



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Planeamento de redes privadas 5G

Luís Guilherme de Matos Raposo de Ornelas Candelária

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática,

Orientador:

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

Setembro, 2024



TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Planeamento de redes privadas 5G

Luís Guilherme de Matos Raposo de Ornelas Candelária

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática,

Orientador:

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

Setembro, 2024

Agradecimento

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha profunda gratidão à minha família, especialmente à minha mãe, Isabel Candelária, pelo apoio incondicional que sempre me ofereceu na minha vida académica. Aos meus avós, Abílio Raposo e Arlete Raposo, e ao meu irmão, Bernardo Candelária, agradeço por todo o apoio que sempre me proporcionaram.

Aos amigos, em particular ao João Carvalho, sou grato por estar sempre presente, especialmente nos momentos mais difíceis, oferecendo-me suporte e força tanto na vida pessoal quanto académica.

À minha namorada, Telma Ferreira, agradeço por ter estado ao meu lado durante todo este processo, proporcionando-me ajuda, atenção, alegria e motivação, o que tornou o percurso muito mais fácil.

Finalmente, ao Professor Américo Correia, expresso o meu agradecimento pela orientação prestada ao longo do trabalho, pela ajuda na resolução dos problemas encontrados e pelo acompanhamento constante de todo o processo.

A todos vós, expresso a minha mais profunda gratidão.

Resumo

A presente dissertação centra-se no planeamento de redes privadas 5G, com ênfase na análise de desempenho de um sistema 5G NR no Rock in Rio Lisboa. O estudo explora dois cenários: um com 13 estações base, cada uma a transmitir a 25W, e outro com 26 estações base, cada uma a transmitir a 10W. Os cenários foram avaliados com diferentes configurações, incluindo modulações a 16QAM e 256QAM, bem como com as estratégias de *clustering* 1C e 3C.

O estudo analisou detalhadamente o *throughput*, cobertura e a qualidade do sinal em ambos os cenários, refletindo sobre a eficácia das diferentes abordagens e configurações utilizadas. Além disso, foi elaborado um cenário teórico indoor, que permitiu expandir a compreensão sobre o comportamento das redes 5G em ambientes interiores.

Os resultados indicam que o cenário com 26 estações base proporciona uma melhoria significativa na cobertura e na qualidade do sinal, especialmente aliada a técnicas de *clustering* eficazes. Relativamente à modulação 16 QAM também se demonstrou superior comparativamente à 256QAM, permitindo uma expansão mais rápida e linear da cobertura em ambos os cenários

Palavras-Chave: 5G; *Clustering*; *Throughput*; Redes Privadas

Abstract

This dissertation focuses on the planning of private 5G networks, with an emphasis on the performance analysis of a 5G NR system at Rock in Rio Lisboa. The study explores two scenarios: one with 13 base stations, each transmitting at 25W, and another with 26 base stations, each transmitting at 10W. The scenarios were evaluated with different configurations, including 16 QAM and 256QAM modulations, as well as clustering strategies 1C and 3C.

The study thoroughly analyzed the throughput, coverage, and signal quality in both scenarios, reflecting on the effectiveness of the different approaches and configurations used. Additionally, a theoretical indoor scenario was developed, which allowed for an expanded understanding of the behavior of 5G networks in indoor environments.

The results indicate that the scenario with 26 base stations provides a significant improvement in coverage and signal quality, especially when combined with effective clustering techniques. Furthermore, 16QAM modulation was shown to be superior compared to 256QAM, enabling a faster and more linear expansion of coverage in both scenarios.

Keywords: 5G; Clustering; Throughput; Private Networks

Índice

CAPÍTULO 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Motivação e Enquadramento	1
1.2. Questões e objetivos de investigação.....	2
1.2.1 Questões de investigação.....	3
1.2.2 Objetivos.....	3
1.3. Metodologia.....	3
CAPÍTULO 2.....	6
Revisão da Literatura.....	6
2.1. Redes 5G	6
2.1.1 Ondas milimétricas (<i>mm-Wave</i>).....	8
2.1.2 Tecnologia <i>m-MIMO</i>	10
2.2. <i>Network slicing</i>	11
2.3. Integração do 5G com outras tecnologias emergentes.....	13
2.4. Redes privadas 5G no setor industrial	14
2.4.1 Integração de redes privadas 5G com equipamentos <i>legacy</i>	16
2.4.2 Segurança e privacidade em redes privadas 5G.....	17
2.5. Alocação de espectro nas redes privadas 5G	17
2.5.1 Espectro licenciado.....	18
2.5.2 Espectro não licenciado.....	19
2.5.3 Espectro dedicado	19
CAPÍTULO 3.....	21
Simulador de Sistema.....	21
3.1 Implementação e descrição do simulador.....	21
3.2 Descrição do cenário.....	22
Capítulo 4	26
Resultados e Discussão	26
4.1 Resultados Teóricos	26
4.2 Resultados das Simulações	26
4.2.1 Resultados de <i>Throughput</i>	27
4.2.2 Resultados de cobertura.....	36
4.2.3 Resultados da qualidade do sinal em relação ao ruído e interferência	39

Capítulo 5	42
Conclusões e Trabalho Futuro.....	42
5.1 Conclusões	42
5.2 Trabalho Futuro	43
ANEXOS	50
Anexo A	50

Índice de Figuras

Figura 1 - DSR Methodology Diagram (Cater-Steel et al., 2019)	4
Figura 2 - 5G use cases (Silva and Gerreiro, 2020)	6
Figura 3 - Small Cell Technology (Niu et al., 2017)	10
Figura 4 - sistema m-MIMO (Salah et al., 2022)	11
Figura 5 - Network slicing baseada em sistemas de rede 5G (Zhang et al, 2017)	12
Figura 6 - Cenários da rede privada 5G	16
Figura 7 - Etapas do simulador	22
Figura 8 - Planta Rock In Rio Lisboa 2024 (Fonte: assets-lisboa.rockinrio)	23
Figura 9 - Cenário 1	24
Figura 10 - Cenário 2	25
Figura 11 - Throughput vs Número de utilizadores, cenário 13 Estações Base	28
Figura 12 – Throughput vs Número de utilizadores, cenário 26 Estações Base	29
Figura 13 - Throughput Vs CDF of Throughput, cenário com 13 estações base	30
Figura 14 - Throughput Vs CDF of Throughput, cenário com 26 BSs	32
Figura 15 - Throughput/user Vs Power, cenário com 13 estações base	34
Figura 16 - Throughput/user Vs Power, cenário com 26 estações base	35
Figura 17 - Coverage Vs Power, cenário com 13 estações base	37
Figura 18 - Throughput/user Vs Power, cenário com 26 estações base	38
Figura 19 - CDF of SINR Vs SINR, cenário com 13 estações base	40
Figura 20 - CDF of SINR Vs SINR, cenário com 26 estações base	41

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Evolução das redes celulares (Sarma et al., 2022).....	8
Tabela 2 - Alocação de espectro em redes privadas 5G.....	18
Tabela 3 - Dados das simulações.....	21
Tabela 4.1 - Parâmetros considerados para planeamento teórico do cenário indoor	51

CAPÍTULO 1

Introdução

O presente capítulo tem como principal objetivo enquadrar o tema escolhido para a dissertação, de modo que seja possível compreender, detalhadamente, todos os assuntos que serão abordados nos próximos capítulos. Aqui ainda são esclarecidas todas as motivações e, respetivas, justificações da importância que este tema constitui, um contributo no avanço da área de telecomunicações. São, também, providenciados alguns conceitos fundamentais, bem como algumas particularidades das redes 5G.

É neste capítulo que são levantadas algumas questões de investigação com foco em delimitar certos objetivos que constituem um papel fulcral no desenvolvimento desta dissertação. Por fim, é explicada qual a metodologia adotada para a conceção desta investigação, assim como uma explicação das fases que o presente trabalho transita.

1.1. Motivação e Enquadramento

Atualmente, com o aumento, não só de tráfego de dados na Internet, como também do número de dispositivos conectados, a demanda por uma infraestrutura de comunicação mais rápida e eficiente, como a implementação generalizada da tecnologia 5G, torna-se cada vez mais imperativa. Para atender às métricas de taxa de dados e eficiência, as redes de quinta geração surgiram como uma evolução do 4G, projetadas para ter taxas de dados sem fio bastante superiores e com latência muito inferior às que as redes 4G ofereciam (Watanabe et al., 2021).

As redes móveis celulares percorreram um longo caminho desde a primeira geração (1G), dando origem a uma nova geração móvel aproximadamente a cada 10 anos. Ao longo dos últimos 30 anos, a indústria móvel transformou a sociedade por meio de cinco gerações, cada uma deixando um impacto significativo. A primeira geração proporcionou a introdução da telefonia móvel de mercado, enquanto a segunda (2G) não apenas trouxe a interoperabilidade global, como também impulsionou a popularização das mensagens de texto SMS. Anos mais tarde, com o avanço do 3G tornou-se possível a transferência de dados em alta velocidade, possibilitando aos utilizadores realizar downloads da Internet de forma eficiente. O 4G testemunhou uma melhoria expressiva na capacidade e velocidade de dados, tornando as plataformas online e os serviços de internet móvel ainda mais rápidos para um número crescente de utilizadores. Agora, a tecnologia 5G emerge como a mais poderosa entre as redes móveis, apresentando capacidades extraordinárias de dados, volumes de chamadas ilimitadas e transmissão de dados infinita, marcando assim um avanço notável na conectividade móvel (Attaran, 2023).

Os operadores de redes móveis tendem a implementar redes em áreas com um grande número populacional, visando receitas para cobrir os custos de implementação. Isto poderá resultar numa cobertura deficiente em áreas urbanas menos povoadas e até mesmo na ausência de cobertura em zonas mais remotas. Adicionalmente, no contexto de um mundo onde ciberataques são cada vez mais frequentes, as empresas de alta tecnologia, e não só, exigem o uso das suas próprias políticas de segurança personalizadas e armazenamento local de dados, requisitos que nem sempre são atendidos por algumas redes celulares públicas tradicionais. Como resultado destas limitações, as redes privadas têm despertado um interesse significativo, oferecendo soluções mais adaptadas às necessidades específicas de empresas e setores industriais. Atualmente, já existem redes privadas baseadas na tecnologia Long Term Evolution (LTE) que se fundamenta em tecnologias de quarta geração (4G), representando uma realidade comercial consolidada. As redes privadas LTE destacam-se por oferecer suporte a uma variedade de aplicações industriais em setores diversos, ao acomodar e processar as informações recolhidas através de equipamentos conectados, como por exemplo sensores, câmaras, robots, etc. Contudo, as crescentes exigências das indústrias em termos de desempenho, abrangendo aspetos como taxa de transferência, latência, fiabilidade e segurança, são requisitos cada vez mais rigorosos que as redes privadas LTE, no seu formato atual, não conseguem satisfazer. Este cenário impulsiona a busca por soluções mais avançadas e adaptáveis, capazes de atender às necessidades específicas e em constante evolução dos setores industriais, promovendo assim a evolução das redes privadas para alcançar padrões mais elevados de eficiência e confiabilidade (Wen et al., 2022).

Uma rede privada 5G é uma realização específica do sistema 5G projetada e configurada para uso privado, ou seja, não público, por um grupo exclusivo de utilizadores. Embora o conceito de redes privadas sem fios não seja totalmente inovador, assistimos agora a uma evolução notável que não só otimiza a eficiência nas operações empresariais, como também impulsiona a transformação digital em diversos setores, destacando assim o potencial verdadeiramente revolucionário das redes privadas 5G (Rostami, 2019).

1.2. Questões e objetivos de investigação

A presente investigação tem como principal objetivo abordar alguns tópicos fundamentais relacionados com o tema escolhido, de modo a solucionar determinadas questões suscitadas durante a realização deste trabalho. Para atingir esse propósito, é essencial estabelecer alguns objetivos específicos que direcionem o rumo da pesquisa, enquanto se delineiam as principais questões que serão esclarecidas ao longo do processo de elaboração deste estudo.

1.2.1 Questões de investigação

Tendo em conta que o foco da investigação provem de questões, facilmente se compreende o grande impacto que estas denotam no desenvolvimento do trabalho. De facto, considera-se que as questões de investigação representarão uma mais-valia na conceção do compromisso proposto.

No âmbito do tema selecionado, colocar-se-ão quatro questões de investigação:

- Como tirar maior proveito das redes privadas 5G?
- Qual o papel das redes privadas 5G na criação de ambientes de trabalho mais inteligentes e adaptáveis?
- Quais são os fatores críticos que influenciam o sucesso ou insucesso no planeamento e implementação de redes privadas 5G?
- De que forma as redes privadas 5G podem ser integradas com outras tecnologias emergentes, tal como por exemplo a Internet das Coisas (IoT), para a criação de soluções mais abrangentes?

1.2.2 Objetivos

O objetivo central deste estudo consiste em realizar o planeamento celular de uma rede privada 5G para ser utilizada durante um concerto, com especial ênfase na avaliação do sistema em termos de *throughput* e cobertura. Para tal, será utilizado um simulador implementado em Java, adaptado especialmente para as necessidades deste contexto. Neste estudo é crucial considerar não apenas os requisitos técnicos e de desempenho, como também as necessidades específicas dos utilizadores e as características do ambiente de implementação.

Além disso, em primeiro lugar, é necessário efetuar uma investigação ao torno do tema escolhido e avaliar as principais características das redes 5G, com o intuito de fundamentar teoricamente o desenvolvimento do estudo. Esta fase inicial de pesquisa permitirá uma compreensão aprofundada do estado atual da tecnologia 5G, identificando as suas capacidades, limitações e tendências emergentes.

1.3. Metodologia

Com intuito de atingir todos os objetivos delineados, esta dissertação baseia-se na metodologia *Design Science Research Methodology (DSRM)*, cuja abordagem ostenta um duplo propósito: a criação de um artefacto destinado a resolver um problema prático, num contexto específico, e gerar novos conhecimentos técnicos e científicos. A Figura 1 representa visualmente as seis fases distintas que estruturam o desenvolvimento desta investigação. De seguida, será providenciada uma descrição de cada uma destas etapas, proporcionando uma visão abrangente do percurso metodológico adotado.

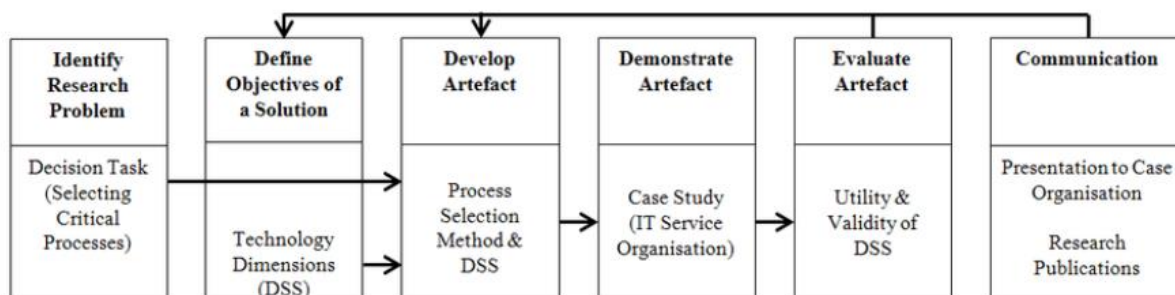


Figura 1 - DSR Methodology Diagram (Cater-Steel et al., 2019)

- A primeira etapa, identificação do problema, será concluída por meio de pesquisas científicas, conforme detalhado no Capítulo 2 desta dissertação. Esta abordagem fornecerá um suporte sólido para o desenvolvimento e investigação do artefacto, estabelecendo as bases fundamentais para o desenvolvimento dos objetivos propostos.
- A definição de objetivos e soluções constitui outra fase crucial nesta dissertação. Será dedicado um esforço significativo para delinear metas específicas e identificar soluções inovadoras que abordem o problema identificado.
- O desenvolvimento do artefacto será conduzido por meio de ferramentas e métodos DDS (*Design Decision Support System*). Desta forma, será criado um artefacto que visa resolver o problema identificado na primeira fase da metodologia. Durante este período, a aplicação de métodos, tecnologias e teorias será indispensáveis para a conceção eficaz do artefacto.
- A etapa da demonstração do artefacto assume uma importância crucial, uma vez que permite evidenciar que o seu uso proporciona uma ou mais soluções para o problema inicial. A validação prática e a eficácia real do artefacto serão destacadas nesta fase.
- Na etapa de avaliação do artefacto, será essencial a utilização de métricas para caracterizar a sua eficiência. Este processo demandará pesquisas quantitativas, visando avaliar todas as hipóteses possíveis e proporcionando uma análise rigorosa da contribuição do artefacto para a resolução do problema.
- A última etapa, a comunicação, será dedicada tanto à pesquisa quanto ao artefacto. Esta fase será direcionada a um público especializado nas áreas de tecnologia e gestão, facilitando a divulgação eficaz dos resultados obtidos e do contributo significativo do artefacto no contexto estudado.

Revisão da Literatura

2.1. Redes 5G

Em termos gerais, as redes 5G abrangem três *use cases*: banda larga móvel aprimorada (eMBB), comunicações em massa para tipos de máquina (mMTC) e conectividade permanente e mais fiável (URLLC). Cada um destes casos apresenta desafios específicos, como a necessidade de proporcionar uma cobertura mais ampla, ampliar a capacidade da rede, garantir alta fiabilidade ou assegurar um atraso mínimo. É evidente que cada cenário de uso 5G demanda estratégias de *handover* distintas, impactando a sobrecarga de sinalização, o consumo de energia e o atraso de *handover* (Shayea et., 2020).

O *use case* de banda larga móvel aprimorada, ou *enhanced mobile broadband* (eMBB), está alinhada com os *use cases* das gerações anteriores, onde o objetivo é fornecer uma taxa de dados mais elevada. Porém, o 5G visa uma melhora de 10 a 100 vezes em relação às redes 4G, equivalente a 10 Gbps. As comunicações massivas para tipos de máquina, ou *massive machine type communications* (mMtc), impulsionadas pelo aumento da Internet das Coisas (IoT), exigem padrões de conectividade que possam suportar uma elevada densidade de dispositivos com baixo consumo de energia. Normalmente, os dispositivos IoT operam com bateria e são projetados para durar vários anos, uma consideração que as gerações de rede anteriores não contemplavam. Finalmente, a comunicação ultra-fiável, ou *ultra-reliable low-latency communication* (URLLC), é direcionada para serviços críticos que exigem uma taxa de erro extremamente baixa (alta confiabilidade) e baixa latência. Essas aplicações geralmente não necessitam de uma taxa de dados elevada (Mughees et al., 2020).

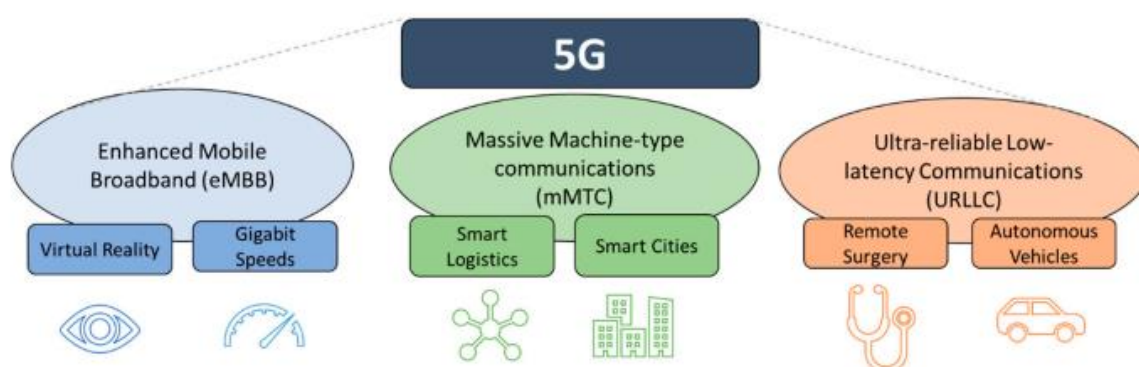


Figura 2 - 5G use cases (Silva and Gerreiro, 2020)

O 5G possibilita uma ampla variedade de conexões, incluindo a Internet das Coisas, Comunicação máquina-a-máquina (M2M), dispositivo-a-dispositivo (D2D), veículo-para-tudo (V2X) e *bluetooth*. Em conjunto, estas conexões referidas, influenciarão setores empresariais, governamentais e interações dos consumidores. Prevê-se que haja centenas de milhares de conexões simultâneas consideradas essenciais para a implementação massiva destes serviços nas redes 5G. Estes tipos de serviços interligados exigirão uma capacidade de sistema expandida e taxa de dados mais elevadas, enquanto algum deles requerem menor latência. Todos estes fatores contribuíram para o desenvolvimento dos sistemas 5G (Shayea et., 2020). A tecnologia D2D é, de facto uma das impulsionadoras desta nova geração, sendo, desta forma, importante focar algumas das particularidades da mesma. A comunicação D2D, ou *device-to-device*, é transparente para a rede celular, uma vez que permite que equipamentos de utilizador (UE) adjacentes contornem a *base station* e estabeleçam ligações diretas entre eles, para partilhar a sua ligação e atuar como estações de retransmissão, ou comunicar diretamente e trocar informações. O D2D pode ser utilizado para implementar muitos dos requisitos do 5G, pois pode suportar taxas de bits elevadas e minimizar o atraso entre os *UEs* e *D2D*. Esta tecnologia proporciona diversos benefícios, nomeadamente na eficiência espectral, realocação de recursos e redução de interferência. No entanto, ainda há vários desafios que precisam de ser resolvidos, tais como a gestão de interferência, alocação de recursos de rádio e qualidade de serviço (Ioannou et al., 2020).

As comunicações 5G utilizam a tecnologia massiva de entrada e saída múltipla (*m-MIMO*), bem como comunicações em ondas milimétricas (*mm-wave*), em grande escala, proporcionando uma eficiência espectral e capacidade notavelmente superiores em comparação com as comunicações de quarta geração. É importante evidenciar que, ao utilizar frequências portadoras com valores próximos de 60 GHz, em vez das tradicionais bandas de 2 ou 3 GHz, as comunicações *mm-wave* facilitam a implementação da tecnologia *m-MIMO*, uma vez que a distância entre antenas é significativamente reduzida, assim como o tamanho das antenas. Por isto, tanto as estações base, assim como os terminais móveis poderão acomodar centenas de elementos de antena (Silva and Guerreiro, 2020).

Relativamente aos sistemas *wireless* da quinta geração, um dos objetivos é proporcionar taxa de dados notavelmente elevadas, na ordem dos gigabits por segundo, apresentando uma latência incrivelmente baixa, juntamente com uma capacidade gradualmente melhorada das estações base e uma melhoria significativa na qualidade de serviço comparativamente às atuais redes *LTE* de quarta geração. As redes celulares convencionais encontram-se sob considerável stress devido ao aumento do número de dispositivos inteligentes, bem como ao rápido crescimento da procura e utilização de dados multimédia sem fios e, consequentemente, a rede fique sobrecarregada (Devrari et al., 2023).

2.1.1 Ondas milimétricas (*mm-Wave*)

A demanda por taxas de dados mais elevadas entre os dispositivos móveis impulsionou a evolução das redes celulares de quinta geração. A evolução das redes celulares, desde a primeira até à quinta geração, está resumida na Tabela 1. Características como largura de banda substancial, transmissão direcional, entre outras, têm sido as características mais desejadas da faixa de ondas milimétricas (*mm-Wave*). A comunicação em ondas milimétricas antecipa a chegada de aplicações intensivas em largura de banda. No entanto, esses avanços também apresentam muitos novos desafios e obstáculos a serem superados, tal como analisaremos adiante (Sarma et al., 2022).

Resumo da evolução de redes celulares			
Geração	Tecnologia	Data rate	Aplicação
1G	AMPS	2 Kbps	Voz
2G	GSM, CDMA	100 Kbps	Voz e dados básicos
3G	UMTS, WCDMA, HSPA	~ 384 Kbps	Voz, acesso de dados em alta velocidade e chamadas de vídeo
4G	LTE, WIMAX	100-200 Mbps	Jogos online
5G	Combinação de várias tecnologias: mm-Wave, IOE, D2D, massive MIMO, V2V, comunicação máquina-a-máquina, NOMA, SDR, etc.	>1 Gbps	Telepresença holográfica, IoT

Tabela 1 – Evolução das redes celulares (Sarma et al., 2022)

Tal como é evidenciado na Tabela 1, o 5G é suportado por uma combinação de várias tecnologias, sendo importante clarificar a importância das *mm-Wave*. As ondas milimétricas são especialmente adequadas para células pequenas, como células *pico* ou *femto*, devido às elevadas perdas de propagação e larguras de banda de coerência elevadas. Nestes cenários, a taxa de transferência disponibilizada é significativamente aumentada (Silva and Guerreiro, 2020).

A comunicação por ondas milimétricas opera na faixa de frequência de 30 a 300 GHz com comprimento de onda variando de 1 a 10 mm. Destacam-se algumas das características negativas salientes na propagação da comunicação *mm-Wave*:

- Maior perda de propagação em comparação com a faixa de micro-ondas ($f \leq 7\text{GHz}$);
- Comprimentos de onda mais curtos do espectro *mm-Wave*, o que tornam difícil a difração ao redor das bordas dos obstáculos;

- Sinal mm-Wave dificilmente penetra em certos materiais, resultando em altas perdas de atenuação.

Além disto, a mitigação de interferência emerge como uma preocupação crucial na implementação da comunicação sem fio. Fatores ambientais, como a atenuação causada pela chuva e a absorção atmosférica, desempenham um papel significativo na degradação da intensidade do sinal. Estes elementos adicionais podem introduzir obstáculos imprevisíveis, influenciando diretamente a qualidade de comunicação, exigindo estratégias eficientes para controlar ou minimizar estes efeitos negativos (Sarma et al., 2022).

Existem alguns esquemas de otimização de cobertura para mitigar os problemas referidos relacionados com as *mm-Waves*. Um exemplo disso é a tecnologia *Small Cell*, que oferece altas taxas de transferência e eficácia na cobertura. A implementação versátil, tanto em ambientes interiores quanto exteriores, permite adaptabilidade aos diferentes cenários, desde salas de conferências até estações de transporte. Destaca-se a capacidade de aliviar sobrecargas de tráfego nas estações macro e melhorar a experiência do utilizador, proporcionando estabilidade de conexão e consistência na qualidade. Esta tecnologia supera obstáculos como a penetração de sinal em paredes e interferências climáticas, mantendo elevada a qualidade do sinal e a taxa de comunicação. Além disso, estas estações *Small Cell* são mais eficientes em termos energéticos e, ainda oferecem uma rede mais flexível e fácil de instalar (Gong et al., 2021).

Na Figura 2 é apresentado um cenário típico de uma rede de *backhaul* de malha na banda *mm-Wave*. Neste cenário, os utilizadores móveis estão associados às estações base *small cells*, enquanto estas estão interligadas por uma rede de *backhaul* de malha na banda de *mm-Wave*. Além disso, observa-se que há uma única *gateway*, tratando-se esta de uma estação base *small cell* conectada à rede principal por meio da macro célula. Essencialmente, as *small cells*, assim como a *gateway*, utilizam a banda de *mm-Wave* para garantir elevadas taxas de acesso, o que por outro lado, também resulta na diminuição do raio da célula (Niu et al., 2017).

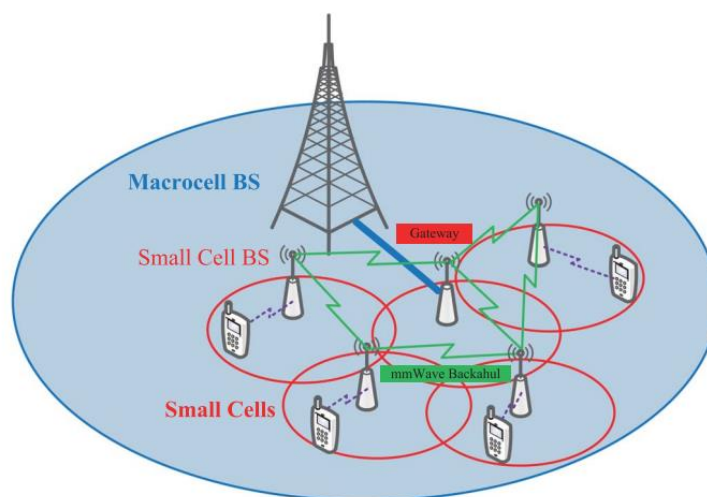


Figura 3 - Small Cell Technology (Niu et al., 2017)

2.1.2 Tecnologia *m-MIMO*

As redes celulares 5G têm como objetivo proporcionar um aumento na capacidade de mil vezes sem custos adicionais significativos nas redes atuais. Num sistema *m-MIMO* (*Massive Multiple Input Multiple Output*), cada *base station* utiliza centenas de antenas para suportar dezenas de equipamentos de utilizadores. Uma *BS*, que tem múltiplas antenas, envia fluxos de dados independentes para vários terminais no mesmo recurso tempo-frequência. O *m-MIMO* desempenha um papel fundamental na implementação bem-sucedida nas redes 5G, proporcionando maior largura de banda, maior taxa de transferência de dados e melhor desempenho geral, comparativamente com as gerações anteriores de tecnologias de comunicação móvel (Salah et al., 2022).

Ainda é possível utilizar a técnica *beamforming* para melhorar o desempenho dos sistemas *m-MIMO*. Esta técnica permite à estação base ajustar o padrão de radiação da antena, auxiliando na entrega eficiente de dados ao utilizador reduzindo interferências com utilizadores vizinhos. O *beamforming* é crucial para as redes 5G, uma vez que oferece vantagens como o aumento da eficiência espectral em *m-MIMO* como também uma maior taxa de dados em ondas milimétricas (Chataut and Akl, 2020). Assim, esta técnica beneficia ambas as tecnologias da seguinte forma:

- Nos sistemas *massivos MIMO*, o *beamforming* permite à estação base enviar dados ao utilizador através de vários caminhos, coordenando o movimento dos pacotes e o tempo de chegada. Isto possibilita a transmissão de dados para vários utilizadores.
- Nas ondas milimétricas, onde a penetração e a propagação são limitadas, o *beamforming* direciona feixes de sinal concentrados para os utilizadores, garantindo sinais fortes, minimizando interferências entre utilizadores.

Na figura 4 é ilustrado um exemplo de como tecnologia *m-MIMO* se comporta.

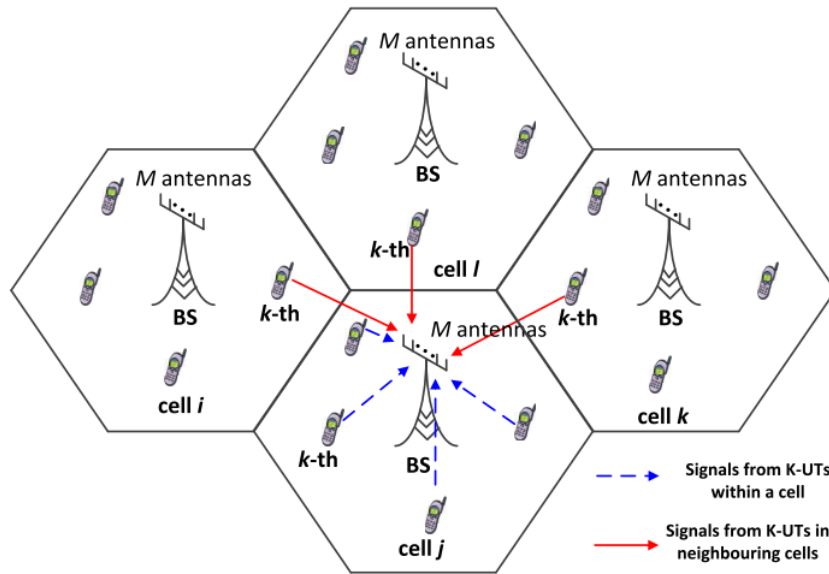


Figura 4 - sistema m-MIMO (Salah et al., 2022)

No que toca à eficiência energética, os sistemas *m-MIMO* destacam-se pela capacidade de oferecer uma otimização genérica nas redes 5G. Dado que a energia da rede varia significativamente ao longo do dia, as redes 5G devem ser capazes de ajustar o consumo de energia. O ajuste da eficiência energética (EE) é uma mais-valia nos sistemas 5G *m-MIMO*, tornando-se uma métrica bastante importante no contexto das comunicações sem fio (Salah et al., 2022).

2.2. Network slicing

O conceito de *network slicing* surgiu como resultado do recente avanço nas tecnologias de computação e virtualização de funções de rede (NFV). Ao fatiar uma rede física em várias redes lógicas, cada uma pode fornecer serviços personalizados para um cenário de aplicação distinto. As fatias de rede 5G, representadas por redes logicamente isoladas, são suficientemente flexíveis e altamente personalizáveis para acomodar simultaneamente diversos *use-cases* impulsionados por negócios sobre a mesma infraestrutura de rede. Para atingir eficientemente os serviços de rede esperados, é crucial decompor as atuais funções de rede em várias funcionalidades de rede modulares baseadas em software, com granularidade variável (Zhang, 2019). A virtualização é um processo fundamental para o *network slicing*, pois possibilita uma partilha eficaz de recursos entre as fatias de rede. Esta virtualização consiste na abstração de recursos através de técnicas apropriadas (Ordóñez-Lucena et al, 2017).

Cada *network slice* representa uma rede lógica de ponta a ponta, personalizada para satisfazer as características de rede necessárias e fornecer serviços específicos para atender a use cases particulares, como por exemplo comunicação por voz ou transmissão de vídeo. Por sua vez, uma rede

lógica é um conjunto de instâncias de funções de rede sobre recursos físicos e virtuais, tal como por exemplo armazenamento, processamento ou nós de acesso (Olimid and Nencioni, 2021).

As redes definidas por software (SDN) têm sido amplamente aceites como uma técnica promissora para implementar o *network slicing* com base na virtualização de NFV. Neste caso, a NFV substitui os elementos de redes tradicionais, por exemplo *gateways* de pacotes/serviço, CN (*Core Network*) e RAN (*Radio Access Network*), por servidores que também hospedam as funções de infraestruturas físicas dedicadas. Cada um destes servidores poderá ser considerado como um conjunto de máquinas virtuais (VMs) em execução de hardware e software (Zhang et al., 2019).

Na figura 5 é possível verificar a segmentação de funções de cada camada, demonstrando a eficácia do *network slicing* na criação de fatias de rede distintas e adaptadas às necessidades de cada *use-case*.

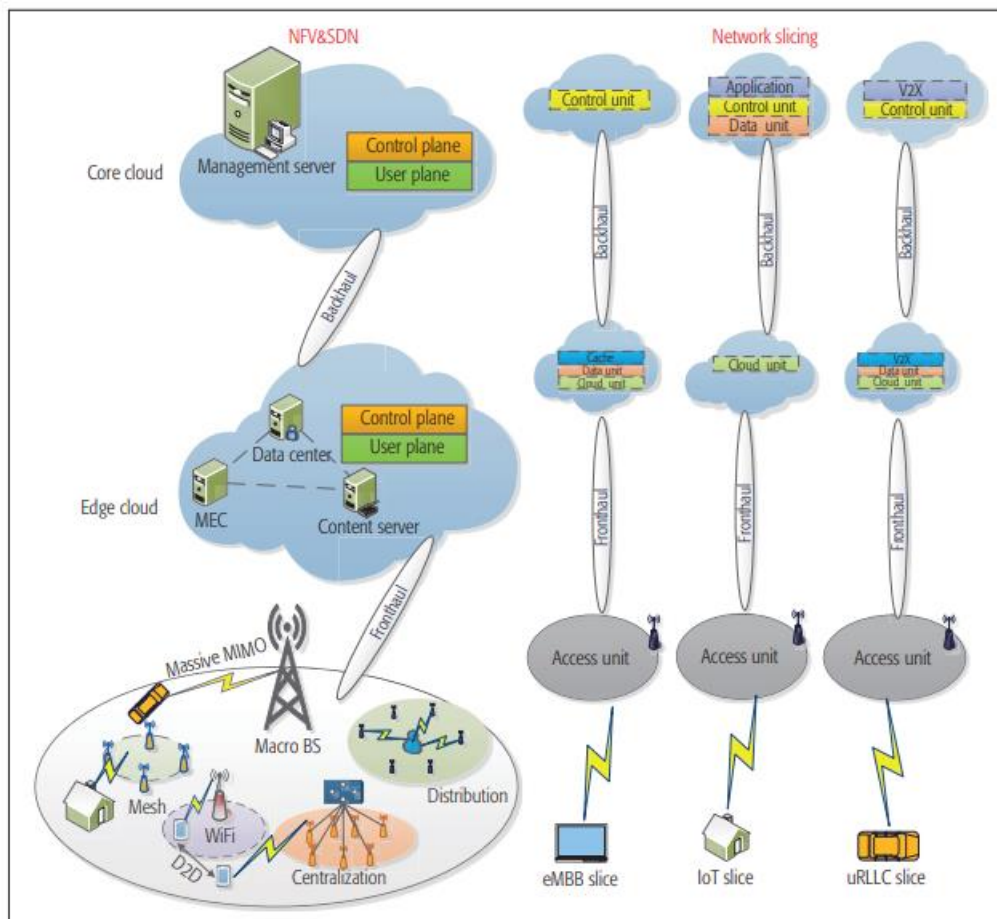


Figura 5 - Network slicing baseada em sistemas de rede 5G (Zhang et al, 2017)

Como é mostrado na Figura 5, a arquitetura centralizada tradicional evoluiu para uma arquitetura baseada em nuvem, que segrega partes do plano de controlo do plano do utilizador para reduzir sinalização de controlo e atrasos na transmissão de dados. A *Core Cloud* fornece algumas funções

importantes do plano de controlo, incluindo gestão de mobilidade, gestão de recursos virtualizados, gestão de interferências, entre outras. Os servidores e outras funções da RAN estão localizados na *Edge Cloud*, que é outro conjunto centralizado de funcionalidades virtualizadas, nomeadamente o encaminhamento de dados e funções para o plano de controlo. As funções do plano do utilizador também são transferidas para a *Edge Cloud*, para fornecer serviços de baixa latência e redução na carga da rede de transporte. As plataformas de *Mobile Edge Computing* (MEC) também são implementadas na *Edge Cloud*, em conjunto com servidores de encaminhamento de dados e armazenamento, que podem executar colaborativamente o armazenamento, processamento e transmissão de grandes quantidades de dados eficientemente em tempo real (Zhang et al, 2017).

2.3. Integração do 5G com outras tecnologias emergentes

A comunicação móvel sem fios evoluiu, desde o final da década de 1970, das chamadas analógicas para as tecnologias modernas atuais, proporcionando aos utilizadores finais elevadas taxas de dados para realizar transmissão de dados (multimédia) e comunicação. A disseminação e o desenvolvimento da comunicação móvel sem fios são também impulsionados pela difusão de dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets*, que abrem caminho para a concretização de aplicações móveis. A consequência é um aumento significativo do tráfego na rede, o que naturalmente requer novos meios para suportar o fornecimento generalizado de serviços sem fios com elevados níveis de Qualidade de Serviço (QoS) (Sicari et al., 2020).

A *IoT* representa uma rede composta por vários dispositivos eletrónicos que interagem entre si utilizando algum canal, sendo o mais comum a Internet. Diversas tecnologias são utilizadas para conectar esses dispositivos à rede, incluindo identificação por radiofrequência e redes de sensores. Atualmente, enfrentamos desafios e limitações específicas associados a dispositivos IoT que requerem atenção. A minimização da latência é crucial, pois possibilita que estes dispositivos forneçam respostas rápidas a eventos específicos. Essa redução não apenas contribui para aprimorar a eficiência operacional, promovendo uma coordenação eficaz entre dispositivos interconectados, como também promove a experiência do utilizador. A privacidade é um dos desafios associados a estes dispositivos, visto que geram uma grande quantidade de dados, que são transmitidos através de um canal e armazenados num determinado local. A segurança é uma preocupação adicional, já que estes dispositivos são limitados em recursos, exigindo esquemas de criptografia mais leves. Além disso, o armazenamento de dados em tempo real proveniente de milhões de dispositivos IoT representa um

desafio substancial, especialmente ao integrar esses dispositivos com tecnologias como blockchain, onde os tamanhos dos blocos poderão ser consideravelmente grandes (Dhar et al., 2021).

O progresso na evolução da tecnologia envolve também uma mobilidade mais eficiente com carros autónomos, cidades inteligentes, segurança e automação residencial. No caso da condução autónoma, um carro pode ser encarado como um robô que utiliza sensores e comunicações para interagir com o ambiente, gerando uma grande quantidade de dados e utilizando inteligência artificial para tomar decisões. As comunicações de quinta geração desempenham um papel importante neste exemplo, utilizando comunicações URLLC, esclarecidas na secção 2.1. Este é um caso onde os serviços são sensíveis à latência e exigem taxas de erro muito baixas (com erros quase inexistentes). Além disso, as comunicações 5G suportam comunicações veículo-para-veículo (V2V) sem a necessidade de uma estação base (Silva and Guerreiro, 2020).

Em síntese, o panorama da comunicação móvel sem fios revela uma evolução marcante, desde as suas origens analógicas até às atuais tecnologias. A expansão da Internet das Coisas apresenta desafios significativos, com ênfase na minimização da latência, privacidade e segurança dos dispositivos interconectados. Paralelamente, a implementação da quinta geração está a desempenhar um papel fulcral para atender aos requisitos das tecnologias emergentes. Estas transformações tecnológicas delineiam um futuro onde a conectividade e eficiência operacional moldam de forma proeminente a nossa interação com o mundo digital (Varga et al., 2020).

2.4. Redes privadas 5G no setor industrial

As redes privadas 5G, também chamadas de redes não públicas (NPNs) tornaram-se uma escolha popular na transformação digital do setor industrial, proporcionando conectividade sem fios de elevada largura de banda, fiável e com baixa latência para atender aos rigorosos processos de fabrico. Além disso, o mundo industrial tem como objetivo construir fábricas inteligentes, totalmente conectadas e automatizadas, onde a tecnologia IoT, soluções em *cloud*, análise de grandes volumes de dados e componentes de cibersegurança são peças fundamentais. Isso traz novos desafios para fornecer uma Internet industrial que integre todos estes componentes. O 5G oferece comunicações sem fio de alta qualidade, com taxas de transmissão muito mais rápidas que as gerações anteriores (Guimarães et al., 2021).

A nível empresarial, os dados críticos para os negócios e acesso à rede devem ser seguros e não afetados por interrupções em redes públicas. Uma rede privada oferece uma forma de partilhar dados de forma segura e autónoma, sem ter a necessidade de utilizar a Internet pública. Como resultado, as implementações de redes privadas estão a crescer exponencialmente, libertando o poder da rede para oferecer soluções seguras, confiáveis e escaláveis (Bektas et al., 2021).

As redes privadas 5G representam sistemas celulares virtuais ou físicos instalados para uso privado por governos, empresas ou outras instituições. Estas redes poderão ser implementadas com uma qualquer dimensão, desde pequenas a amplas redes, atendendo a todos os tipos de locais empresariais e circunstâncias de tráfego. As NPNs 5G podem ser instaladas com vários cenários de implementação, dependendo do grau de interação com a rede pública 5G (Eswaran and Honnavalli, 2023).

Especificamente, os cenários de implementação de redes privadas 5G podem ser categorizados da seguinte forma:

- Cenário da rede privada 5G autónoma (*standalone*), no qual todas as funções da rede privada 5G estão localizadas dentro da organização, sem interação direta com a rede pública 5G. Neste cenário é proporcionado o isolamento completo e maior controlo sobre as operações e segurança da rede. Esta abordagem é vista como promissora para atender aos requisitos específicos de serviços e garantir alta segurança nos ambientes empresariais. Apesar disto, este tipo de rede também possui algumas desvantagens, tais como o elevado custo para implementação, bem como a necessidade de especialistas altamente qualificados;
- Cenário da rede de acesso por rádio (RAN) partilhada, refere-se a um cenário em que a rede privada 5G e a rede pública 5G compartilham a infraestrutura de acesso por rádio. Neste contexto, as duas redes utilizam a mesma infraestrutura de comunicação sem fio para fornecer conectividade, enquanto outras funções de rede permanecem segregadas. Este panorama oferece benefícios de otimização de recursos e eficiência, assim como garantias de segurança, visto que a rede privada 5G continua a ser independente da rede pública;
- Cenário de RAN e plano de controlo partilhada, refere-se a um cenário idêntico ao anterior no que toca à partilha de infraestrutura de acesso por rádio, que inclui componentes como antenas e torres de transmissão. A principal diferença é as tarefas de controlo da rede, como gestão do tráfego e autenticação de dispositivos, são realizadas na rede pública 5G.
- Cenário onde a rede privada é totalmente hospedada pela rede pública, isto é, todas as funções da rede estão alocadas na rede pública. Neste contexto, a rede privada pode depender de recursos e capacidades fornecidas pela rede pública para operar e oferecer serviços.

A figura 5 ilustra todos os cenários acima descritos, fornecendo uma representação visual abrangente das diferentes implementações e configurações de redes privadas 5G.

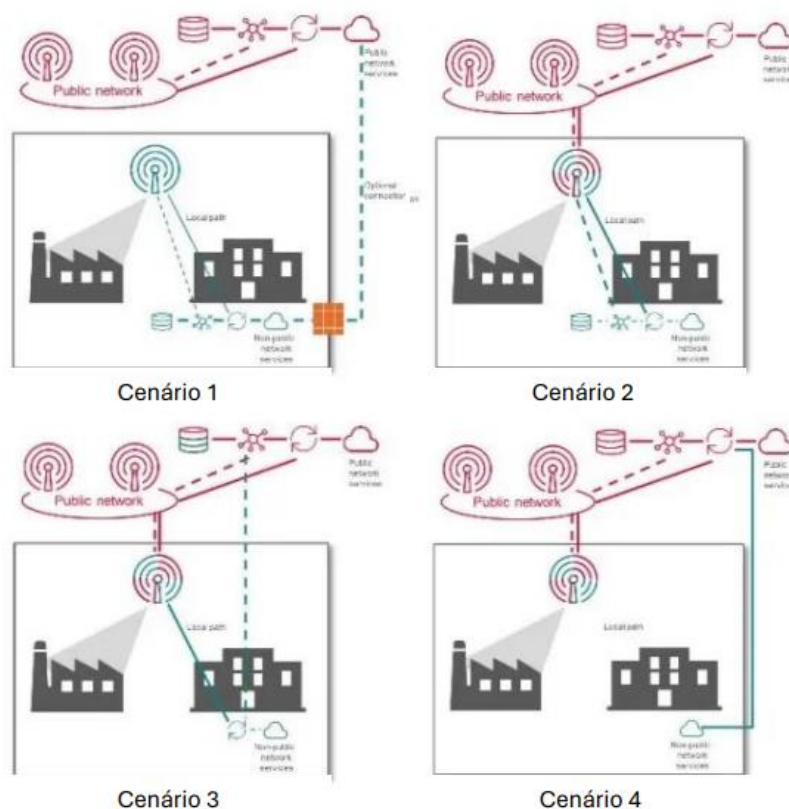


Figura 6 - Cenários da rede privada 5G

2.4.1 Integração de redes privadas 5G com equipamentos *legacy*

A integração de redes privadas 5G com equipamentos *legacy* representa um desafio crucial no contexto industrial. Enquanto as redes 5G procuram atender às demandas de novos *use-cases*, os dispositivos industriais *legacy*, como sensores, câmeras, entre outros, muitas vezes não possuem capacidade de conectar às redes móveis. Neste sentido, surge a necessidade de utilizar *gateways* celulares para conectar os domínios de trabalho desses dispositivos à nova infraestrutura de rede privada 5G. A compatibilidade entre as tecnologias existentes e emergentes é essencial para garantir uma transição suave e eficiente. Sendo este um aspeto que ainda requer investigação e implementação mais aprofundadas (Ficzere et al., 2022).

O desafio não se limita à conectividade física, estendendo-se igualmente à adaptação dos protocolos e na interoperabilidade entre os sistemas *legacy* e as tecnologias emergente. Uma possível solução é o desenvolvimento ou adoção de protocolos de comunicação que sejam compatíveis tanto com dispositivos *legacy* quanto com as capacidades de redes 5G. Esta solução poderá incluir a atualização de *firmware* nos dispositivos existentes. A implementação de soluções baseadas em software, que permitam virtualização de funções de rede, simplificando a adaptação destas funções aos requisitos específicos de cada dispositivo e aplicação, também representa uma solução eficaz para este problema (Prados-Garzon et al., 2021).

2.4.2 Segurança e privacidade em redes privadas 5G

Uma das características principais das redes privadas 5G é a alta segurança. Estas redes podem empregar técnicas como isolamento de rede, proteção de dados e autenticação de dispositivos e utilizadores para assegurar ativos críticos. Como vantagem, as empresas ou entidades operacionais conseguem preservar a soberania dos dados, mantendo informações sensíveis localmente. A realização de transmissões seguras através das redes públicas torna-se crucial, especialmente em aplicações militares e industriais, onde a confidencialidade e integridade dos dados são imperativas. Além disso, a capacidade de gerir centralmente as políticas de segurança e monitorizar continuamente as ameaças contribuí para um ambiente mais resiliente e preparado contra potenciais ataques cibernéticos (Wen et al., 2022).

A segurança e privacidade são alcançadas através do conceito de *network slicing*, conforme descrito na secção 2.2, no qual as fatias de rede constituem redes lógicas de ponta a ponta. É natural procurar assegurar a segurança em todo o percurso. O conceito de segurança de ponta a ponta está intimamente ligado aos conceitos de isolamento e orquestração. O isolamento é considerado um pré-requisito essencial, que visa criar ambientes isolados que fortalecem a proteção contra potenciais ameaças. Por sua vez, a orquestração, desempenha um papel crucial na gestão e coordenação eficiente desses ambientes isolados, contribuindo para a segurança global do sistema. Esta abordagem integrada visa não só proteger as comunicações, como também fortalecer a confiança no ecossistema de redes privadas 5G (Olimid and Nencioni, 2020).

2.5. Alocação de espectro nas redes privadas 5G

Tal como foi descrito nas secções anteriores, as redes 5G destinam-se a proporcionar um acesso com taxas de dados significativamente elevadas e qualidade de serviço garantida. Desta forma, espera-se um aumento considerável na demanda por recursos de espectro nas redes 5G. Embora as redes privadas possam ser implementadas como uma fatia de rede reutilizando o espectro de um operador público de rede 5G, muitas indústrias privadas poderão exigir ou preferir a operação de uma rede autónoma não pública, usando o seu próprio espectro. (Hasan et al., 2016). Neste caso, as entidades privadas poderão optar por um espectro privado dedicado, solicitado ao regulador.

Na tabela 2 analisamos as decisões de atribuição de espectro em diferentes países do ponto de vista das redes 5G privadas. Os países seleccionados para a análise foram: Alemanha, Reino Unido, Japão, Estados Unidos e Finlândia, representando diversidade geográfica. Esta lista não é exaustiva, e a situação está em constante mudança à medida que mais países realizam avaliações e implementam processos de candidatura. Através desta tabela conseguimos compreender que as bandas de espectro

consideradas estão em torno da faixa 3.5 GHz, que é uma faixa comum para as redes 5G em todo o mundo.

Alocação de espectro em redes privadas 5G		
País	Espectro	Descrição
Alemanha	3.7 GHz – 3.8 GHz	3.7 GHz para redes privadas licenciadas locais e regionais para aplicações industriais.
Reino Unido	3.6 GHz – 3.8 GHz	Espectro licenciado cobrado pelos Operadores de Rede Móvel.
Japão	3.6 GHz – 4.1 GHz	Disponível para uso privado em redes 5G em ambientes internos. Duração da licença é de 5 anos, podendo esta ser renovada.
Estados Unidos	3.7 GHz – 3.98 GHz	Espectro obtido pelos Operadores de Rede Móvel.
Finlândia	3.4 GHz – 3.8 GHz	Espectro obtido pelos Operadores de Rede Móvel.

Tabela 2 - Alocação de espectro em redes privadas 5G

Nas subsecções que se seguem serão apresentados com maior detalhe as diferentes opções de alocação de espectro para as redes privadas 5G.

2.5.1 Espectro licenciado

O espectro licenciado poderá ser obtido junto dos operadores de rede móvel, ou seja, esta entidade aloca uma parte dedicada das suas bandas de espectro para uso privado. Isto representa uma continuação do modelo clássico de licenciamento de espectro, onde diferentes modelos de negócio poderão ser aplicados (Wen et al., 2022).

Esta opção oferece uma maior segurança e garantia de interferência reduzida, visto que outras entidades não licenciadas não têm permissão para operar nestas faixas. Por outro lado, os custos serão mais elevados devido à aquisição de licenças e à necessidade de cumprir regulamentações específicas.

2.5.2 Espectro não licenciado

O espectro não licenciado é, por definição, um espectro partilhado. A interferência com outros utilizadores é controlada por limites de potência e mecanismos de *Listen-Before-Talk* (LBT) baseados em contenção que permitem que as redes explorem oportunisticamente o tempo de antena. Estes sistemas apresentam melhor desempenho quando há um número limitado de utilizadores a competir pelo canal, contudo o desempenho do utilizador final e a eficiência espectral podem ser afetados negativamente quando há muitos utilizadores a competir (Brown, 2019).

Uma solução proposta que preserva os benefícios do espectro não licenciado e aborda o desafio da partilha é sincronizar o acesso ao tempo de antena da rede de uma forma mutuamente benéfica. Em combinação com a partilha espacial, isso pode aumentar a capacidade e possibilitar QoS previsível, tornando o espectro não licenciado mais adequado para serviços URLLC e utilizadores industriais (Wen et al., 2022).

2.5.3 Espectro dedicado

O espectro dedicado para redes privadas é um tema controverso. Este modelo é definido por grandes empresas industriais, uma vez que lhes confere a certeza de posse e previsibilidade no desempenho da rede, tornando-se numa opção ideal para a IoT a nível industrial. Alguns operadores móveis estão preocupados que o espectro dedicado possa resultar em fragmentação e uso ineficiente do espectro, e são resistentes a este modelo (Brown, 2019).

Apesar desta controvérsia, o espectro dedicado oferece exclusividades sem as formalidades do licenciamento tradicional e, por isto, poderá ser considerado como uma opção intermédia entre o espectro licenciado e não licenciado (Wen et al., 2022).

Simulador de Sistema

3.1 Implementação e descrição do simulador

O simulador utilizado para a realização do planeamento da rede privada 5G foi escrito em linguagem JAVA e é composto por várias classes, sendo a “Global.java” aquela que sofreu a maior quantidade de alterações. É nesta classe que se encontram as variáveis do simulador, permitindo ao utilizador criar múltiplos cenários com o propósito de realizar novos estudos sobre funcionalidades emergentes.

Nesta dissertação foram realizadas quatro simulações, duas para cada cenário, cujos parâmetros constam na tabela 3. O objetivo destas simulações é comparar qual a que melhor se apropria para a realização de um grande evento, tal como o Rock In Rio Lisboa.

Ambas as simulações serão testadas para a mesma área, com valores de tempo de transmissão (TTI) iguais. A largura de banda em ambas simulações é de 50MHz. Na primeira simulação o raio da célula é de 150 metros, enquanto na segunda é de 100 metros. Por fim, os símbolos modulados em ambas as simulações são de 16-QAM e 256-QAM.

Parâmetros	Simulação 1	Simulação 2
Área da Simulação [m ²]	30000	30000
Radio da célula [m]	150	100
Largura de Banda [MHz]	50	50
Símbolos [QAM]	16; 256	16; 256
TTI [ms]	5	5
Limites Máximos de potência de Saída [W]	10	10

Tabela 3 - Dados das simulações

O processo de simulação consiste em essencialmente em três etapas: configuração, simulação e análise de desempenho do sistema. Na figura 7 ilustra a lógica do simulador utilizado para esta dissertação.

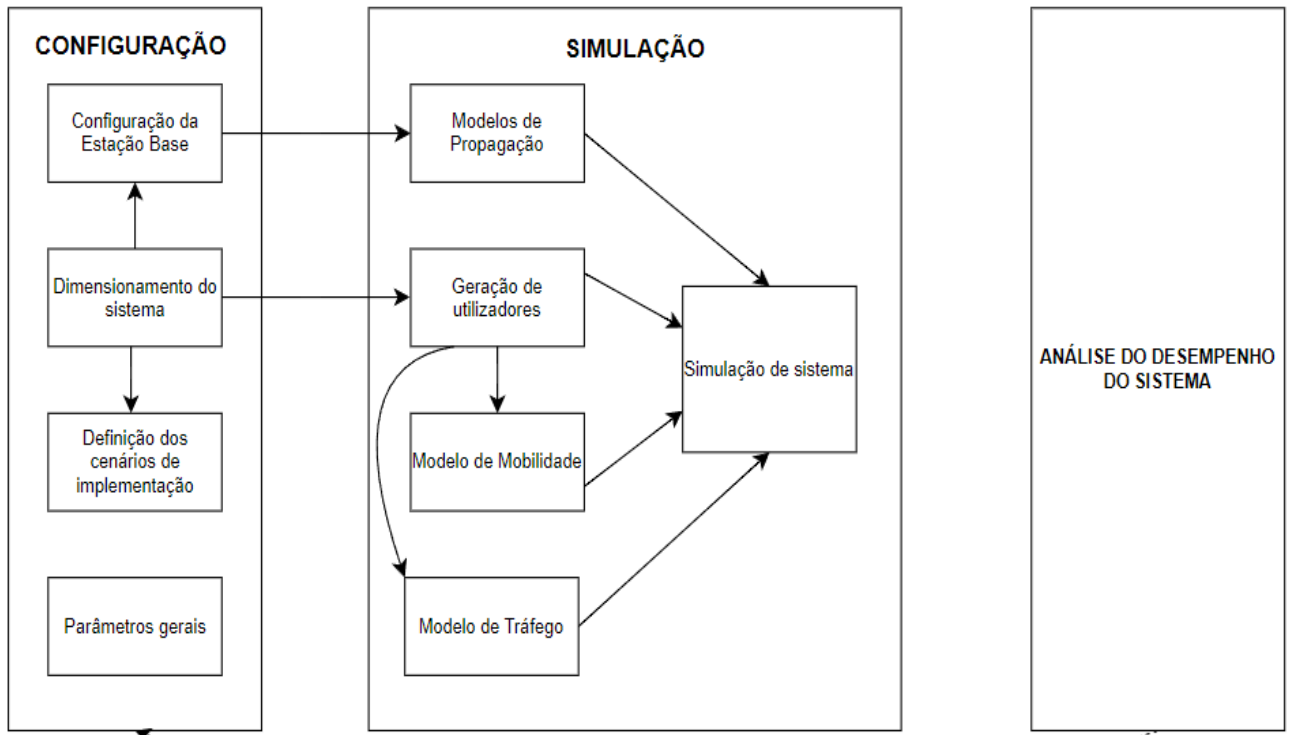


Figura 7 - Etapas do simulador

A etapa de configuração inclui a configuração e localização das estações base, dimensionamento do sistema, definição dos cenários de implementação e os parâmetros gerais. De uma forma geral, pode-se afirmar que esta etapa representa tanto o dimensionamento quanto a caracterização do sistema.

Relativamente à etapa de simulação encontram-se os modelos de propagação, geração de utilizadores, modelos de mobilidade, modelo de tráfego, que juntos resultam na simulação do sistema. As diversas entidades mencionadas são encontradas nas diferentes classes de Java e, quando compiladas, permitem obter a simulação do sistema.

Por fim, a análise do desempenho do sistema, que está diretamente relacionada com a sua configuração. Nesta fase, avaliam-se e comparam-se os diferentes resultados obtidos em cada simulação, permitindo uma análise detalhada do desempenho do sistema em termos de cobertura, rendimento e *throughput*.

3.2 Descrição do cenário

Tal como já foi descrito anteriormente, serão apresentados dois cenários de forma a oferecer rede 5G a todos os espectadores presentes no evento do Rock In Rio Lisboa 2024.

É importante realçar que este evento será realizado no Parque Tejo Trancão, cuja área é de aproximadamente 30000 m² e receberá cerca de 80 mil pessoas diariamente durante quatro dias. Desta forma, é necessário que haja vários esforços para disponibilizar as melhores condições aos espectadores. É crucial salientar a importância de uma infraestrutura de rede robusta, que permita a partilha multimédia e comunicações em geral. Este sistema de rede deve ser capaz de suportar o elevado volume de dados gerado pelos utilizadores, garantido uma experiência fluida e sem interrupções. Essencial para a partilha em tempo real de vídeos, fotos e outras formas de comunicação digital durante o evento.

O Rock in Rio Lisboa 2024 não se limita apenas aos concertos. Embora as atuações musicais de grandes artistas internacionais e nacionais sejam o principal atrativo, a experiência do festival vai muito além disso. Na cidade do Rock, os visitantes podem desfrutar de uma programação musical diversificada, distribuída por diferentes palcos, como o Palco Mundo e o palco secundário. Além dos concertos, este festival proporciona uma experiência multifacetada, combinando música, cultura, gastronomia, entretenimento digital e atividades recreativas, garantida diversão para todos os gostos e idades. A imagem que se segue demonstra a planta oficial do Rock in Rio Lisboa 2024, estando identificadas todas as áreas temáticas do interesse dos festivaleiros.

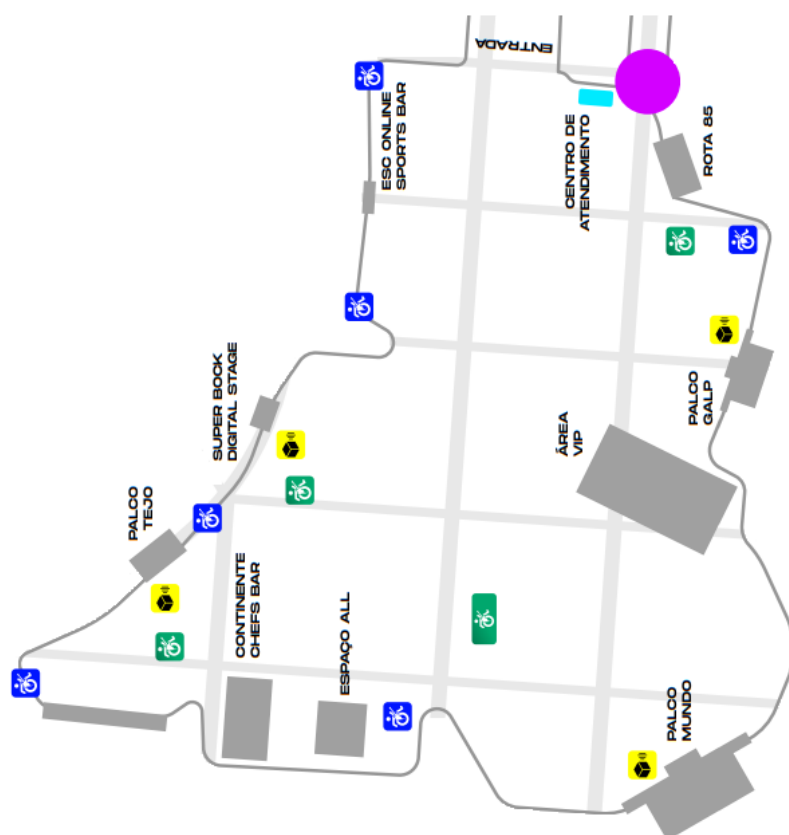


Figura 8 - Planta Rock In Rio Lisboa 2024 (Fonte: assets-lisboa.rockinrio)

Para a cobertura do Rock in Rio Lisboa 2024, serão avaliados dois cenários para determinar qual oferece os melhores resultados na garantia de uma experiência de conectividade eficiente para todos os participantes do evento

As Figuras 9 e 10 ilustram, respetivamente, o Cenário 1 e Cenário 2, apresentando o mapeamento das estações base. Esta visualização permite compreender a distribuição espacial das estações base em relação aos palcos, evidenciando a cobertura de rede planeada para garantir conectividade eficiente aos espectadores em diferentes áreas dos concertos. As imagens mostram uma aproximação da planta do Rock in Rio Lisboa 2024, destacando a posição estratégica das estações base para otimizar a cobertura.

O primeiro cenário envolverá a instalação de 13 estações base, cada uma transmitindo a uma potência de 25W. Destas, 8 terão uma altura de 10 metros e estarão localizadas próximas ao Palco Mundo, onde se espera uma maior concentração de público. As outras 5 estações base terão uma altura de 5 metros e estarão situadas junto à entrada do recinto, proporcionando uma cobertura inicial robusta à medida que os espectadores chegam ao evento.



Figura 9 - Cenário 1

A segunda simulação aumentará significativamente a infraestrutura de rede, contando com um total de 26 estações base, cada uma transmitindo a uma potência de 10W. Neste cenário, 16 estações base terão uma altura de 10 metros e estarão distribuídas ao redor do Palco Mundo e de outras áreas de alta densidade de público para assegurar uma cobertura extensa. As restantes 10 estações base, com 5 metros de altura, estarão posicionadas junto à entrada e em outras áreas estratégicas do recinto, garantindo uma cobertura mais uniforme e capacidade adicional para suportar o elevado número de utilizadores.

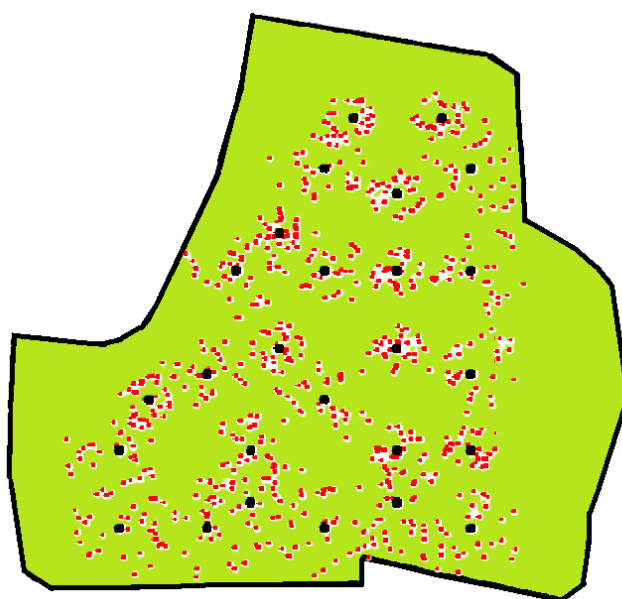


Figura 10 - Cenário 2

Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão apresentados tanto os resultados teóricos como os resultados das simulações, com foco na avaliação do desempenho do sistema, considerando os dois cenários específicos implementados. Além de expor os dados numéricos e gráficos obtidos, será realizada uma análise crítica, discutindo a performance do sistema em cada cenário. Esta análise detalhada inclui a interpretação dos resultados, destacando as vantagens e desafios observados, e oferece recomendações para possíveis melhorias na infraestrutura de rede.

4.1 Resultados Teóricos

Os resultados teóricos obtidos estão disponíveis nos Anexos.

4.2 Resultados das Simulações

Aqui serão apresentados os resultados obtidos através das simulações dos dois cenários descritos anteriormente, com base no planeamento celular de uma rede 5G, tendo em conta a organização do evento do Rock in Rio Lisboa.

A análise dos resultados será baseada nos gráficos gerados a partir dos valores obtidos nas simulações de cada cenário. Desta forma, será possível realizar tanto a análise individual de cada cenário, como também a comparação de ambos, avaliando os pontos positivos e negativos de cada um.

Foi implementada a técnica de *clustering* na rede de acesso rádio virtualizada, permitindo a organização de várias estações base em grupos ou *clusters* que colaboram entre si para atender os utilizadores. Esta abordagem possibilita que múltiplas BSs operem de forma coordenada, transmitindo e recebendo sinais para os utilizadores, ao invés de funcionarem de forma isolada. O principal objetivo desta técnica é melhorar o desempenho do sistema, reduzindo a interferência ao permitir que várias BSs sirvam simultaneamente um único utilizador. Além disso, a técnica de *clustering* contribui para a melhoria da eficiência espectral, uma vez que a colaboração entre estações base dentro de um cluster maximiza a utilização do espectro disponível. Esta otimização permite acomodar uma maior densidade de utilizadores por área sem comprometer a qualidade do serviço. Adicionalmente, o clustering reforça o desempenho global da rede, sendo particularmente vantajoso em cenários de alta densidade de utilizadores, como o abordado nesta dissertação.

Na análise dos resultados obtidos, será também avaliado o comportamento dos clusters em função do seu tamanho. Os clusters podem ser de tamanho 1, 1C, ou 3, 3C. O cluster 1C indica que não há agrupamento entre estações base, o que significa que cada utilizador é atendido exclusivamente por uma única estação base, sem qualquer cooperação entre células para o mesmo utilizador. Em contraste, o cluster 3C envolve três estações base adjacentes que formam um grupo colaborativo. Nesta configuração, cada utilizador pode ser atendido simultaneamente por três estações base, permitindo uma gestão mais eficiente do sinal e uma redução significativa das interferências. Esta abordagem melhora a performance nas bordas das células ao coordenar a transmissão e receção de sinais entre múltiplas estações base, resultando numa otimização geral da qualidade do serviço e cobertura da rede.

4.2.1 Resultados de *Throughput*

Nesta secção, serão apresentados os resultados relativos ao *throughput*. Serão incluídos gráficos que ilustram a relação entre o *throughput* e o número de utilizadores, bem como o desempenho do *throughput* por utilizador em função da potência de transmissão na rede. Adicionalmente, será analisada a função de distribuição acumulada (CDF) do *throughput*, que proporciona uma visão detalhada da probabilidade acumulada para o tamanho dos clusters. Estes gráficos abrangem tanto o cenário 1 quanto o cenário 2, permitindo uma comparação aprofundada do desempenho da rede em diferentes condições e configurações. Em ambos os cenários, foi considerado a presença de 10 utilizadores por setor com um total de 256 antenas ativas.

Na figura 11 é apresentado o gráfico que mostra o desempenho do *throughput* em função do número de utilizadores no cenário com 13 estações base. Importa destacar que o número total de UEs é de 390, dos quais 240 são atendidos pelas BSs Outdoor1 e 150 pelas BSs Outdoor2.

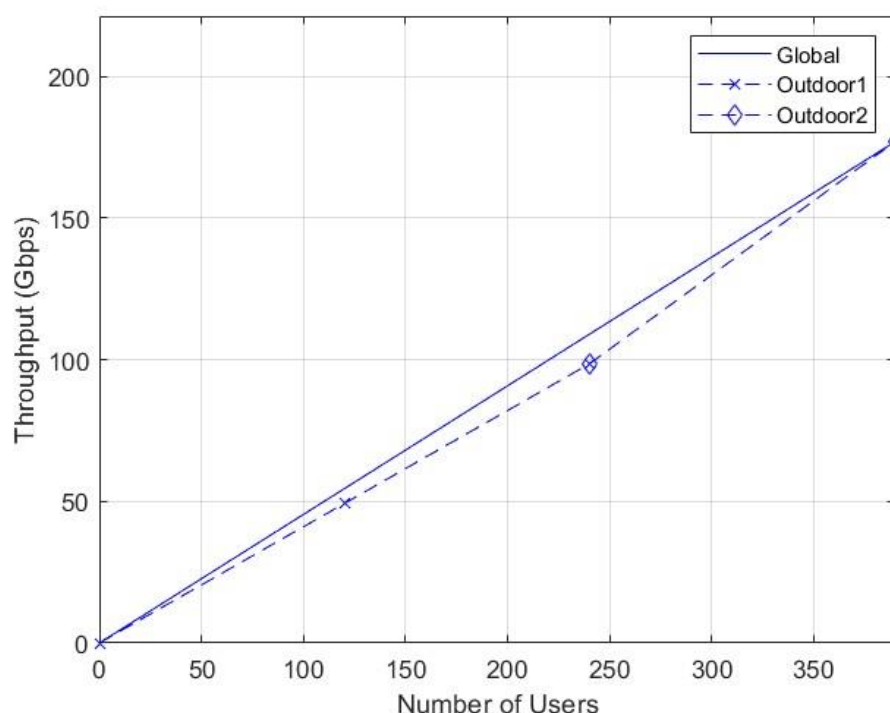


Figura 11 - Throughput vs Número de utilizadores, cenário 13 Estações Base

Com base no gráfico da Figura 11, podemos confirmar que, com 120 utilizadores, o *throughput* para as estações base Outdoor1 é de aproximadamente 49 Gbps e, quando essas mesmas estações base estão a servir 240 utilizadores, o *throughput* aumenta para 98.5 Gbps. Quanto às estações base Outdoor2, o *throughput* é de aproximadamente 177 Gbps.

O gráfico mostra que, à medida que o número de utilizadores aumenta, o *throughput* também cresce de forma linear. Este comportamento indica que o sistema consegue lidar eficientemente com o aumento de carga, sem ocorrer saturação ou degradação significativa do serviço. As estações base Outdoor1, com antenas a 10 metros de altura, atendem à maioria dos utilizadores apresentam um desempenho de *throughput* inferior ao das estações de base Outdoor2. Estas últimas BSs têm as antenas a 5 metros de altura e atendem menor número de utilizadores. É o declive das retas que indica em termos de *throughput*, qual o seu valor relativo. Maior declive da reta indica maior *throughput* esperado.

Na Figura 12, é apresentado o gráfico correspondente ao cenário com 26 estações base. Neste cenário, o número de estações base é duplicado e, como se manteve o número de 10 UEs por setor, obteve-se um número máximo de 780 UEs. Assim, o número de UEs servidos pelas estações base Outdoor1 é de 480 enquanto pelas estações base Outdoor2 é de 300.

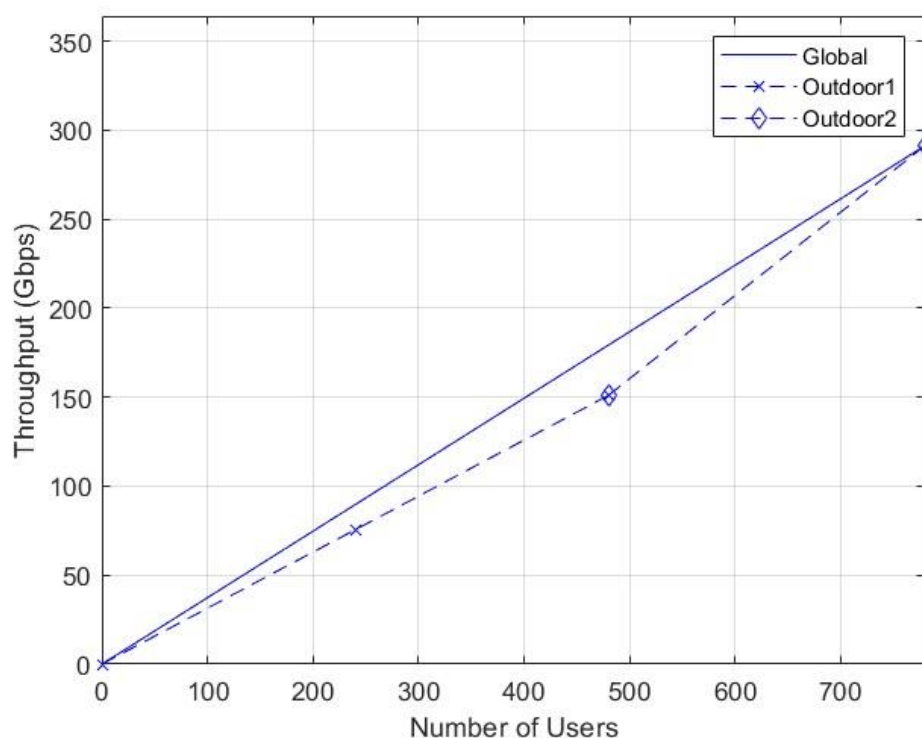


Figura 12 – Throughput vs Número de utilizadores, cenário 26 Estações Base

O gráfico ilustrado na Figura 12, mostra que com 240 utilizadores, o *throughput* para as estações Outdoor1 é de cerca de 75.60 Gbps, e com 480 utilizadores, esse valor atinge 151 Gbps. Contabilizando também as estações base Outdoor2, com 780 utilizadores, o *throughput* total atinge 291 Gbps.

Neste cenário, onde o número de BSs é duplicado, o *throughput* também aumenta de forma significativa, mantendo a linearidade da relação entre o número de utilizadores e o *throughput*. O acréscimo no número de BSs permitiu que a rede suportasse o dobro dos utilizadores com um desempenho eficiente. É possível verificar que as BSs Outdoor1, que atendem a um maior número de utilizadores, apresentam valores de *throughput* menos elevados do que as BSs Outdoor2, o que é consistente com a configuração da rede em que as antenas das BSs Outdoor1 estão mais elevadas e há maior interferência proveniente das outras BSs mais próximas.

A comparação entre os dois cenários revela que o aumento do número de estações base permite suportar um maior número de utilizadores, embora não consiga manter o desempenho geral da rede em termos de *throughput*, do cenário 1, devido ao aumento de interferência entre BSs. Em ambos os cenários, o *throughput* aumenta de forma linear com o número de utilizadores, indicando que a rede está bem dimensionada para as cargas projetadas. No entanto, o cenário com 26 estações base, demonstra uma capacidade de *throughput* global significativamente superior, o que é crucial para assegurar uma boa qualidade de serviço em áreas com alta densidade de utilizadores.

Apesar disso, ao duplicar o número de estações base de 13 para 26, seria esperado que o *throughput* também duplicasse. No entanto, ao observar os valores máximos de *throughput*, vemos que no cenário com 13 BSs e 390 UEs o *throughput* é de 177 Gbps, enquanto no cenário 26 BSs e 780 UEs atinge 291 Gbps, o que não corresponde exatamente ao dobro, apesar da duplicação do número de estações base. Especificamente, o *throughput* no cenário com 26 BSs é aproximadamente 1.64 vezes maior que no cenário com 13 BSs, e não o dobro.

Portanto, embora o cenário com 26 BSs apresente um aumento significativo de *throughput*, esse aumento não corresponde a uma duplicação em relação ao cenário com 13 BSs. Este resultado indica que, embora a duplicação do número de estações base traga benefícios claros, esses benefícios podem estar sujeitos a outras limitações e fatores, nomeadamente interferência entre as BSs, não resultando necessariamente num aumento linear do *throughput*.

Nas Figuras 13 e 14, são apresentados gráficos da função de distribuição acumulada (CDF) do *throughput*. Assim, é possível observar e analisar como o *throughput* é distribuído entre os utilizadores em diferentes configurações de *cluster* (1C e 3C) para cada cenário.

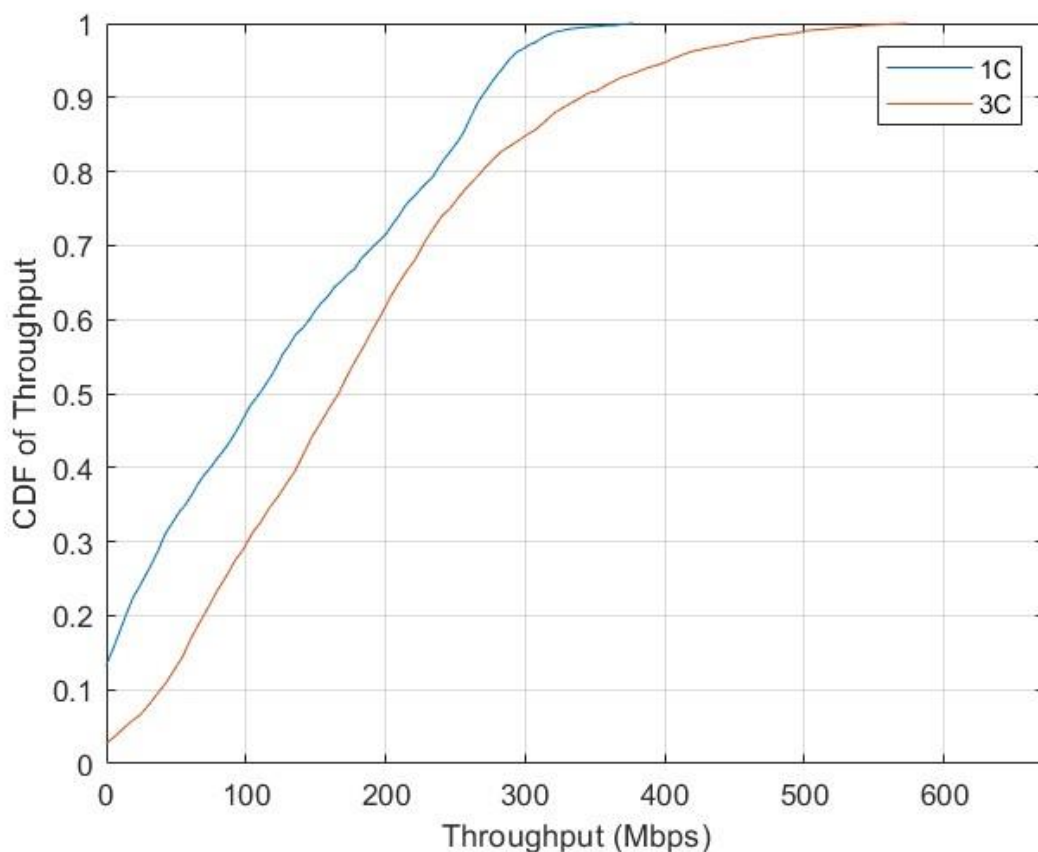


Figura 13 - Throughput Vs CDF of Throughput, cenário com 13 estações base

Na Figura 13 está ilustrada a função de distribuição acumulada do *throughput* para o cenário com 13 estações base. É importante destacar que, para o cluster 1C, ou seja, sem agrupamento, o *throughput* varia de 0.73Gbps a 377.55Gbps. A função de distribuição acumulada atinge 50% em aproximadamente 107.73Gbps, o que indica que metade dos utilizadores tiveram um *throughput* inferior a este valor. O *throughput* máximo ocorre quando o valor da CDF é de 1, resultando num *throughput* de 377.55 Gbps.

É possível observar que, no início, a curva é relativamente acentuada, indicando que uma pequena percentagem de utilizadores experiência um valor de *throughput* significativamente baixo. À medida que o *throughput* aumenta, a inclinação da curva começa a diminuir, mostrando uma maior concentração de utilizadores em faixas de *throughput* medianas. A curva torna-se muito menos inclinada à medida que se aproxima do *throughput* máximo, indicando que apenas poucos utilizadores conseguem atingir os valores mais elevados de *throughput*.

Ainda neste cenário, mas para o cluster 3C, a variação ocorre entre os 5.64Gbps e os 573.42Gbps. A CDF atinge os 50% em cerca de 166.1 Gbps, sugerindo uma distribuição mais uniforme e maior *throughput* para metade dos utilizadores comparado com o cluster 1C. A configuração 3C alcança um *throughput* significativamente maior, com valores máximos de até 573.42Gbps.

Inicialmente, a curva apresenta uma forma mais suave comparativamente com o cluster 1C, indicando que o agrupamento permite que menos utilizadores fiquem restritos a *throughput* baixo. O *throughput* inicial, 5.64Gbps, é maior, mostrando que os utilizadores têm uma experiência mínima de qualidade mais elevada. A inclinação média da curva, é menos acentuada, refletindo uma distribuição mais equitativa do *throughput*, com a maioria dos utilizadores concentrada em faixas de *throughput* mais elevadas. Na parte final, a curva mantém uma inclinação moderada, mostrando que valores de *throughput* mais elevados estão acessíveis a uma maior proporção de utilizadores em comparação com o cluster 1C.

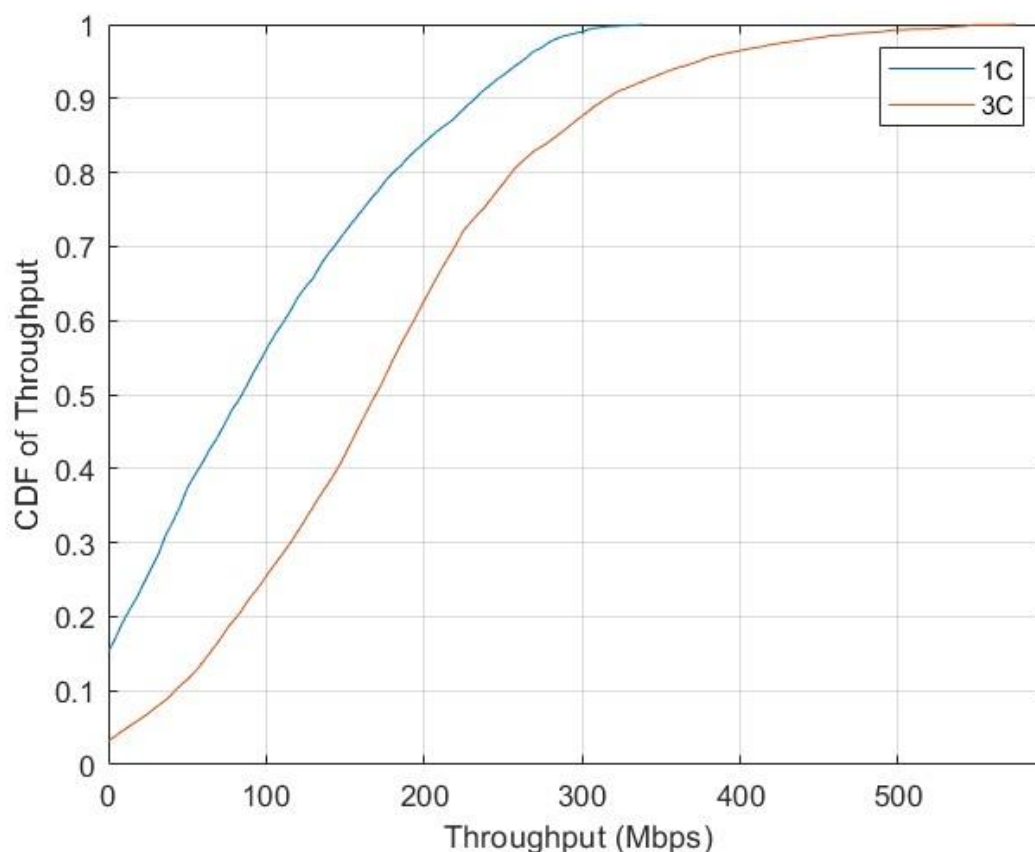


Figura 14 - Throughput Vs CDF of Throughput, cenário com 26 BSs

Na Figura 14 temos a distribuição acumulada de *throughput* para o cenário com 26 estações base. No *cluster* 1C o *throughput* varia de 3.89Gbps a 338.65Gbps, onde o valor mediano é cerca de 101.53Gbps.

Na inclinação inicial do *cluster* 1C a curva começa com uma inclinação suave, indicando que mesmo os utilizadores com menor *throughput* têm valores superiores ao cenário com 13 estações base, respetivamente 3.89 Gbps e 0.73 Gbps. A curva torna-se gradualmente mais íngreme, especialmente na faixa de *throughput* mediano, indicando que a maioria dos utilizadores se concentra aqui, mas com maior variabilidade em comparação com o *cluster* 3C. Na parte final, a curva suaviza-se novamente à medida que se aproxima do *throughput* máximo, sugerindo que apenas uma pequena percentagem de utilizadores consegue atingir os valores mais altos.

No *cluster* 3C o *throughput* tem o valor mínimo de 4.92Gbps e atinge o máximo com o valor de 574Gbps, indicando uma melhor utilização dos recursos da rede. O CDF atinge 50% em cerca de 160.15Gbps, mostrando uma distribuição melhorada de *throughput* quando comparado ao *cluster* 1C.

A curva inicial do *cluster* 3C é relativamente suave desde o início, com um *throughput* inicial superior ao do *cluster* 1C. Isso mostra que a configuração de agrupamento beneficia mesmo os

utilizadores com *throughput* mais baixo. Na inclinação média, verifica-se uma inclinação constante, mostrando que os utilizadores têm uma experiência de *throughput* mais uniforme e elevada. À medida que a curva se aproxima do *throughput* máximo de 574Gbps, o crescimento é mais gradual, o que sugere que uma proporção maior de utilizadores consegue usufruir de *throughput* elevado, refletindo uma rede mais eficiente e equilibrada.

Nos dois cenários, a configuração 3C, apresenta curvas menos íngremes, principalmente nas fases iniciais e médias. Isto sugere uma distribuição mais uniforme e equitativa do *throughput*, com menos utilizadores a atingir *throughput* baixos e mais utilizadores a alcançar *throughput* elevados.

Por outro lado, no cluster 1C, a curva tende a ser mais íngreme na zona de *throughput* mediano, indicando uma maior concentração de utilizadores com valores de *throughput* mediano, mas com uma variação mais ampla entre os valores mínimos e máximos de *throughput*.

Comparando os dois cenários, é evidente que o aumento do número de estações base ajuda a suavizar a inclinação da curva nas configurações 1C e 3C. No entanto, o efeito é mais pronunciado na configuração 3C, onde a inclinação é mais gradual, indicando uma melhoria na qualidade geral da experiência dos utilizadores. A análise da inclinação das curvas reforça a conclusão de que o agrupamento de estações base proporciona um desempenho de rede mais uniforme e robusto, especialmente em cenários com maior densidade de estações.

No entanto, o aumento do número de estações base não resultou num aumento proporcional do *throughput*, sugerindo que existem outros fatores limitantes que impedem o ganho teórico máximo.

Nas Figuras 15 e 16 é apresentado os gráficos de desempenho de *throughput* por utilizador em função da potência transmitida.

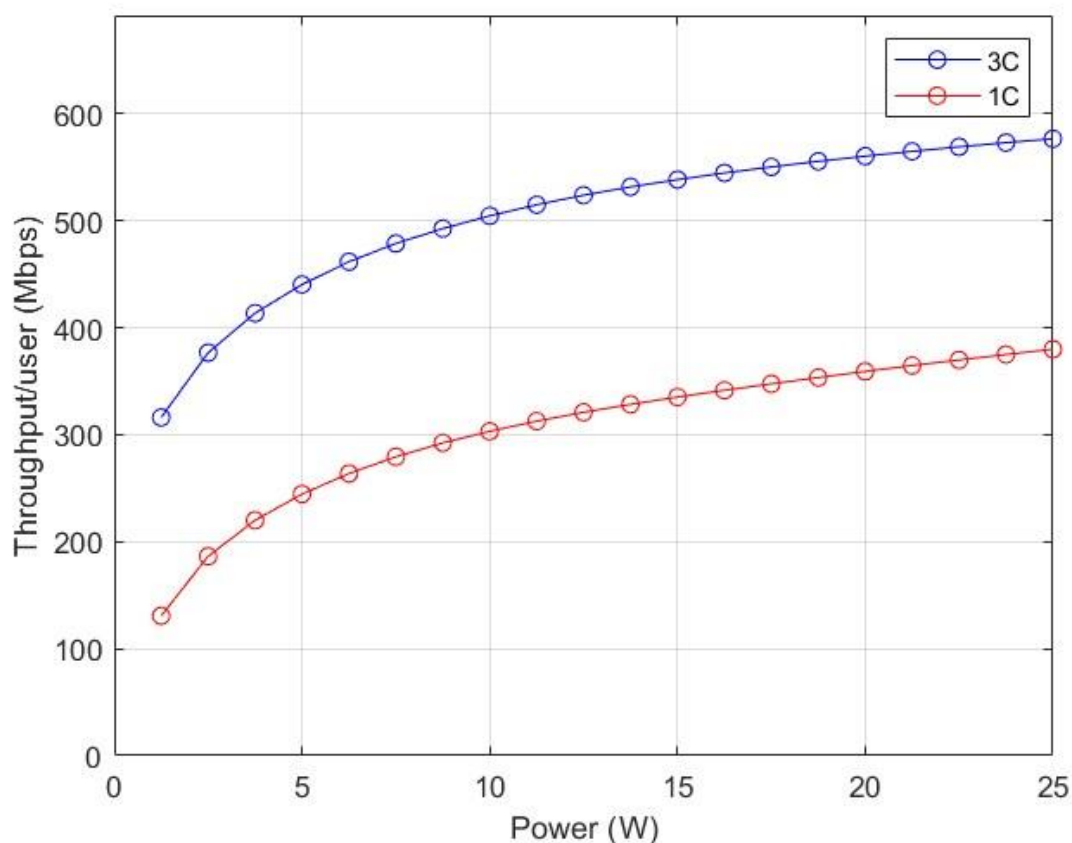


Figura 15 - Throughput/user Vs Power, cenário com 13 estações base

A Figura 15 apresenta um gráfico de *throughput* por utilizador em função da potência de transmissão no cenário com 13 estações base. Neste cenário, a potência de transmissão escolhida foi de 25W.

No cluster 1C o *throughput* por utilizador começa em 130.67 Mbps a uma potência de 1.25 W e cresce gradualmente até atingir 379.87 Mbps a 25W. É possível observar um aumento consistente no *throughput* à medida que a potência de transmissão aumenta. A curva apresenta uma inclinação crescente, especialmente nos primeiro 5W, onde o *throughput* aumenta significativamente. A partir desse ponto, a inclinação começa a diminuir, indicando que o incremento no *throughput* por utilizador é menor à medida que a potência aumenta. Neste caso, o cluster 1C apresenta uma boa performance inicial, mas o ganho em *throughput* por utilizador começa a reduzir com potências mais altas, indicando uma possível saturação da capacidade das estações base à medida que se aproxima dos 25W.

Já no cluster 3C, a performance é significativamente melhor, começando em 316.13Mbps com 1.25W e atingindo 576.51Mbps a 25W. A curva de *throughput* neste *cluster* está sempre acima da do

cluster 1C, demonstrando que o agrupamento melhora consideravelmente o desempenho da rede. A curva apresenta uma inclinação mais suave após os 5W, mas mantém um crescimento consistente em todo o intervalo de potência, com *throughput* quase linear em relação ao aumento da potência, até o limite de 25W.

Neste cenário, é o cluster 3C que demonstra uma utilização mais eficiente da potência de transmissão, oferecendo um aumento de *throughput* por utilizador mais substancial e mais estável ao longo do intervalo de potência.

A Figura 16 apresenta o gráfico que mostra o desempenho de *throughput* por utilizador em função da potência de transmissão do cenário com 26 estações base. Diferentemente do cenário anterior, este foi simulado com uma potência de transmissão de 10W.

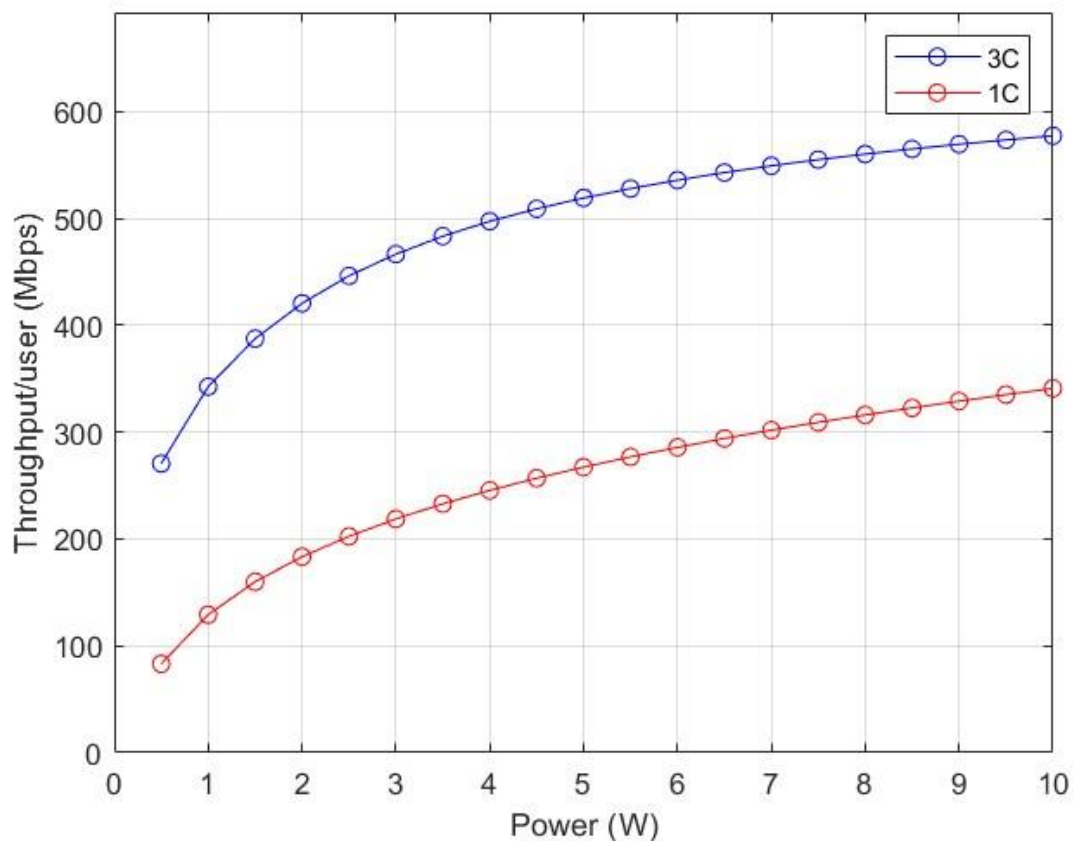


Figura 16 - Throughput/user Vs Power, cenário com 26 estações base

No cluster 1C, o *throughput* por utilizador começa em 83.15Mbps a 0.5W e cresce até 340.971Mbps a 10W. Embora o *throughput* aumente de forma constante, os valores são inferiores aos registados no cenário com 13 estações base. O crescimento mais expressivo ocorre até os 5W, seguido de um incremento mais gradual até aos 10W.

No cluster 3C, a curva inicia-se em 270.588Mbps a 0.5W e atinge 577.34Mbps a 10W. Tal como no cenário com 13 estações base, o *cluster* 3C mantém uma performance superior comparativamente ao cluster 1C, com crescimento constante do *throughput*. Neste cluster, mesmo com uma potência menor, aproxima-se dos valores do *cluster* 3C do cenário com 13 estações base, evidenciando a eficácia do aumento de estações base no agrupamento.

Em relação às curvas do *cluster* 1C e 3C, observa-se que, no primeiro, a curva tem uma inclinação inicial moderada e torna-se menos acentuada após os 5W, o que sugere uma limitação na eficácia da potência adicional para gerar mais *throughput*. A suavização da curva indica que, mesmo com o dobro das estações base, a menor potência por estação restringe o aumento de *throughput* por utilizador. No *cluster* 3C, a inclinação é mais constante e linear ao longo de todo o intervalo de potência, similar ao observado no cenário com 13 estações base, mas com uma taxa de crescimento inicial menor. A curva reflete uma boa eficiência no uso da potência, onde o *throughput* por utilizador continua a aumentar de forma linear até ao limite de 10W, sem sinais de saturação.

A análise permite concluir que a duplicar o número de estações base, combinado com uma redução da potência por estação, não resulta automaticamente numa duplicação do *throughput* por utilizador. No entanto, a eficiência da rede, especialmente quando se utiliza *clusters* com mais estações base, como no caso do *cluster* 3C, pode ser otimizada através do agrupamento, que possibilita uma melhor gestão da potência e uma distribuição mais equilibrada do *throughput* entre os utilizadores. O cenário com 26 estações base demonstra que, com uma configuração adequada, é possível obter um desempenho comparável ao cenário com 13 estações base, mesmo com uma menor potência por estação.

4.2.2 Resultados de cobertura

Neste subcapítulo, será analisada a cobertura de rede, expressa em percentagem, em função da potência de transmissão para os dois cenários distintos. A análise considera duas modulações diferentes, 256QAM e 16QAM, cada uma com diferentes níveis de eficiência espectral, o que influencia diretamente a cobertura alcançada.

A Figura 17 e 18 apresentam gráficos que mostram a relação entre a cobertura e a potência de transmissão para os cenários com 13 e 26 estações base, respetivamente.

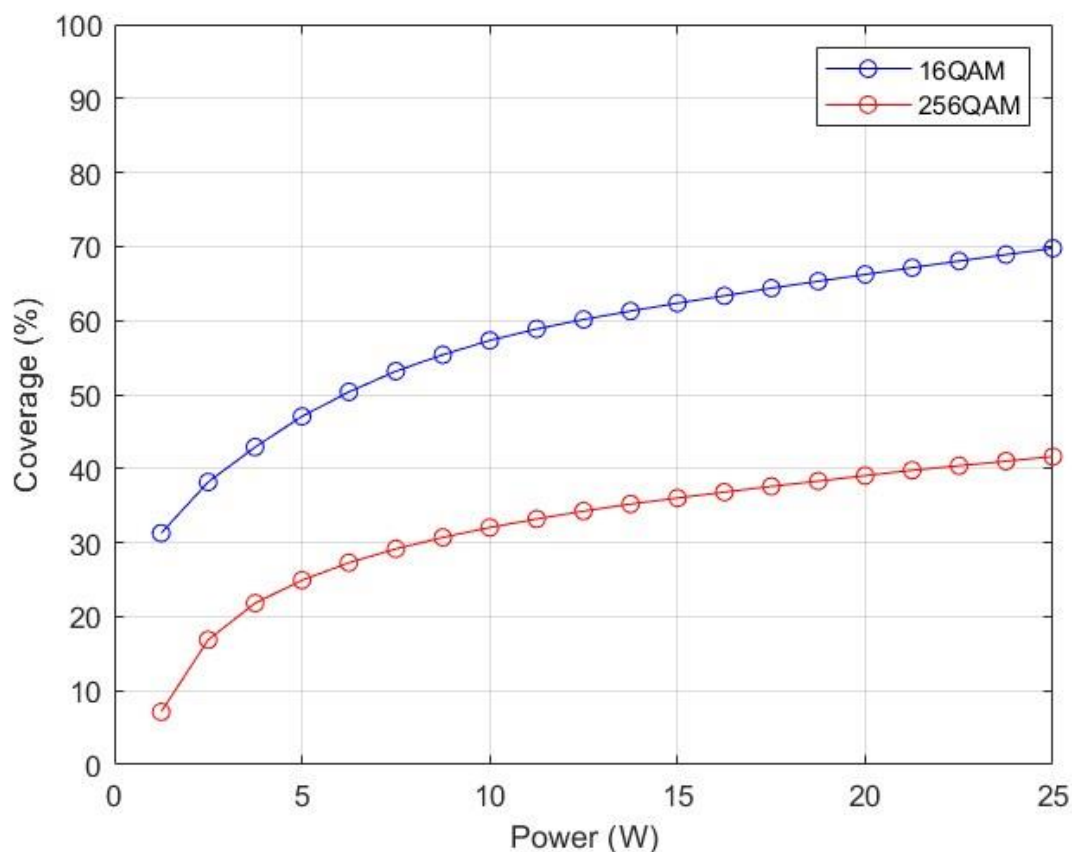


Figura 17 - Coverage Vs Power, cenário com 13 estações base

Na modulação de 256QAM, a cobertura inicia-se em 7.13% com 1.25 W, aumentando gradualmente até atingir 41.623 % com 25W. Observa-se um crescimento acentuado nos primeiros aumentos de potência especialmente até aos 5W, onde a cobertura atinge 27.28 %. A partir desse ponto, o crescimento desacelera, tornando-se mais gradual. Esta tendência indica que aumentos menores na potência de transmissão resultam em ganhos significativos na cobertura. No entanto, após os 10W, a inclinação da curva diminui consideravelmente, sugerindo que a cobertura está a aproximar-se da saturação, onde aumentos adicionais na potência têm efeitos cada vez menores.

Relativamente à modulação 16QAM, a cobertura inicial é significativamente maior do que com 256QAM, começando em 31.27% a 1.25W e atingindo um máximo de 69.75% a 25W. Além disso, a curva de crescimento é mais linear em comparação com a modulação a 256QAM, apresentando aumentos consistentes na cobertura ao longo do intervalo da potência. Embora a inclinação inicial seja menos acentuada do que a modulação com 256QAM, esta mantém-se constante, indicando que a 16QAM oferece uma relação mais linear entre a potência e a cobertura. Isto indica que 16QAM é mais eficiente na expansão da cobertura em níveis de potência mais baixos e mantém um crescimento sustentado até os 25W.

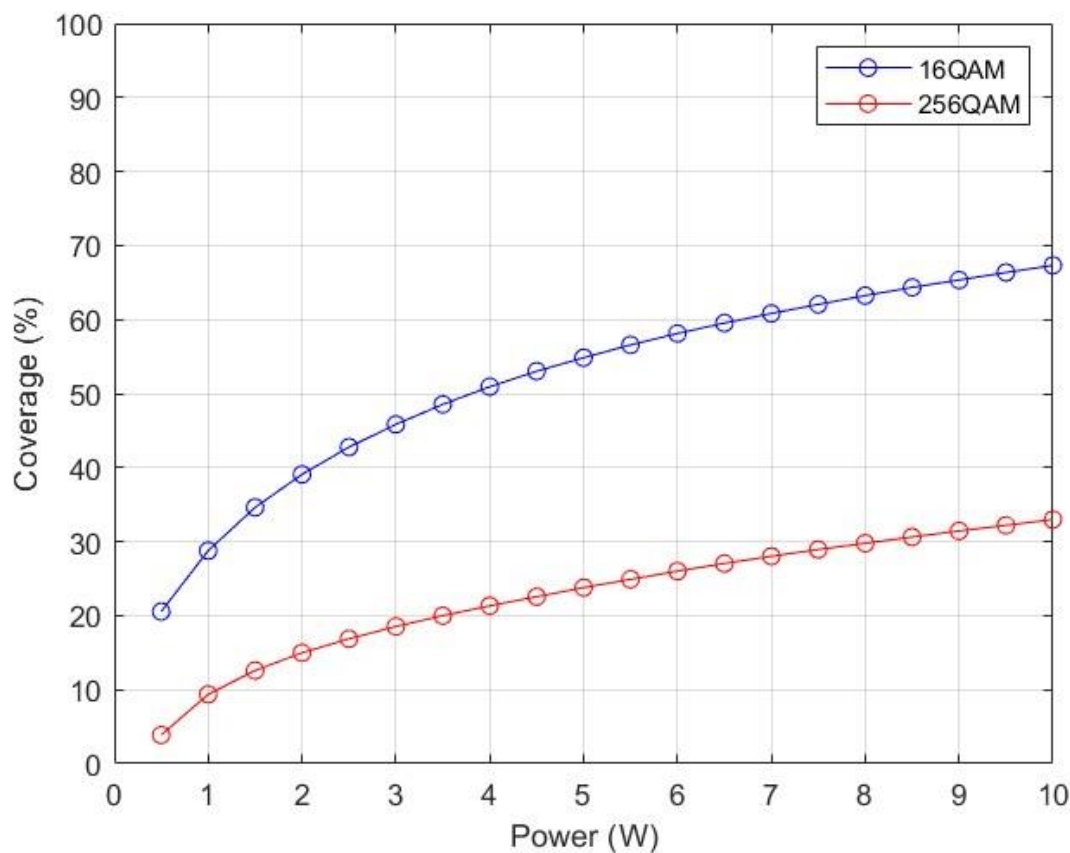


Figura 18 - Throughput/user Vs Power, cenário com 26 estações base

No cenário com 26 estações base, observa-se que a cobertura inicial é menor em ambas as modulações, quando comparada com o cenário de 13 estações base. Na modulação 256QAM a cobertura mínima é de 3.87% a 0.5W, atingindo um máximo de 32.97% a 10W, enquanto na modulação 16QAM a cobertura inicial a 0.5W é de 20.55%, aumentando para 67.31% a 10W.

O comportamento da modulação com 256QAM é bastante semelhante à verificada no cenário com 13 estações base, mas com valores absolutos mais baixos, refletindo o impacto da menor potência de transmissão por estação base. Também aqui se verifica uma inclinação mais acentuada até aos 5W, seguida de um abrandamento. No entanto, a inclinação da curva mantém-se ligeiramente mais linear comparativamente com cenário de 13 estações base.

Tal como no cenário anterior, a modulação com 16QAM oferece uma cobertura significativamente maior desde o início, com uma curva de crescimento que se aproxima de um padrão linear. Em comparação ao cenário e 13 estações base, a curva neste cenário é ligeiramente mais acentuada, refletindo a eficiência de um maior número de estações base em expandir a cobertura com menor potência.

De um modo geral, pode-se afirmar que o aumento do número de estações base no cenário com 26 estações base permite atingir níveis de cobertura relativamente altos com menor potência por estação, especialmente quando se utiliza a modulação 16QAM. Isto significa que, em termos de cobertura, o aumento do número de estações poderá compensar uma menor potência de transmissão, especialmente em configurações de rede com maior densidade de utilizadores.

A análise revela que, enquanto a modulação a 256QAM oferece uma cobertura inferior devido à sua maior eficiência espectral, a 16QAM permite uma expansão mais rápida e linear da cobertura em ambos os cenários. O cenário de 26 estações base, apesar de utilizar uma potência de transmissão menor por estação base, consegue alcançar uma cobertura significativa graças ao aumento do número de estações base. Isto destaca a importância de uma abordagem equilibrada entre a potência de transmissão e a densidade de estações base para otimizar a cobertura de rede.

4.2.3 Resultados da qualidade do sinal em relação ao ruído e interferência

Neste subcapítulo, será analisada a distribuição acumulativa em função do SINR, uma métrica essencial para avaliar a qualidade do sinal. Esta análise abrangerá os dois cenários, com 13 e 26 estações base, com transmissão de potência a 25 e 10W, respetivamente. Serão considerados dois tipos de agrupamento de estações, 1C e 3C, para explorar como o SINR se distribui em cada cenário, tendo em conta o impacto da densidade das estações base e da potência de transmissão.

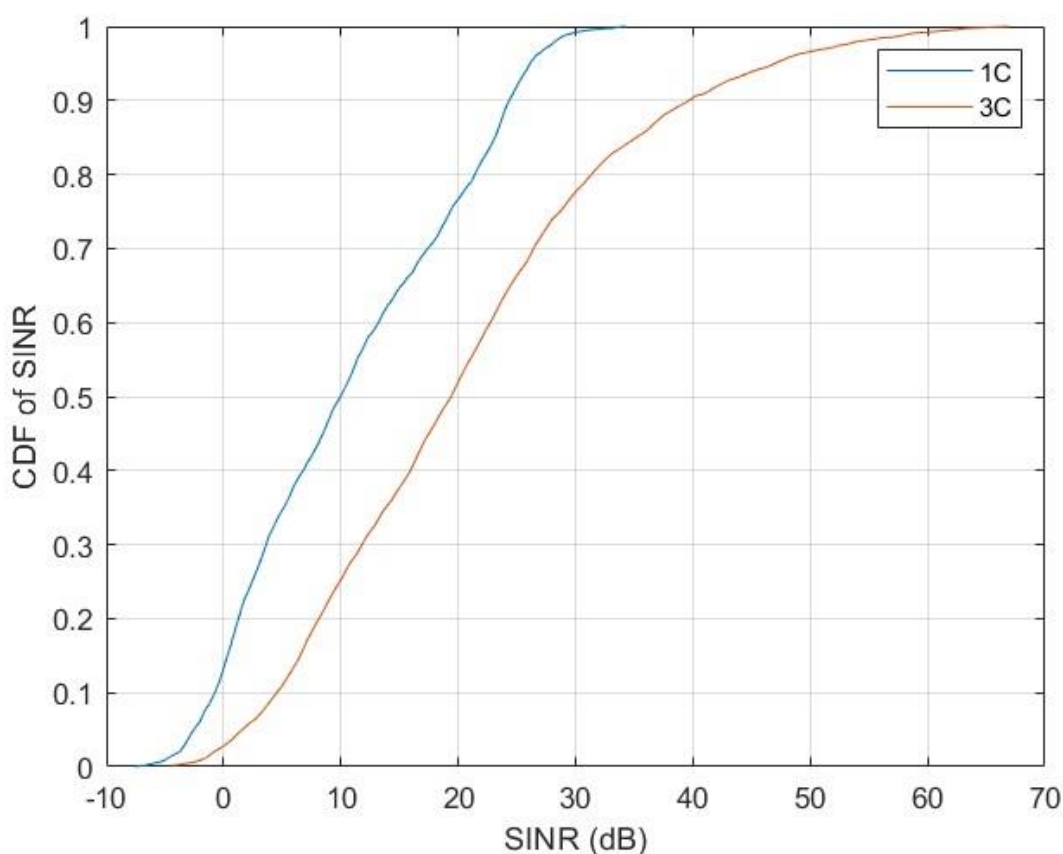


Figura 19 - CDF of SINR Vs SINR, cenário com 13 estações base

A Figura 19 apresenta o gráfico que corresponde à distribuição acumulativa do cenário de 13 estações base.

No *cluster* 1C, observa-se que o SINR varia de -7.53 até cerca de 34.25dB. A função acumulativa revela que 50% dos utilizadores têm um SINR em torno de 10.19dB, o que indica o sinal não é muito forte. A inclinação acentuada e o valor mediano relativamente baixo indicam que uma parte significativa dos utilizadores pode experienciar condições de sinal insatisfatória. A potência de transmissão elevada não é suficiente para garantir um SINR mais alto para todos os utilizadores, possivelmente devido à interferência ou outras limitações.

Por outro lado, no *cluster* 3C, a variação do SINR vai de -4.38dB até cerca de 66.85dB, com uma distribuição mais alargada comparativamente ao *cluster* 1C. A mediana do SINR ocorre aproximadamente aos 22.25dB, o que é significativamente melhor comparado ao 1C, mostrando uma melhoria na qualidade do sinal para a maioria dos utilizadores. Quando a curva tende a aproximar-se de 1, os valores de SINR também são mais elevados, indicando que uma maior parte das medições está concentrada em valores mais altos de SINR. A inclinação menos acentuada e o valor mediano mais alto indicam que a qualidade do sinal é melhor para os utilizadores no *cluster* 3C. Isto resultará numa experiência de rede mais consistente e satisfatória, com menor variação na qualidade do sinal.

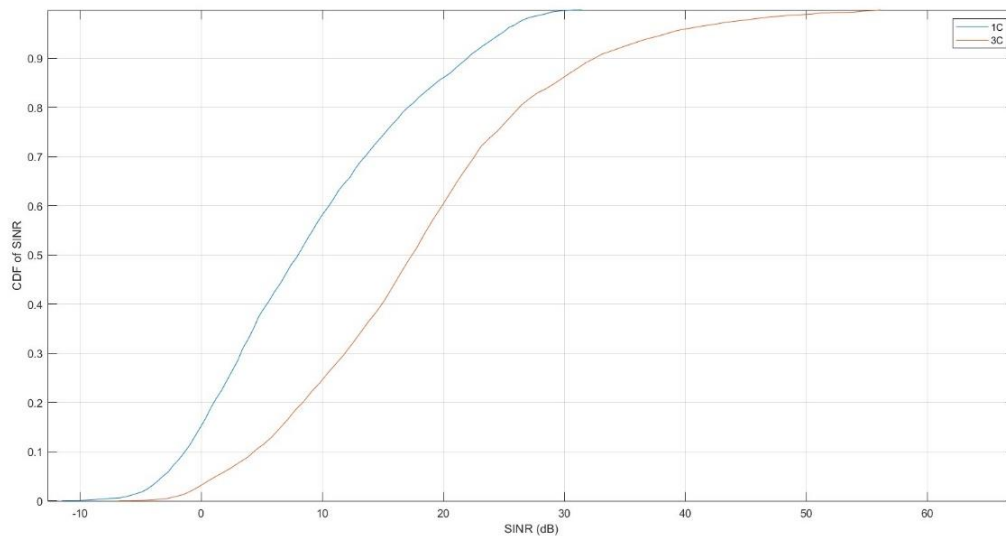


Figura 20 - CDF of SINR Vs SINR, cenário com 26 estações base

No cenário de 26 estações base, no *cluster* 1C, o SINR varia de -11.51dB e vai até cerca de 32.04dB. A curva CDF começa com uma inclinação gradual, o que sugere que há uma acumulação mais lenta de valores baixos de SINR e uma distribuição mais uniforme comparativamente ao cenário de 13 estações base. O valor médio é de 14.0075dB. Este valor é mais alto comparando ao *cluster* 1C do cenário anterior, indicando uma melhoria na qualidade do sinal médio. A curva mais gradual também sugere que, apesar da menor potência de transmissão, o aumento do número de estações base contribui para uma cobertura mais eficiente, beneficiando a qualidade do sinal para os utilizadores.

No *cluster* 3C, a variação ocorre entre -6.81dB até cerca de 59.07dB. Neste *cluster*, a curva CDF ainda mostra uma inclinação ainda mais gradual do que no *cluster* 1C. A distribuição SINR é muito mais ampla, com valores médios de SINR mais elevados, aproximadamente 21.14dB. Assim como no *cluster* 3C do cenário anterior, a mediana é alta, indicando uma boa qualidade de sinal para a maioria dos utilizadores.

Tendo em conta esta análise, podemos concluir que o aumento no número de estações base tende a melhorar a distribuição do SINR, mesmo com uma menor potência de transmissão. Isso reflete uma melhor gestão da interferência e uma cobertura mais eficiente, resultando numa qualidade de sinal mais consistente para os utilizadores. A comparação entre os *clusters* 1C e 3C dentro de cada cenário mostra que 3C geralmente oferece uma qualidade de sinal melhor, com valores médios mais altos e uma distribuição mais uniforme do SINR.

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo principal o planeamento e a análise de um sistema 5G, para o qual foram elaborados dois cenários com diferentes parâmetros de simulação, visando a implementação da infraestrutura de comunicações para o evento Rock in Rio Lisboa. Foi necessário realizar um levantamento detalhado, tanto a nível terrestre quanto das necessidades de telecomunicações dos festivaleiros.

Neste contexto, o desempenho do sistema foi avaliado utilizando um simulador adaptado para modelar uma rede 5G. Foram criados dois cenários de estudo num ambiente muito próximo da realidade, com 13 e 26 estações base, tendo em conta a elevada demanda de tráfego devido ao grande número de utilizadores presentes na área. As simulações foram realizadas para ambos os cenários, com configurações distintas em termos de número de estações e potência de transmissão para cada uma. Foi também considerado dois tipos de modulação, 16QAM e 256QAM, e também foram implementadas arquiteturas com 256 antenas ativas por setor para atender os utilizadores.

A avaliação de desempenho do sistema focou-se nos resultados relativos ao *throughput*, à cobertura de rede e à qualidade do sinal. No que diz respeito ao *throughput*, foram analisadas a relação entre o *throughput* e o número de utilizadores, o desempenho do *throughput* por utilizador em função da potência de transmissão da rede, e a função de distribuição acumulada do *throughput*. Para a cobertura, foram apresentados os resultados da taxa de cobertura em relação à percentagem de potência transmitida. Finalmente, a qualidade do sinal foi analisada através da função de distribuição acumulada do SINR.

Nesta dissertação, foi também realizado um estudo sobre a técnica de *clustering*, que permite que um utilizador seja atendido por pelo menos uma estação base ou, alternativamente, por várias estações base simultaneamente. Esta técnica teve impacto significativo nos resultados obtidos, permitindo concluir positivamente sobre o efeito do tamanho do *cluster*.

Com base na análise apresentada na secção anterior, a técnica de *clustering*, particularmente com a configuração 3C, demonstra ser superior à configuração 1C em termos de *throughput* e qualidade de sinal. No cluster 3C, observa-se uma distribuição mais uniforme do *throughput*, com uma maior proporção de utilizadores a atingir valores elevados, o que indica uma experiência de rede mais consistente e de melhor qualidade. Além disso, o SINR também é mais favorável no cluster 3C, sugerindo uma melhor qualidade de sinal, o que é crucial para a eficácia e robustez da rede.

Relativamente ao número de estações base, podemos concluir que o cenário com 26 estações base apresenta uma capacidade de *throughput* significativamente superior quando comparamos com o cenário de 13 estações base, suportando um maior número de utilizadores com eficiência. Embora o aumento do número de estações base não resulte numa duplicação proporcional do *throughput*, o cenário com 26 estações base ainda se mostra mais adequado para áreas com alta densidade de utilizadores, como é o caso descrito nesta dissertação. A maior densidade de estações permite uma cobertura mais ampla e uma melhor distribuição do sinal, o que é benéfico para a qualidade geral da rede.

No que toca à potência de transmissão, é conclusivo que no cenário com 13 estações base, a potência de 25W proporciona um *throughput* por utilizador crescente de forma constante, mas com ganhos decrescentes à medida que a potência aumenta. No cenário com 26 estações base, a potência foi reduzida para 10W, o que, combinado com o aumento do número de estações, conseguiu alcançar um desempenho comparável ao cenário com 13 estações base. Isso sugere que, em redes densas, uma menor potência por estação pode ser compensada pelo aumento do número de estações base, otimizando a eficiência energética sem sacrificar significativamente o desempenho.

De forma geral, pode-se afirmar que o melhor cenário depende do contexto da aplicação. Se a prioridade é suportar um grande número de utilizadores com uma boa qualidade de serviço, o cenário com 26 estações base e a configuração 3C é o mais apropriado, pois oferece um equilíbrio entre a densidade das estações, cobertura, e qualidade de sinal. Para áreas com menor densidade de utilizadores, o cenário com 13 estações pode ser suficiente, mas a configuração 3C ainda é recomendada para maximizar a eficiência da rede.

Apesar do cenário com 26 estações base ter apresentado os melhores resultados em termos de cobertura e qualidade de sinal, é importante destacar que este é também o cenário com o maior custo envolvido. Os custos operacionais e de manutenção aumentariam significativamente, além do investimento inicial necessário para a instalação das 26 estações. Este cenário compensa caso a procura por uma cobertura mais abrangente e uma melhor qualidade de serviço justificar o investimento adicional. Assim, a escolha deste cenário deve ser cuidadosamente ponderada em função da relação custo-benefício, considerando as necessidades específicas dos utilizadores e a sustentabilidade financeira do projeto a longo prazo.

5.2 Trabalho Futuro

Uma possível linha de investigação para dar continuidade a este estudo seria explorar o impacto do aumento do número de antenas em cada estação base, mantendo o número de estações base inalterado e a potência de transmissão constante. Esta abordagem permitiria analisar o efeito no

throughput global da rede, proporcionando uma comparação direta com os resultados obtidos na presente dissertação, onde se focou na duplicação do número de estações base.

Ao duplicar o número de antenas por estação base, espera-se que seja possível melhorar o desempenho da rede, otimizando a utilização do espectro disponível e aumentando a capacidade de transmissão de dados, sem a necessidade de instalar novas estações base.

A realização deste trabalho futuro contribuiria para uma compreensão mais profunda da relação entre a densidade de antenas e o *throughput* da rede, ajudando a definir estratégias mais eficazes para melhorar a cobertura e a capacidade da rede.

Referências Bibliográficas

- M. Attaran (2023), "The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization", *Journal of Ambiente Itelligence and Humanized Computing*, 14(5), pp. 5977-5993.
- C. Bektas, S. Bocker, B. Sliwa, and C. Wietfeld (2021), "Rapid Network Planning of Temporary Private 5G Networks with Unsupervised Machine Learning", *IEE Vehicular Technology Conference*, pp. 3-4.
- G. Brown (2019), "Private 5G Mobile Networks for Industrial IoT", *white paper produced for Qualcomm*.
- A. Cater-Steel, R. Valverde, A. Shrestha, and M. Toleman (2016), "Decision support systems for IT service management", *International Journal of Information and Decision Sciences*, 8(3), pp. 284-304.
- R. Chataut and R. Akl (2020), "Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction", *Sensors (Switzerland)*, pp. 8-9.
- A. Devrari, A. Kumar and P. Kuchhal (2023), "Global aspects and overview of 5G multimedia communication", *Multimedia Tools and Applications*.
- A. D. Dwivedi, R. Singh, K. Kaushik, R. R. Mukkamala, and W. S. Alnumay (2021), "Blockchain and artificial intelligence for 5G-enabled Internet of Things: Challenges, opportunities, and solutions", *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*.
- K. Easton (2019), "Private 5G Networks for Vertical Industries: Deployment and Operation Models", *Corporate Sector Research and Advance Engineering*.
- S. Eswaran and P. Honnavalli (2023), "Private 5G networks: a survey on enabling technologies, deployment models, use cases and research directions", *Telecommunication Systems*, 82(1), pp. 3-26.
- D. Ficzer, D. Patel, J. Sanchs, J. Ansari, G. Soos, and P. Varga (2002), "5G public network integration for a real-life PROFINET application", *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium 2022*.
- Y. Gong, W. Zhang, C. Zhang (2021), "Research on the Coverage Optimization of 5G mm Wave", *Journal of Physics: Conference Series*.

- C. Guimaraes, X. Li, C. Papagianni, J. Mangues-Bafalluy, L. Contreras, A. Garcia-Saavedra, J. Brenes, D. Cristobal, J. Alonso, A. Zabala, J. Kainulainen, A. Mourad, M. Lorenzo, and C. Bernardos (2021), "Public and Non-Public Network Integration for 5Growth Industry 4.0 Use Cases", *IEEE Communications Magazine*, 59(7), pp. 108-114.
- I. Ioannou, V. Vassiliou, C. Christophorou, and A. Pitsillides (2020), "Distributed Artificial Intelligence Solution for D2D Communication in 5G Networks", *IEEE Systems Journal*, 14(3), pp. 4232-4241.
- A. Mughees, M. Tahir, M. Sheikh, and A. Ahad (2020), "Towards energy efficient 5G networks using machine learning: Taxonomy, research challenges, and future research directions", *IEEE Access*, 8, pp. 187498-187522.
- Y. Niu, C. Gao, Y. Li, L. Su, D. Jin, Y. Zhu, and D. Wu (2017) "Energy-Efficient Scheduling for mmWave Backhauling of Small Cells in Heterogeneous Cellular Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(3), pp.2674-2687.
- R. Olimid and G. Nencioni (2020), "5G Network Slicing: A Security Overview", *IEEE Access*, 8, pp. 99999-100009.
- J. Ordóñez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez, J. Ramos-Munoz, J. Lorca, and J. Folgueira (2017), "Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges", *IEEE Communications Magazine*, 55(5), pp. 80-87.
- I. Salah, M. Mabrook, K. Rahouma, and A. Hussein (2022), "Energy efficiency optimization in adaptive massive MIMO networks for 5G applications using genetic algorithm", *Optical and Quantum Electronics*, 54(2), pp. 1-2.
- S. Sarma, P. Khuntia, and R. Hazra (2022), "Power control scheme for device-to-device communication using uplink channel in 5G mm-Wave network", *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*.
- I. Shayea, M. Ergen, M. Azmi, S. Çolak, R. Nordin, and Y. Daradkeh (2020), "Key challenges, drivers and solutions for mobility management in 5G networks: A survey", *IEEE Access*, 8, pp. 172534-172552.
- S. Sicari, A. Rizzardi, and A. Coen-Porisni (2020), "5G in the Internet of Things era: an overview on security and privacy challenges".
- N. U. Hassan, W. Ejaz, N. Ejaz, H. Kim, A. Anpalagan, and M. Jo (2016) "Network Selection and Channel Allocation for Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks", *IEEE Access*, 4, pp. 980-992.

- P. Varga, J. Peto, A. Franko, D. Balla, D. Haja, F. Janky, G. Soos, D. Ficzero, M. Maliosz, and L. Toka (2020), "5g support for industrial iot applications – challenges, solutions, and research gaps", *Sensors (Switzerland)*.
- A. Watanabe, M. Ali, S. Sayeed, R. Tummala, and M. Pulugurtha (2021), "A Review of 5G Front-End Systems Package Integration", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 11(1), pp. 118-133.
- M. Wen, Q. Li, D. Lopez-Perez, O. Dobre, H. Poor, P. Popovski, and T. Tsiftsis (2022), "Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape", *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 16(1), pp. 7-25.
- P. William, S. Choubey, M. Ramkumar, K. Vengatesan, and A. Choubey (2022), "Implementation of 5G Network Architecture with Interoperability in Heterogeneous Wireless Environment using Radio Spectrum", *Proceedings of the International Conference on Electronics and Renewable Systems*, pp. 786-791.
- S. Zhang (2019), "An Overview of Network Slicing for 5G", *IEEE Wireless Communications*, 26(3), pp. 111-117.

Anexo A

Planeamento celular considerando um cenário genérico

Neste anexo, é apresentado os cálculos para realizar o planeamento considerando um cenário genérico. Neste cenário, cada estação base (BS/AP) cobre duas zonas com diferentes taxas de transmissão de dados, dependendo da distância à BS. Até 25 metros da BS, utilizam-se símbolos 256QAM com uma taxa de codificação $R_c=7/8$, e até 49 metros, utilizam-se símbolos 16QAM com $R_c=3/4$.

O sistema é baseado em 5G NR com MIMO massivo, onde em cada setor da célula há um mMIMO com $M=256$ antenas, para servir $k=21$ utentes, resultando numa razão $M/K=12$ antenas por utente, utilizando TDD. No total, existem 30 setores (3 setores por célula, multiplicados por 10 células).

Considera-se uma frequência central $f_c=3.6\text{GHz}$ com numerologia 1, uma largura de banda por portadora de 50 MHz, e uma separação de sub-portadoras $\Delta f=30\text{KHz}$. O sistema OFDM transmite 28 símbolos em cada subtrama com duração de 1.0ms.

O tempo de coerência do canal é $T_c=25\text{ms}$, e a largura de banda de coerência do canal é $B_c=8\text{MHz}$. Utiliza-se TDD, em que o tempo de transmissão do downlink (DL) é igual ao do uplink (UL) mais a duração dos pilotos.

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

Tabela 4.1 - Parâmetros considerados para planeamento teórico do cenário indoor

Parâmetros	Valor
Frequência Portadora (f_c)	3.6GHz
Largura de Banda por Protadora (B_t)	50MHz
Espaçamento de Sub-portadoras (Δf)	30KHz
Número de Símbolos por Subtrama (OFDM)	28
Número de Antenas Massivas por Utilizador (M/K)	256
Número de Antenas por Utilizador (M/K)	12
Número de UEs por Setor (K)	21
Tempo de Coerência do Canal (T_c)	25ms
Largura de Banda de Coerência do Canal (B_c)	8MHz
Potência de Transmissão ($EIRPTX$)	24dBm
Ganho da Antena de Recepção (GRX)	0dB
Perda na Antena de Recepção (LRX)	0dB
Ganho de Propagação em dB ($10\log(F)$)	8dB
Margem de Desvanecimento (M_F)	13dB
Densidade Espectral de Potência do Ruído Térmico ($10 \log(kT)$)	-174dBm
Número de Sub-portadoras (N_{sc})	1650
Duração de Símbolo (T_s)	1ms

- Cálculo da sensibilidade

Para calcular a potência do ruído, foi utilizado as seguintes equações:

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

Substituindo com os valores presentes na tabela 4.1, obtem-se que:

$$10\log(P_n) = 10\log(kT) + 10\log(F) + 10\log(Bt) = -174 + 8 + 77 = -89.0dBm$$

- Para o cálculo do número total de bits transmitidos utilizou-se a seguinte equação

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

Para a modulação a 256QAM:

$$Nb1 = 56 \times 1650 \times 8 \times 7/8 = 646800bits$$

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

Para a modulação 16QAM:

$$Nb2 = 56 \times 1650 \times 4 \times 3/4 = 277200 \text{ bits}$$

Na modulação 16QAM, ainda obtemos um débito considerável suficiente para oferecer uma experiência de dados satisfatória aos utilizadores durante o evento do Rock in Rio

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

$$Rb = Nb/Ts$$

Para a modulação 256QAM obtem-se um ritmo binário de 646.8Mbps, proporcionando uma notável taxa de transmissão de dados, fundamental para atender às necessidades dos utilizadores durante o evento. Para a modulação 16QAM obtem-se um ritmo binário de 277.2Mbps, o que é relativamente baixo, contudo conseguirá assegurar uma experiência de dados razoável para os utilizadores.

- Relação de Sinal-Ruído

Para calcular a relação Sinal-Ruído, foi utilizada a seguinte equação:

$$10\log(SNR) = 10\log(Eb/No) + 10\log(Rb/Bt)$$

Para a modulação 256QAM, tem-se que:

$$10\log(SNR1) = 5.1\text{dB} + 10\log(646.8/50) = 16.2\text{dB}$$

Para a modulação 16QAM, obtém:

$$10\log(SNR2) = 0.1\text{dB} + 10\log(277.2/50) = 7.5\text{dB}$$

O SNR para a modulação 256QAM é de 16.2dB, sugerindo uma qualidade de sinal bastante boa, permitindo manter uma comunicação estável num ambiente ruidoso. Na modulação 16QAM obtém-se o valor 7.5dB, que é bastante mais baixo com o verificado na modulação 256QAM. Apesar disto, este valor conseguirá assegurar uma transmissão de dados eficaz para os utilizadores.

- Cálculo da Potência do Sinal

A potência do sinal pode ser calculada através da seguinte equação:

$$10\log(S) = 10\log(SNR) + 10\log(Pn)$$

Para a modulação 256QAM obtem-se:

$$10\log(S1) = 16.2 - 89.0 = -72.8dBm$$

Para a modulação 16QAM obtem-se:

$$10\log(S2) = 7.5 - 89.0 = -81.5dBm$$

Verifica-se que a potência do sinal para a modulação 256QAM é de -72.8dBm, o que significa que é necessária uma potência de transmissão mais elevada para compensar perdas de propagação e assegurar a qualidade da comunicação. No caso da modulação 16QAM, a potência do sinal é de -81.5dBm, o que significa que a comunicação exige menos potência de transmissão em comparação com a 256QAM, tornando-se mais eficiente neste contexto específico de um evento como o Rock in Rio.

- Cálculo do raio de cobertura:

A perda de propagação poderá ser obtida através da seguinte equação:

$$L_{path} = EIRPTX + Grx - Lrx - Mf - 10\log(S)$$

Substituindo com os valores presentes na tabela 4.1, tem-se que:

$$L_{path} = 24 + 2 - 0 - 10 - 10\log(S) = 16 - 10\log(S)$$

Para a modulação 256QAM:

$$L_{path1} = 16 + 72.8 = 88.8dB$$

Para a modulação 16QAM:

$$L_{path2} = 16 + 81.5 = 97.5dB$$

Na modulação 256QAM há uma perda de propagação de 88.8dB, enquanto para a modulação 16QAM a perda é de 97.5 dB. Ambos os valores são altos, contudo, onde se verifica a maior perda de propagação é na modulação 16QAM.

- Cálculo da distância da zona de cobertura

A distância da zona de cobertura poderá ser calculada através da seguinte equação:

$$L_{path} = 43.6 + 32\log(d)dB$$

Para a modulação a 256QAM, obtem-se que:

$$L_{path} = L_{path1} \Rightarrow R1 = 10^{(88.8-43.6)/32} = 25.9m$$

Para a modulação a 16QAM, obtem-se que:

$$L_{path} = L_{path2} \Rightarrow R2 = 10^{(97.5-43.6)/32} = 48.4m$$

Com base nestes resultados é possível confirmar que a modulação 16QAM tem a maior distância que o sinal pode propagar de forma eficaz.

- Análise da capacidade do mMimo neste cenário Indoor

Aqui será analisada a capacidade do mMIMO neste cenário Indoor. Em primeiro lugar é necessário determinar o número máximo de símbolos que poderá ser transmitido no canal, através da seguinte equação:

$$\tau_c = BC \times T_c$$

Substituindo com os valores presentes na tabela 4.1, tem-se que:

$$\tau_c = 2.5 \times 10^{-2} \times 8 \times 10^6 = 2 \times 10^5 = 200000$$

Com o resultado obtido, conclui-se que o número máximo de símbolos para transmitir no canal mMIMO é de 200000.

Considerando que $\tau_p = K$, em que K representa o número de utilizadores por setor, e N_s representa o número de símbolos que são transmitidos a cada T_c tem-se que:

$$\tau_p = K = 21 \Rightarrow \tau_c - \tau_p = 200000 - 21$$

No *Downlink*:

$$\text{Downlink (DL)} \Rightarrow N_s = 100000$$

No *Uplink*:

$$\text{Uplink (UL)} \Rightarrow N_s = 100000 - 21$$

- Cálculo da taxa de símbolos no *Downlink*:

A taxa de símbolos no Downlink pode ser calculada através da seguinte equação:

$$R_s = N_s / T_c$$

Substituindo com os valores presentes na tabela 4.1:

$$R_s = 10^5 / 2.5 \times 10^{-2} = 0.4 \times 10^7$$

A taxa de símbolos no *Downlink* é de 0.4×10^7 sps em cada Bc

- Cálculo da taxa de símbolos na rede:

A taxa de símbolos na rede pode ser calculada através da seguinte equação:

$$R_{st} = B_t / B_c x R_s$$

Substituindo com os valores presentes na tabela 4.1:

$$R_{st} = 50/8 x 0.4 x 10^7 = 2.5 x 10^7 \text{ sps}$$

Sabendo que na zona 1 temos $R_c = 7/8$ (256QAM), então:

$$R_{st1} = 10^7 x 2.5 x 7/8 \text{ sps}$$

Na zona 2 temos $R_c = 3/4$ (16QAM):

$$R_{st2} = 10^7 x 2.5 x 3/4 \text{ sps}$$

- Taxa de símbolos por setor em cada zona

A área total do setor poderá ser calculada através da equação:

Tem-se que $R_1 = 25.9\text{m}$ (256QAM):

$$A_1 = \pi x 25.9^2$$

E para A_2 :

Tem-se que $R_2 = 48.4\text{m}$ (16QAM):

$$A_2 = \pi x (48.4^2 - 25.9^2)$$

A taxa de símbolos por setor em cada zona poderá ser calculada através da seguinte equação:

$$R_{sc} = R_{st} x K$$

Em cada setor da célula há $K=21$ pedestres/setor, por isto:

Zona 1:

$$R_{sc1} = 21 x 10^7 x 2.5 x 7/8 x (A_1 / A_T) \text{ sps} \Rightarrow R_{bc1} = 105.1 x 10^7 \text{ bps; (8bits/símbolo)}$$

Zona2:

$$R_{sc2} = 21 x 10^7 x 2.5 x 3/4 x (A_2 / A_T) \text{ sps} \Rightarrow R_{bc2} = 149.9 x 10^7 \text{ bps; (4bits/símbolo)}$$

- Ritmo binário total por setor

O ritmo binário total por setor poderá ser calculado através do somatório dos ritmos binários nas 2 zonas:

$$R_{bc} = R_{sc1} + R_{sc2}$$

Substituindo com os valores obtidos anteriormente, tem-se que:

$$Rbc = 255.0 \times 10^7 \text{ bps}$$

- Eficiência espectral

A eficiência espectral é calculada através da seguinte equação:

$$\varepsilon = Rbc \times Bt$$

Substituindo pelos valores obtidos anteriormente, tem-se que:

$$\varepsilon = 255.0 \times 10^7 / 5 / 10^7 = 51.0 \text{ bps/Hz} \Rightarrow \varepsilon = 51.0 \text{ bps/Hz/sector}$$

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

$$\varepsilon_K = \varepsilon / K$$

Assim, sabendo que K=21, tem-se que:

$$\varepsilon_K = 51.0 / 21 = 2.42 \text{ bps/Hz/pedestre}$$

- Throughput

Considerando que há 39 setores (13 BS/AP) no interior do cenário, tem-se que:

$$\text{Throughput} = Rbc \times 39 = 99.5 \text{ Gbps}$$