviços digitais avançados. [2]

O **URLLC** (*Ultra-Reliable and Low Latency Communications*) representa um dos casos de uso mais inovadores e disruptivos do 5G, tendo sido especificamente concebido para aplicações de missão crítica que exigem níveis de fiabilidade extremamente elevados (superiores a 99,999%) e latências extremamente baixas (inferiores a 1 ms). Este tipo de comunicação é fundamental em sistemas onde qualquer atraso ou falha pode ter consequências graves, sendo, por isso, indispensável em contextos que não admitem margem para erro.

Um exemplo paradigmático da aplicação do URLLC é a cirurgia robótica remota, onde cirurgiões podem operar pacientes à distância com precisão milimétrica, beneficiando de uma latência mínima que permite intervenções em tempo real, mesmo em locais remotos, sem necessidade de deslocação física dos profissionais de saúde. Outro exemplo relevante encontra-se nos veículos autónomos, que dependem de comunicações instantâneas e ultrafáiveis para interagir entre si (V2V - *Vehicle to Vehicle*), com a infraestrutura urbana (V2I - *Vehicle to Infrastructure*) e com peões (V2P - *Vehicle to Pedestrian*), garantindo assim a segurança e a eficiência do tráfego rodoviário.

No setor industrial, o URLLC é igualmente determinante para a evolução das fábricas inteligentes, permitindo a sincronização precisa de robôs, sensores e sistemas de produção. Desta forma, contribui para o aumento da eficiência, da produtividade e da segurança operacional, viabilizando processos industriais cada vez mais automatizados e interligados [3].

mMTC (Massive Machine-Type Communications) é essencial para a digitalização da sociedade, permitindo conectividade eficiente e sustentável para dispositivos IoT em grande escala no 5G. O seu objetivo principal consiste em permitir a conectividade massiva de dispositivos IoT (Internet of Things), garantindo a comunicação eficiente de até 1 milhão de dispositivos por km², ideal para cidades inteligentes e redes IoT industriais devido ao baixo consumo de energia e uso eficiente do espetro de rádio. Os cenários de uso abrangem maioritariamente aplicações IoT como infraestruturas urbanas inteligentes onde sensores de tráfego otimizam o fluxo de veículos e luzes públicas inteligentes que ajustam a iluminação conforme a presença de pessoas [1].

Tabela 2.1 - Características principais do 5G

Características	eMBB	URLLC	mMTC
Velocidade de dados	Alta (Gbit/s, até 10 Gbit/s)	Média (Mbps - Gbit/s)	Baixa (Kbps)
Latência	<10 ms	<1ms	>1 s
Fiabilidade	Média	Muito Alta	Média
Número de dispositivos suportados	Moderado	Baixo	Muito Elevado
Consumo de energia	Elevado	Médio	Muito baixo
Mobilidade	Alta (até 500 km/h)	Alta(veículos autónomos)	Baixa (sensores IoT estáticos)

2.1.3 Desafios da Implementação do 5G

A implementação do 5G enfrenta desafios complexos que envolvem infraestrutura, regulação, segurança e compatibilidade de dispositivos, apesar do seu potencial transformador, a adoção global do 5G requer investimentos elevados, avanços tecnológicos e adaptação dos sistemas existentes.

Esta infraestrutura, contrariamente ao método de funcionamento da rede 4G LTE, que opera principalmente em frequências abaixo de 3 GHz, introduz uma série de novas bandas de espetro, incluindo as ondas milimétricas (mmWave, acima de 24 GHz), que oferecem maior largura de banda, permitindo transmissões a velocidades superiores, tecnologia que será explicada no ponto 2.4.2.

No entanto, estas frequências possuem um alcance reduzido e menor penetração em edifícios e obstáculos, exigindo uma rede mais densa de antenas para garantir cobertura e qualidade de serviço, o que faz com que os custos associados a esta implementação se tornem um entrave, especialmente em zonas rurais e pouco povoadas [6].

Para superar as limitações da propagação do sinal nas frequências do 5G, é essencial uma densificação massiva da rede. Isto é, ao invés de depender apenas de macro antenas tradicionais (grandes torres de telecomunicações que cobrem vastas áreas) que têm um consumo energético elevado, o 5G utiliza *Small Cells*. Estas são pequenas estações base de baixa potência estrategicamente distribuídas para melhorar a cobertura e aumentar a capacidade da rede. Outro dos desafios do 5G relaciona-se com a eficiência energética de todo o sistema.

Apesar de todos os componentes serem mais eficientes, com o crescimento exponencial de antenas e tráfego de dados, o 5G consome mais energia do que as gerações anteriores, exigindo soluções inovadoras no âmbito da eficiência energética.

Em termos de segurança e privacidade, a interoperabilidade e integração com as redes existentes constituiu também um grande desafio para a implementação desta nova rede. No caso das redes híbridas NSA (*Non-standalone*), tecnologia que será explicada no ponto 2.2.4.2, a rede 5G coexiste com a infraestrutura 4G LTE existente e muitos dispositivos móveis e IoT ainda dependem de 4G LTE e não possuem suporte para 5G, exigindo que a infraestrutura seja híbrida por um longo período [9].

2.2 Arquitetura das Redes 5G

A arquitetura das redes 5G foi projetada para superar os desafios das gerações anteriores, oferecendo baixa latência, alta conectividade e maior eficiência operacional. Embora ainda compatível com 4G LTE e Wi-Fi, o 5G foi redesenhado para ser mais flexível e escalável, adaptando-se a diferentes cenários de uso.

Esta tecnologia baseia-se na virtualização de funções de rede (NFV) e redes definidas por software (SDN), permitindo uma gestão dinâmica dos recursos e segmentação eficiente da rede. Esta separação entre plano de utilizador e plano de controlo (CUPS), combinada com *Network Slicing*, possibilita deste modo personalizar a infraestrutura de rede para aplicações específicas, otimizando desempenho e escalabilidade conforme as exigências dos utilizadores.

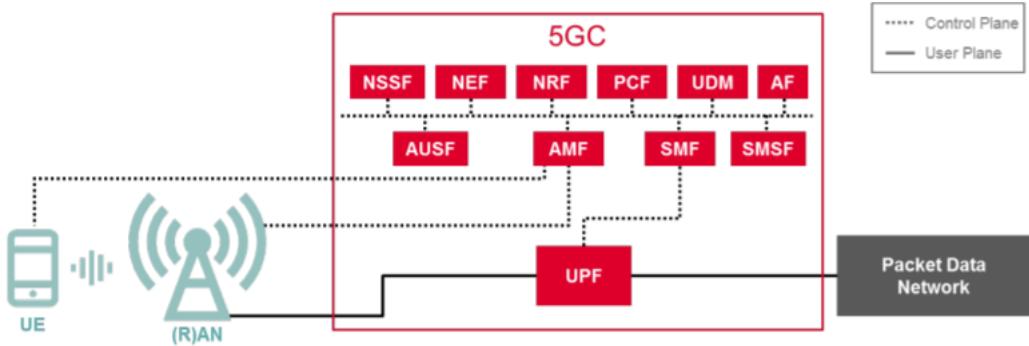


Figura 2.2 - Arquitetura 5G [12]

Rede 5GC - a rede core 5G

Isto permite que, à medida que o tráfego aumenta, o sistema consiga escalar de uma maneira mais eficiente, porque permite a evolução independente do Control Plane e do User Plane, que, sendo escalados separadamente, garantem mais eficiência e flexibilidade na operação e atualização da rede 5G [12].

Rede RAN - Radio Access Network

É um dos principais componentes da arquitetura do 5G, responsável pela ligação dos dispositivos móveis à rede de telecomunicações. O 5G RAN adota uma arquitetura modular e flexível, tendo sido projetado para oferecer maior eficiência espectral, menor latência e maior capacidade de transmissão de dados, diferenciando-se das gerações anteriores. O RAN é composto por estações base distribuídas (gNBs), que comunicam com os dispositivos móveis através do 5G New Radio (NR) e transmitem dados para a rede core (5GC) [3], [12].

2.2.1 Modos de Implementação do 5G

Dentro da arquitetura modular e virtualizada, o 5G pode ser implementado em dois modos distintos, dependendo da estratégia e dos requisitos operacionais de cada organização:

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

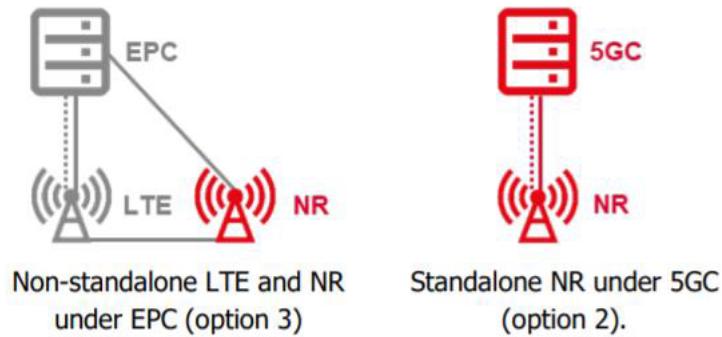


Figura 2.3 - Rede 5G NSA vs SA

2.2.1.1 Standalone (SA)

O modelo *Standalone* (SA) refere-se à implementação do 5G de forma totalmente independente, com infraestrutura própria, incluindo a Rede de Acesso Rádio (RAN) e o núcleo de rede (5GC – 5G Core). Esta abordagem permite controlo total sobre a operação, segurança e políticas de qualidade de serviço (QoS). A arquitetura é baseada na *Service-Based Architecture* (SBA), onde todas as funções da rede são virtualizadas e executadas em *cloud computing*, permitindo suporte total a *network slicing* e facilitando a criação de redes lógicas dedicadas a serviços específicos como IoT massivo, comunicações ultrarrápidas e veículos autónomos.

A principal vantagem do modelo SA é a sua baixa latência e alta escalabilidade, melhorando a flexibilidade na gestão dos recursos da rede. No entanto, exige custos elevados e um tempo de implementação mais longo, pois requer a construção de uma nova infraestrutura, ao contrário do modelo NSA, que reutiliza a rede 4G LTE.

2.2.1.2 Non-Standalone (NSA)

O modelo 5G Non-Standalone (NSA) permite uma transição gradual para o 5G, utilizando a infraestrutura 4G existente. Neste modelo, a rede 5G NR (New Radio) é usada apenas para transmissão de dados, enquanto o núcleo 4G LTE (Evolved Packet Core - EPC) continua responsável pelo plano de controlo, incluindo autenticação e sinalização.

As vantagens do NSA incluem um custo de implementação reduzido, já que aproveita a infraestrutura LTE existente, e uma implementação mais rápida, permitindo que as operadoras ofereçam 5G de forma gradual. Além disso, proporciona melhor capacidade de rede e velocidades de até 10 Gbps, melhorando a experiência do utilizador comparativamente ao LTE puro.

No entanto, a latência no modelo NSA ainda depende do 4G, o que pode limitar aplicações que exigem tempos de resposta ultrabaixos, como veículos autónomos e cirurgias remotas. Além disso, há menos flexibilidade comparativamente ao SA, pois a rede LTE deve ser mantida para suporte ao plano de controlo.

2.3 Tecnologias Fundamentais do 5G

O 5G representa uma revolução tecnológica nas telecomunicações, incorporando diversas inovações para garantir altas velocidades, baixa latência e conectividade massiva. Diferente das gerações anteriores, o 5G não apenas melhora as redes móveis existentes, mas transforma a infraestrutura de comunicação, possibilitando aplicações como cidades inteligentes, veículos autónomos e telemedicina.

De acordo com [11], o uso de técnicas avançadas como *beamforming* e MIMO massivo é fundamental para atingir as metas de capacidade e eficiência espectral do 5G. Para alcançar esses avanços, esta tecnologia combina novos espectros de frequência, arquitetura de rede flexível e tecnologias emergentes, como ondas milimétricas (*mmWave*), *Small Cells*, *Network Slicing* e *Edge Computing*. Estas inovações permitem maior eficiência espectral, conectividade confiável e menor consumo energético, tornando o 5G essencial para o futuro das comunicações e da digitalização global.

2.3.1 Massive MIMO

O MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) tem por base o uso de múltiplas antenas tanto no transmissor quanto no receptor permitindo aumento da eficiência espectral. Ao utilizar centenas de antenas para transmitir e receber dados simultaneamente, isto melhora a cobertura, reduz a interferência e aumenta a capacidade da rede [4].

Esta tecnologia já tinha sido implementada anteriormente na rede 4G LTE, mas foi ampliada para Massive MIMO na rede 5G, permitindo que um maior número de dispositivos se conecte à rede sem degradação do desempenho [1].

O Massive MIMO é fundamental para suportar os altos desafios herdados das gerações anteriores ao nível do tráfego de dados, possibilitando que aplicações como realidade aumentada, cidades inteligentes e comunicações ultra confiáveis operem de maneira eficiente e com qualidade garantida.

A principal vantagem do M-MIMO está na sua capacidade de multiplexação espacial, que permite a transmissão simultânea de diferentes fluxos de dados em paralelo no mesmo canal de rádio, aumentando substancialmente a taxa de transmissão de dados. Isto significa que a quantidade de utilizadores na rede pode ser aumentada sem comprometer o desempenho da mesma. Esta tecnologia também melhora a robustez da conexão, reduzindo os efeitos negativos de reflexões e interferências, tornando a comunicação mais estável mesmo em ambientes urbanos densos. Além disso, permite uma maior eficiência no uso da energia, pois as transmissões podem ser ajustadas dinamicamente para direcionar a potência apenas onde for necessário, reduzindo o desperdício e otimizando a cobertura da rede [4].

Para maximizar ainda mais os benefícios desta tecnologia, o 5G utiliza a tecnologia *Beamforming*, que consiste em direcionar feixes de transmissão de sinal para os dispositivos móveis de forma precisa, em vez de espalhar o sinal de maneira uniforme em todas as direções, como era feito no passado. Assim, permite que cada utilizador receba um sinal mais forte e estável, reduzindo interferências e melhorando a eficiência espectral. O *Beamforming* trabalha de maneira integrada com o Massive MIMO, possibilitando um aumento significativo da capacidade da rede ao garantir que os sinais sejam transmitidos de forma otimizada para cada utilizador [2].

O Massive MIMO, combinado com *beamforming*, permite que o 5G NR atinja altas taxas de dados e melhore a fiabilidade da ligação. Desta forma, a combinação destas tecnologias permite que o 5G atinja velocidades de até 20 Gbps e latências inferiores a 1 ms, características fundamentais para aplicações que exigem desempenho em tempo real [2].

2.3.2 Beamforming

O *Beamforming* é uma técnica de processamento de sinal que complementa o *Massive MIMO* ao direcionar feixes de transmissão precisamente na direção dos utilizadores, ao invés de espalhar o sinal de maneira uniforme em todas as direções como acontecia nas gerações anteriores. Esta tecnologia reduz significativamente interferências e melhora a receção do sinal, garantindo maior alcance e estabilidade na comunicação. Identificando a posição do dispositivo receptor, as antenas podem ajustar dinamicamente os feixes para manter a melhor conexão possível, otimizando a eficiência da transmissão. Deste modo, torna-se essencial para redes 5G, especialmente em frequências mais altas, como as ondas milimétricas (*mmWave*), que possuem alcance reduzido e sofrem maior atenuação devido a obstáculos físicos como edifícios, árvores e até mesmo condições climáticas adversas [6], [11].

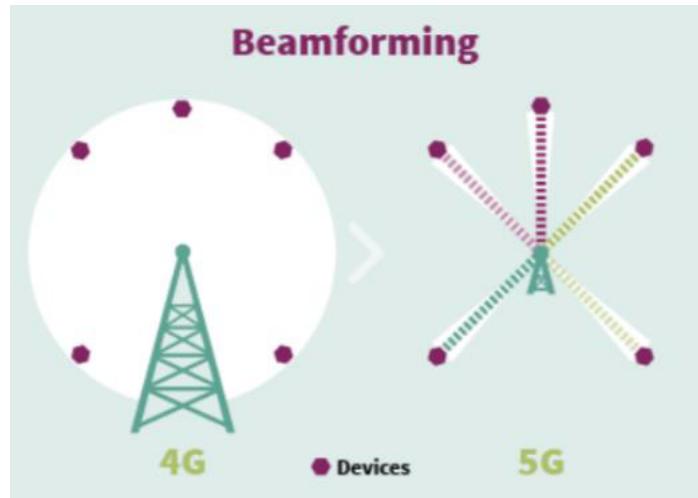


Figura 2.4 - *Beamforming* em 4G vs 5G [13]

2.3.3 Ondas Milimétricas (mmWave) e Small Cells

O 5G utiliza frequências muito altas, entre 25 GHz e 100 GHz, possibilitando altíssimas taxas de transmissão, chegando até 10 Gbps ou mais, permitindo assim uma maior capacidade de transmissão de dados. Isso ocorre porque a capacidade de transmissão de dados está diretamente relacionada à frequência da onda [6].

No entanto, quanto maior a frequência da onda, maior a degradação que sofre em função da distância que percorre. Estas ondas possuem alcance limitado e exigem infraestrutura específica para evitar estas perdas. As ondas milimétricas são também altamente suscetíveis a interferências climáticas e bloqueios físicos, como paredes e árvores, o que torna necessária a existência de small cells [5].

Uma das principais estratégias para compensar este alcance reduzido nas ondas mmWave é a implementação de Small Cells, pequenas estações base distribuídas estrategicamente em áreas urbanas. Estas melhoraram a cobertura e continuidade do sinal, garantindo conectividade em locais densamente povoados, como centros urbanos, aeroportos e estádios [9].

2.3.4 Fatiamento de Rede (Network Slicing)

O Network Slicing baseia-se na segmentação da rede em fatias (*slices*), cada uma otimizada para diferentes tipos de serviços. Podemos ter, numa única rede física, diversas redes virtuais alocando recursos específicos de acesso rádio, transporte e núcleo de rede (Core Network) [10].

O fatiamento de rede torna-se possível devido ao NFV e SDN, o SDN permite a separação do plano de controlo e do plano de dados, facilitando a gestão de múltiplas "slices" na mesma infraestrutura física. A tecnologia NFV é responsável por gerir as funções de rede virtual e permite uma alocação flexível de recursos virtuais. Além de oferecer uma arquitetura modular para essas funções, cria funções virtualmente dedicadas para cada um dos segmentos da rede. Já o SDN é capaz de proporcionar a comunicação entre essas funções de rede virtual, utilizando planos de separação e roteamento de rede para obter isolamento de recursos para cada fatia de rede.

Com a combinação destas duas tecnologias, torna-se possível segmentar a rede física em diversas fatias lógicas, cada uma com características diferentes e recursos isolados para as necessidades específicas de serviço [3].

2.3.5 Computação em Borda (Edge Computing)

A computação em borda (*Edge Computing*) é um dos principais impulsionadores do 5G, permitindo processar dados mais próximos dos utilizadores e dispositivos conectados, esta abordagem reduz a latência, melhora o desempenho da rede e permite aplicações em tempo real [3].

A organização 3GPP define o *Edge Computing* como um meio de encaminhar o tráfego de forma eficiente, utilizando funções como a seleção dinâmica do plano de utilizador (UPF) e o encaminhamento influenciado por aplicações. Ao descentralizar o processamento, a carga nos servidores centrais e no core da rede é reduzida, aumentando a eficiência operacional.

A integração do *Edge Computing* com o 5G favorece a implementação de redes inteligentes e adaptáveis, otimizando a gestão do tráfego de dados. Além disso, melhora a privacidade e segurança ao reduzir a necessidade de transmissão de informações sensíveis para *data centers* remotos [10].

2.3.6 Segurança e Privacidade no 5G

A segurança e a privacidade no 5G são preocupações fundamentais devido ao grande número de dispositivos conectados e à diversidade de aplicações críticas, a virtualização e a utilização de redes definidas por software (SDN) aumentam a flexibilidade da rede, mas também introduzem novos desafios de cibersegurança [9].

Técnicas como segmentação de rede (*network slicing*) e autenticação robusta são essenciais para mitigar ataques e proteger dados sensíveis, o uso de criptografia avançada e protocolos de comunicação seguros ajuda a prevenir acessos não autorizados e violações de privacidade. Além disso, a implementação de inteligência artificial e *machine learning* permite a deteção proativa de ameaças e respostas rápidas a incidentes [2], [9].

A colaboração entre governos, reguladores e empresas é crucial para estabelecer normas e melhores práticas que garantam a integridade e a confiança na infraestrutura 5G.

2.4 Redes 5G Privadas

As redes privadas 5G estão a emergir como uma alternativa estratégica para organizações que procuram maior controlo, segurança e personalização sobre a sua conectividade sem fios. Diferentemente das redes 5G públicas, que fornecem serviços móveis a assinantes em larga escala, as redes privadas são implementadas exclusivamente para um cliente corporativo, como indústrias, hospitais, portos, aeroportos e centros logísticos, permitindo-lhes uma gestão autónoma da infraestrutura e um desempenho otimizado para necessidades específicas [2],[8].

2.4.1 Modos de Implementação

As redes 5G privadas podem ser classificadas em duas principais categorias, dependendo do seu grau de independência em relação às redes públicas e da forma como utilizam a infraestrutura de telecomunicações.

2.4.1.1 Standalone Non-Public Network (SNPN)

A SNPN é uma rede 5G privada totalmente independente, a organização implementa a sua própria rede 5G dedicada, sem depender de uma operadora móvel.

Deste modo, é também mais segura, pois todos os dados e tráfego da rede são mantidos internamente, reduzindo riscos de interferência e ciberataques.

A rede, ao não possuir partilha de recursos com redes públicas, pode ser otimizada para aplicações específicas. Toda a infraestrutura, incluindo rede de acesso rádio (RAN) e núcleo de rede (5GC - 5G Core), é gerida pela própria organização ou por um operador privado contratado [8],[10].

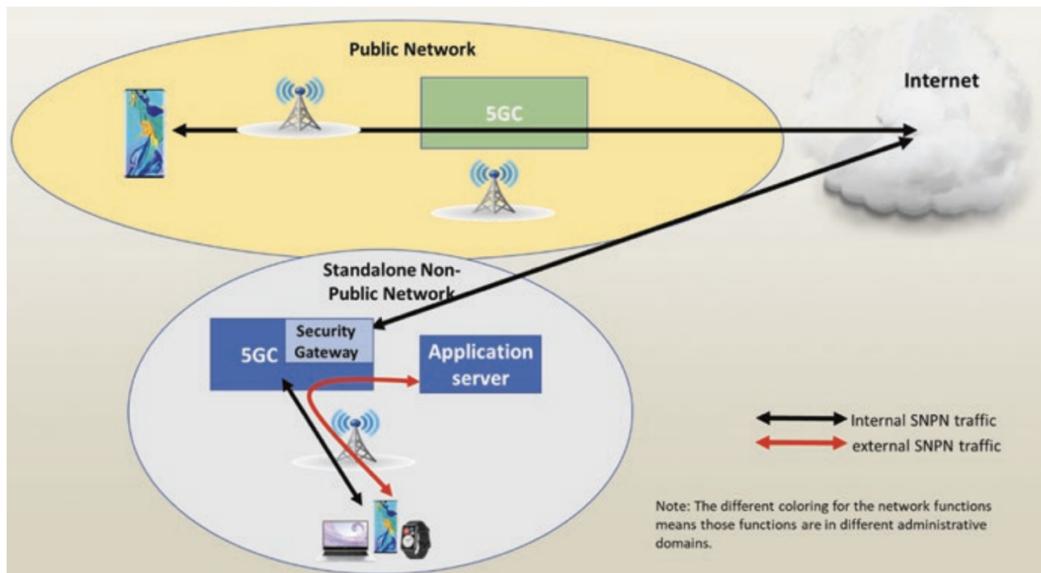


Figura 2.5 - Funcionamento de uma Standalone Non-Public Network (SNPN)

2.4.1.2 Public Network Integrated Non-Public Network (PNI-NPN)

A PNI-NPN (Public Network Integrated Non-Public Network) é uma rede privada que, devido ao fatiamento de rede (Network Slicing), partilha infraestrutura e recursos com uma rede pública. Esta cria fatias dedicadas de rede, garantindo qualidade de serviço diferenciada sem comprometer a segurança.

Ou seja, a organização utiliza a infraestrutura de uma operadora móvel, reduzindo custos de implementação. Este é o cenário ideal para empresas que desejam uma transição faseada para redes privadas completas [8],[10].

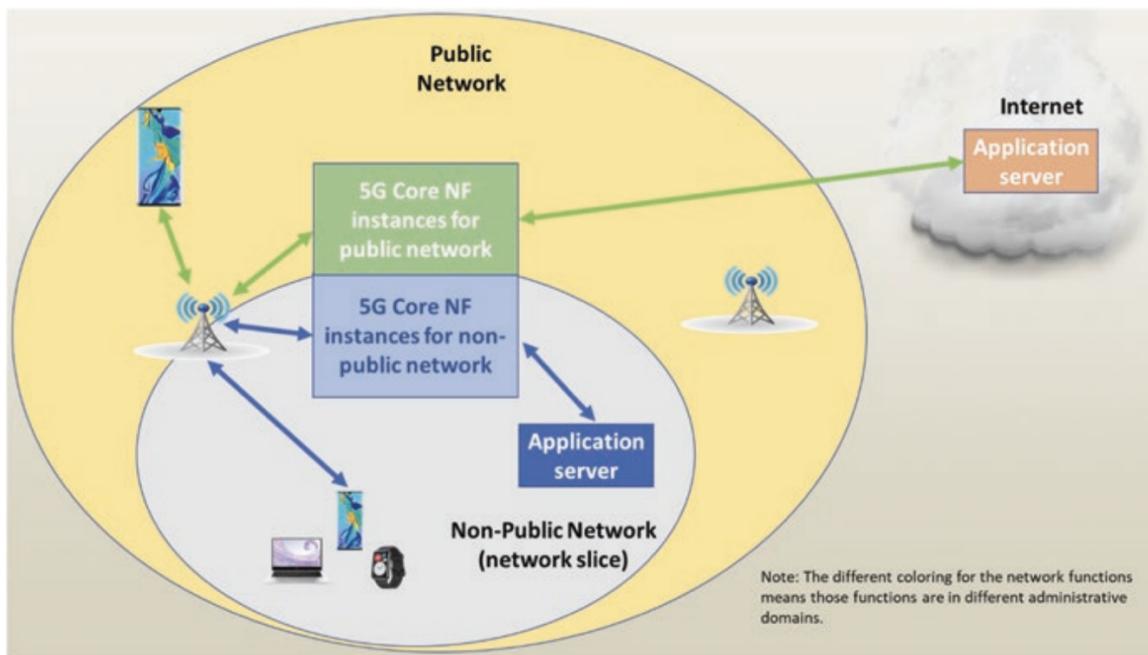


Figura 2.6 - Public Network Integrated Non-Public Network (PNI-NPN)

CAPÍTULO 3

Implementação do Simulador de Sistema

3.1 Descrição do simulador de sistema

Para realizar este estudo, foi utilizado um simulador desenvolvido a partir da atualização de um simulador já existente, em linguagem de programação Java, com o objetivo de avaliar o desempenho de sistemas 5G NR outdoor.

Este simulador sofreu inicialmente alterações ao código de base para conseguir reproduzir o cenário em estudo e, numa segunda fase, foram implementadas alterações em várias classes Java de forma a obter os melhores resultados possíveis.

Durante o estudo foram realizadas dez simulações: seis para um cenário com 14 BSs e quatro para outro cenário com 7 BSs, cujos principais parâmetros estão apresentados na Tabela 3.1. O objetivo desta abordagem é permitir a comparação entre as diferentes configurações, de modo a identificar a solução mais adequada para suportar um evento de grande dimensão no Passeio Marítimo de Algés.

A relação m/N_{tx} quantifica a densidade de utilizadores por antena no sistema, onde m representa o número de utilizadores por célula e N_{tx} o número de antenas por utilizador. Esta métrica é fundamental para avaliar a eficiência de utilização dos recursos de antena em sistemas MIMO, indicando quantos utilizadores cada antena serve simultaneamente.

Tabela 3.1 - Valores das Simulações

Parâmetros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Simulação	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1
Power Tx (W)	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1
Número de BS	14	14	14	14	14	14	7	7	7	7
N_{tx}	9	9	9	9	18	18	9	9	18	18
m/N_{tx}	300	300	300	300	150	150	300	300	150	150
Raio da célula micro [m]	50	100	200	100	100	200	100	200	100	200
Raio da célula macro [m]	50	100	200	100	100	200	100	200	100	200

Durante o processo de desenvolvimento, foi considerada a hipótese de uma solução unificada que integrasse todas as funcionalidades numa única implementação. Apesar de teoricamente ser mais elegante, essa abordagem revelou-se inviável devido à elevada complexidade computacional, resultando em tempos de execução demasiado longos e numa sobrecarga de processamento incompatível com a realização de estudos extensivos.

Por este motivo, optou-se por uma arquitetura modular, em que diferentes partes do sistema são tratadas de forma independente. Assim, torna-se fundamental estabelecer um protocolo de comunicação entre os dois subsistemas: o simulador ao nível do sistema e o simulador ao nível da ligação. Podemos ver a estrutura de ligação e interação entre o Simulador de Sistema e o Simulador de Ligação na Figura 3.1.

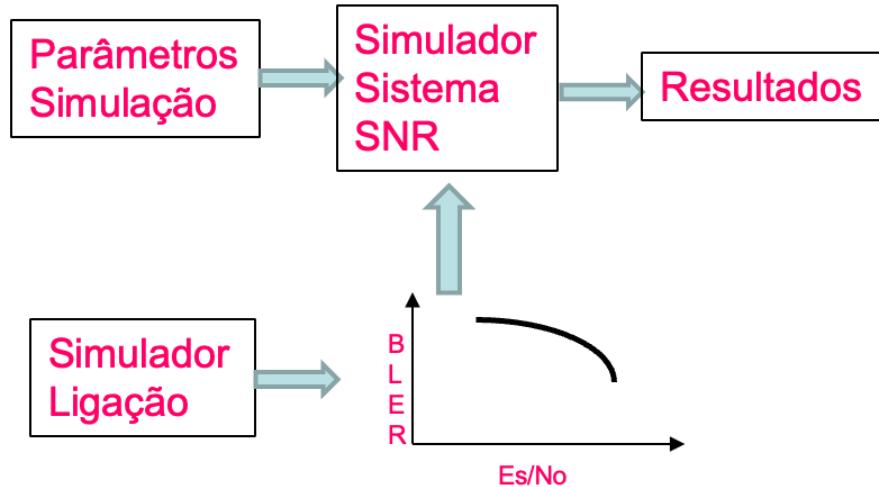


Figura 3.1 - Exemplo da Ligação entre Simuladores

A troca de dados da camada física para o simulador de sistema é realizada por meio de uma interface que utiliza métricas de qualidade, como BLER (*Block Error Rate*) e BER (*Bit Error Rate*). É através destas métricas que a camada física traduz o impacto do canal em indicadores úteis para a camada de sistema, assegurando uma simulação realista.

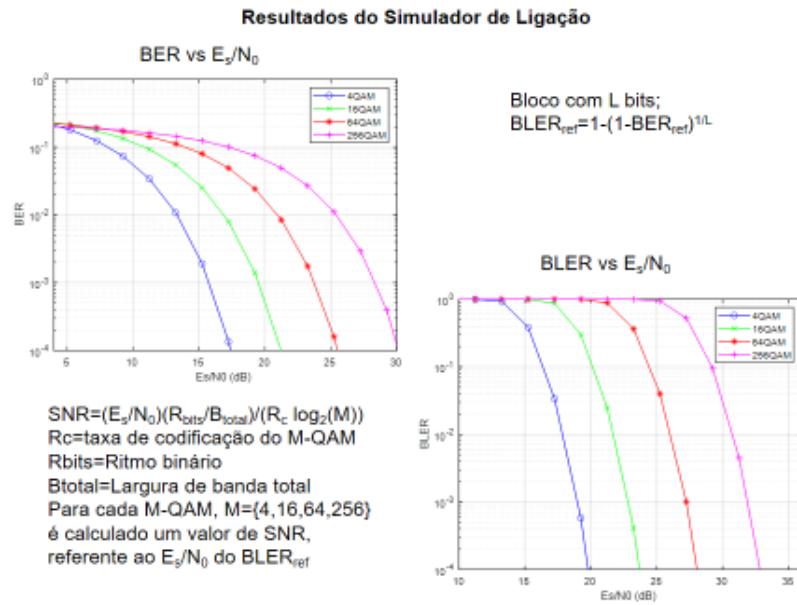


Figura 3.2 - Exemplo de Resultados do Simulador de Ligação

Com base nas curvas de BLER vs Es/No obtidas do simulador de ligação (ver Figura 3.2), 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 descodificar pacotes de grande dimensão com modulação 256QAM. Por outro lado, os utilizadores mais afastados da BS com valores de SNR mais baixos apenas conseguem descodificar pacotes de pequena dimensão com modulação 4QAM.

A metodologia de simulação de sistema compreende três etapas fundamentais: definição dos parâmetros de configuração, execução da simulação e análise do desempenho do sistema, conforme demonstrado na Figura 3.3.

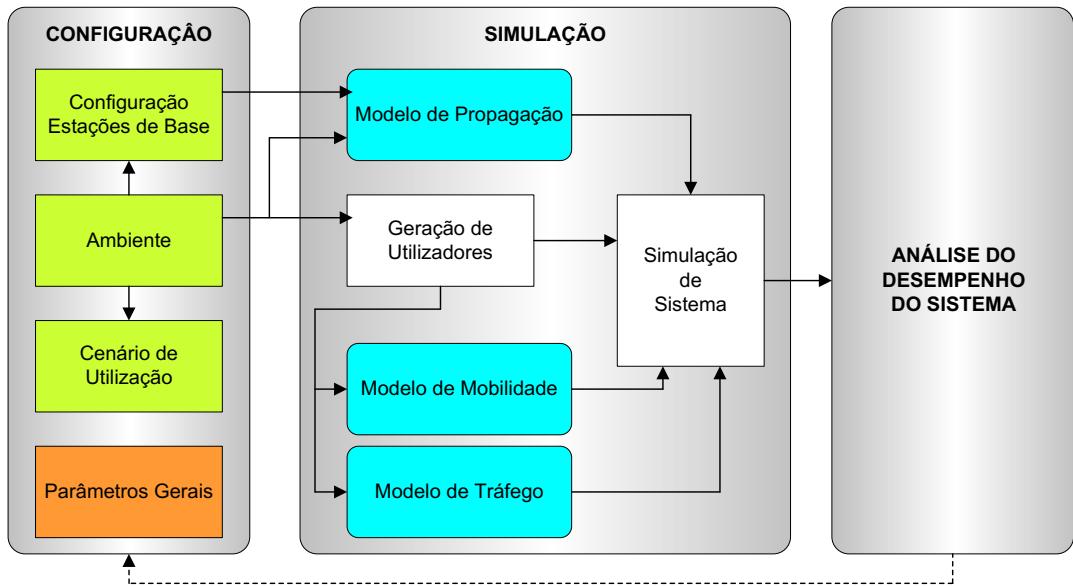


Figura 3.3 - Visão geral do Simulador de Sistema

A primeira fase corresponde à configuração, onde se procede ao dimensionamento e caracterização do sistema, incluindo a localização das estações base, a definição dos modelos de propagação e mobilidade, o cenário de simulação e os parâmetros gerais necessários.

Segue-se a fase de simulação, que é a fase principal do processo, sendo responsável pela execução dos modelos definidos de simulação, tais como o modelo de geração de utilizadores, propagação, mobilidade e tráfego. Todas estas entidades estão distribuídas pelas diferentes classes em Java e, após a compilação, possibilitam a execução da simulação do sistema.

Por fim, ocorre a análise do desempenho do sistema, que está diretamente relacionada com as etapas anteriores. Nesta fase, é feita uma avaliação e comparam-se os resultados obtidos em cada simulação. É aqui que são avaliados diversos indicadores fundamentais, tais como *throughput*, cobertura e rendimento do sistema.

3.2 Cenários de Implementação

Tal como foi descrito anteriormente, pretende-se realizar o planeamento celular considerando dois cenários do recinto outdoor do Passeio Marítimo de Algés: um composto por 14 estações base (BS/AP) com 3 setores por estação, totalizando 42 setores, e um segundo de 7 estações base (BS) com 3 setores por estação, totalizando 21 setores.

Considerando ainda uma área total de 94,693 km², o sistema 5G NR com MIMO massivo (mMIMO) é configurado de modo que cada setor disponha de M=64 antenas e sirva K=[150,300] utilizadores por setor, resultando numa razão antenas/utente de M/K=[18,9].

● UE BS ●

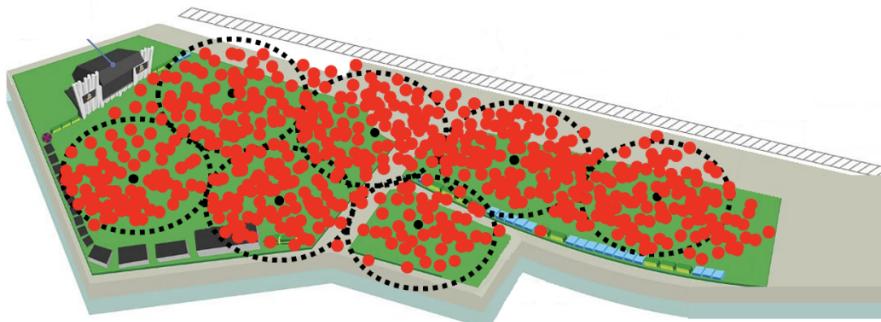


Figura 3.4 - Cenário com 7 BS

● UE BS ●

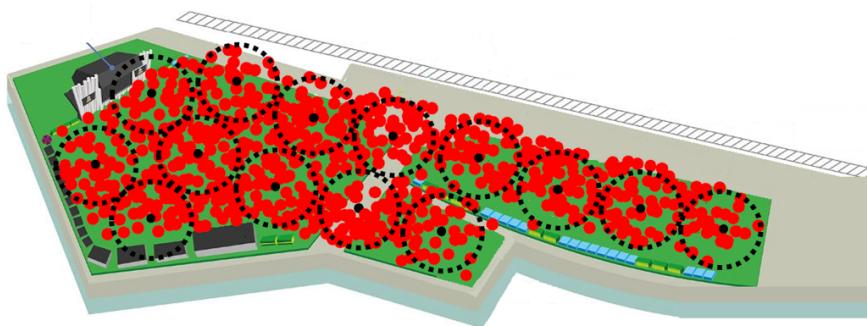


Figura 3.5 - Cenário com 14 BS

Em redor de cada estação base são definidas quatro zonas com diferentes raios de cobertura correspondentes a diferentes modulações MQAM com diferentes ritmos binários, dependentes da distância à BS. Dependendo do valor decrescente da relação SNR necessária para descodificar com sucesso os pacotes, tem-se modulação 256QAM com taxa de codificação $R_c = 7/8$, 64QAM com $R_c = 5/6$, 16QAM com $R_c = 3/4$ e 4QAM com $R_c = 1/2$.

No total, o cenário contempla $3 \times 14 = 42$ setores, com frequência da portadora $f_c = 3.6$ GHz e largura de banda total de 100 MHz. É utilizado OFDM com espaçamento entre subportadoras de $\Delta f = 30$ kHz e transmissão de 28 símbolos por subtrama de 1,0 ms (Numerologia 1 do 5G NR).

O tempo de coerência do canal considerado é $T_c = 25$ ms, enquanto a largura de banda de coerência é $B_c = 4$ MHz. O sistema opera em modo TDD, sendo o tempo de transmissão no enlace descendente (DL) igual ao do enlace ascendente (UL), acrescido da duração dos símbolos piloto.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados teóricos assim como os resultados obtidos através das simulações realizadas, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema 5G NR em ambos os cenários apresentados. Para além da apresentação dos dados numéricos e gráficos, é realizado uma análise e discussão crítica, permitindo uma avaliação abrangente do comportamento e o desempenho do sistema.

4.1 Resultados Teóricos

A apresentação detalhada dos cálculos e dos parâmetros utilizados encontra-se disponível no Anexo A, servindo como suporte à análise comparativa com os resultados obtidos através das simulações.

4.2 Resultados das Simulações

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através das simulações dos dois cenários descritos anteriormente, considerando as variações indicadas na Tabela 3.1 da Secção 3.1.

Tendo como base o planeamento celular de uma rede 5G, a análise fundamenta-se nos gráficos gerados a partir dos dados das simulações, permitindo tanto a avaliação individual de cada cenário como a comparação entre ambos, examinando o impacto dos diversos parâmetros considerados e identificando as vantagens e limitações de cada configuração.

A arquitetura da rede de acesso rádio virtualizada baseia-se numa técnica de agrupamento estático de estações base (BS), com o propósito de maximizar a eficiência espectral e minimizar a interferência. A rede foi particionada em três clusters adjacentes, assegurando cobertura redundante onde cada terminal é servido por uma ou mais BSs pertencentes ao respetivo agrupamento.

No âmbito das simulações realizadas, foram consideradas quatro modulações M-QAM distintas: 4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM. Relativamente à dimensão dos clusters na RAN, foram testadas 3 configurações: 1C, 2C e 3C.

A configuração "1C" representa um cenário sem agrupamento, onde cada utilizador é servido individualmente por uma única BS. A implementação das configurações de *clustering* múltiplo (2C e 3C), configuração onde cada utilizador é servido simultaneamente por duas ou três estações base adjacentes. O utilizador recebe e combina sinais de duas ou três BS diferentes, proporcionando ainda maior diversidade espacial.

Proporcionando assim benefícios significativos ao sistema, como diversidade espacial resultante da receção de sinais provenientes de múltiplas fontes, contribuindo para a redução da interferência inter-cellular e para o aumento da robustez da ligação. Consequentemente, observa-se uma melhoria substancial na qualidade de serviço e no desempenho global da rede, traduzindo-se numa maior eficiência do sistema de comunicações móveis.

4.2.1 Resultados de *Throughput*

Throughput é a quantidade de dados efetivamente transmitidos com sucesso através de um canal de comunicação numa unidade de tempo, esta métrica representa a capacidade real de transferência de informação do sistema, considerando apenas os dados úteis que chegam corretamente ao destino, excluindo retransmissões, overhead de protocolos e dados corrompidos.

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos diversos parâmetros de *throughput*, este resultantes das simulações, com recurso a gráficos para cada uma das 8 simulações. Estas descrevem a evolução do *throughput* total face ao aumento do número de utilizadores, o comportamento do *throughput* médio por utilizador em função da potência de transmissão, e a função de distribuição acumulada (CDF) do *throughput*, a qual fornece uma análise estatística detalhada da probabilidade acumulada dos valores de *throughput* observados para cada configuração de cluster.

4.2.1.1 *Throughput* vs Number of users

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os resultados das simulações 1, 2, 3 e 4 que contemplam uma rede heterogénea composta por 14 estações base (8 macro células situadas mais a sul e 6 micro células situadas mais a norte) representada na Figura 3.5. Cada estação opera a 3,6 GHz com configuração tri-setorial, suportando 300 utilizadores por setor, totalizando 12.600 utilizadores.

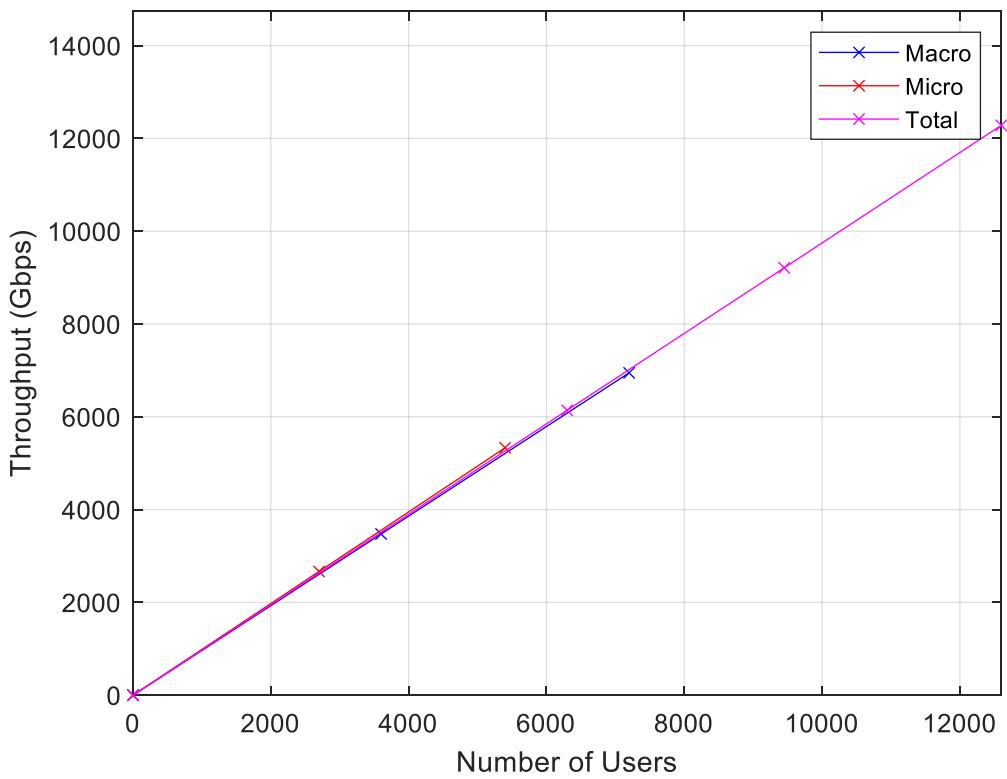


Figura 4.1 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 1, Ntx=9, raio=50m

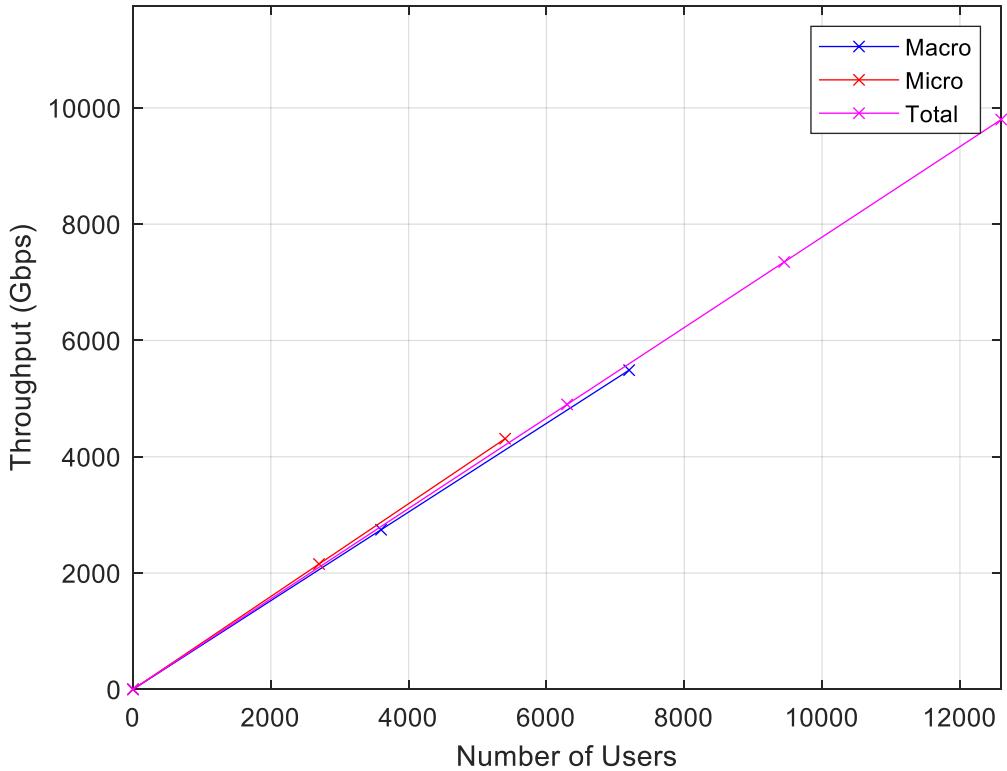


Figura 4.2 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 2, Ntx=9, raio=100m

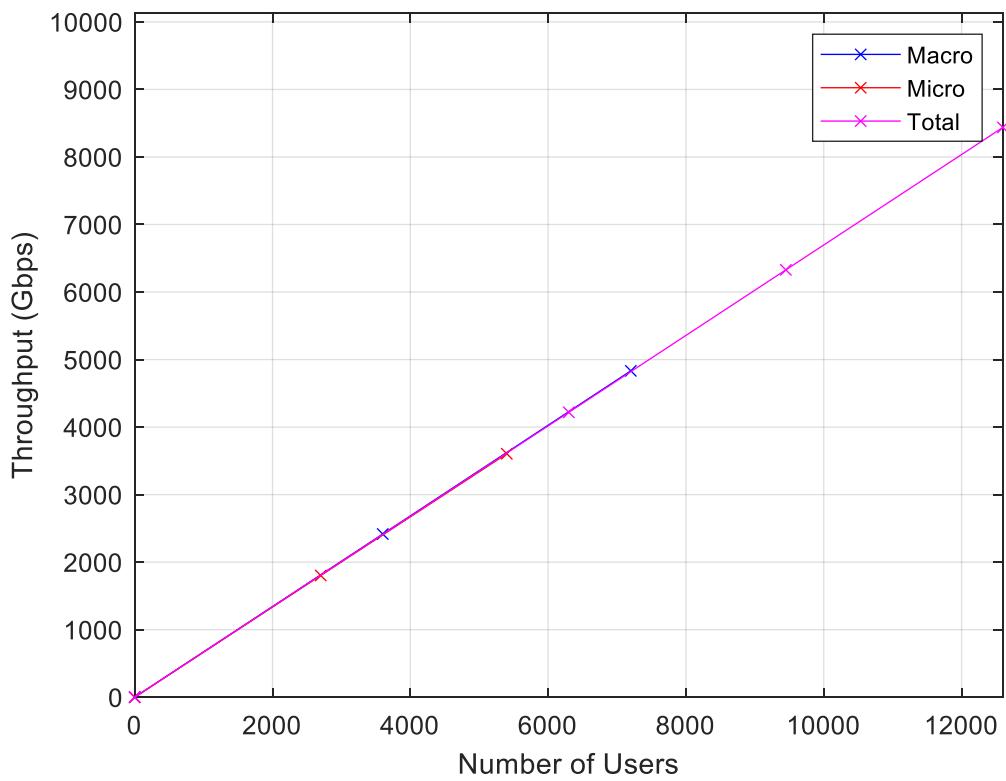


Figura 4.3 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 3, Ntx=9, raio=200m

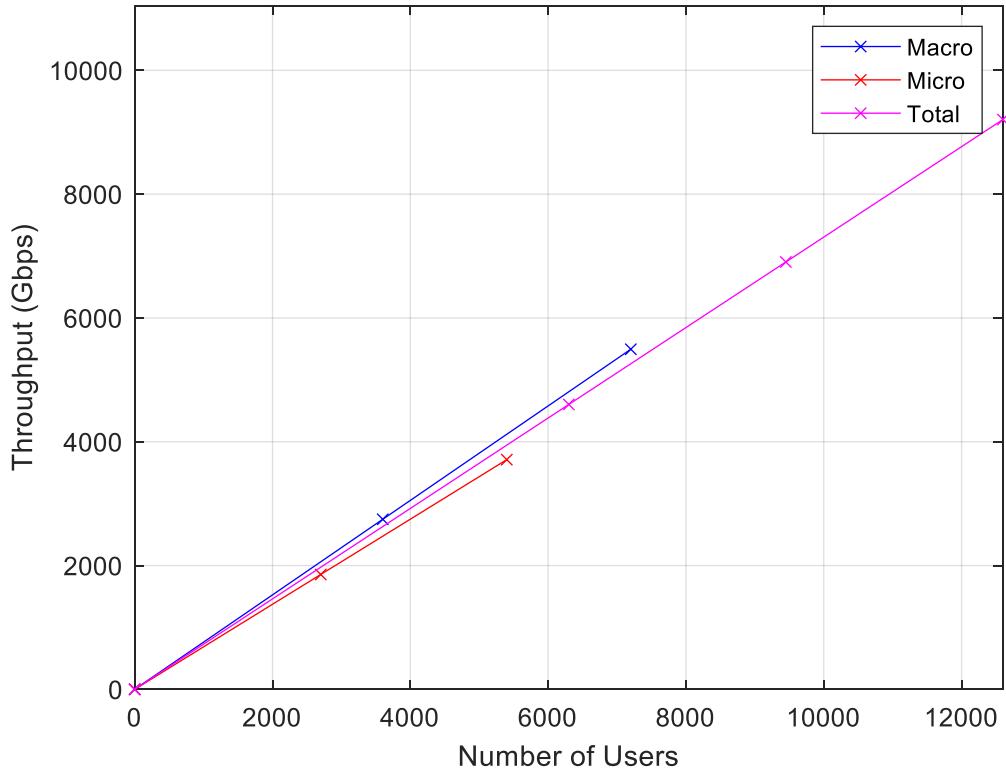


Figura 4.4 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 4, Ntx=9, raio=100m, Pt=10W

O posicionamento das BSs segue uma distribuição espacial uniforme na área de cobertura, conforme a topologia ilustrada na Figura 3.5, a análise dos gráficos revela um comportamento linear no desempenho de ambos os tipos de estações base. As macro células apresentam desempenho igual ao das micro células. Apenas na Figura 4.4, quando se aumenta a potência de transmissão para 10 W, nota-se um desempenho ligeiramente superior das macro células em relação às micro células. O *throughput* médio por utilizador tem crescimento linear proporcional ao aumento do número de utilizadores ativos.

Da comparação entre as Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 é evidente o decréscimo do *throughput* total para os 12.600 UEs à medida que se aumenta o raio das células de 50, 100 e 200 metros, respetivamente. Isto deve-se ao aumento da interferência entre células adjacentes, pois o aumento do raio tende a colocar os utilizadores dentro das fronteiras das células adjacentes.

A comparação entre as Figuras 4.2 e 4.4, ambas com raio de 100 metros, indica que o aumento da potência de 1 W para 10 W teve como consequência um decréscimo ligeiro no *throughput* total. Isto deve-se a uma redução na relação SINR. Embora a potência recebida (S) tenha aumentado, o aumento da interferência nas células adjacentes (I) foi superior ao aumento do S.

Com a distribuição de 7.200 utilizadores nas macro células e 5.400 utilizadores nas micro células, ambos os tipos operam com densidade idêntica de 900 utilizadores por estação base (300 por setor). Apesar desta densidade uniforme, as macro células demonstram na Figura 4.4 um *throughput* superior de 0,8 Gbps por utilizador, comparativamente aos 0,7 Gbps por utilizador nas micro células. Este desempenho ligeiramente superior deve-se à maior altura das antenas de transmissão e às características de cobertura mais favoráveis das macro células, evidenciando o impacto direto das diferenças técnicas entre os dois tipos de estações base no desempenho global da rede. A altura das antenas das macro células é de 10 metros e a das micro células é de 5 metros.

Nas simulações 5 e 6, ao aumentar o Ntx para 18, resulta numa capacidade reduzida de 150 utilizadores por setor, totalizando 6.300 utilizadores (metade da configuração Ntx=9). Esta redução reflete o trade-off entre o número de utilizadores por estação base e o *throughput* por utilizador, mantendo constante o número total de elementos de antena disponíveis por setor (2.700). Tal como se antecipava, o aumento do raio das células de 100 para 200 m reduz o *throughput* total devido ao aumento percentual de utilizadores nas fronteiras das células.

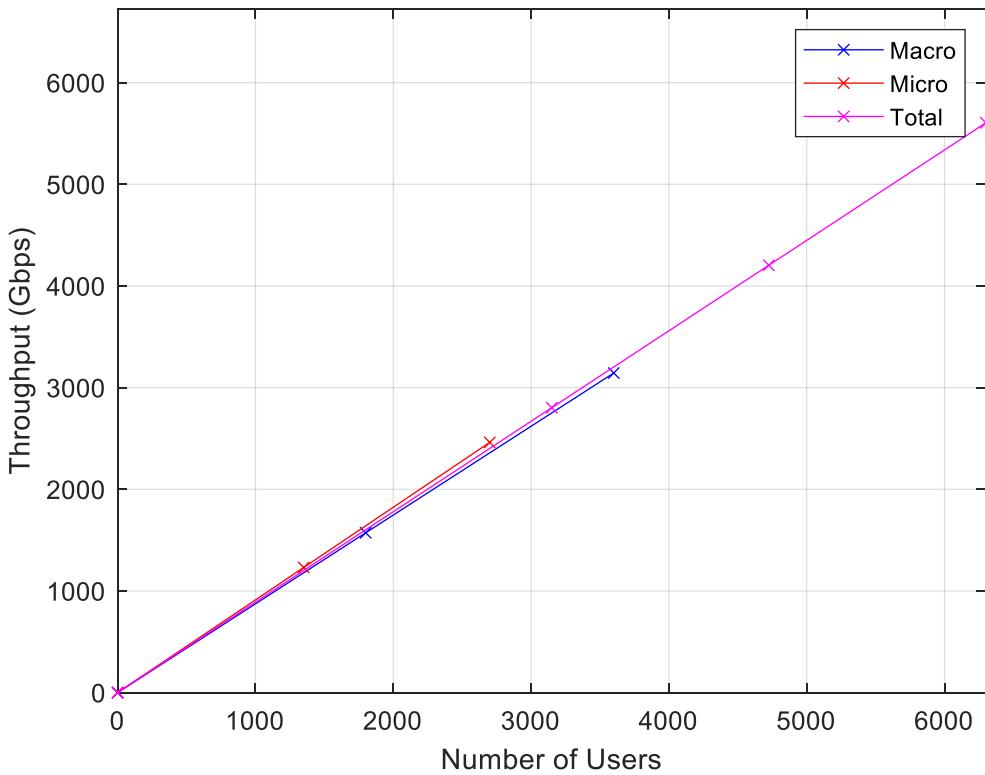


Figura 4.5 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 5, Ntx=18, raio=100m

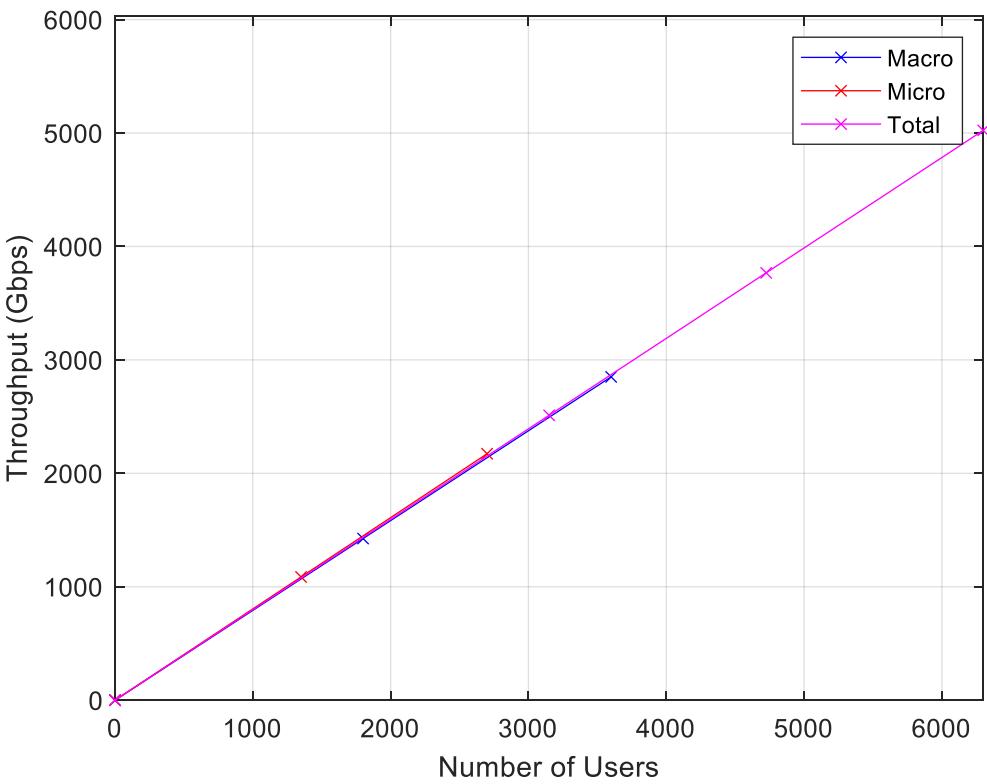


Figura 4.6 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 6, Ntx=18, raio=200m

Desta vez, nas simulações 7 e 8, foi alterado o número de estações base de 14 para 7 e com Ntx=9, ficando a distribuição das estações base como demonstrado na Figura 3.4. Ao reduzir o número de estações base, foi necessário aumentar o raio de transmissão de modo a manter a cobertura total do recinto. De acordo com a Tabela 3.1, na simulação 7 o raio utilizado foi de 100 metros e na simulação 8 de 200 metros. Como o número de utilizadores por setor foi duplicado em comparação com as simulações anteriores, ao reduzirmos para metade o número de estações base, obtemos consequentemente metade dos setores, mantendo assim o número total de utilizadores.

Ao manter o número de utilizadores e seguindo a linha de pensamento anterior, era expectável o resultado obtido: o *throughput* médio mantém-se igual, assim como as curvas das macro células e micro células, cerca de 0,865 Gbps/utilizador. Esta consistência nos resultados confirma que a redução do número de estações base, compensada pelo aumento do raio de cobertura e duplicação dos utilizadores por setor, não altera significativamente o desempenho global da rede.

Para finalizar, a Figura 4.9 apresenta o gráfico resultante da simulação 9, que é idêntica à simulação 10. Tal como referido anteriormente, ao manter o número de estações base, mas reduzir o número de utilizadores por setor para metade ($N_{tx}=18$), obtém-se metade do total de utilizadores. O aumento do raio de 100 para 200 m produz uma esperada redução do *throughput* total, tal como tinha ocorrido na situação de haver 14 BSs e quando $N_{tx}=9$ com 7 BSs.

O comportamento linear observado nas simulações anteriores mantém-se inalterado, demonstrando que a distribuição espacial das estações base, quando adequadamente dimensionada para manter a densidade de utilizadores, não constitui um fator determinante para a variação do *throughput* médio.

Estes resultados reforçam a robustez do sistema e a validade da abordagem de dimensionamento adotada, sugerindo que diferentes configurações topológicas podem alcançar desempenhos equivalentes desde que os parâmetros fundamentais sejam mantidos em equilíbrio.

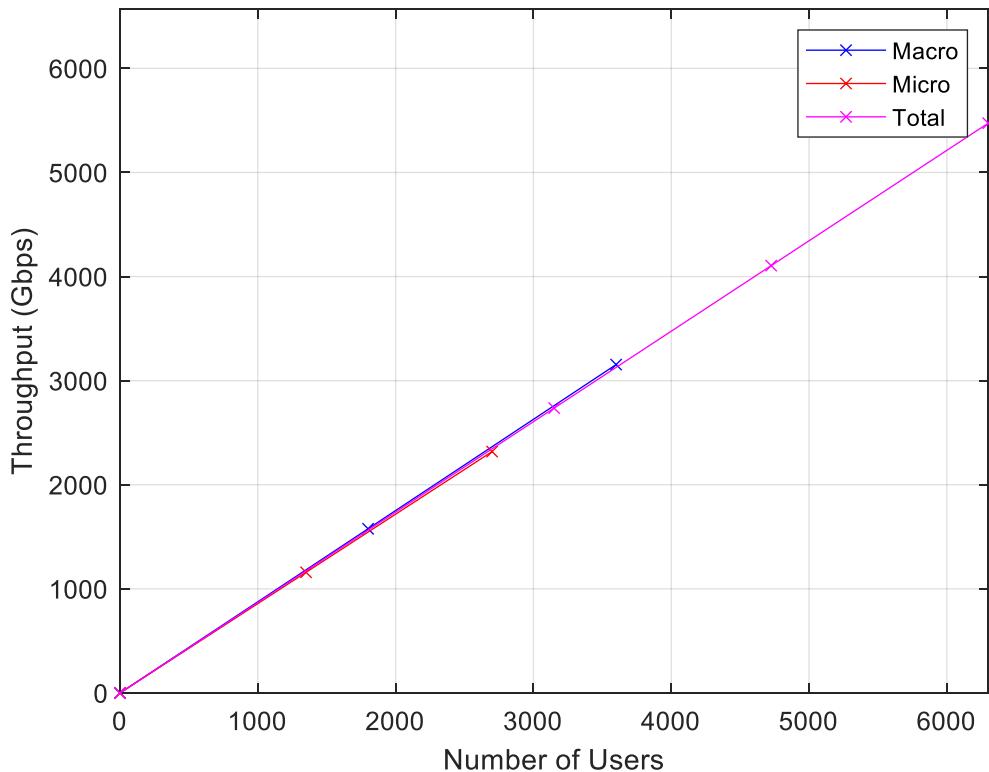


Figura 4.7 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 7, $N_{tx}=9$, raio=100m

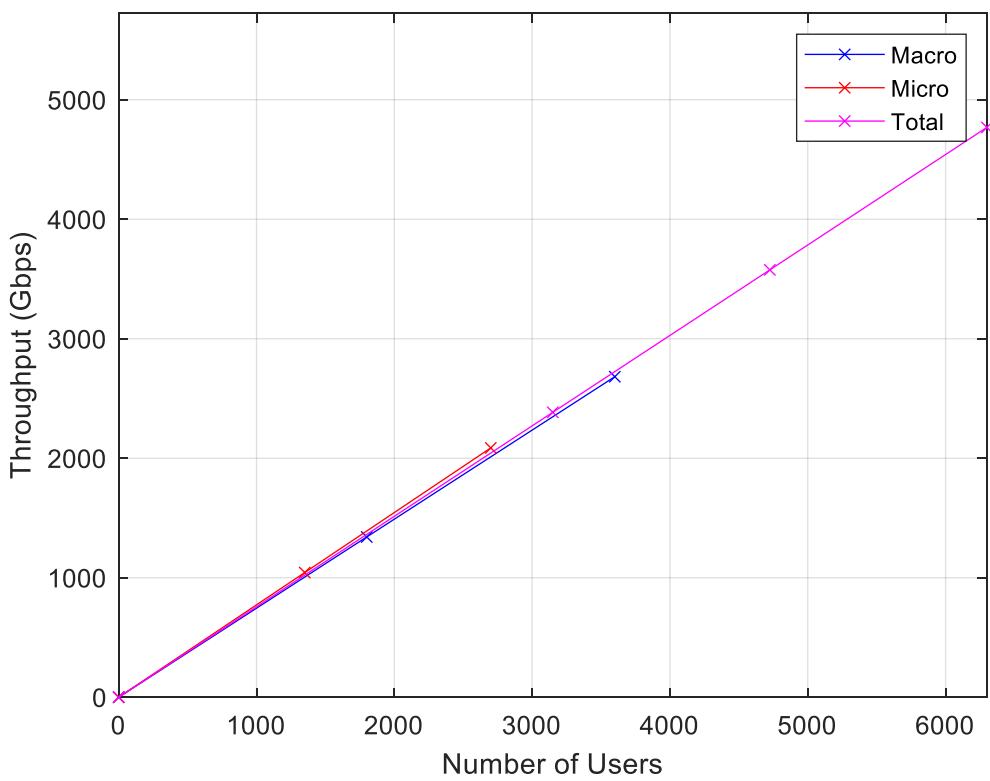


Figura 4.8 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 8, Ntx=9, raio=200m

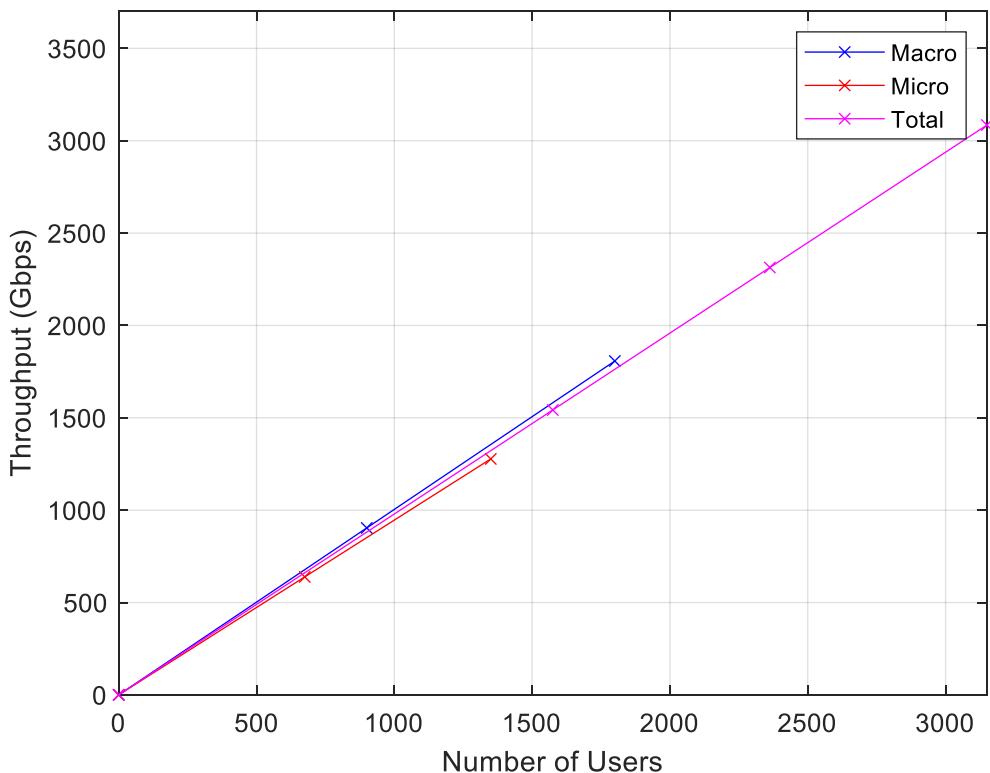


Figura 4.9 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 9, Ntx=18, raio=100m

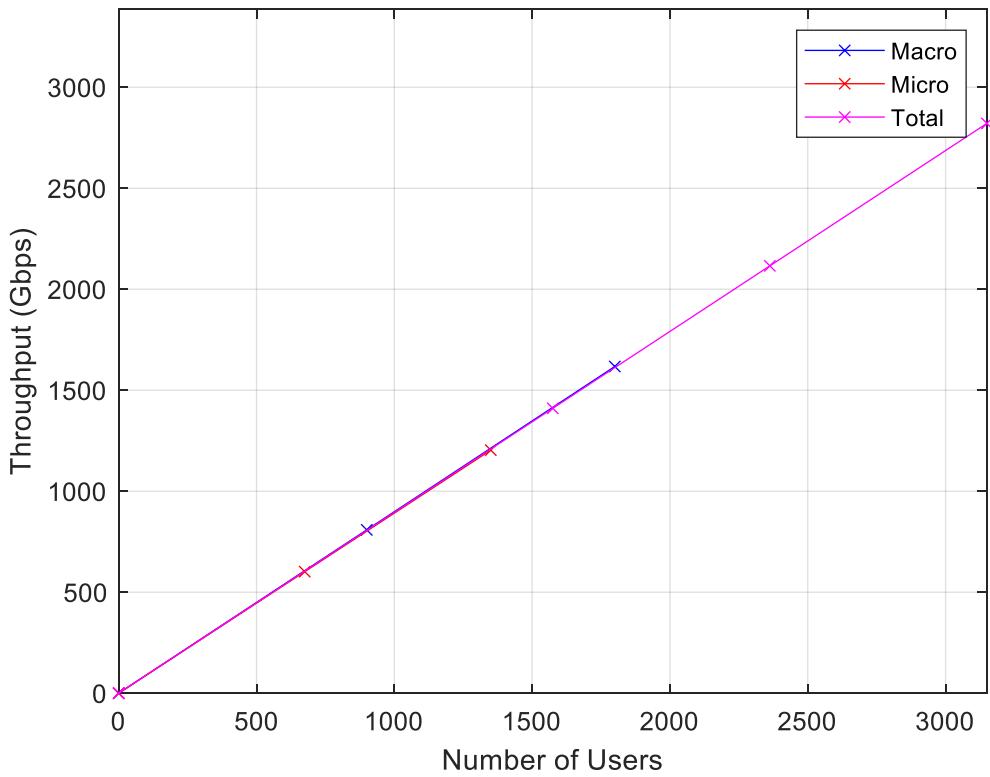


Figura 4.10 - *Throughput* vs Number of users – Simulação 10, Ntx=18, raio=200m

4.2.1.2 *Throughput/user* vs Power (W)

A relação entre o *throughput* e a potência de transmissão constitui um aspecto fundamental no planeamento de redes, potência de transmissão, medida em watts (W), influencia diretamente a qualidade do sinal recebido pelos utilizadores e, consequentemente, o desempenho global da rede.

Teoricamente, o aumento da potência de transmissão deveria resultar numa melhoria do *throughput*, uma vez que proporciona um sinal mais forte e uma melhor relação sinal-ruído (SNR). No entanto, esta relação não é sempre linear, especialmente em cenários com múltiplas células, onde o aumento da potência pode também incrementar a interferência inter-cellular.

A Figura 4.11 representa o gráfico de *throughput/user* vs power da simulação 2, que foi executada com o parâmetro de potência padrão de 1 W, tal como todas as restantes simulações, à exceção da simulação 4. A simulação 4 foi a única executada com 10 W em vez do valor padrão de 1 W e foi criada especificamente para permitir a comparação e análise de resultados. Consiste numa variante da simulação 2, diferindo apenas no valor da potência de transmissão utilizada.

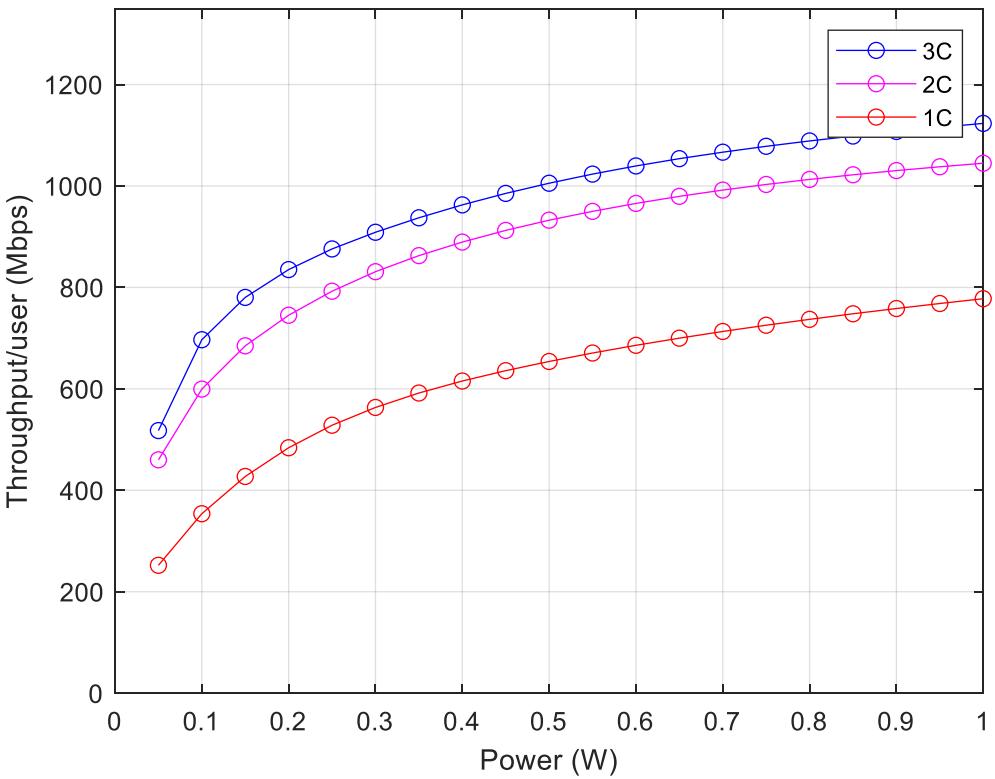


Figura 4.11 - *Throughput* vs Power (W) – Simulação 2, 1W, raio=100m

Ao analisar todos os gráficos começando com a Figura 4.11, observa-se a presença das configurações de *clustering* anteriormente mencionadas, representadas por 1C, 2C e 3C.

Este gráfico demonstra claramente que a implementação de *clustering* aumenta significativamente o *throughput* por utilizador, independentemente da potência de transmissão utilizada. Neste contexto, a configuração 3C supera o desempenho de *throughput* por utilizador em relação às configurações 2C e 1C, confirmando os resultados esperados. Este comportamento indica que, com o *clustering* 3C, o sistema é capaz de alcançar taxas de transferência de dados superiores, atingindo 1,12 Gbps de *throughput* por utilizador, comparativamente aos 1,08 Gbps no 2C e 0,79 Gbps no 1C.

Na prática, observa-se que o aumento da potência de transmissão deveria conduzir a melhorias no *throughput*. Porém, esse incremento não segue um padrão linear devido ao facto de sinais com maior potência gerarem interferências adicionais noutras locais de transmissão, provocando mais retransmissões de pacotes.

Existe uma relação direta entre o *throughput* médio por utilizador na potência máxima, no caso da configuração 1C, e os declives das curvas de *throughput* das Figuras 4.1 a 4.10. Observa-se uma redução ligeira do *throughput* médio por utilizador da Figura 4.12 em relação à Figura 4.11. Este resultado está em sintonia com os gráficos 4.2 e 4.4. Dependendo da potência transmitida, a variação da potência entre 1W e 10W influencia o desempenho do *throughput* como mostram os gráficos da Figura 4.11 utilizando 1W e da Figura 4.12 utilizando 10 W.

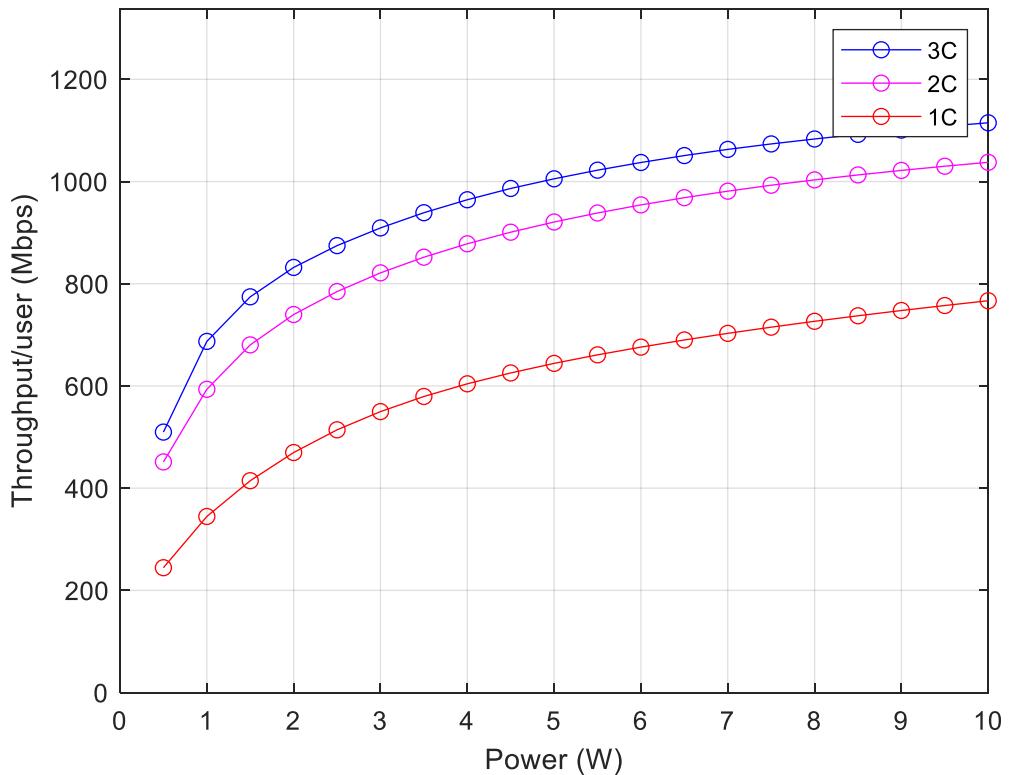


Figura 4.12 - *Throughput* vs Power (W) – Simulação 4-10W, raio=100m

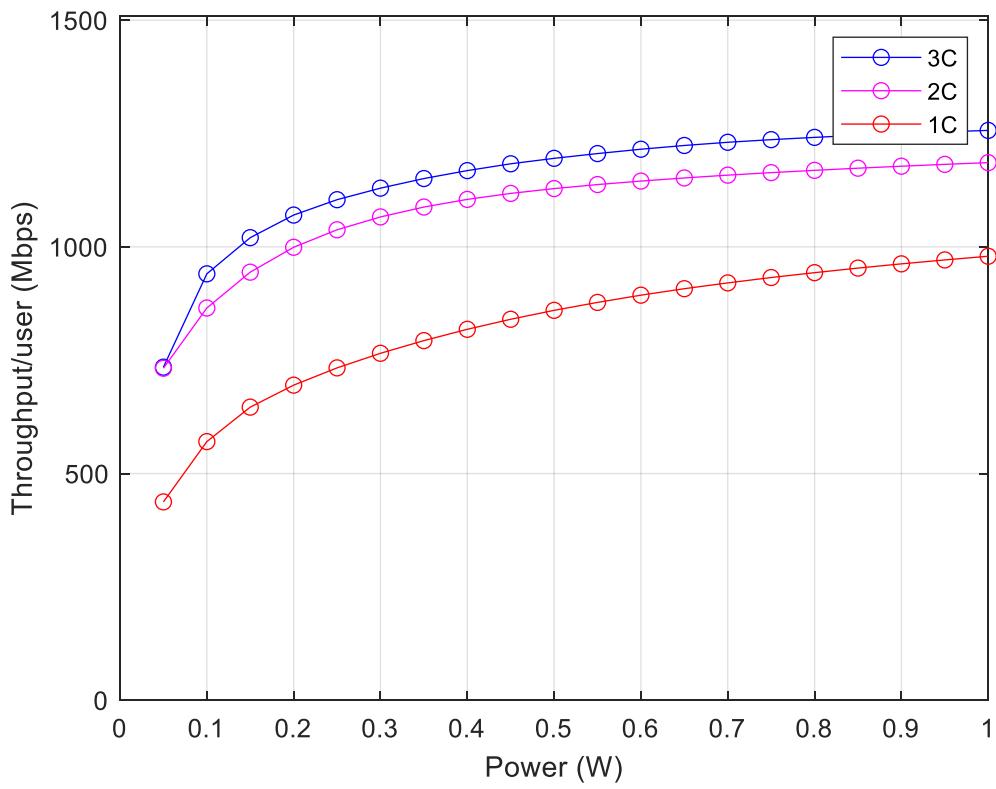


Figura 4.13 - *Throughput* vs Power (W) – Simulação 9-1W, raio=100m.

Observa-se um aumento do *throughput* médio por utilizador da Figura 4.13 em relação à Figura 4.11. Este resultado está em sintonia com o *throughput* médio por utilizador da Figura 4.9. Na simulação 9, há 7 BSs em vez de 14 BSs e o raio mantém-se em 100 m. Contudo, a simulação 9 tem Ntx=18 e a simulação 2 tem Ntx=9.

O aumento do *throughput* médio deve-se a dois fatores: uma redução da interferência entre células adjacentes devido à redução de 14 BSs para 7 BSs e um aumento da potência recebida (S) devido a ter-se Ntx=18 em vez de Ntx=9. Evidentemente, ocorre uma redução da capacidade da rede para metade quando se passa de Ntx=9 para Ntx=18.

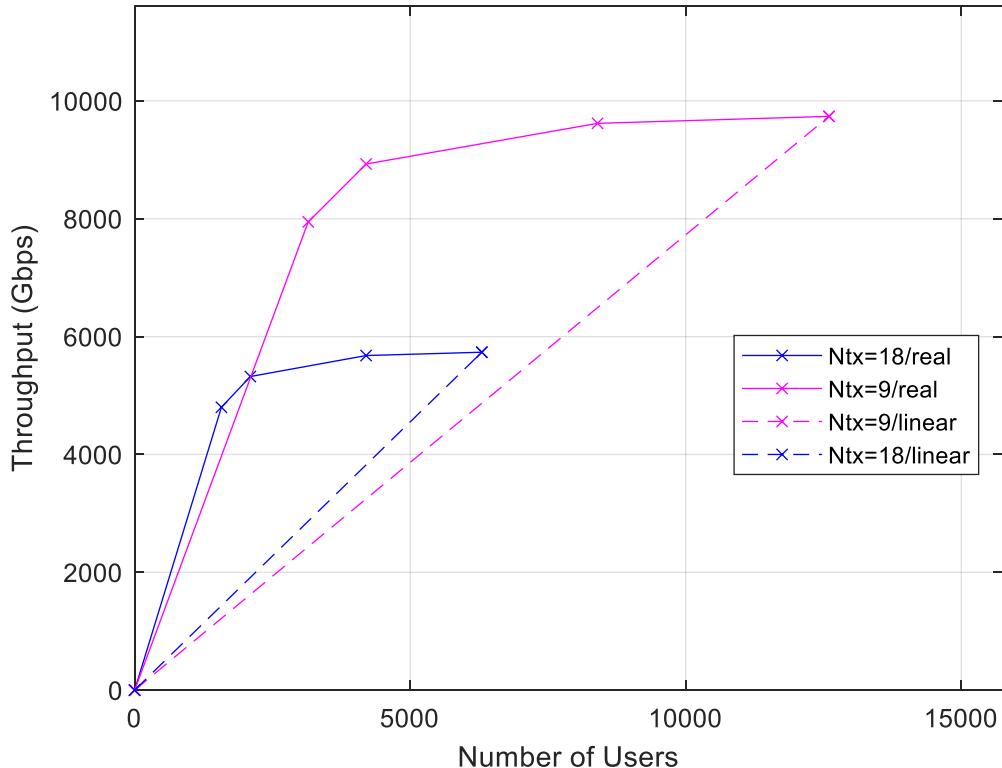


Figura 4.14 - *Throughput* vs Nu com Ntx=9 e Ntx=18, 14 BSs, raio=200m

O gráfico da figura 4.14 representa a combinação da potência de transmissão da estação de base e do *throughput* obtido em função do número de utilizadores, i.e., número de antenas de transmissão por utilizador. Observa-se, como se esperava, que o *throughput* máximo é alcançado na situação de haver $Ntx=M/K=9$ antenas a transmitir para cada terminal. Neste caso, sendo $M=64$, há $K=M/9=7$ utilizadores por setor e o máximo de $3 \times 14 \times 300 = 12.600$ utilizadores a serem constantemente servidos no cenário.

As curvas designadas por 'real' estão associadas à potência de transmissão da BS onde se usam amplificadores de potência não lineares que saturam na potência máxima de 1 W. 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 $K=M/18=150$ utilizadores por setor. Neste caso é evidente a redução no *throughput* total alcançado. Tal como no caso anterior, existem as curvas 'real' e 'linear' relacionadas com o modo de operação do amplificador de potência do emissor da estação de base.

4.2.2 Resultados de Cobertura

Este subcapítulo apresenta os resultados obtidos em termos de cobertura para todos os cenários listados na Tabela 3.1. A análise constitui um aspeto fundamental na avaliação do desempenho de redes de comunicações móveis, uma vez que determina a capacidade do sistema em fornecer serviço adequado aos utilizadores distribuídos pelo cenário em estudo.

A cobertura é definida como a percentagem de utilizadores que conseguem estabelecer comunicação com uma qualidade de sinal superior ao limiar mínimo exigido para cada esquema de modulação (4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM). A principal métrica que governa este comportamento é o SINR (*Signal-to- Interference-plus-Noise Ratio*), que corresponde à relação entre a potência do sinal útil recebido e a soma das potências de interferência e de ruído presentes no canal.

Os resultados apresentados permitem avaliar o impacto da variação da potência de transmissão (1 W e 10 W) na cobertura do sistema, bem como analisar o comportamento de diferentes configurações de *clustering* e tipos de estações base. Esta análise é essencial para compreender as limitações e potencialidades de cada cenário simulado.

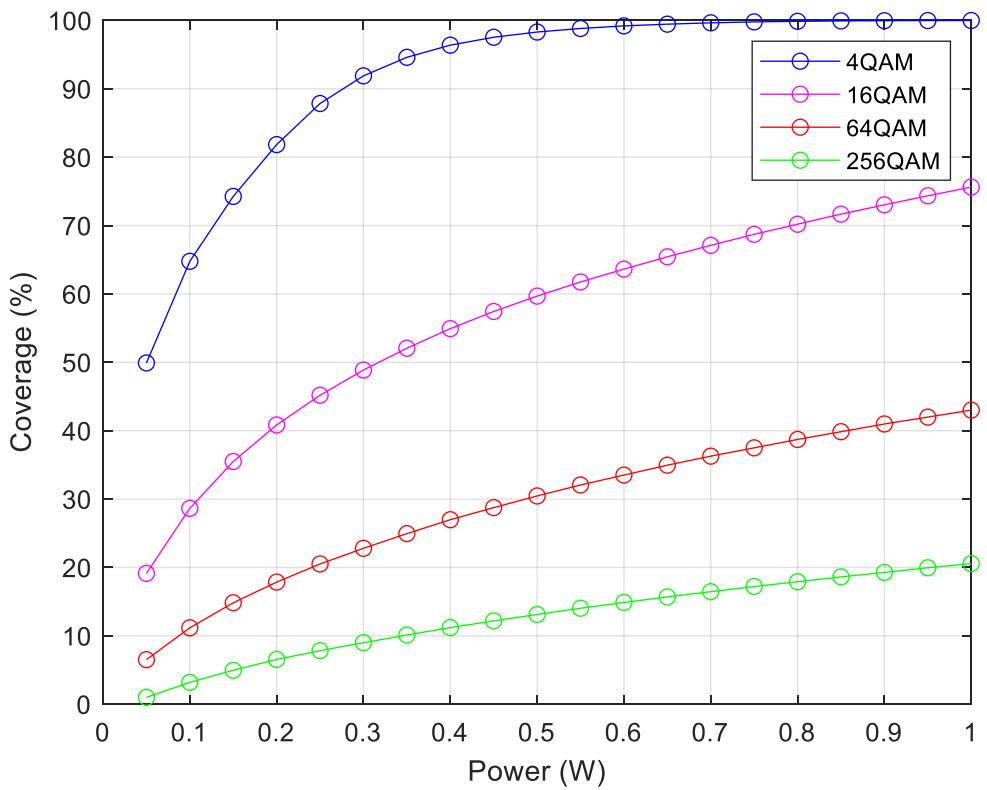


Figura 4.15 - Coverage vs Power (W) – Simulação 2-1W, raio=100m

Analisando o gráfico da Figura 4.15, constata-se que o aumento da potência de transmissão melhora a cobertura até aproximadamente 0,55 W, ponto a partir do qual a curva do 4QAM atinge os 100% e estabiliza. Os resultados revelam diferenças significativas entre os esquemas de modulação, onde o 4QAM demonstra elevada robustez, atingindo 100% de cobertura a partir dos 0,55 W, confirmando a sua capacidade de operação mesmo em condições adversas de SINR.

O 16QAM apresenta desempenho inferior, com evolução mais gradual, alcançando cerca de 75% de cobertura no limite da potência, indicando boa eficiência com ligeira sensibilidade adicional à degradação do canal.

Observa-se que, à medida que aumenta a ordem M de modulação (M-QAM), a cobertura torna-se progressivamente mais limitada, uma vez que esquemas de modulação de ordem superior requerem valores de SINR mais elevados para assegurar uma transmissão fiável. O 64QAM exibe cobertura mais restrita, cobrindo aproximadamente 43% dos utilizadores, refletindo a necessidade de SINR mais elevado para garantir a correta descodificação. Por último, o 256QAM evidencia a cobertura mais limitada, apenas 21%, confirmando que este esquema é viável exclusivamente em regiões próximas da estação base, onde as condições de propagação são ótimas e o sinal recebido é forte.

Este comportamento demonstra o compromisso inerente entre robustez da modulação e eficiência espectral: modulações de baixa ordem garantem maior cobertura, mas transmitem menos dados, enquanto modulações de alta ordem permitem maiores débitos binários, mas apenas funcionam adequadamente em locais com sinal forte e reduzida interferência.

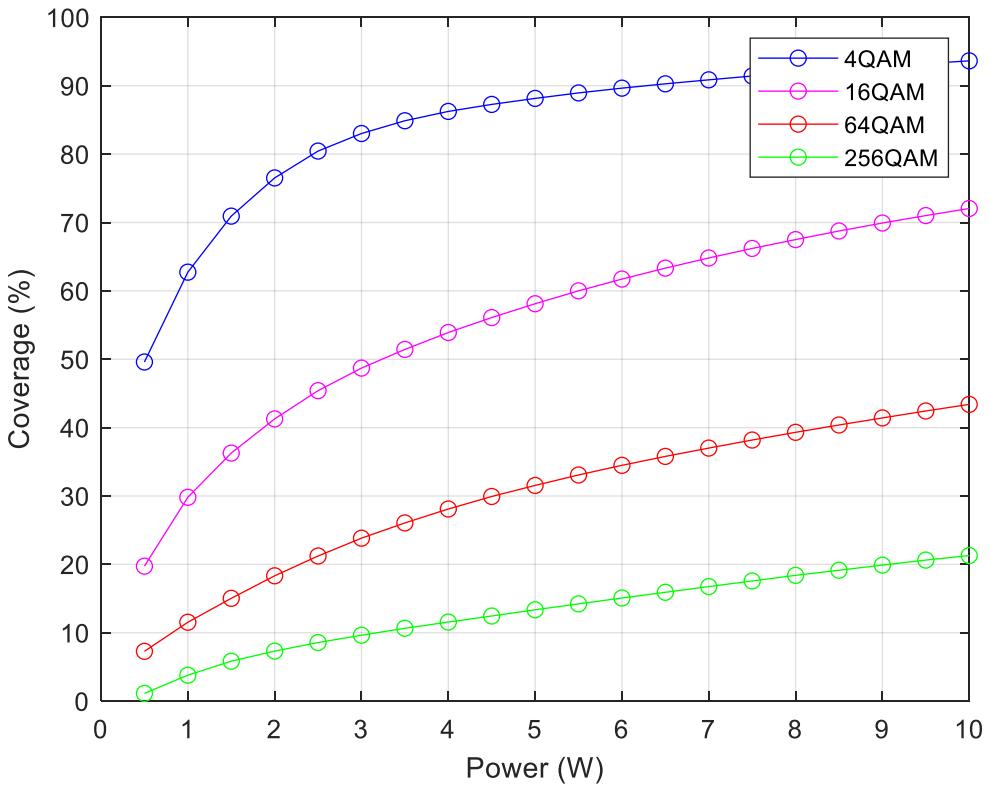


Figura 4.16 - Coverage vs Power (W) – Simulação 4-10W, raio=100m

Os gráficos das Figuras 4.15 e 4.16 correspondem às simulações 2 e 4, respetivamente, que diferem exclusivamente no valor da potência de transmissão utilizada (1 W e 10 W, respetivamente). A análise comparativa dos resultados revela que, com o aumento significativo da potência de transmissão de 1 W para 10 W, de todas as curvas de cobertura apenas a da modulação 4QAM apresenta menor cobertura. Isso deve-se à diminuição da relação SINR devida ao aumento da potência de transmissão. Sendo o sistema constituído por 14 células, o aumento de potência implica um aumento da potência da interferência das células adjacentes. Apesar do aumento da potência recebida na própria célula (S), o aumento da interferência inter-cellular é mais elevado e provoca a redução do SINR nas fronteiras das células. Como apenas o 4QAM cobre as fronteiras das células, é esta a única modulação que sofre redução da cobertura. Este comportamento da cobertura está em sintonia com o desempenho do *throughput* anteriormente analisado.

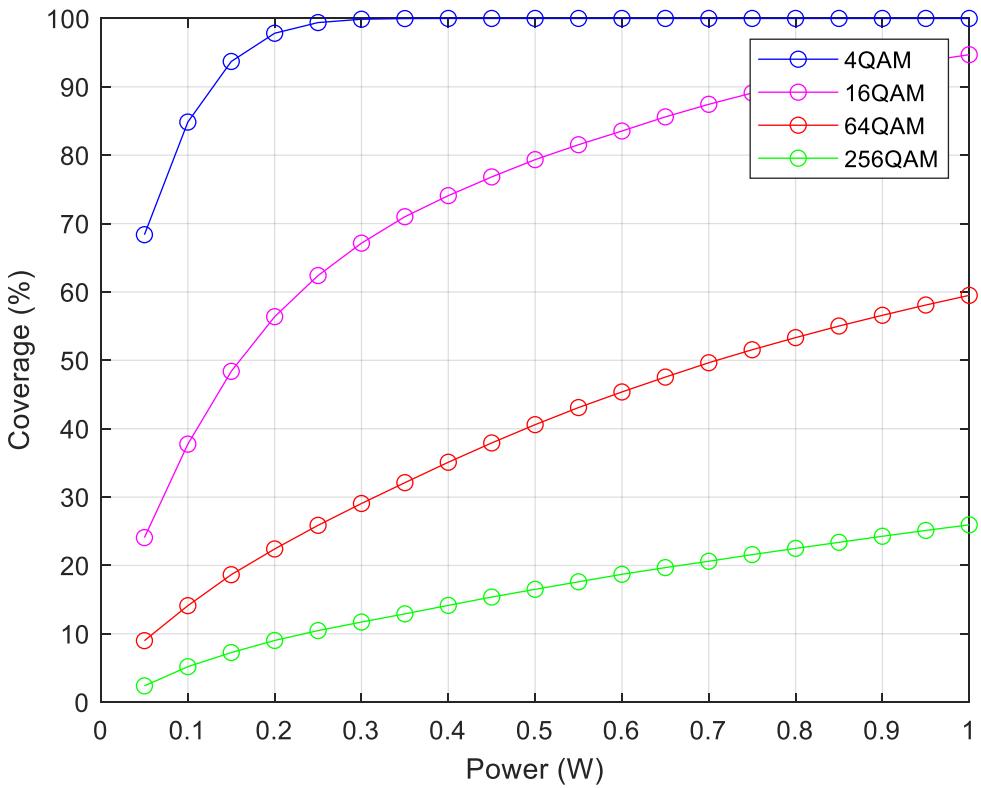


Figura 4.17 - Coverage vs Power (W) – Simulação 9-1W, raio=100m

O gráfico da Figura 4.17 corresponde à simulação 9 e deve ser comparado com a Figura 4.15 (simulação 2), que apresenta igual potência transmitida 1W. A análise comparativa dos resultados revela que existe uma melhoria da cobertura em todas as modulações na simulação 9. Esta melhoria pode ser explicada pelo aumento da relação SINR quando se transmite com $N_{tx}=18$ antenas para cada utilizador, em vez de $N_{tx}=9$ antenas.

Como se disse anteriormente, na simulação 9, há 7 BS em vez de 14 BS e o raio mantém-se em 100 m. O aumento da cobertura deve-se a uma redução da interferência entre células adjacentes devido à redução de 14 BS para 7 BS e ao aumento da potência recebida S devido a ter-se $N_{tx}=18$ em vez de $N_{tx}=9$. Ocorre uma redução da capacidade da rede para metade quando se passa de $N_{tx}=9$ para $N_{tx}=18$.

4.2.3 Resultados de CDF do SINR vs SINR

O SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) é uma métrica fundamental utilizada em comunicações sem fios para avaliar a qualidade do sinal, representando a relação entre a potência do sinal útil recebido e a soma das potências de interferência e ruído presentes no canal.

Um SINR mais elevado indica uma ligação mais clara e fiável, constituindo um fator crucial para determinar a taxa de sucesso na receção de pacotes de dados.

Usando a Figura 4.18 abaixo como exemplo explicativo, o gráfico no eixo X representa a qualidade em dB do SINR, sendo que quanto maior melhor e no eixo Y mostra a CDF (Cumulative Distribution Function) do SINR, ou seja, a probabilidade acumulada em percentagem (%) dos utilizadores terem no máximo aquele valor de SINR.

Este gráfico da figura 4.18, apresenta diferentes curvas:

- Global, que engloba toda a rede (macrocélulas e microcélulas).
- Macro, que se refere exclusivamente às estações macrocelulares.
- Micro, que corresponde às estações microcelulares.
- C1 e C2, que representam a diferenciação entre as configurações de clustering.

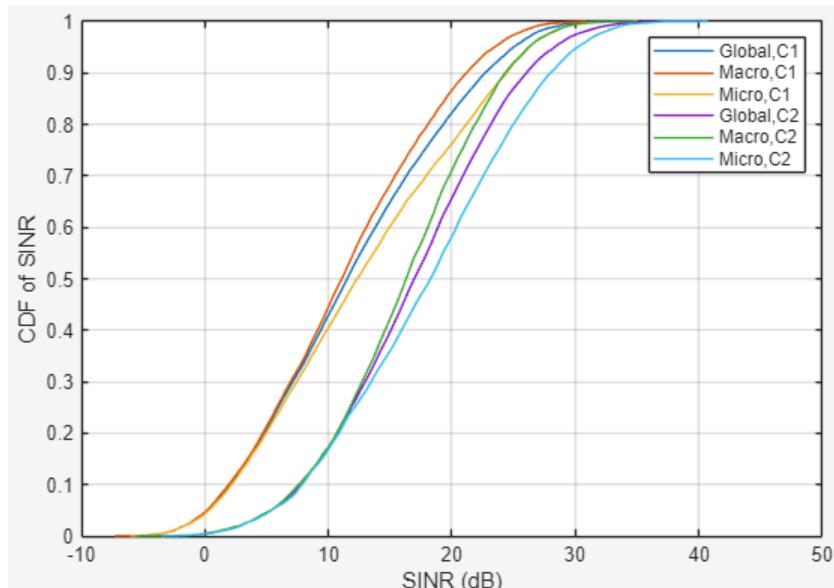


Figura 4.18 - CDF of SINR vs SINR – Simulação 1

Analizando o gráfico em concreto e focando na simulação 1, onde a simulação foi realizada de acordo com a Tabela 3.1 com 14 estações base, 300 utilizadores por setor, um raio de 50 metros e uma potência de transmissão de 1 W, observa-se que as curvas C1 (Global, Macro e Micro) estão deslocadas para a esquerda em relação às curvas C2, com uma diferença média de aproximadamente 5 dB, o que representa um desempenho inferior para os mesmos valores em percentagem.

Esta análise da CDF do SINR demonstra que o cenário C2 proporciona uma melhoria significativa na qualidade do sinal em todos os tipos de célula, evidenciada pelo deslocamento das curvas para a direita, indicando um aumento no SINR médio.

A curva Micro tende a apresentar valores de SINR mais elevados, justificado pela menor interferência que as estações microcelulares sofrem e por uma cobertura mais eficiente em relação às curvas Macro, que tendem a sofrer maior interferência inter-cellular. A curva Global, como esperado, posiciona-se sempre entre as duas curvas (Macro e Micro) por representar uma média ponderada entre ambas.

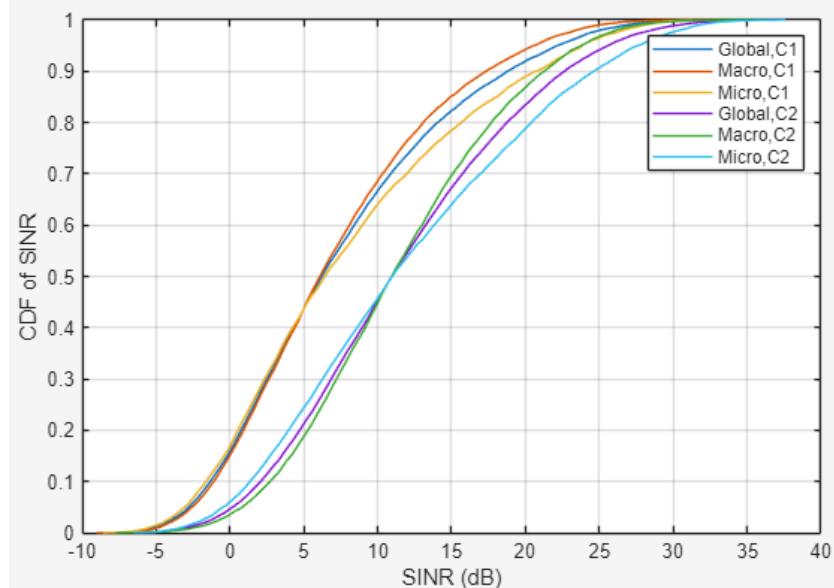


Figura 4.19 - CDF of SINR vs SINR – Simulação 2

Avançando para outra simulação, desta vez a simulação 2 que, em relação ao gráfico anterior da Figura 4.18, mantém os valores de simulação apenas aumentando o raio de 50 para 100 metros.

Consequentemente, observando o gráfico da Figura 4.19, pode-se verificar que a curva Macro de C1 apresenta um aumento mais acentuado na fase inicial e depois estabiliza o crescimento, acabando por atingir o valor máximo mais tarde comparativamente à simulação 1.

A configuração C2 mantém-se muito semelhante à simulação 1, justificado pelo *clustering*. Os utilizadores, ao estarem conectados a 2 estações base, mesmo que uma estação tenha sinal mais degradado, acabam por ser compensados pela outra, ou seja, o ganho de diversidade de estações compensa a perda de propagação. Verifica-se que a eficácia do *clustering* diminui em células de maior dimensão, pois a correlação espacial entre os sinais das diferentes estações base reduz-se com o aumento da distância. Este comportamento sugere que estratégias de cooperação entre estações são mais benéficas em implementações de rede com elevada densidade, onde a proximidade física facilita a coordenação e a mitigação conjunta da interferência.

Na Figura 4.20 (simulação 4), onde se mantêm os parâmetros da simulação 2, aumentando o valor da potência de transmissão de 1 W para 10 W, o gráfico da CDF do SINR vs SINR é praticamente igual.

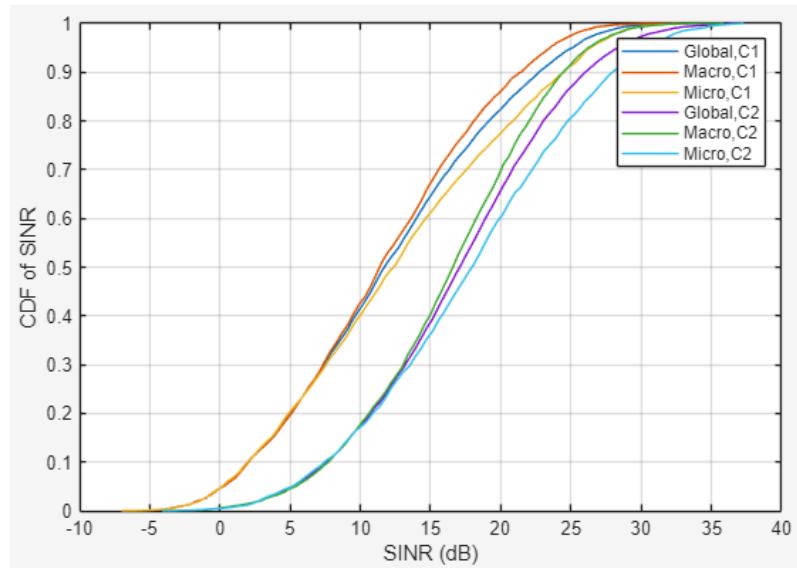


Figura 4.20 - CDF of SINR vs SINR – Simulação 4

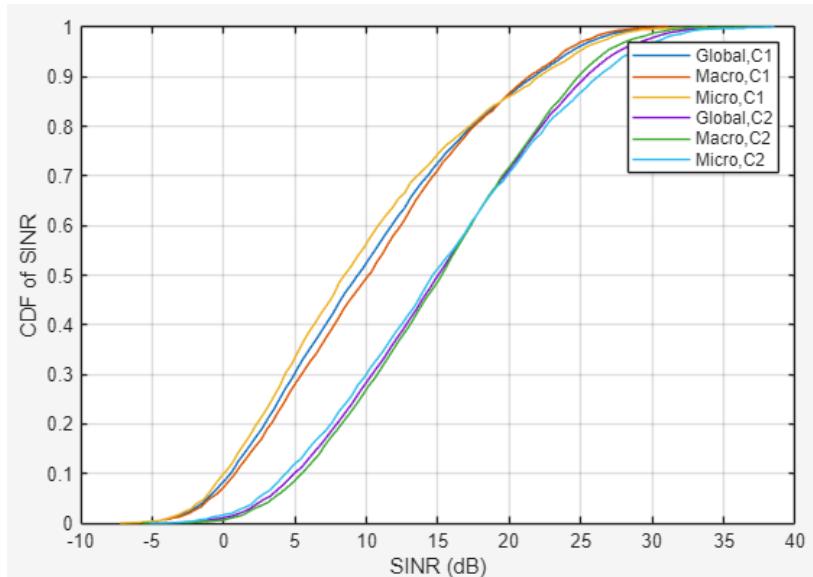


Figura 4.21 - CDF of SINR vs SINR – Simulação 7

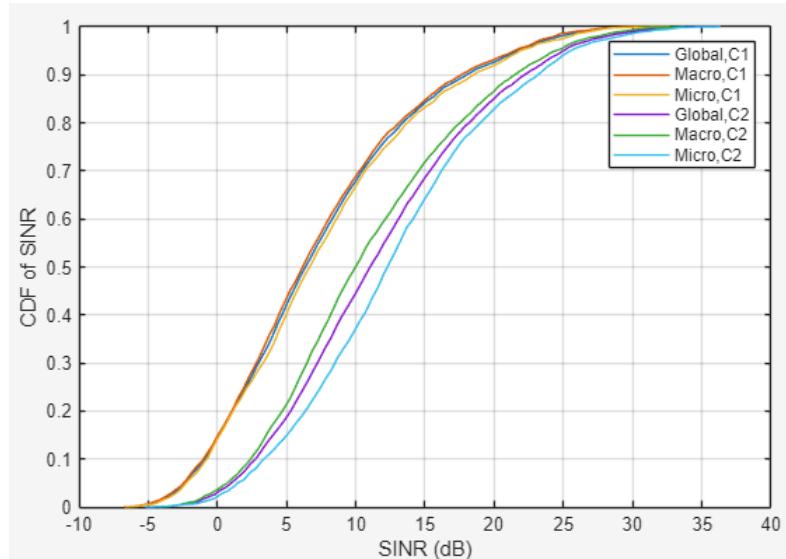


Figura 4.22 - CDF of SINR vs SINR – Simulação 8

Relativamente à Figura 4.21, o gráfico da simulação 7 é gerado com base em 7 estações base, 300 utilizadores por setor e 200 metros de raio. O objetivo desta simulação é, a par com a simulação 8, perceber qual o comportamento do sistema ao aumentar o raio para o dobro (de 100 metros para 200 metros).

Comparando a Figura 4.22, da simulação 8, com o gráfico da simulação 7, esta apresenta um deslocamento das curvas para a esquerda, indicando que os resultados são piores em comparação com a simulação 7. Observando a curva de *clustering* C2 de ambos os gráficos, constata-se que 50% dos utilizadores no cenário da simulação 8 têm apenas 10 dB, enquanto na simulação 7 os mesmos 50% atingem 15 dB. Esta diferença deve-se essencialmente ao maior raio das células na simulação 8, o que prejudica o desempenho do sistema.

4.2.4 Resultados de CDF *Throughput* vs *Throughput*

O gráfico CDF (Cumulative Distribution Function) do *Throughput* representa a probabilidade acumulada de que a taxa de transmissão de um determinado utilizador seja inferior ou igual a um dado valor de referência. Por outras palavras, representa como o desempenho (*throughput*) está distribuído por todos os utilizadores da rede.

Os gráficos do CDF do *throughput* apresentam diferentes curvas, tal como representado nos gráficos de CDF de SINR. Estas curvas são: Global, Macro, Micro, C1 e C2, explicadas anteriormente no subcapítulo 4.2.3.

A Figura 4.23 permite observar o CDF do *throughput* da simulação 1, esta foi configurada com 14 estações base, cada uma servindo 300 utilizadores por setor ($N_{tx} = 9$), com um raio de cobertura de 50 metros por célula. Considerando que cada estação base possui 3 setores, o sistema atende um total de 12.600 utilizadores.

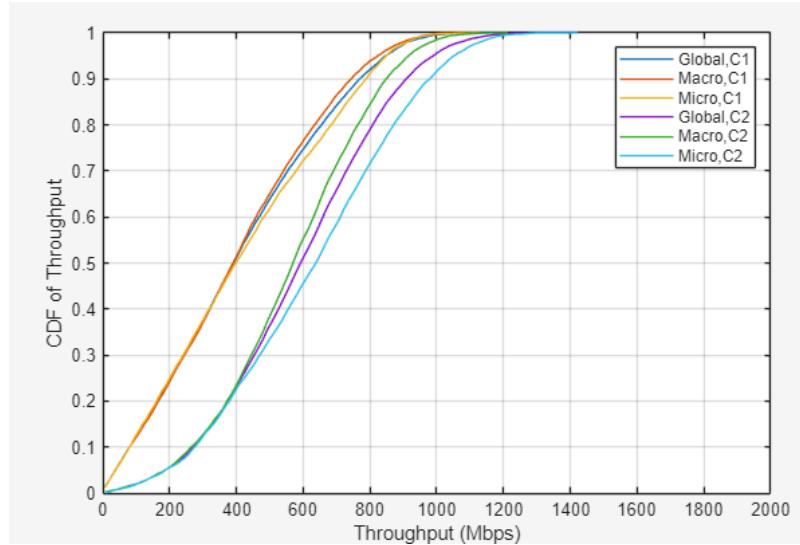


Figura 4.23 - CDF of *Throughput* vs *Throughput* – Simulação 1

Os resultados mostram que as curvas de C1, representando a ausência de *clustering*, tendem a apresentar uma curva mais deslocada para a esquerda e com 200 a 250 Mbps menos de *throughput* em relação às curvas com *clustering* de 2 estações base (C2). Nesta configuração, o *user equipment* (UE) consegue estar conectado simultaneamente a duas estações base, proporcionando assim um *throughput* disponível superior através da combinação dos recursos de ambas as estações.

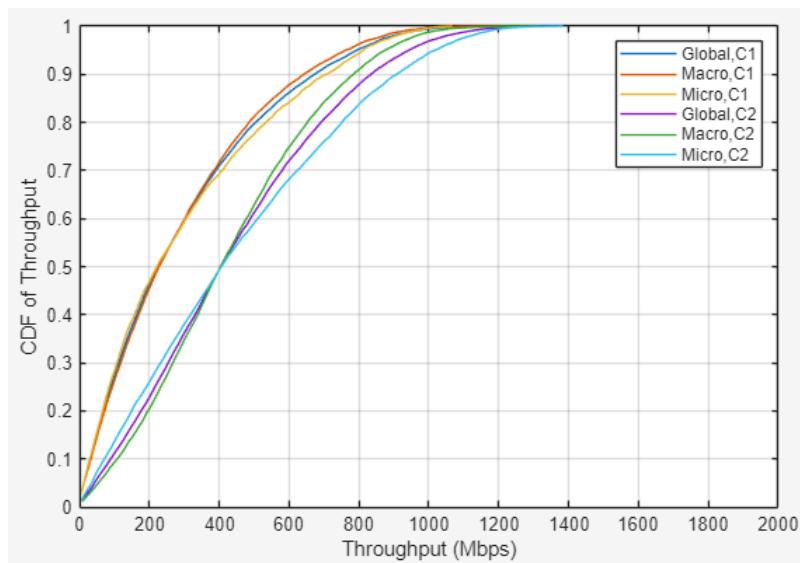


Figura 4.24 - CDF of *Throughput* vs *Throughput* – Simulação 2

À semelhança das simulações do SINR, o gráfico da simulação 2, configurada com os mesmos parâmetros da simulação 1 apenas alterando o raio de 50 para 100 metros, mantém os mesmos 12.600 utilizadores, mas aumenta a área abrangida por cada BS, criando assim mais interferência e ruído, prejudicando o desempenho do sistema. Deste modo, tal como na análise do SINR, as curvas da CDF do *throughput*, em comparação com a simulação 1, estão deslocadas para a esquerda, demonstrando um desempenho médio inferior, o que resulta em taxas de transmissão cerca de 200 Mbps mais baixas para os utilizadores. A simulação 4, tal como observado anteriormente, apesar de alterar a potência de transmissão de 1 W para 10 W, revela-se insignificante para o cenário em estudo e apresenta um resultado idêntico ao da simulação 2.

Para as simulações 5 e 6, os resultados obtidos, apresentados pelas Figuras 4.25 e 4.26, demonstram comportamento paralelo ao observado na comparação entre as simulações 2 e 1.

Verifica-se que o aumento do raio das células conduz a uma redução do *throughput* médio por utilizador, refletida em curvas da CDF deslocadas para a esquerda. Este efeito decorre do aumento da interferência inter-celular, resultante da sobreposição de sinais provenientes de estações base adjacentes, o que degrada a relação sinal-interferência-ruído (SINR) e, consequentemente, o desempenho global da rede.

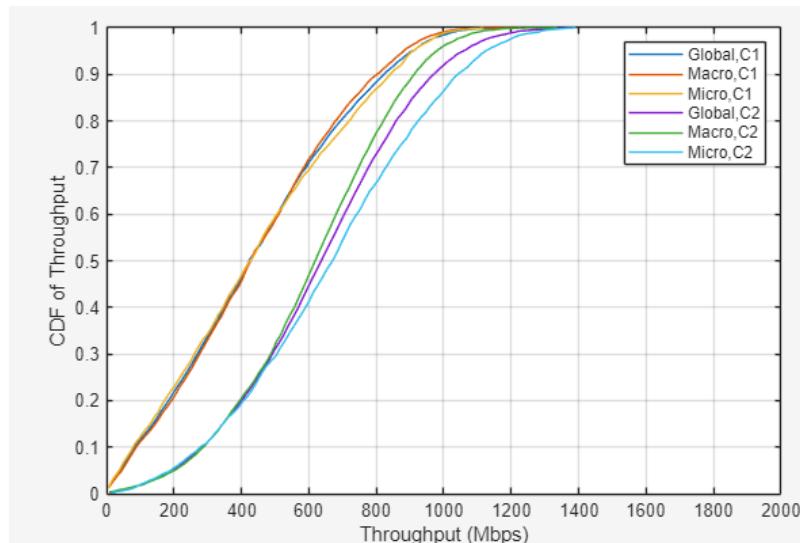


Figura 4.25 - CDF of *Throughput* vs *Throughput* – Simulação 5

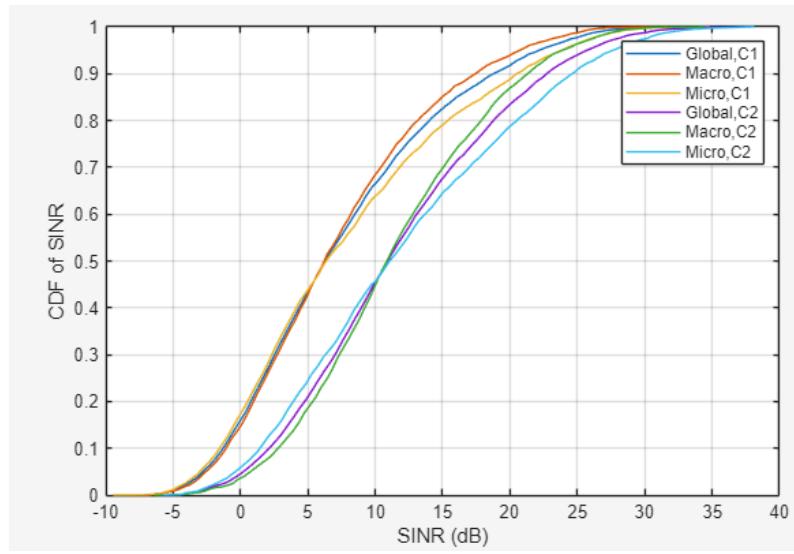


Figura 4.26 - CDF of *Throughput* vs *Throughput* – Simulação 6

CAPÍTULO 5

Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

A presente dissertação teve como principal objetivo o planeamento e análise de desempenho de uma rede 5G NR outdoor no recinto do Passeio Marítimo de Algés, explorando a otimização de parâmetros técnicos e a avaliação de diferentes configurações de rede.

Para este efeito, procedeu-se ao aperfeiçoamento de um simulador a nível de sistema já existente, detalhadamente descrito no Capítulo 3, concebido especificamente para representar com elevada precisão o comportamento de uma infraestrutura 5G em ambientes de elevada densidade de utilizadores, característicos de eventos de grande escala. Através deste simulador, foi possível realizar uma análise detalhada de métricas críticas de desempenho, nomeadamente *throughput* agregado e por utilizador, cobertura e SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), permitindo a formulação de conclusões técnicas fundamentadas sobre o comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais e configurações paramétricas.

Para a realização do estudo, foram elaborados dois cenários de implementação para serem simulados: um com 14 estações base e outro com 7, contemplando variações em parâmetros críticos como o raio de cobertura por célula (50, 100 e 200 metros), os esquemas de modulação (4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM), as potências de transmissão (1W e 10W) e diferentes estratégias de agrupamento de células (1C, 2C e 3C). Esta abordagem permitiu compreender como cada parâmetro influencia a eficiência global da rede e quais as combinações mais adequadas para maximizar o desempenho em ambientes complexos e de alta carga.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o número de estações base tem impacto direto na capacidade total do sistema, o cenário com 14 estações base apresentou um *throughput* agregado superior, permitindo suportar um número maior de utilizadores com uma distribuição mais equilibrada do tráfego. Por outro lado, o cenário com 7 estações base revelou uma cobertura mais ampla, mas com degradação do *throughput* médio por utilizador, consequência da maior distância entre células e do aumento da interferência intercelular.

Relativamente ao raio de cobertura, verificou-se que áreas de menor raio (50 m) proporcionam melhor qualidade de sinal e valores de SINR mais elevados, favorecendo modulações de maior ordem e, consequentemente, um *throughput* mais elevado. Para raios superiores (100 e 200 m), observou-se uma redução gradual da taxa de transferência associada à maior atenuação do sinal e à limitação de potência efetiva recebida pelos utilizadores nas zonas mais afastadas.

No que diz respeito à modulação, as simulações confirmaram a tendência teórica: as modulações de ordem inferior, como 4QAM e 16QAM, garantem uma melhor cobertura e maior estabilidade em condições de sinal fraco, enquanto as modulações 64QAM e 256QAM demonstraram maior eficiência espectral, mas requerem condições de propagação mais favoráveis. Em particular, a modulação 256QAM mostrou-se vantajosa apenas nas regiões centrais das células, próximas das estações base, onde o SINR é mais elevado.

A técnica de *clustering* demonstrou um papel determinante na mitigação da interferência e na melhoria da qualidade de sinal. Entre as configurações testadas, o *clustering* 3C destacou-se como a mais eficaz, proporcionando ganhos expressivos de *throughput* e melhoria notável do SINR em relação às configurações 1C e 2C, verificando-se simultaneamente uma distribuição mais uniforme do *throughput* entre os utilizadores, onde a partilha de recursos entre estações base contribui para uma experiência de rede mais estável e consistente.

Em relação à potência de transmissão, os resultados mostram que o seu aumento tende a melhorar o *throughput* até certo ponto, mas também intensifica a interferência intercelular. Deste modo, a utilização de potências mais elevadas deve ser equilibrada com a densidade de células e a estratégia de *clustering*, para evitar perdas de eficiência. No cenário com 14 estações, observou-se que potências moderadas permitiram atingir resultados equivalentes aos obtidos com potências elevadas no cenário com 7 estações, o que reforça a ideia de que redes mais densas permitem reduzir a potência individual sem comprometer o desempenho global.

Para ambientes com alta densidade de utilizadores e elevada exigência de qualidade de serviço, o cenário com 14 estações base e *clustering* 3C apresentou o melhor equilíbrio entre capacidade, cobertura e qualidade de sinal. Para áreas menos congestionadas, a configuração com 7 estações base e modulação 16QAM pode ser suficiente, garantindo uma boa cobertura com menor custo operacional.

Contudo, é importante salientar que o aumento da densidade de estações base acarreta também maiores custos de instalação, manutenção e consumo energético. Assim, a escolha do cenário ideal deve ser ponderada com base na relação custo-benefício, considerando as condições do ambiente, o perfil dos utilizadores e os requisitos de serviço esperados.

5.2 Trabalhos Futuros

Com base nas conclusões obtidas e nas limitações identificadas durante o desenvolvimento desta investigação, propõem-se linhas de trabalho futuro que poderão contribuir para o aprofundamento e expansão dos conhecimentos na área do planeamento de redes 5G.

A otimização avançada de algoritmos de *scheduling* e alocação de recursos constitui uma extensão natural deste trabalho, permitindo implementar técnicas mais sofisticadas de gestão dinâmica de utilizadores e recursos espectrais com base em condições de tráfego em tempo real. Isto poderá resultar em melhorias significativas da eficiência global do sistema através de algoritmos adaptativos que respondam automaticamente às variações de carga e qualidade de canal.

A integração de métricas de eficiência energética no simulador permitirá analisar o impacto das diferentes configurações no consumo energético global da rede, aspeto fundamental para a sustentabilidade das implementações 5G. Isto inclui a otimização de algoritmos de gestão de potência que equilibrem desempenho e eficiência energética, particularmente relevante em cenários com elevada densidade de estações base.

A aplicação de técnicas de inteligência artificial e *machine learning* ao planeamento automático de redes constitui uma área promissora, permitindo desenvolver algoritmos que otimizem automaticamente parâmetros como potência de transmissão, esquemas de modulação e estratégias de *clustering* com base em dados históricos de tráfego e condições de propagação. Isto reduziria significativamente o tempo de configuração e aumentaria a eficiência operacional.

Finalmente, a validação experimental através de implementação em testbed 5G ou simulação híbrida com dados reais de medições representaria um passo crucial para confirmar empiricamente os resultados teóricos obtidos, permitindo calibrar os modelos desenvolvidos e identificar eventuais discrepâncias entre simulação e realidade operacional.

Referências Bibliográficas

1. Mishra, A. (2018). *Fundamentals of network planning and optimisation 2G/3G/4G: evolution to 5G*. John Wiley & Sons.
2. Penttinens, J. (2019). *5G explained: security and deployment of advanced mobile communications*. . John Wiley & Sons.
3. Venkataraman, H., & Trestian, R. (2017). *5G Radio Access Networks: centralized RAN, cloud-RAN and virtualization of small cells*. . CRC Press.
4. Zhao, L., Zhao, H., Zheng, K., & Xiang, W. (2018). *Massive MIMO in 5G networks: selected applications*. Switzerland: Springer International Publishing.
5. Xiang, W., Zheng, K., & Shen, X. (2016). *5G mobile communications*. Springer.
6. Asif, S. (2018). *5G Mobile communications: concepts and technologies*. CRC Press.
7. Vaezi, M., Ding, Z., & Poor, H. (2019). *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond*. Berlin: Springer.
8. Holma, H., Toskala, A., & Nakamura, T. (2020). *5G technology: 3GPP new radio*. . John Wiley & Sons.
9. Jayakody, D., Srinivasan, K., & Sharma, V. (2019). *5G enabled secure wireless networks*. Springer International Publishing.
10. LEI , W., Soong, A., Jianghua, L., Yong, W., Classon, B., Xiao, W., . . . Mazzarese, D. (2021). *5G system design*. Springer International Publishing.
11. Cox, C. (2025). *An Introduction to 5G: The New Rad*.
12. GSM Association. (2018, April). *Road to 5G: Introduction and Migration. Official Document*. Retrieved from GSMA.COM: https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf
13. Infineon Technologies. (2019, Sep. 2019). *5G – The high-speed mobile network of the future*. Retrieved from EE Times ASIA: <https://www.eetasia.com/5g-the-high-speed-mobile-network-of-the-future/>

ANEXOS

ANEXO A

Neste anexo são apresentados os cálculos teóricos necessários para realizar o planeamento celular considerando um cenário hipotético outdoor com 14 BS/AP e 42 setores no total. Cada BS possui 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 um sistema 5G NR com MIMO Massivo em que em cada setor de célula possui mMIMO com $M=576$ antenas, para servir $K=[32,64]$ utentes, resultando em $M/K=[18,9]$ antenas por utente, sendo o sistema TDD. O sistema compreende no total $3 \times 14 = 42$ setores.

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

O tempo de coerência do canal é $T_c=25\text{ ms}$ e a largura de banda de coerência do canal é $B_c=4\text{MHz}$. Utiliza-se TDD com tempo de transmissão do downlink (DL) igual ao do uplink (UL) mais a duração dos pilotos.

Parâmetros considerados para o planeamento teórico:

$M/K=9$;

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

$EIRPTX=30\text{dBm}$;

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

$10\log(E_{sc}/N_0)=13.6\text{dB}$, $R_c=7/8$ (256QAM);

$10\log(E_{sc}/N_0)=8.9\text{dB}$, $R_c=5/6$ (64QAM);

$10\log(E_{sc}/N_0)=4.9\text{dB}$, $R_c=3/4$ (16QAM);

$10\log(E_{sc}/N_0)=-2.4\text{dB}$, $R_c=1/2$ (4QAM);

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

$10\log(E_b/N_0)=5.1\text{dB}$ (256QAM);

$10\log(E_b/N_0)=1.9\text{dB}$ (64QAM).

$10\log(E_b/N_0)=0.1\text{dB}$ (16QAM);

$10\log(E_b/N_0)=-2.4\text{dB}$ (4QAM).

$T_c=25\text{ms}$;

$B_c=4\text{MHz}$;
 $10\log(F)=8\text{dB}$;
 $M_f=13\text{dB}$;
 $10\log(kT)=-174\text{dBm}$;
 $G_{rx}=2\text{dB}$; $L_{rx}=0\text{dB}$;
 $N_{sc}=3300$ subportadoras com dados.
 $T_s=1\text{ms}$.

Calculo da sensibilidade ($f_c=3.6\text{ GHz}$, $B_t=100\text{MHz}$);
 $10\log(S)=10\log(\text{SNR})+10\log(P_n)$;
 $10\log(P_n)=10\log(kT)+10\log(F)+10\log(B_t)=-174+8+80=-86.0\text{dBm}$;
 $N_b = N_{simb.} \times N_{sc} \times \log_2(M) \times R_c$
 $N_b 1 = 28 \times 3300 \times 8 \times 7/8 = 646800\text{bits}$; $R_b 1 = N_b 1 / T_s$; $R_b 1 = 646.8\text{Mbps}$ (256QAM)
 $N_b 2 = 28 \times 3300 \times 6 \times 5/6 = 462000\text{bits}$; $R_b 2 = N_b 2 / T_s$; $R_b 2 = 462.0\text{Mbps}$; (64QAM)
 $N_b 3 = 28 \times 3300 \times 4 \times 3/4 = 277200\text{bits}$; $R_b 3 = N_b 3 / T_s$; $R_b 3 = 277.2\text{Mbps}$ (16QAM)
 $N_b 4 = 28 \times 3300 \times 2 \times 1/2 = 92400\text{bits}$; $R_b 4 = N_b 4 / T_s$; $R_b 4 = 92.4\text{Mbps}$; (4QAM)

$10\log(\text{SNR})=10\log(E_b/N_0)+10\log(R_b/B_t)$;
 $10\log(\text{SNR}1)=5.1\text{dB}+10\log(646.8/100)=13.2\text{dB}$; (256QAM)
 $10\log(\text{SNR}2)=1.9\text{dB}+10\log(462.0/100)=8.6\text{dB}$; (64QAM)
 $10\log(\text{SNR}3)=0.1\text{dB}+10\log(277.2/100)=4.5\text{dB}$; (16QAM)
 $10\log(\text{SNR}4)=-2.4\text{dB}+10\log(92.4/100)=-2.7\text{dB}$; (4QAM)

$10\log(S)=10\log(\text{SNR})+10\log(P_n)$;
 $10\log(S1)=13.2-86.0=-72.8\text{dBm}$; (256QAM);
 $10\log(S2)=8.6-86.0=-77.4\text{dBm}$; (64QAM);
 $10\log(S3)=4.5-86.0=-81.5\text{dBm}$; (16QAM);
 $10\log(S4)=-2.7-86.0=-88.7\text{dBm}$; (4QAM);

Calculo do raio de cobertura no cenário genérico;
 $L_{path}=\text{EIRPTX}+G_{rx}-L_{rx}-M_f-10\log(S)$; $L_{path}=30+2-0-13-10\log(S)=19-10\log(S)$;
 $L_{path}1=19+72.8=91.8\text{dB}$;
 $L_{path}2=19+77.4=96.4\text{dB}$;
 $L_{path}3=19+81.5=100.5\text{dB}$;
 $L_{path}4=19+88.7=107.7\text{dB}$;

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

$L_{path}=L_{path1} \Rightarrow R_1=10(91.8-43.6)/32=32.08$ m (256QAM)

$L_{path}=L_{path2} \Rightarrow R_2=10(96.4-43.6)/32=44.67$ m (64QAM)

$L_{path}=L_{path3} \Rightarrow R_3=10(100.5-43.6)/32=60.0$ m (16QAM)

$L_{path}=L_{path4} \Rightarrow R_4=10(107.7-43.6)/32=100.72$ m (4QAM)

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

$T_c=25$ ms; $B_c=4$ MHz; $\tau_c=B_c T_c=2.5 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^6=105=100000$ (nº máximo de símbolos para transmitir no canal com mMIMO)

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

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

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

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

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

Na zona 1 com $R_c=7/8$ (256QAM) $\Rightarrow R_{st1}=5 \times 10^7 \times 7/8$ sps. $A_1=\pi \times 32.082$; $A_1/AT=9.8\%$

Na zona 2 com $R_c=5/6$ (64QAM) $\Rightarrow R_{st2}=5 \times 10^7 \times 5/6$ sps. $A_2=\pi \times (44.672-32.082)$; $A_2/AT=9.5\%$

Na zona 3 com $R_c=3/4$ (16QAM) $\Rightarrow R_{st3}=5 \times 10^7 \times 3/4$ sps. $A_3=\pi \times (164.32-44.672)$; $A_3/AT=20.7\%$

Na zona 4 com $R_c=1/2$ (4QAM) $\Rightarrow R_{st4}=5 \times 10^7 \times 1/2$ sps. $A_4=\pi \times (100.722-60.02)$; $A_4/AT=60.0\%$

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 $\Rightarrow R_{bc1}=219.52 \times 10^7$ bps;(8bits/símbolo)

Zona 2 $R_{sc2}=64 \times 5 \times 10^7 \times 5/6 \times (A_2/AT)$ sps $\Rightarrow R_{bc2}=152.0 \times 10^7$ bps;(6bits/símbolo)

Zona 3 $R_{sc3}=64 \times 5 \times 10^7 \times 3/4 \times (A_3/AT)$ sps $\Rightarrow R_{bc3}=198.72 \times 10^7$ bps;(4bits/símbolo)

Zona 4 $R_{sc4}=64 \times 5 \times 10^7 \times 1/2 \times (A_4/AT)$ sps $\Rightarrow R_{bc4}=192.0 \times 10^7$ bps;(2bits/símbolo)

Somatório dos ritmos binários nas 4 zonas; $R_{bc}=R_{bc1}+R_{bc2}+R_{bc3}+R_{bc4}=762.24 \times 10^7$ bps

$\epsilon=R_{bc}/B_t=762.24 \times 10^7 / 108=76.22$ bps/Hz $\Rightarrow \epsilon=76.22$ bps/Hz/sector

$\epsilon/K=1.191$ bps/Hz/pedestre

Considerando que há 42 setores (14 BS) no cenário hipotético dá um *Throughput* total = 320.2 Gbps

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

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

$10\log(E_{sc}/N_0)=10.6$ dB, $R_c=7/8$ (256QAM);

$10\log(E_{sc}/N_0)=5.9$ dB, $R_c=5/6$ (64QAM);

$10\log(E_{sc}/N_0) = 1.9 \text{ dB}$, $R_c = 3/4$ (16QAM);

$10\log(E_{sc}/N_0) = -5.4 \text{ dB}$, $R_c = 1/2$ (4QAM);

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

$10\log(E_b/N_0) = 2.1 \text{ dB}$ (256QAM);

$10\log(E_b/N_0) = -1.1 \text{ dB}$ (64QAM).

$10\log(E_b/N_0) = -2.9 \text{ dB}$ (16QAM);

$10\log(E_b/N_0) = -5.4 \text{ dB}$ (4QAM).

$10\log(F) = 8 \text{ dB}$;

$M_f = 13 \text{ dB}$;

$10\log(kT) = -174 \text{ dBm}$;

$G_{rx} = 2 \text{ dB}$; $L_{rx} = 0 \text{ dB}$;

$T_c = 25 \text{ ms}$;

$B_c = 4 \text{ MHz}$;

$N_{sc} = 3300$ subportadoras.

$T_s = 1 \text{ ms}$.

$M/K = 18$

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

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

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

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

$N_b = 28 \times 3300 \times 8 \times 7/8 = 646800 \text{ bits}$; $R_b = N_b/T_s$; $R_b = 646.8 \text{ Mbps}$ (256QAM)

$N_b = 28 \times 3300 \times 6 \times 5/6 = 462000 \text{ bits}$; $R_b = N_b/T_s$; $R_b = 462.0 \text{ Mbps}$; (64QAM)

$N_b = 28 \times 3300 \times 4 \times 3/4 = 277200 \text{ bits}$; $R_b = N_b/T_s$; $R_b = 277.2 \text{ Mbps}$ (16QAM)

$N_b = 28 \times 3300 \times 2 \times 1/2 = 92400 \text{ bits}$; $R_b = N_b/T_s$; $R_b = 92.4 \text{ Mbps}$; (4QAM)

$10\log(SNR) = 10\log(E_b/N_0) + 10\log(R_b/B_t)$;

$10\log(SNR_1) = 2.1 \text{ dB} + 10\log(646.8/100) = 10.2 \text{ dB}$; (256QAM)

$10\log(SNR_2) = -1.1 \text{ dB} + 10\log(462.0/100) = 5.6 \text{ dB}$; (64QAM)

$10\log(SNR_3) = -2.9 \text{ dB} + 10\log(277.2/100) = 1.5 \text{ dB}$; (16QAM)

$10\log(SNR_4) = -5.4 \text{ dB} + 10\log(92.4/100) = -5.7 \text{ dB}$; (4QAM)

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

$10\log(S1)=10.2-86.0=-75.8\text{dBm};(256\text{QAM});$
 $10\log(S2)=5.6-86.0=-80.4\text{dBm};(64\text{QAM});$
 $10\log(S3)=1.5-86.0=-84.5\text{dBm};(16\text{QAM});$
 $10\log(S4)=-5.7-86.0=-91.7\text{dBm};(4\text{QAM});$

Calculo do raio de cobertura no cenário genérico;

$L_{path}=EIRPTX+Grx-Lrx-Mf-10\log(S); L_{path}=30+2-0-13-10\log(S)=19-10\log(S);$

$L_{path1}=19+75.8=94.8\text{dB};$

$L_{path2}=19+80.4=99.4\text{dB};$

$L_{path3}=19+84.5=103.5\text{dB};$

$L_{path4}=19+91.7=110.7\text{dB};$

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

$L_{path}=L_{path1} \Rightarrow R1=10(94.8-43.6)/32=39.81\text{m (256QAM)}$

$L_{path}=L_{path2} \Rightarrow R2=10(99.4-43.6)/32=55.43\text{m (64QAM)}$

$L_{path}=L_{path3} \Rightarrow R3=10(103.5-43.6)/32=74.46\text{m (16QAM)}$

$L_{path}=L_{path4} \Rightarrow R4=10(110.7-43.6)/32=125.0\text{m (4QAM)}$

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

$T_c=25\text{ms};$

$B_c=4\text{MHz};$

$\tau_c=B_c T_c=2.5 \times 10 - 2 \times 4 \times 106 = 105 = 100000$ (nº máximo de símbolos para transmitir no canal com mMIMO)

$M=576;$

$K=32;$

$M/K=18$ (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 $R_s=N_s/T_c=5 \times 104 / 2.5 \times 10 - 2 = 0.2 \times 10^7 \text{sps}$ em cada B_c .

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

Na zona 1 com $R_c = 7/8$ (256QAM) $\Rightarrow R_{st1} = 5 \times 10^7 \times 7/8 \text{ sps. } A_1=\pi \times 39.812; A_1/AT=10.1\%$

Na zona 2 com $R_c = 5/6$ (64QAM) $\Rightarrow R_{st2} = 5 \times 10^7 \times 5/6 \text{ sps. } A_2=\pi \times (55.432-39.812); A_2/AT=9.5\%$

Na zona 3 com $R_c = 3/4$ (16QAM) $\Rightarrow R_{st3} = 5 \times 10^7 \times 3/4 \text{ sps. } A_3=\pi \times (74.462-55.432); A_3/AT=14.9\%$

Na zona 4 com $R_c = 1/2$ (4QAM) $\Rightarrow R_{st4} = 5 \times 10^7 \times 1/2 \text{ sps. } A_4=\pi \times (125.02-74.462); A_4/AT=64.5\%$

Em cada setor da célula há K=32 pedestres/setor => Rsc = Rst x K

Zona 1 Rsc1=32x5x107x7/8x(A1/AT)sps => Rbc1=113.12x107bps;(8bits/simbolo)

Zona 2 Rsc2=32x5x107x5/6x(A2/AT)sps=> Rbc2=76.0x107bps;(6bits/simbolo)

Zona 3 Rsc3=32x5x107x3/4x(A3/AT)sps => Rbc1=71.52x107bps;(4bits/simbolo)

Zona 4 Rsc4=32x5x107x1/2x(A4/AT)sps=> Rbc2=103.2x107bps;(2bits/simbolo)

Somatório dos ritmos binários nas 4 zonas; Rbc=Rbc1+Rbc2+Rbc3+Rbc4=363.84x107bps

$\epsilon = Rbc/Bt = 363.84 \times 107 / 108 = 36.384 \text{ bps/Hz}$ => $\epsilon = 36.384 \text{ bps/Hz/sector}$

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

Considerando que há 42 setores (10 BS) no cenário hipotético dá um *Throughput* total = 152.9 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 $(125.0 / 100.72)2 = 1.54$ maior do que no caso M/K=9, pelo que se deve multiplicar este valor do *throughput* total inicialmente obtido.

Isto é: *Throughput* total = $152.9 \times 1.54 = 235.4 \text{ Gbps}$.