



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Planeamento de Redes 5G: Redes Privadas em Ambientes Industriais

Pedro Afonso Aresta Morais Teixeira Santana

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

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

Setembro, 2025



TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação

Planeamento de Redes 5G: Redes Privadas em Ambientes Industriais

Pedro Afonso Aresta Morais Teixeira Santana

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

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

Setembro, 2025

*"I write these words in steel,
for anything not set in metal cannot be trusted."*

- Brandon Sanderson

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Professor Américo Correia, por todo o apoio, orientação e disponibilidade que teve comigo no decorrer da elaboração desta dissertação, que foi fundamental para o resultado e sucesso da mesma.

Também gostaria de agradecer a todos os meus amigos que me aturaram e continuam a aturar a minha má disposição, amigos esses que fizeram de mim quem eu sou hoje e por isso estou-lhes eternamente grato. Primeiramente ao meu grande amigo Nuno Gouveia, que como um irmão para mim, me atura nos piores e nos melhores momentos há quase 20 anos. Queria agradecer ao André Cardoso e ao Miguel Romana, que me acompanham nesta jornada há quase 15 anos. Não me esquecendo claro do Afonso Gaspar, da Beatriz Mota, do Bernardo Ramalhe, do Filipe Lopes, do Pedro Souto, do Ricardo Pinto e da Sofia Morais, que já lá vão quase 10 anos desde que os posso considerar como grandes amigos.

Queria agradecer à minha família por todo o apoio e suporte que me deram nestes últimos 6 longos anos de percurso académico, mas especialmente por todo o carinho e apoio que sempre me deram nestes meus 24 anos, por me fazerem rir nos maus momentos, por me reconfortarem quando falho, por me mostrarem que se quiser consigo alcançar e nisso estar-lhes-ei eternamente grato. Especialmente aqueles que me viram a iniciar este percurso académico, mas não me viram a concluí-lo, agradeço imenso aos meus dois avós, Aurélio Teixeira e João Santana, por todo o apoio e encorajamento que me deram mesmo nos seus momentos mais difíceis e de fragilidade, por terem sempre querido o seu netinho engenheiro, mas nunca o terem visto a formar-se. Não me esquecendo claro daqueles que ainda me viram a concluir esta etapa, queria agradecer a minha irmã Maria Santana por ter aturado as minhas manias, às minhas avós, Florencia Bacalhau e Noémia Morais, por todo o carinho que me deram nestes últimos anos, e claro aos meus pais Marta Teixeira e Paulo Santana por me encorajarem a seguir este caminho que tanto arranjava motivos para não seguir, por todo o suporte emocional que me duram nos tempos mais nublados. Aos meus gatos que nestes 24 anos me fizeram companhia nas noites mais frias, que me aqueceram com as suas fofuras e brincadeiras, e que mesmo trazendo-me às vezes sofrimento foram e são muito importantes para mim, a Sissy, ao Karité(Kaká), ao Ramsés(Rá) e ao Bastét(Té) agradeço-vos e espero que continuem a fazer os meus dias durante muitos mais anos, e ao Verdy(Didi), ao João(Jojo), a Tita e a Tucha(Tutu) agradeço-vos pelo tempo que estiveram comigo, curto ou longo quanto foi, fez mais impacto que muitas pessoas que passaram pela minha vida.

A todos vós que fizeram de mim quem sou, que me acompanharam e que me acompanham, que me apoiaram e continuam a apoiar-me, deixo aqui o meu agradecimento, estar-vos-ei eternamente grato.

Resumo

Esta dissertação foca-se no planeamento de uma rede 5G NR em ambiente industrial, tendo como caso de estudo o cenário Std3D, construído a partir da planta da Volkswagen Autoeuropa em Palmela, com o objetivo de avaliar o desempenho de cobertura e throughput, considerando redes privadas focadas em elevada densidade de dispositivos e IIoT.

Foi adaptado um simulador de sistema em JAVA, no qual foram implementados quatro cenários. Um cenário com 38BS a 8 metros e três cenários com 20BS, dois com as BS a 8 metros, um com $M/K=9$ e outro com $M/K=18$, e um cenário com as BS a 10 metros com $M/K = 9$. Todos os cenários utilizam como parâmetros, uma portadora a 28 GHz, largura de banda de 200 MHz, numerologia 2 do 5G NR e mMIMO com $M=576$ antenas por setor.

Quanto ao desempenho, passar de 20 para 38 BS resulta num aumento de 9.18% do throughput. Os valores M/K têm diferentes impactos, $M/K=9$ duplica a capacidade de UEs/IIoTs face a $M/K=18$, e no ponto de capacidade máxima de $M/K=18$, o throughput total é 41.30% superior ao de $M/K=9$. Cluster 3C, teve ganhos de até 49.82% quando comparado com 1C e até 10.88% comparando com 2C, com potências de transmissão de 250 mW. O desempenho de cobertura das quatro modulações foi: 4QAM de 100.00%; 16QAM entre 71.93% e 78.27%; 64QAM até 30.42%; 256QAM até 5.47%. As CDF do SINR e do throughput validam a vantagem de duas ligações e o melhor desempenho dos UEs face aos IIoTs.

Palavras-chave: 5G; Redes Privadas; IIoT; Planeamento de Rede; Throughput; Cobertura.

Abstract

This dissertation focuses on the planning of a 5G NR network in an industrial environment, having as its case study the Std3D scenario, built from the floor plan of Volkswagen Autoeuropa in Palmela, with the objective of evaluating coverage and throughput performance, considering private networks focused on high density of device and IIoT.

A system-level simulator in Java was adapted, in which four scenarios were implemented. One scenario with 38 BS at 8 metres and three scenarios with 20 BS, two with the BS at 8 metres, one with $M/K=9$ and another with $M/K=18$, and one scenario with the BS at 10 metres with $M/K = 9$. All scenarios use as parameters a 28 GHz carrier, 200 MHz bandwidth, 5G NR numerology 2 and mMIMO with $M=576$ antennas per sector.

In terms of performance, moving from 20 to 38 BS results in a 9.18% increase in throughput. The M/K values have different impacts, $M/K=9$ doubles the capacity of UEs/IIoTs compared with $M/K=18$, and at the maximum-capacity point of $M/K=18$, the total throughput is 41.30% higher than with $M/K=9$. Cluster 3C achieved gains of up to 49.82% when compared with 1C and up to 10.88% when compared with 2C, with transmit powers of 250 mW. The coverage performance of the four modulations was: 4QAM at 100.00%; 16QAM between 71.93% and 78.27%; 64QAM up to 30.42%; 256QAM up to 5.47%. The SINR and throughput CDFs validate the advantage of two connections and the better performance of UEs compared with IoTs.

Keywords: 5G; Private Networks; IIoT; Network Planning; Throughput; Coverage.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Glossário	xv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1. Motivação e Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia de Pesquisa	2
1.4. Estrutura da Dissertação	2
Capítulo 2 Revisão Literária	3
2.1. As Antigas Gerações de Redes Móveis	3
2.2. 5G – A Quinta Geração de Redes Móveis	4
2.2.1. O Crescimento de Tráfego de Dados Móveis e a Necessidade do 5G	4
2.2.2. Requisitos de Desempenho das Redes 5G	5
2.2.3. Diferenças entre a Quarta e a Quinta Geração	6
2.2.4. Casos de Uso do 5G	7
2.3. Arquitetura do 5G	8
2.3.1. 5G NSA	9
2.3.2. 5G SA	10
2.4. Tecnologias	11
2.4.1. O mMIMO	11
2.4.2. Ondas Milimétricas (mmWaves)	12
2.4.3. Utilização do Espectro	13
2.4.4. Beamforming	14
2.4.5. Network Slicing	15
2.5. Redes Privadas 5G	16
2.5.1. Alocação do Espectro	16
2.5.2. Tipologias de Implementação de Redes Privadas	16
Capítulo 3 Simulador de Sistema	21
3.1. Descrição do Simulador de Sistema	21

3.2. Cenários Implementados	22
Capítulo 4 Discussão de Resultados	25
4.1. Resultados das simulações	25
4.1.1. Resultados do Throughput Vs Número de Utilizadores	25
4.1.2. Resultados do Throughput Vs Potência	31
4.1.3. Resultados da Cobertura Vs Potência	33
4.1.4. Resultados do CDF do SINR e do CDF do Throughput	36
Capítulo 5 Conclusões e Trabalhos Futuros	39
5.1. Conclusões	39
5.2. Trabalhos Futuros	40
Referências	41
Anexos	43
Anexo A	43

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama do modelo de investigação DSRP [1]	2
Figura 2. Crescimento anual do tráfego de dados móveis [7]	4
Figura 3. Metas de desempenho para serviços 5G [8]	6
Figura 4. Categorias de cenários de aplicação do 5G [11]	7
Figura 5. Requisitos de desempenho da rede 5G nos diferentes cenários [11]	7
Figura 6. 5G vs 4G – Download [12]	8
Figura 7. 5G vs 4G – Tempo de paragem de um Veículo Autónomo [12]	8
Figura 8. 5G vs 4G – Densidade de Dispositivos [12]	8
Figura 9. Arquitetura 5GC [13]	9
Figura 10. Implementação 5G NSA – Option 3 [16]	10
Figura 11. Implementação 5G SA – Option 2 [17]	11
Figura 12. Massive MIMO para Múltiplos Utilizadores [11]	12
Figura 13. Espectro 5G NR [22]	12
Figura 14. Cobertura VS Capacidade das Bandas de Frequências do 5G [23]	13
Figura 15. Massive MIMO com Beamforming [12]	14
Figura 16. Beam-Tracking e Beam-Switching a 28 GHz [10]	14
Figura 17. Exemplo de Network Slicing [25]	15
Figura 18. Stand-Alone NPNs adaptado de [27]	17
Figura 19. Public Network Integrated NPNs com partilha de RAN, adaptado de [27]	17
Figura 20. Public Network Integrated NPNs com partilha de RAN e do C-Plane, adaptado de [27]	18
Figura 21. Public Network Integrated NPNs com integração completa, adaptado de [27]	18
Figura 22. Interação entre o Simulador de Sistema e o Simulador de Ligação	21
Figura 23. Fases da simulação	21
Figura 24. Representação do Cenário Std3D com 20 BS	22
Figura 25. Representação do Cenário Std3D com 38 BS	23
Figura 26. Representação das 4 zonas de R_b da BS	23
Figura 27. Exemplo de Resultados do Simulador de Ligação	24
Figura 28. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário com 38BS a 8m de altura	25
Figura 29. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário com 20BS a 8m de altura	25
Figura 30. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário com 20BS a 10m de altura	26
Figura 31. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário 20BS VS 38BS	26
Figura 32. Throughput/User (Mbps) Vs Number of Users, Cenário 20BS VS 38BS	27
Figura 33. Throughput Increment (%) Vs Number of Users, Cenário 20BS VS 38BS	28
Figura 34. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário 20BS M/K=9 e M/K=18	29
Figura 35. Diferença entre valores de Throughput Max e Min	29
Figura 36. Throughput/User (Mbps) Vs Number of Users	30
Figura 37. Throughput/User (Mbps) Vs Potência (mW), Cenário com 38BS a 8m de altura	31
Figura 38. Throughput/User (Mbps) Vs Potência (mW), Cenário com 20BS a 8m de altura	31
Figura 39. Throughput/User (Mbps) Vs Potência (mW), Cenário com 20BS a 10m de altura	32
Figura 40. Diferença (%) entre os valores Throughput/User dos cenários com 20BS a 10m e a 8m	32
Figura 41. Coverage (%) Vs Power (mW), Cenário com 38BS a 8m de altura	33
Figura 42. Coverage (%) Vs Power (mW), Cenário com 20BS a 8m de altura	33
Figura 43. Coverage (%) Vs Power (mW), Cenário com 20BS a 10m de altura	34
Figura 44. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 4QAM	34
Figura 45. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 16QAM	35
Figura 46. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 64QAM	35
Figura 47. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 256QAM	35

Figura 48. CDF do SINR	36
Figura 49. CDF do Throughput	36

36
36

Índice de Tabelas

Tabela 1. Principais diferenças entre as diversas gerações de redes móveis	4
Tabela 2. Características principais da quarta e da quinta geração de redes móveis. [8]	7
Tabela 3. Principais parâmetros das Simulações	22
Tabela 4. Raio de cada Zona	23
Tabela 5. Parâmetros para o Planeamento Teórico	43

Glossário

1G – *First Generation*
2G – *Second Generation*
3G – *Third Generation*
3GPP – *3rd Generation Partnership Project*
4G – *Fourth Generation*
5G – *Fifth Generation*
5GC – *5G Core*
5G NR – *5G New Radio*
BS – *Base Station*
CDF – *Cumulative Distribution Function*
CDMA – *Code Division Multiple Access*
CN – *Core Network*
C-Plane – *Control Plane*
CUPS – *Control and User Plane Separation*
D2D – *Device-to-Device*
DC-HSDPA – *Dual Carrier High Speed Downlink Packet Access*
DL – *Downlink*
DSRPM – *Design Science Research Process Model*
DSR – *Design Science Research*
EDGE – *Enhanced Data Rate for GSM Evolution*
eMBB – *Enhanced Mobile Broadband*
ENDC – *EUTRA-NR Dual Connectivity*
eNB – *Evolved Node B*
EPC – *Evolved Packet Core*
FDMA – *Frequency Division Multiple Access*
GPRS – *General Packet Radio Service*
GSM – *Global System for Mobile Communications*
HSDPA – *High Speed Downlink Packet Access*
HSUPA – *High Speed Uplink Packet Access*
H+ – *HSDPA+*
IMT – *International Mobile Telecommunications*
IMT-2000 – *International Mobile Telecommunications 2000*
IIoT – *Industrial Internet of Things*
IoT – *Internet of Things*
IP – *Internet Protocol*
ITU – *International Telecommunication Union*
LOS – *Line-of-Sight*
LTE – *Long-Term Evolution*
LTE-Advanced – *Long Term Evolution Advanced*
mMTC – *Massive Machine Type Communications*
M2M – *Machine-to-Machine*
MEC – *Multi-Access Edge Computing*
mMIMO – *Massive Multiple-Input Multiple-Output*
MMS – *Multimedia Messaging Service*
mmWaves – *Ondas Milimétricas*
NFV – *Network Function Virtualization*
NLOS – *Non-Line-of-Sight*
NPN – *Non-Public Network*

NFV – *Network Functions Virtualization*
NR – *New Radio*
NSA – *Non-Standalone*
OFDM – *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*
QoS – *Quality of Service*
RAN – *Radio Access Network*
SA – *Standalone*
SBA – *Service-Based Architecture*
SDN – *Software-Defined Networking*
SINR – *Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*
SMS – *Short Message Service*
TDMA – *Time Division Multiple Access*
U-Plane – *User Plane*
UL – *Uplink*
UMTS – *Universal Mobile Telecommunication System*
uRLLC – *Ultra-Reliable and Low Latency Communications*
V2V – *Vehicle-to-Vehicle*
W-CDMA – *Wideband Code Division Multiple Access*

Introdução

Neste capítulo inicial, será realizada uma pequena introdução sobre o tema da dissertação, assim como a motivação e o enquadramento da mesma, quais as questões de pesquisa e objetivos da mesma assim como a estrutura da dissertação em si.

1.1. Motivação e Enquadramento

A evolução das redes móveis, desde a segunda geração (2G) até à quarta geração (4G), teve como objetivo responder a desafios causados por limitações das gerações anteriores, não mudando por completo a sua estrutura e construindo em cima das fundações de gerações anteriores. No entanto, com o aumento exponencial do número de dispositivos conectados e o surgimento de novas aplicações tornou-se evidente a necessidade de transição para a quinta geração (5G). Esta nova geração não é apenas uma extensão das anteriores, mas sim uma mudança de paradigma, concebida para suportar uma vasta gama de casos de uso, incluindo aplicações críticas da Internet of Things (IoT).

A crescente digitalização da indústria e a implementação da Indústria 4.0 exigem soluções de comunicação mais avançadas, capazes de suportar redes de sensores e dispositivos autónomos em ambientes industriais. As infraestruturas de redes móveis tradicionais não conseguem garantir os requisitos necessários para a automação industrial em larga escala, criando a necessidade de um novo modelo de conectividade.

O 5G, com as suas características de baixa latência, elevada fiabilidade e suporte a um grande volume de dispositivos conectados, apresenta-se como a solução ideal para o setor industrial. Em particular, a categoria mMTC (Massive Machine-Type Communications), que permite a comunicação eficiente entre milhares de sensores, máquinas e dispositivos IIoT. A introdução do 5G na indústria representa um avanço significativo, permitindo uma maior flexibilidade, eficiência energética.

Deste modo, a presente dissertação tem como objetivo estudar a aplicação do 5G em ambientes industriais, com foco na otimização do desempenho das redes móveis em ambientes fabris, e as melhores estratégias para a sua implementação.

1.2. Objetivos

O objetivo primário desta dissertação é realizar o planeamento de uma rede 5G New Radio (5G NR), mais precisamente, o planeamento de uma rede 5G NR num ambiente industrial, fazendo uma análise quanto ao desempenho do sistema tanto ao nível de cobertura como ao nível de *Throughput*. Para tal, será utilizado um simulador de sistema de redes 5G NR em JAVA, obtendo assim os dados necessários para avaliar o desempenho para cada cenário.

Assim, dada a importância tanto de um enquadramento histórico sobre a evolução das redes móveis, como das características principais da atual geração de redes móveis o 5G serão desenvolvidas as seguintes questões ao longo da dissertação:

RQ1: Quais as principais características das redes móveis 5G?

RQ2: Quais as principais diferenças entre o planeamento de redes privadas 5G e 4G?

RQ3: Como planear e otimizar uma rede privada 5G específica tendo IIoT incluído?

1.3. Metodologia de Pesquisa

A presente dissertação segue a metodologia Design Science Research (DSR). A metodologia DSR, ilustrada na seguinte Figura 1, possui seis etapas fundamentais, que vão desde a identificação do problema até à validação e comunicação dos resultados obtidos.

A primeira etapa corresponde à identificação do problema e motivação, onde são analisados principais desafios do planeamento das redes 5G. Na segunda etapa, relativa à definição dos objetivos da solução, são estabelecidos os critérios de avaliação e as métricas de desempenho. A terceira etapa incide sobre o design e desenvolvimento da solução, neste caso o desenvolvimento/adaptação de um artefacto capaz de realizar as devidas e necessárias simulações, relativas ao planeamento de redes privadas 5G NR em ambientes industriais. Na quarta etapa, procede-se à realização de simulações recorrendo ao artefacto desenvolvido/adaptado anteriormente. A quinta etapa, avaliação, consiste na análise dos resultados obtidos das simulações corridas. Avaliando as métricas de desempenho da rede obtidas da simulação, permitindo verificar a viabilidade da solução ou soluções propostas. Por fim, a sexta etapa, comunicação, corresponde à sistematização e divulgação dos resultados. Ou seja, neste caso corresponde à redação desta dissertação.

Nominal process sequence

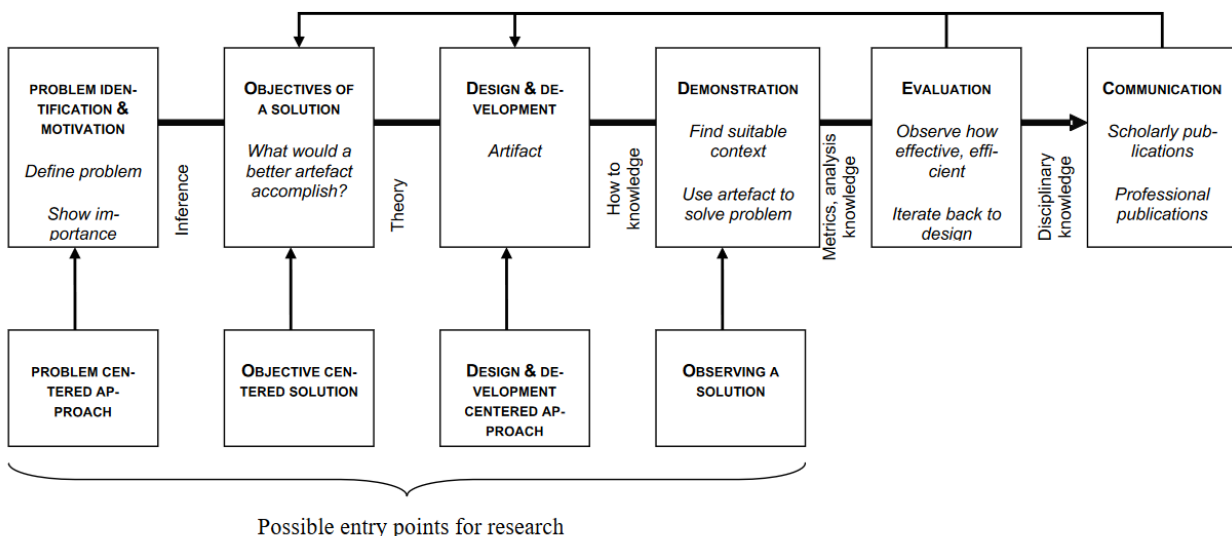


Figura 1. Diagrama do modelo de investigação DSRP [1]

1.4. Estrutura da Dissertação

Nesta secção será descrita a estrutura da dissertação.

O primeiro capítulo é a secção da dissertação onde são apresentados as motivações, objetivos e enquadramento da mesma. Assim como, a metodologia de pesquisa e as questões de pesquisa.

O segundo capítulo pode ser descrito como uma revisão literária das matérias consideradas fundamentais para o planeamento de redes privadas 5G NR.

O terceiro capítulo é relativo à descrição do simulador de sistema desenvolvido em JAVA .

No quarto capítulo apresentam-se os resultados das simulações de sistema.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões e o trabalho futuro.

Revisão Literária

Neste capítulo será apresentada uma revisão literária sobre planeamento de redes 5G, apresentando não só um enquadramento histórico das redes móveis, assim como as características da quinta geração, desde a sua arquitetura e tecnologias que implementa, como as de uma implementação privada da rede.

2.1. As Antigas Gerações de Redes Móveis

A segunda geração de redes móveis (2G), lançada comercialmente no começo da década de 1990, introduziu as primeiras redes digitais, que utilizavam o Global System for Mobile Communications (GSM) como standard. Estas redes possuíam encriptação digital, fornecendo uma maior segurança nas comunicações móveis, e ampliaram a gama de serviços disponíveis, tais como Short Message Service (SMS). O 2G utilizava dois esquemas de modulação como Time Division Multiple Access (TDMA) e Code Division Multiple Access (CDMA), operando na gama de frequências entre os 850 MHz e os 1900 MHz, utilizando uma largura de banda de 200 kHz, para além disso o esquema de comutação era baseado em circuitos e pacotes. Inicialmente possuía, as taxas de dados que alcançavam os 9.6 kbps, evoluindo posteriormente para 144 kbps e subsequentemente para 384 kbps, com o desenvolvimento de tecnologias como General Packet Radio Service (GPRS) no 2.5G e Enhanced Data Rate for GSM Evolution (EDGE) no 2.75G [3]-[5].

A terceira geração de redes móveis (3G), surgiu no começo dos anos 2000, obtendo assim o nome de International Mobile Telecommunication 2000 (IMT-2000) pela International Telecommunication Union (ITU). Esta foi a primeira geração de redes móveis a integrar serviços como acesso à internet, videochamadas, email e streaming de vídeo. As redes 3G, baseavam-se em tecnologias como Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) ou Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) como sucessores do GSM. As taxas de transmissão dependiam do local onde se encontrava o utilizador da rede, em ambientes rurais as taxas atingiam os 144 kbps, já em ambientes urbanos outdoor e indoor as taxas chegavam aos 384 kbps e aos 2 Mbps, respetivamente. Quanto a utilização de espectro, o 3G utiliza a gama de frequências entre os 1.8 GHz e os 2.5 GHz, utilizando uma largura de banda de 5 MHz, para além disso utilizavam um esquema de comutação híbrido, tal como na geração que antecedente. Evoluções subsequentes desta geração, como o High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) ou 3.5G, HSDPA+ (H+) ou 3.75G e H+ Dual Carrier (DC-HSDPA+), não só aumentaram as velocidades de transmissão de dados, podendo atingir os 10 Mbps, como passaram a utilizar apenas comutação de pacotes [2]-[4].

A quarta geração de redes móveis (4G), introduzida na década de 2010, foi a primeira geração a ter uma infraestrutura totalmente baseada no Internet Protocol (IP). Concebida com objetivo de fornecer serviços de alta qualidade e segurança a custos reduzidos, com taxas de dados significativamente mais elevadas. O 4G também conhecido como Long-Term Evolution (LTE) baseia-se em tecnologias como Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) e MIMO, utiliza a gama de frequências entre os 1.8 GHz e os 2.6 GHz, com larguras de banda dos 1.4 MHz aos 20 MHz. Para além disso atinge taxas de 1 Gbps e de 100 Mbps em casos de baixa mobilidade e alta mobilidade respetivamente [2]-[6].

A Seguinte Tabela 1, apresenta as principais diferenças das diversas gerações de redes móveis do 1G ao 4G, os dados desta tem como base os conceitos apresentados ao longo desta secção sobre as antigas gerações de redes móveis e as suas evoluções [2]-[6].

Geração	Acesso Rádio	Taxas de Dados	Largura de Banda	Esquemas de Comutação
1G	FDMA	Até 2.4 kbps	10 kHz a 30 kHz	Circuito
2G	TDMA/CDMA	Até 9.6 kbps (2G) ou até 384 kbps (2.75G)	200 kHz	Circuito/Pacotes
3G	W-CDMA	Até 2 Mbps (3G) ou até 10 Mbps (3.75G)	5 MHz	Circuito/Pacotes
4G	OFDMA	Até 1 Gbps (baixa mobilidade)	1.4 MHz a 20 MHz	Pacotes

Tabela 1. Principais diferenças entre as diversas gerações de redes móveis

A evolução das redes móveis, do 1G ao 4G, foi estimulada pela procura crescente por conectividade e pela necessidade de soluções mais eficazes e de maior capacidade. Demonstrando um progresso significativo, desde a comunicação de voz analógica até aos serviços multimídia de alta velocidade baseados em IP. Cada geração trouxe melhorias tecnológicas que moldaram a forma como os dispositivos móveis são utilizados no dia a dia [5].

2.2. 5G – A Quinta Geração de Redes Móveis

A evolução das redes móveis tem sido impulsionada pela crescente exigência de maior capacidade, menor latência e conectividade mais eficiente. Desde a introdução do 1G, concebido exclusivamente para chamadas de voz, até ao 4G, que permitiu tráfego de dados a alta velocidade e streaming de vídeo, cada avanço tecnológico trouxe consigo melhorias significativas nas comunicações móveis. No entanto, com o exponencial crescimento do tráfego de dados e a diversificação das aplicações móveis e das suas necessidades, as limitações da utilização do 4G tornaram-se evidentes, criando assim a necessidade da implementação de uma nova geração capaz de responder às emergentes exigências.

2.2.1. O Crescimento de Tráfego de Dados Móveis e a Necessidade do 5G

Segundo estudos conduzidos pela Ericsson, o número de assinaturas de serviços móveis atingiu os 8.7 mil milhões no segundo trimestre de 2024. Destes, 1.9 mil milhões correspondiam a subscrições de 5G, representando 22% do total de assinaturas móveis. Estes valores refletem a rápida adoção do 5G a nível global, impulsionada pela procura crescente por maior velocidade, menor latência e maior

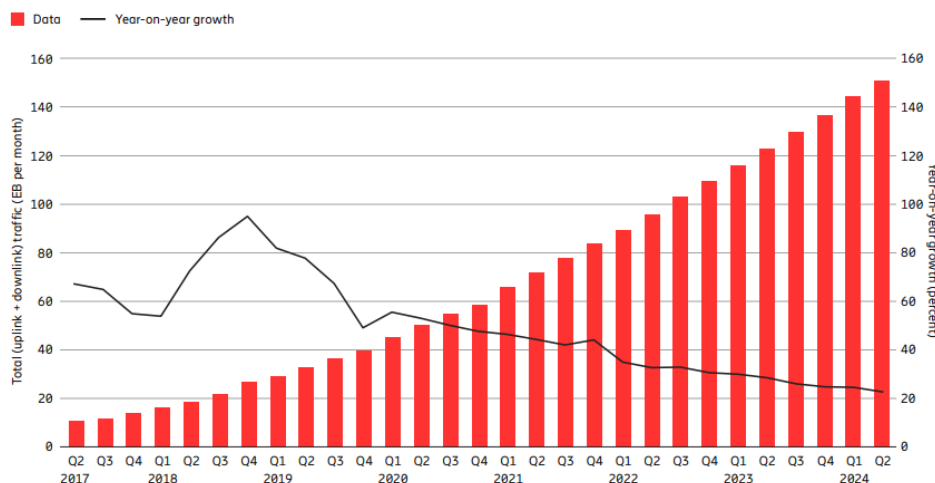


Figura 2. Crescimento anual do tráfego de dados móveis [7]

capacidade de rede, fatores essenciais para suportar o contínuo crescimento do tráfego de dados móveis [7].

Nos últimos anos o tráfego de dados móveis tem registado um crescimento exponencial, impulsionado pelo aumento do número de dispositivos conectados e pela adoção generalizada de serviços digitais. A Figura 2 ilustra esta evolução, demonstrando o aumento contínuo do tráfego móvel global desde 2017, onde os valores de tráfego móvel mensal atingiam os 10 Exabytes, até à atualidade, no segundo trimestre de 2024 o valor de tráfego móvel mensal atingiu os 151 Exabytes. Observando-se assim um crescimento exponencial no volume de tráfego de dados mensal, crescimento esse de 1410 por cento em 7 anos [7].

2.2.2. Requisitos de Desempenho das Redes 5G

Com o surgimento de novas aplicações como realidade aumentada, smart cities, veículos autónomos, domótica, o crescimento da IoT, da comunicação Device-to-Device (D2D), das comunicações Machine-to-Machine (M2M) e das comunicações Vehicle-to-Vehicle (V2V), reforça-se a necessidade de conectividade de alto desempenho, latência ultrabaixa e elevada fiabilidade. Estas exigências tornaram incontestável a necessidade de evolução das infraestruturas de comunicação.

Estas novas aplicações introduzem requisitos de desempenho que ultrapassam as capacidades oferecidas pelas redes 4G. Para responder a estas exigências, a ITU definiu na recomendação ITU-R M.2083 o conceito de International Mobile Telecommunications-2020 (IMT-2020), também conhecido como 5G [8], caracterizado pelos seguintes requisitos:

- Taxa de transmissão de pico: A taxa máxima de transmissão em condições ideais por utilizador/dispositivo, expressa em Gbps.
- Taxa de dados do utilizador: A taxa de transmissão disponível na generalidade numa dada área de cobertura, garantindo Mbps ou Gbps por utilizador/dispositivo.
- Latência: O tempo que a rede de rádio contribui para a transmissão de um pacote, medido desde o envio até à receção no destino, expresso em ms.
- Mobilidade: A velocidade máxima suportada mantendo a Quality of Service (QoS) e garantindo uma transferência contínua entre diferentes nós de rádio e tecnologias de acesso, expressa em km/h.
- Densidade de conexão: O número total de dispositivos conectados e/ou acessíveis por unidade de área, expresso em dispositivos/km².
- Eficiência energética:
 - o Na rede: mede a relação entre a quantidade de bits transmitidos/recebidos e o consumo de energia da infraestrutura da Radio Access Network (RAN), expresso em bit/Joule.
 - o Nos dispositivos: mede a relação entre a quantidade de bits transmitidos e o consumo energético do módulo de comunicação, expresso em bit/Joule.
- Eficiência espectral: A taxa média de transmissão de dados por unidade de espectro e por célula, expresso em bps/Hz.
- Capacidade de tráfego de área: taxa total de Throughput suportada por unidade de área geográfica, expressa em Mbps/m².

2.2.3. Diferenças entre a Quarta e a Quinta Geração

Para compreender a dimensão desta evolução, a comparação entre o 5G e o Long Term Evolution Advanced (LTE-Advanced), também conhecido por 4G, permite salientar as melhorias introduzidas pela nova geração.

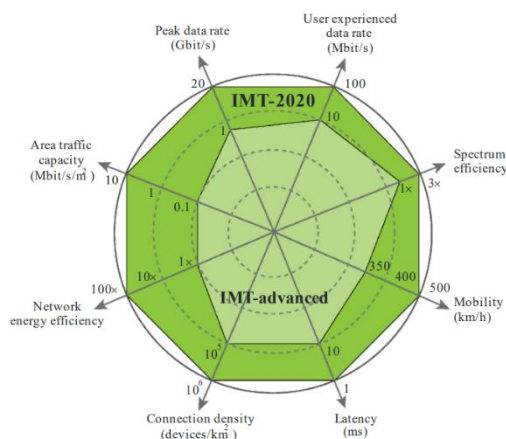


Figura 3. Metas de desempenho para serviços 5G [8]

A Figura 3 ilustra esta comparação, destacando as principais melhorias em cada um dos requisitos do 5G em relação ao 4G e reforçando a sua importância no desenvolvimento da próxima geração de redes móveis. Entre estas melhorias, destacam-se:

- Aumento da taxa de dados: enquanto o LTE-Advanced atinge o pico de 1 Gbps, o 5G pode chegar aos 20 Gbps, proporcionando taxas de transmissão de dados significativamente superiores e garantindo um maior volume de transmissão de dados por utilizador.
- Redução da latência: o tempo de resposta da rede, que no 4G pode atingir 10 ms, é reduzido para 1 ms no 5G, permitindo comunicações em tempo real, fundamentais para aplicações críticas como veículos autónomos e controlo remoto de dispositivos industriais.
- Maior eficiência espectral e energética: a utilização mais eficiente dos recursos do espetro, com um aumento de 3x na eficiência espectral, e a redução do consumo energético por bit transmitido em até 100x permitem a operação de um número significativamente maior de dispositivos sem comprometer o desempenho da rede, viabilizando assim a expansão de setores como IoT e das comunicações M2M.
- Aumento da mobilidade suportada: a capacidade de manter comunicações estáveis a velocidades mais elevadas, passando de 350 km/h no 4G para 500 km/h no 5G, permitindo uma experiência de comunicação ininterrupta quando o utilizador se desloca a velocidades elevadas.
- Maior densidade de conexão: o 5G suporta um milhão dispositivos/km², face aos cem mil dispositivos/km² no 4G, possibilitando uma conectividade massiva essencial para cidades inteligentes, fábricas automatizadas e redes de sensores de alta densidade.
- Aumento da capacidade de tráfego por área: a capacidade de Throughput em áreas densamente povoadas foi significativamente alargada, passando de 0,1 Mbps/m² no 4G para 10 Mbps/m² no 5G, permitindo o suporte a um maior número de utilizadores simultâneos.

Características	4G	5G
Taxa de dados do utilizador	10 Mbps	100 Mbps
Taxa de transmissão de pico	1 Gbps	20 Gbps
Capacidade de tráfego de área	0.1 Mbps/m ²	10 Mbps/m ²
Eficiência energética	-	100x
Densidade de conexão	100.000 devices/km ²	1.000.000 devices/km ²
Latência	10 ms	1ms
Mobilidade	350 km/h	500 km/h
Eficiência espectral	-	3x

Tabela 2. Características principais da quarta e da quinta geração de redes móveis. [8]

Podemos sumarizar as características de cada uma das gerações na Tabela 2, na qual podemos observar também as melhorias que o 5G tem quando comparado com o 4G.

2.2.4. Casos de Uso do 5G

Uma das principais características do 5G é a sua versatilidade, permitindo que diferentes tipos de aplicação coexistam numa única infraestrutura de rede. Como o 5G foi concebido para suportar uma vasta gama de serviços e dispositivos, torna-se essencial que a rede seja altamente adaptável a uma grande diversidade de requisitos [9].

Embora o 5G tenha sido concebido para suportar uma vasta gama de serviços, os diferentes requisitos de desempenho dificilmente podem ser alcançados em simultâneo numa única implementação[10]. A necessidade de equilibrar elevadas taxas de transmissão de dados, baixa latência e suporte a um número dispositivos conectados na casa dos milhões, torna inviável uma solução única que optimize todos estes fatores simultaneamente. Para responder às distintas necessidades de implementação, foram definidos três grandes cenários de utilização pela ITU [8].

A seguinte Figura 4 apresenta os três principais cenários de utilização do 5G: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable and Low Latency Communications (uRLLC) e Massive Machine Type Communications (mMTC). Cada um destes casos de uso responde a requisitos específicos, sendo fundamentais para diferentes tipos de aplicações e setores.

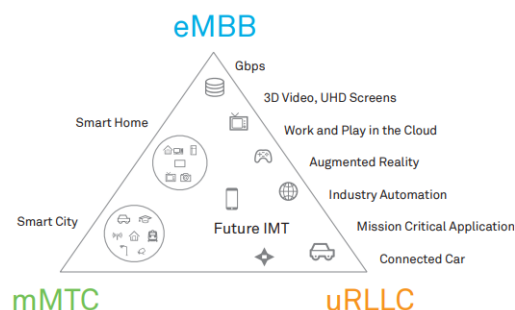


Figura 4. Categorias de cenários de aplicação do 5G [11]

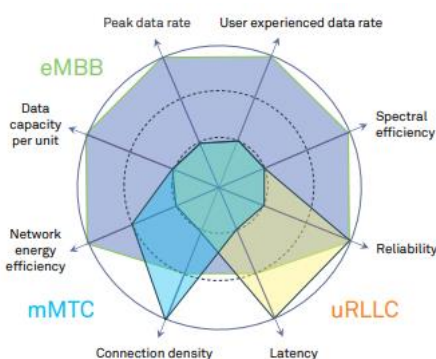


Figura 5. Requisitos de desempenho da rede 5G nos diferentes cenários [11]

O Enhanced Mobile Broadband (eMBB) expande a capacidade de transmissão de dados, permitindo velocidades significativamente superiores às do 4G, como representado na Figura 6. Este caso de uso é voltado para aplicações que requerem grandes quantidades de dados, como streaming de vídeo em 4K e 8K, realidade virtual e aumentada, e cloud computing. Para além disso é possível verificar, observando a anterior Figura 5, que o eMBB é otimizado para métricas como taxa de dados por utilizador, capacidade por unidade de área, fiabilidade, eficiência espectral e energética.



Figura 6. 5G vs 4G – Download [12]

O Ultra-Reliable and Low Latency Communications (uRLLC) foca-se na redução extrema da latência e no aumento da fiabilidade da rede. Este cenário é crucial para aplicações que exigem comunicação quase instantânea e ininterrupta, como veículos autónomos, telemedicina e redes de energia inteligentes. A latência extremamente baixa do uRLLC, combinada com uma alta fiabilidade, permite que dispositivos críticos tomem decisões em frações de segundo, tal como ilustra a seguinte Figura 7.

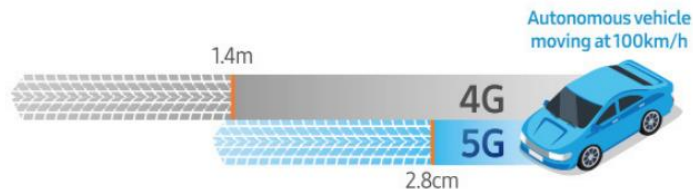


Figura 7. 5G vs 4G – Tempo de paragem de um Veículo Autónomo [12]

Já o Massive Machine Type Communications (mMTC) suporta um número massivo de dispositivos conectados, como sensores IoT, dispositivos industriais e aplicações de smart cities. Diferente dos outros casos de uso, o mMTC não prioriza altas velocidades de dados, mas sim a capacidade de conectar milhões de dispositivos simultaneamente, de forma eficiente e com baixo consumo energético. Observando as Figura 5 e Figura 8, é possível verificar que o mMTC destaca-se na métrica de densidade de conexão, permitindo que a infraestrutura do 5G suporte um ecossistema de dispositivos inteligentes numa larga escala.



Figura 8. 5G vs 4G – Densidade de Dispositivos [12]

Podemos assim dizer que cada um dos três cenários previstos para o 5G possui requisitos e objetivos distintos:

- O eMBB exige altas taxas de transmissão de dados e maior eficiência espectral.
- O uRLLC prioriza latência mínima e confiabilidade elevada.
- O mMTC foca-se na conectividade massiva e na eficiência energética.

2.3. Arquitetura do 5G

A arquitetura do 5G, sendo similar na sua estrutura à geração anterior, possui uma estrutura modular, escalável e orientada aos novos serviços.

Uma rede móvel é composta por duas grandes componentes: a Radio Access Network (RAN) e a Core Network (CN). Tal como em gerações anteriores, a 3rd Generation Partnership Project (3GPP) definiu as seguintes nomenclaturas para o RAN e para o CN do 5G:

- RAN possui a designação de 5G New Radio (5G NR);
- Enquanto o CN é denominado 5G Core (5GC);

O 5GC surge como substituto do antigo Evolved Packet Core (EPC), a Core Network do 4G. O 5GC apresenta diversos benefícios, entre eles estão maior flexibilidade, virtualização de funções, ou também chamado de Network Function Virtualization (NFV) e uma abordagem Service-Based Architecture (SBA)

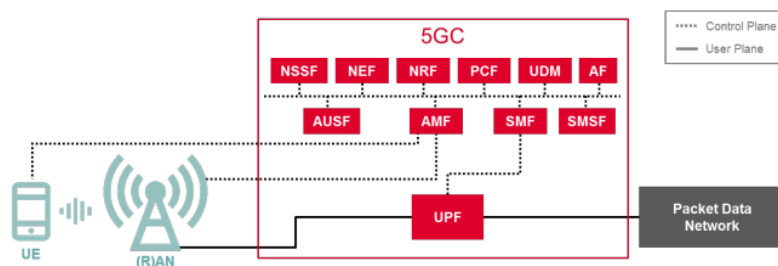


Figura 9. Arquitetura 5GC [13]

Na Figura 9 podemos observar a estrutura base do 5GC, sendo de notar a existência de uma separação entre o User Plane (U-Plane), e Control Plane (C-Plane), isto é uma evolução do Control and User Plane Separation (CUPS) introduzido pela 3GPP na EPC Release 14. Esta separação permite um maior desempenho e escalabilidade, otimizando o encaminhamento do tráfego e a gestão da mobilidade. [13]-[14]

A implementação do 5G pode seguir dois modelos principais: 5G Non-Standalone (NSA) e o 5G Standalone (SA). Enquanto o NSA utiliza a infraestrutura existente do 4G LTE, o SA opera de forma independente.

2.3.1. 5G NSA

No modo NSA, a implementação do 5G utiliza a tecnologia E-UTRA-NR Dual Connectivity (ENDC), onde o 5G NR opera em conjunto com a infraestrutura existente do 4G e o EPC. Nesta configuração, o 5G fornece cobertura numa dada área, funcionando como um hotspot de alta capacidade, enquanto a rede 4G LTE continua em funções.

Nesta abordagem, o 5G atua exclusivamente no U-Plane, garantindo uma maior largura de banda e velocidades mais elevadas, enquanto todas as mensagens do C-Plane, como estabelecimento e terminação de chamadas, registo de localização e gestão da mobilidade, continuam a ser processadas pelo Evolved Node B (eNB) do LTE e pelo EPC. [15]

A implementação do 5G NSA pode ser realizada recorrendo a diversas opções definidas pela 3GPP, a escolha de qual será a abordagem ideal depende de diversos fatores como custo, tempo de implementação e infraestrutura existente. Entre as opções disponíveis, a Option 3 destaca-se como a mais adotada pelas operadoras, devido a sua capacidade de reutilizar a infraestrutura LTE e o EPC, minimizando a necessidade de investimentos iniciais elevados e permitindo um lançamento mais rápido do 5G.

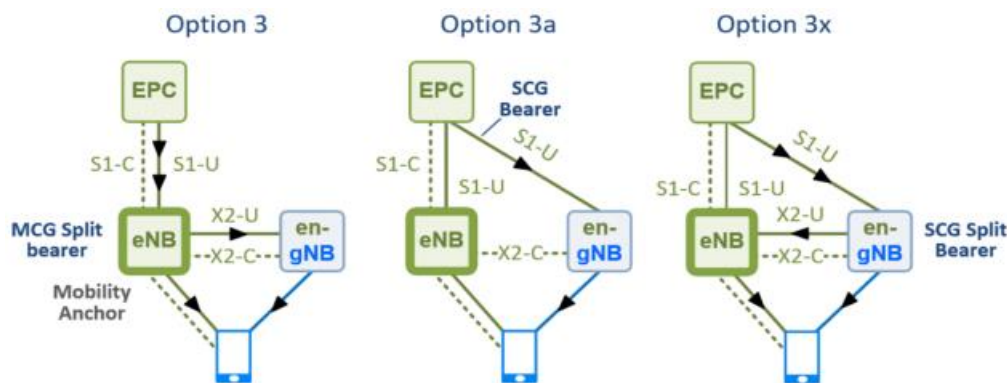


Figura 10. Implementação 5G NSA – Option 3 [16]

Esta configuração permite às operadoras implementar o 5G de forma rápida, tirando partido da infraestrutura 4G LTE já existente. O eNB continua a ser o nó principal da rede, mantendo a ligação ao EPC, enquanto o 5G NR é integrado para fornecer maiores velocidades de transmissão de dados. A Option 3 pode ser implementada em três variações, tal como ilustra a Figura 10: 3, 3A e 3X, que se distinguem pelo modo como o tráfego de dados (S1-U e X2-U) e a sinalização (S1-C e X2-C) são distribuídos entre as Base Station (BS) do 4G (eNB) e do 5G (gNB).

2.3.2. 5G SA

No modo de implementação SA, a implementação do 5G assenta numa infraestrutura totalmente nova, onde o 5G NR opera em conjunto com o 5GC, removendo qualquer dependência da rede 4G LTE. Esta abordagem permite que o 5G funcione de forma autónoma, oferecendo baixa latência, maior eficiência espectral e suporte a novos serviços como network slicing. Nesta configuração, tanto o U-Plane como o C-Plane são geridos exclusivamente pelo 5GC, permitindo um controlo mais eficiente do tráfego e da mobilidade. Esta separação total entre U-Plane e C-Plane proporciona melhor escalabilidade, menor latência e otimização de recursos, tornando o 5G SA a solução ideal para aplicações críticas como automação industrial, veículos autónomos.

Tal como a implementação do 5G NSA, a implementação do 5G SA, também pode ser realizada através de diversas opções, opções também definidas pela 3GPP, destas a Option 2 é a abordagem mais adotada para redes totalmente 5G. Na Option 2, visível na seguinte Figura 11, o Next Generation NodeB (gNB) liga-se diretamente ao 5GC, permitindo um desempenho otimizado, sem necessidade de integração com a infraestrutura LTE. Este modelo oferece maior flexibilidade na configuração da rede, facilitando a implementação de novos serviços e a adaptação às futuras exigências do setor.

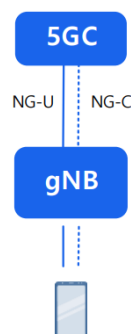


Figura 11. Implementação 5G SA – Option 2 [17]

O modo de implementação 5G SA Option 2 pode implicar um investimento inicial mais elevado, dado que requer uma nova infraestrutura de CN e RAN. No entanto, esta abordagem assegura maior longevidade e escalabilidade, posicionando o 5G SA como a solução mais robusta.

2.4. Tecnologias

A Indústria 4.0 representa a evolução dos processos produtivos, resultante da integração de tecnologias digitais e conectividade avançada. A crescente necessidade de comunicações de alta fiabilidade, baixa latência e elevada capacidade de transmissão reforça o papel do 5G como elemento central nesta transformação [18].

A implementação do 5G possibilita a interligação eficiente entre máquinas, sensores e sistemas inteligentes, promovendo a adoção do Industrial Internet of Things (IIoT) e da comunicação M2M. Estes elementos são fundamentais para a automação avançada e a digitalização das fábricas, permitindo maior eficiência operacional, processamento de dados em tempo real e otimização dos recursos produtivos [18].

A transformação digital da indústria depende de tecnologias 5G que assegurem maior flexibilidade, eficiência e desempenho na comunicação, sendo três das mais relevantes o Network Slicing, Massive MIMO e as Ondas milimétricas ou mmWaves.

2.4.1. O mMIMO

O Massive Multiple-Input Multiple-Output (mMIMO) representa uma evolução significativa da tecnologia MIMO introduzida no 4G, pois enquanto o MIMO convencional utiliza várias antenas para melhorar a qualidade das comunicações sem fios, o Massive MIMO expande esta abordagem recorrendo ao uso de dezenas ou até mesmo centenas de antenas, trazendo assim ganhos expressivos em termos de capacidade, eficiência espectral e na própria robustez nas comunicações [19].

Tal como referido anteriormente, os sistemas mMIMO recorrem ao uso de múltiplas antenas num sistema de agregados, tanto no receptor como no transmissor. A utilização destes agregados de antenas compostos por centenas de elementos nas BS, permite o envio e a receção simultânea de múltiplos feixes de sinal direcionados a diferentes utilizadores, possibilitando assim, não só o aumento da quantidade de informação transmitida, como também melhorias significativas na fiabilidade, resultantes da transmissão direcionada do sinal [19] [20].

A principal vantagem da utilização do mMIMO é a sua capacidade de ajustar dinamicamente os feixes formados pelas antenas, adaptando-se assim, a variações no tráfego e a mudanças de condições no canal de propagação. Esta adaptabilidade melhora não só a cobertura, como também a qualidade do sinal, reduzindo interferências e aumentando a eficiência da rede. Assim, ao contrário dos sistemas tradicionais, onde os sinais são distribuídos de forma mais difusa, através do Broadcast do sinal, o mMIMO utiliza a formatação de feixes, ou *Beamforming* em inglês, focando a energia do sinal

diretamente nos utilizadores e moldando-o conforme as necessidades da rede, sendo possível o envio simultâneo de múltiplos sinais diferentes a diferentes utilizadores [4] [12].

A seguinte Figura 12 represente o funcionamento do Massive MIMO com Múltiplos Utilizadores, recorrendo à utilização de *Beamforming*.

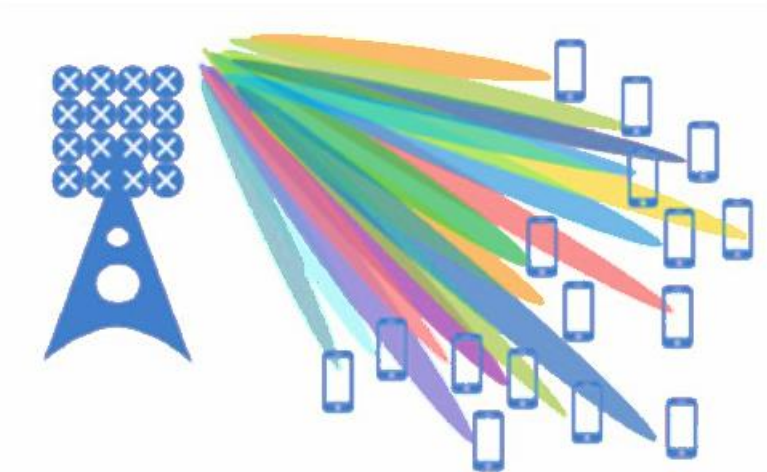


Figura 12. Massive MIMO para Múltiplos Utilizadores [11]

Devido à utilização do *Beamforming*, o mMIMO é capaz de operar de forma eficiente em cenários onde a densidade de dispositivos é elevada, garantindo assim uma maior robustez contra interferências e um melhor desempenho em redes sobrecarregadas. Esta capacidade de suportar um número elevado de utilizadores e dispositivos simultaneamente responde às crescentes exigências de conectividade impostas pela massificação da IoT e a utilização da mesma em ambientes industriais no caso do IIoT. Além disso, a utilização desta tecnologia contribui para a redução do consumo energético, uma vez que os sinais são direcionados de forma mais precisa, minimizando a necessidade de potência excessiva para alcançar os dispositivos [9] [21].

2.4.2. Ondas Milimétricas (mmWaves)

A introdução das ondas milimétricas (*mmWaves*) nas redes 5G, uma das principais inovações desta geração, surge como resposta às crescentes exigências relativas a largura de banda, baixa latência e maior capacidade de transmissão de dados. O espectro correspondente às *mmWaves* inclui faixas entre os 24 GHz e os 100 GHz, de onde se destacam as bandas dos 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz e a E-band (71–76 GHz e 81–86 GHz), oferecendo larguras de banda superiores às utilizadas nas gerações anteriores [4].

A seguinte Figura 13, demonstra que Secção do Espectro eletromagnético são correspondentes as mmWaves.

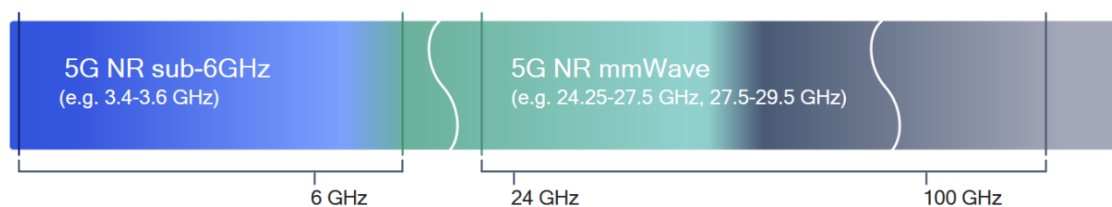


Figura 13. Espectro 5G NR [22]

Estas bandas que até ao 5G eram pouco exploradas, permitem alcançar velocidades de transmissão de dados na ordem dos gigabits por segundo, tornando-as adequadas para aplicações exigentes, como o streaming de vídeo em tempo real ou comunicações críticas em ambientes industriais. As frequências elevadas, características das mmWaves, possibilitam a criação de canais de elevada capacidade, traduzindo-se em melhorias significativas no desempenho da rede, especialmente em ambientes com uma elevada densidade de dispositivos [4] [6].

No entanto, a elevada atenuação do sinal e a reduzida penetração em edifícios representam limitações inerentes às ondas milimétricas. Para mitigar estes efeitos, recorre-se ao uso de antenas direcionais com técnicas de beamforming e algoritmos de rastreamento (*tracking*) de feixe, permitindo concentrar o sinal e manter a ligação mesmo em casos de Non-Line-of-Sight (NLOS). Além disso, a utilização conjunta de mmWaves com bandas sub-6 GHz garante uma conectividade robusta, mesmo em ambientes urbanos densos ou de alta mobilidade [4] [9].

A utilização de ondas milimétricas representa, portanto, um avanço significativo na capacidade das redes móveis, complementando as bandas tradicionais. Sendo particularmente relevante em cenários de elevada densidade de utilizadores e tráfego elevado, onde é uma solução eficiente para suportar casos de uso que exigem elevadas capacidades de transmissão de dados, latências reduzidas e alta fiabilidade.

2.4.3. Utilização do Espectro

A utilização mais eficiente do espectro eletromagnético é um dos elementos centrais na concretização das redes 5G, permitindo responder aos requisitos exigentes de elevada capacidade, baixa latência e conectividade massiva. Nesse sentido o 5G foi concebido para operar em diversas bandas de frequências simultaneamente, com a utilização conjunta de bandas sub-6 GHz e bandas de ondas milimétricas (mmWave) [11] [17].

O 5G opera em três bandas distintas, representadas na seguinte Figura 14, cada uma otimizada para diferentes cenários de aplicação:

- Low-band: abaixo de 1 GHz, oferece cobertura ampla, mas possui uma capacidade baixa.
- Mid-band: entre 1 GHz e 6 GHz, oferece um equilíbrio entre elevada cobertura e alta capacidade, sendo particularmente indicada para zonas urbanas, onde a densidade de dispositivos conectados tende a ser elevada.
- High-band: acima dos 24 GHz, oferece uma maior capacidade, mas por contrapartida, possui um alcance reduzido e uma fraca penetração de obstáculos.

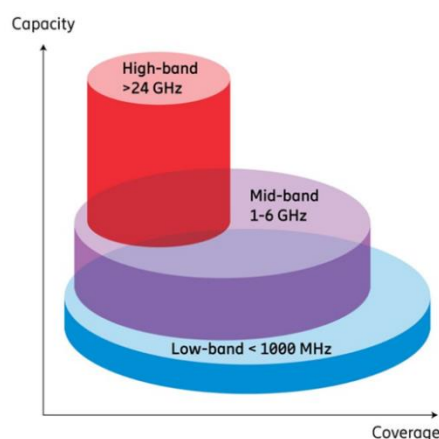


Figura 14. Cobertura VS Capacidade das Bandas de Frequências do 5G [23]

Enquanto as bandas *Mid* e *Low*, ou seja, as sub-6 GHz, possibilitam larguras de canal máximas de 20 MHz, sendo teoricamente possível atingir os 100 MHz, as bandas *High*, ou seja, as mmWaves com frequências acima dos 24 GHz, permitem larguras superiores, que variam entre os 500 MHz e 1 GHz, possibilitando um aumento substancial da capacidade de dados disponível por utilizador [10].

No entanto, a operação em altas frequências implica algumas desvantagens. Nestas bandas as perdas de propagação de sinal são mais elevadas. Além disso, nestas bandas as perdas de penetração são entre 5 e 18 dB superiores às observadas nas bandas sub-6 GHz, sendo bastante afetadas por vegetação, chuva e até mesmo absorção pelo oxigénio na atmosfera, estes fatores comprometem tanto a fiabilidade como a cobertura [11].

Tendo em conta as desvantagens da utilização individual, tanto das bandas sub-6 GHz como das bandas mmWaves, no 5G estes dois grupos de bandas são utilizados em conjunto. Neste caso as bandas sub-6 GHz são utilizadas para garantir uma cobertura ampla e a fiabilidade das comunicações, enquanto as bandas mmWaves são utilizadas nos ambientes de elevada densidade de tráfego, como centros urbanos, estádios ou instalações industriais inteligentes, onde o desempenho requerido quanto à capacidade é bastante elevado [11] [17].

2.4.4. Beamforming

O Beamforming é uma tecnologia fundamental nas redes 5G, especialmente para as frequências mais elevadas, como as das bandas mmWaves. Tal como já referido anteriormente, estas frequências apesar de oferecerem larguras de banda superiores, apresentam contrapartidas, como atenuação do sinal elevadas e baixa penetração. A técnica de Beamforming permite concentrar a energia do sinal numa direção específica, ajustando tanto a fase como a amplitude dos sinais transmitidos. Este controlo sobre o feixe emitido, proporciona não só um aumento considerável da força do sinal no recetor como melhora o desempenho global da ligação [19].

A seguinte Figura 15 ilustra um caso de utilização do Beamforming conjugado com mMIMO.



Figura 15. Massive MIMO com Beamforming [12]

Esta técnica é bidirecional, ou seja, é aplicada tanto na transmissão como na receção. No sentido Uplink, sentido Utilizador para BS, permite captar sinais provenientes de direções específicas, enquanto no sentido Downlink, sentido BS para Utilizador, concentra o feixe em direção ao utilizador, aumentando assim a eficiência da comunicação, mesmo em condições adversas [19].

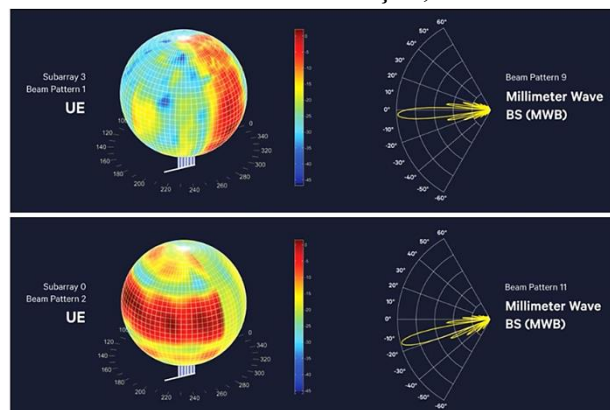


Figura 16. Beam-Tracking e Beam-Switching a 28 GHz [10]

A utilização do Beamforming no 5G depende de técnicas como o beam-steering e o beam-tracking, técnicas essas evidenciadas na Figura 16. Estas técnicas permitem o ajuste dinâmico dos feixes em resposta a alterações da posição do utilizador ou das condições do canal, algo fundamental para mitigar os efeitos da mobilidade e variações no ambiente [10] [12].

O Beamforming, e as tecnologias associadas a este, permite direcionar o sinal de forma mais precisa na direção do utilizador, contribuindo assim para um aumento da intensidade do sinal e para a redução de interferências [12].

2.4.5. Network Slicing

O Network Slicing é uma das principais tecnologias implementadas na quinta geração de redes móveis, permitindo a criação de múltiplas redes virtuais independentes sobre uma única infraestrutura física. Cada uma destas redes virtuais, designada por *slice* ou fatia, é isolada das restantes e pode ser configurada para responder a requisitos de desempenho específicos, como por exemplo, de latência, de largura de banda, de fiabilidade ou mesmo de densidade de dispositivos, em função das necessidades do serviço em questão. Ao contrário do que acontecia na geração anterior, onde os serviços partilhavam uma infraestrutura comum, no 5G é possível dedicar a cada serviço uma fatia distinta da rede, com parâmetros próprios de controlo e transmissão de dados. Esta abordagem garante QoS destinto e adequado para cada caso de uso, sendo essencial para dar resposta aos destintos requisitos associados ao eMBB, mMTC e URLLC [12] [17].

A arquitetura que sustenta o Network Slicing baseia-se em três tecnologias. A primeira é o Software-Defined Networking (SDN), que possibilita a virtualização da rede e garante controlo sobre o tráfego e os recursos, facilitando, assim, uma gestão centralizada e dinâmica da infraestrutura. A segunda é o Network Function Virtualization (NFV), que permite virtualizar funções de rede em servidores convencionais, eliminando a dependência de hardware dedicado e promovendo maior eficiência e flexibilidade na gestão da infraestrutura. Por fim, o Multi-Access Edge Computing (MEC) aproxima os recursos de processamento e armazenamento do utilizador final, reduzindo a latência e melhorando o desempenho de aplicações críticas [24].

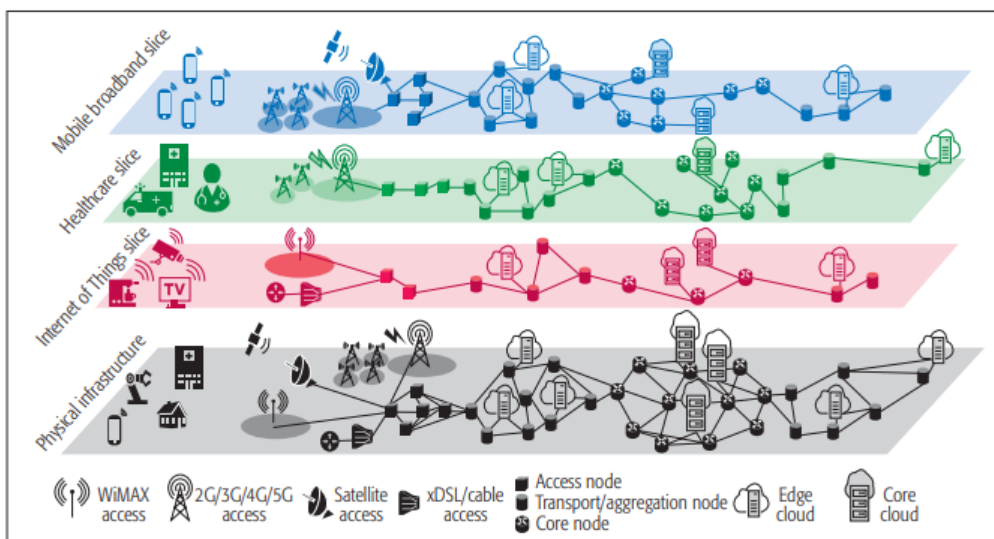


Figura 17. Exemplo de Network Slicing [25]

Estas tecnologias atuam de forma a criar uma rede adaptável, escalável e orientada ao serviço. Com esta flexibilidade, torna-se possível disponibilizar fatias otimizadas para aplicações distintas, tal como demonstra a Figura 17. Por exemplo, uma fatia vocacionada para IoT pode privilegiar a eficiência energética e o elevado número de dispositivos. Já uma fatia destinada a aplicações de telemedicina deverá priorizar fiabilidade e tempos de resposta reduzidos, suportando decisões críticas em tempo real. Por outro lado, uma fatia dedicada a comunicações móveis exige uma alta capacidade de transmissão de dados assim como baixa latência [24] [25].

2.5. Redes Privadas 5G

Com o aumento da procura por soluções de conectividade personalizada e fiável, especialmente em contextos industriais e empresariais, surgem as Redes Privadas 5G, também conhecidas como Non-Public Networks (NPNs). Estas redes distinguem-se das redes públicas, pois são destinadas ao uso exclusivo por parte de uma organização ou grupo restrito de utilizadores, operando dentro de um espaço físico restrito, como uma fábrica [26] [27].

A principal vantagem das redes privadas 5G é a capacidade de oferecer maior controlo, segurança e personalização da rede, adaptando-se aos requisitos operacionais específicos de setores como a indústria, a saúde, entre outros. Esta flexibilidade é possibilitada pelas diferentes abordagens no que toca a alocação do espectro e pelas várias opções de integração com redes públicas.

2.5.1. Alocação do Espectro

A disponibilidade e forma de acesso ao espectro constituem um dos principais fatores que condicionam a implementação de redes privadas 5G. Existem três principais modelos de alocação do espectro:

- **Licenciamento privado:** Neste modelo, o regulador atribui diretamente às empresas a licença de utilização do espectro. Este método atribui controlo sobre a operação da rede, maior segurança e possibilidade de personalização.
- **Utilização de espectro licenciado:** A organização utiliza o espectro cedido pelos operadores móveis, usufruindo da infraestrutura existente e do suporte técnico do operador. Esta abordagem reduz a complexidade da gestão da rede, embora implique menor independência e flexibilidade operacional.
- **Utilização de espectro não licenciado:** A utilização de bandas abertas como os 5 GHz ou 6 GHz, facilita a implementação de redes privadas com custos mais reduzidos. No entanto, esta opção apresenta uma menor previsibilidade em termos de desempenho e fiabilidade da rede.

2.5.2. Tipologias de Implementação de Redes Privadas

Segundo a classificação definida pela 3GPP, as redes privadas 5G podem ser implementadas de forma autónoma ou com diferentes graus de integração com a infraestrutura de operadores públicos, de acordo com o grau de partilha de recursos e funções [27] [28].

Redes Privadas Independentes (Stand-Alone NPNs):

As redes privadas 5G independentes, também designadas por NPNs autónomas, são implementadas de forma completamente independente em relação à infraestrutura das redes públicas, tal como demonstra a Figura 18. A totalidade das funções de rede, incluindo a CN e a RAN, estão fisicamente localizadas dentro das instalações da organização, como definido pela 3GPP. Esta configuração

garante à entidade proprietária um controlo total sobre todos os atributos do serviço, desde a gestão dos fluxos de dados até à autenticação e segurança dos dispositivos e utilizadores da rede [26][27].

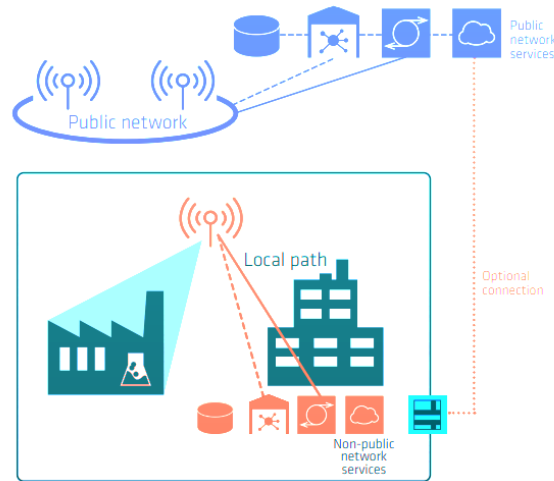


Figura 18. Stand-Alone NPNs adaptado de [27]

Embora estas redes privadas sejam concebidas para operar de maneira totalmente independente e isolada, é possível estabelecer uma ligação à rede pública, para isso, recorre-se a uma *firewall* que atua como fronteira da rede. Esta ligação pode ser configurada de forma a permitir, por exemplo, o acesso a serviços públicos enquanto os dispositivos permanecem dentro da área de cobertura da NPN, ou, em sentido inverso, possibilitar o acesso a serviços privados a partir da rede pública. No entanto, importa referir que todas as funções da rede, sejam elas relativas ao C-Plane ou ao U-Plane, permanecem sob total responsabilidade do proprietário da NPN [27].

Redes Privadas Integradas com Redes Públicas (Public Network Integrated NPNs):

Neste modelo, a rede privada utiliza parte da infraestrutura de um operador móvel público, beneficiando assim de recursos já existentes na rede pública, como espectro ou funções da rede central. Esta partilha pode ocorrer a diferentes níveis, originando três cenários distintos, que oferecem soluções com graus variados de controlo, complexidade e custo:

- **Cenário 1 – Partilha da RAN:**

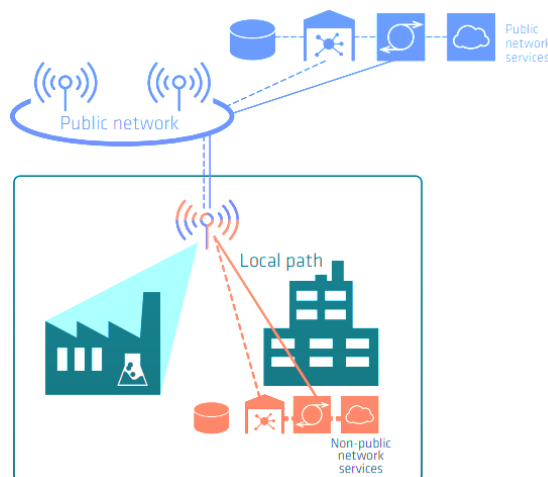


Figura 19. Public Network Integrated NPNs com partilha de RAN, adaptado de [27]

Neste primeiro cenário, apresentado na Figura 19, a rede privada partilha a infraestrutura RAN com o operador público. Apesar desta partilha, todas as funções da rede permanecem logicamente separadas. Esta abordagem baseia-se na partilha da RAN e constitui uma solução eficiente do ponto de vista económico, ao evitar a necessidade de aquisição de espectro dedicado, embora possa implicar limitações na capacidade de assegurar qualidade de serviço de forma consistente em todos os cenários de utilização.

- **Cenário 2 – Partilha da RAN e do C-Plane:**

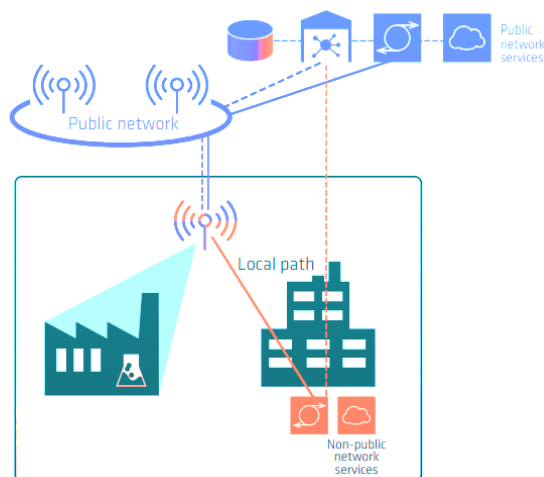


Figura 20. Public Network Integrated NPNs com partilha de RAN e do C-Plane, adaptado de [27]

Neste segundo cenário, apresentado na Figura 20, para além da partilha da RAN, as funções do C-Plane são totalmente geridas pela rede pública, sendo os dispositivos privados assinantes dessa mesma rede. A rede privada mantém, no entanto, o tratamento local do U-Plane, permitindo que os fluxos de tráfego permaneçam dentro dos limites lógicos definidos pela organização. A separação entre as redes é garantida através da utilização de identificadores de fatia distintos, sendo possível implementar esta configuração por meio de network slicing. Esta abordagem permite reduzir significativamente a complexidade da gestão da rede privada, embora implique uma menor autonomia e capacidade de personalização dos serviços. Ainda assim, a ligação direta dos dispositivos aos serviços da rede pública facilita o acesso a funcionalidades como o roaming e permite uma integração mais simples entre as duas redes.

- **Cenário 3 – Integração completa com a rede pública:**

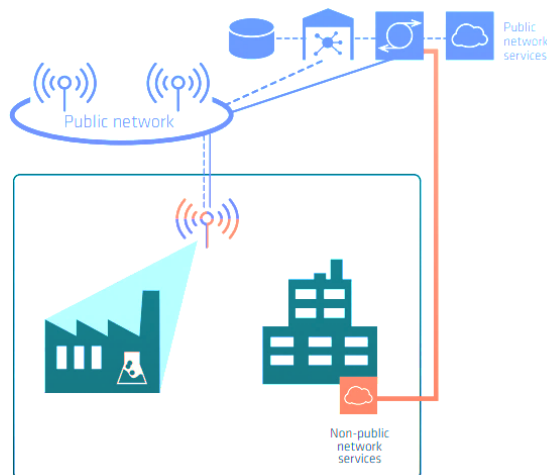


Figura 21. Public Network Integrated NPNs com integração completa, adaptado de [27]

Por fim o terceiro cenário, apresentado na Figura 21, de entre os três, é o que possui um maior grau de integração entre a rede privada e a rede pública, onde toda a gestão e operação da rede é assegurada pelo operador público. A infraestrutura física é totalmente fornecida pelo operador e os serviços da rede privada são implementados logicamente através de network slicing, funcionando de forma isolada das demais utilizações da rede pública, embora partilhando o mesmo ambiente físico e virtualizado. Neste modelo, tanto o tráfego da rede pública como o tráfego da rede privada encontram-se fora da organização, sendo tratados como se pertencessem a redes distintas. Esta separação é possível graças à NFV onde os mesmos recursos podem ser utilizados para fins públicos e privados. Adicionalmente, os utilizadores da rede privada são, por definição, também assinantes da rede pública, o que permite, de forma simplificada, o acesso a serviços públicos e a funcionalidades de roaming. Esta abordagem apresenta vantagens em termos de simplicidade operacional e custos reduzidos de implementação, sendo particularmente adequada para casos em que os requisitos de segurança e controlo são de menor exigência.

A escolha da tipologia de implementação deve ter em conta fatores como, o grau de autonomia desejado, os requisitos de segurança, as necessidades das aplicações, a complexidade de gestão e os custos económicos. As soluções totalmente autónomas oferecem o maior controlo, enquanto os modelos integrados com operadores públicos apresentam vantagens em termos de escalabilidade e rapidez de implementação, com um menor investimento inicial [26] [27].

Simulador de Sistema

3.1. Descrição do Simulador de Sistema

Para realizar o planeamento de uma rede privada 5G em ambiente industrial, foi utilizado um simulador desenvolvido na linguagem de programação JAVA. Neste foram feitas algumas alterações ao código já existente, de modo a adaptar o mesmo ao cenário em estudo (Std3D), tendo em conta os parâmetros caracterizantes e necessários para realizar a simulação. O cenário implementado designado por Std3D baseia-se na vista aérea via Google Maps da Fábrica de Automóveis Volkswagen da Autoeuropa situada em Palmela.

Os principais parâmetros característicos deste cenário são os seguintes, uma frequência portadora de 28 GHz, com uma largura de banda por portadora de 200 MHz e espaçamento entre sub-portadoras de 60 kHz. A modulação utilizada foi OFDM, transmitindo 56 símbolos por subtrama, com duração de 1 ms.

Interação entre o simulador de sistema e o simulador de ligação, representada pela Figura 22.

Dado que o simulador está dividido em duas componentes distintas, é necessário estabelecer uma interface entre ambas. A informação proveniente do Simulador de Ligação, é obtida recorrendo a um simulador em Matlab que gera curvas de BLER em função da relação E_s/N_0 , e que caracterizam a qualidade da transmissão da camada física entre um emissor e um recetor. Estes dados são então integrados no Simulador de Sistema, como demonstra a Figura 22, permitindo que este tenha em conta a performance da camada física de forma realista aquando da simulação global da rede.

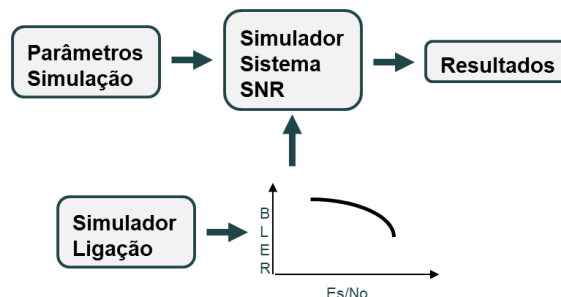


Figura 22. Interação entre o Simulador de Sistema e o Simulador de Ligação

O processo de simulação de sistema é composto por três fases: configuração, simulação e análise de desempenho do sistema. Tal como está representado na Figura 23.

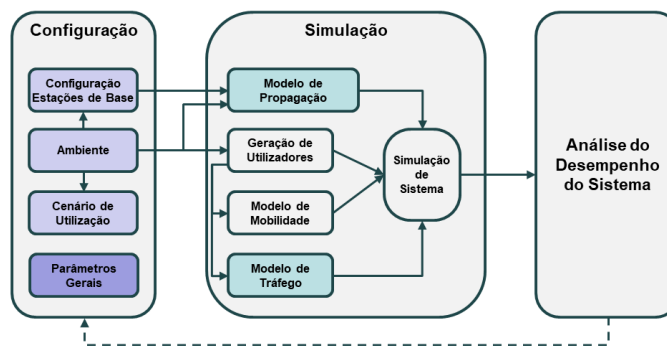


Figura 23. Fases da simulação

A fase de configuração, foca-se no dimensionamento e caracterização do sistema. Incluindo a definição da localização das BS, a seleção dos modelos de propagação e mobilidade, a escolha do cenário de simulação e a introdução dos parâmetros gerais.

A fase seguinte corresponde à simulação. Nesta são executados os modelos previamente definidos, tais como propagação e mobilidade, bem como os algoritmos específicos associados à gestão dos recursos rádio.

Por fim, a última fase consiste na análise de desempenho do sistema, na qual são avaliados os resultados obtidos das simulações. Resultados tais como valores de cobertura e de Throughput são obtidos.

3.2. Cenários Implementados

Foram, portanto, implementados 4 casos distintos do cenário Std3D variando a topologia da rede, nomeadamente a quantidade e configuração das BS. Em três das simulações foi considerada uma configuração com um total de 20 BS, diferindo entre si na razão M/K e na altura das BS: uma com M/K=9 antenas e altura das BS de 8 metros, outra com M/K=18 antenas e altura das BS de 8 metros, e a última com M/K=18 antenas e altura das BS de 10 metros. Por fim, foi ainda realizada uma simulação com uma configuração com um total de 38 BS. Os principais parâmetros de cada uma das simulações encontra-se na seguinte Tabela 3.

Parâmetros	Std3D com 20 BS	Std3D com 38 BS
Nº de BS	20	38
Altura da BS	8m e 10m	8m
Nº de Setores	60	114
Nº Antenas por Setor	576	576
Nº de EU/IIoT	1200	2280
Esquemas de modulação	4QAM;16QAM;64QAM;256QAM	4QAM;16QAM;64QAM;256QAM
M/K	9 e 18	18

Tabela 3. Principais parâmetros das Simulações

O cenário Std3D com 20 BS, ilustrado pela seguinte Figura 24, é uma representação da disposição das BS pelo cenário em estudo. Este é caracterizado por uma área de 0.42km x 0.64km = 0.2688km², onde existem 3x20 = 60 setores, cada setor de célula utiliza mMIMO, cada um composto por M = 576 antenas.

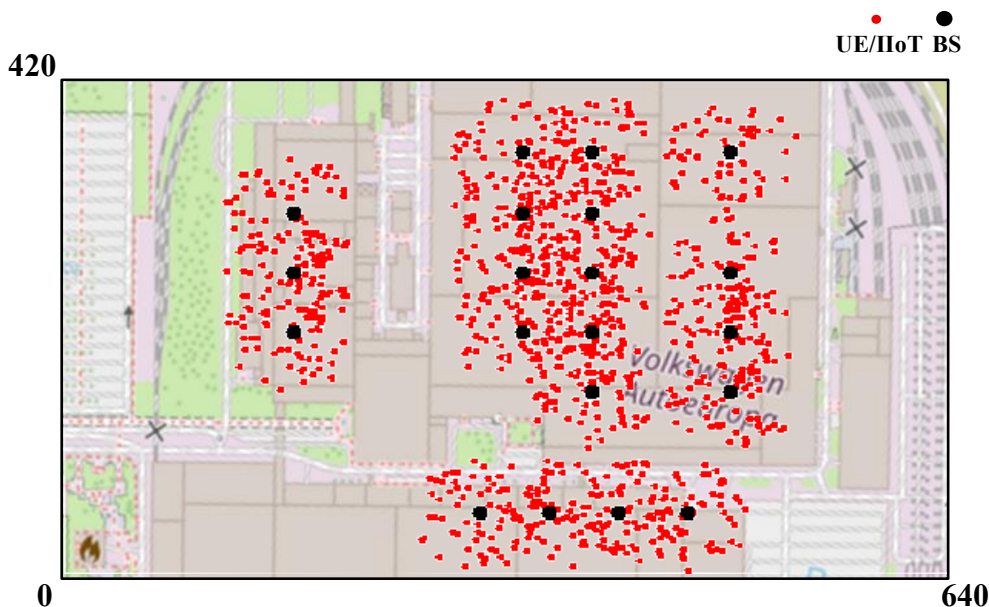


Figura 24. Representação do Cenário Std3D com 20 BS

Tal como no cenário Std3D com 20 BS, o cenário Std3D com 38 BS é caracterizado por uma área de $0.42\text{km} \times 0.64\text{km} = 0.2688\text{km}^2$, neste caso, em vez de 60 setores, este possui $3 \times 38 = 114$ setores, cada setor de célula utiliza mMIMO, cada um composto por $M = 576$. A seguinte Figura 25 ilustra a disposição das BS do cenário Std3D com 38 BS.

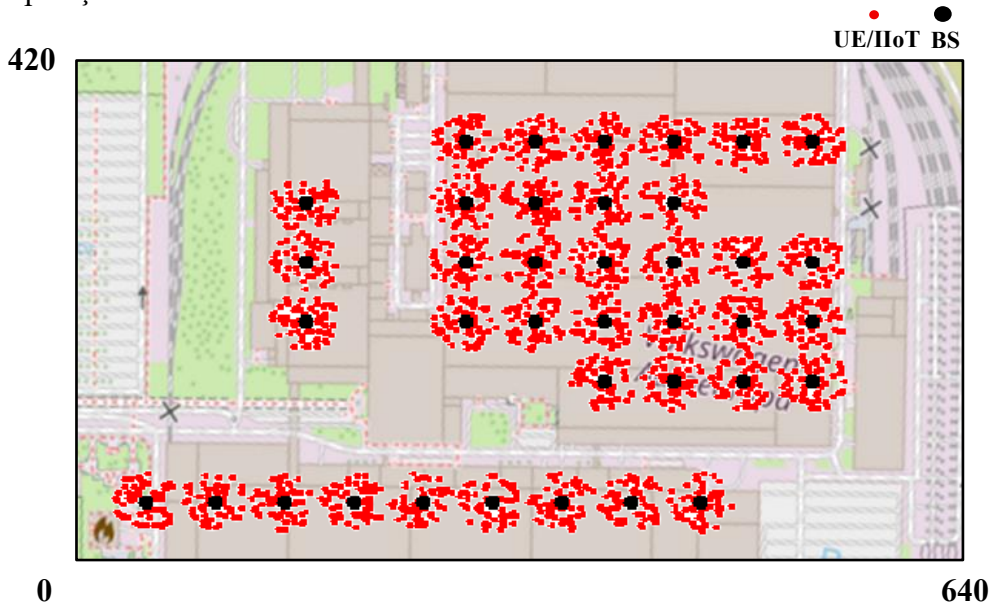


Figura 25. Representação do Cenário Std3D com 38 BS

Para além disso cada BS possui 4 zonas com ritmos binários distintos, dependendo da distância ao utilizador, tal como representado na Figura 26.

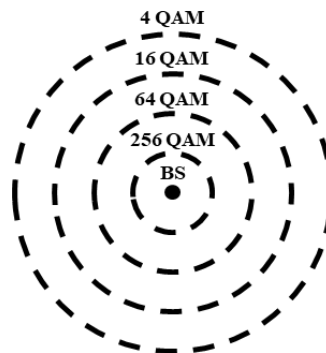


Figura 26. Representação das 4 zonas de R_b da BS

O raio de cada zona varia dependendo da razão entre o número de antenas e o número de utilizadores por setor. Assim, quando $M/K=9$, na primeira zona, até 7.15m da BS, são utilizados símbolos 256 QAM com RC de 7/8. Na zona seguinte, até 10.02m da BS, são utilizados símbolos 64 QAM com RC de 5/6. Na terceira zona, até aos 13.37m da BS, são utilizados símbolos 16 QAM com RC de 3/4. Por fim, a última zona até 22.60m da BS, são utilizados símbolos 4 QAM com RC de 1/2. No caso de $M/K=18$ as distâncias estão também presentes na seguinte Tabela 4.

QAM	$M/K=9$	$M/K=18$
4	7.15 m	8.87 m
16	10.02 m	12.44 m
64	13.37 m	16.59 m
256	22.60 m	28.05 m

Tabela 4. Raio de cada Zona

Resultados do Simulador de Ligação

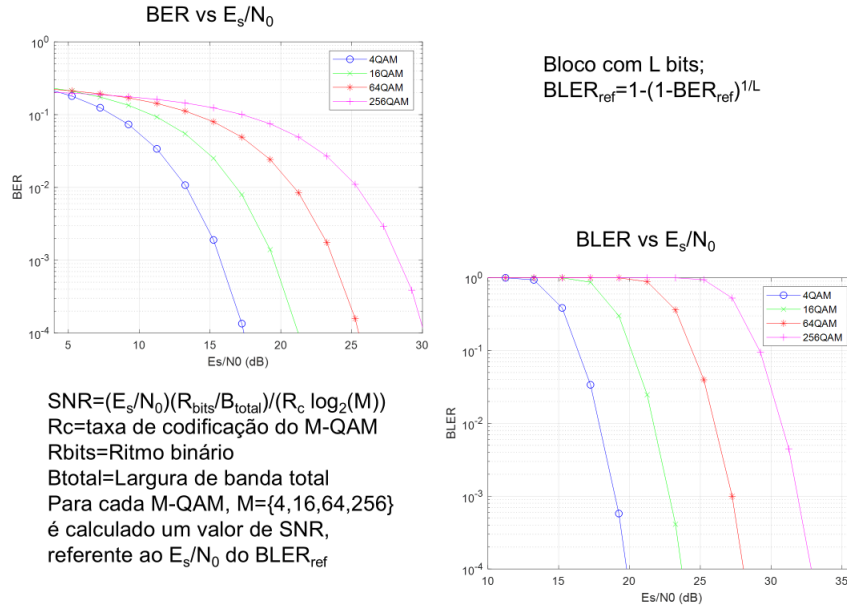


Figura 27. Exemplo de Resultados do Simulador de Ligação

Com base nas curvas de BLER vs E_s/N_0 obtidas do simulador de ligação, presentes na anterior Figura 27, o simulador de sistema calcula a relação sinal ruído SNR para cada modulação M-QAM, $M = \{4, 16, 64, 256\}$ e são estes valores de SNR que determinam de todos os pacotes transmitidos aqueles que são corretamente recebidos pelos utilizadores UE. Os utilizadores próximos da BS com os valores de SNR mais elevados conseguem decodificar pacotes de grande dimensão com modulação 256QAM. Por outro lado, os utilizadores mais afastados da BS com valores de SNR mais baixos apenas conseguem decodificar pacotes de pequena dimensão com modulação 4QAM.

Discussão de Resultados

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos das simulações realizadas. Esta análise tem como principal objetivo avaliar o desempenho dos diferentes cenários em causa, tendo como principais métricas o Throughput médio por utilizador e os níveis de cobertura.

Durante este capítulo, será feita referência diversas vezes a valores teóricos cujos respetivos cálculos estão presentes no Anexo A.

4.1. Resultados das simulações

4.1.1. Resultados do Throughput Vs Número de Utilizadores

Nesta subsecção serão apresentados os resultados obtidos relativos ao Throughput médio por utilizador em função do número de utilizadores.

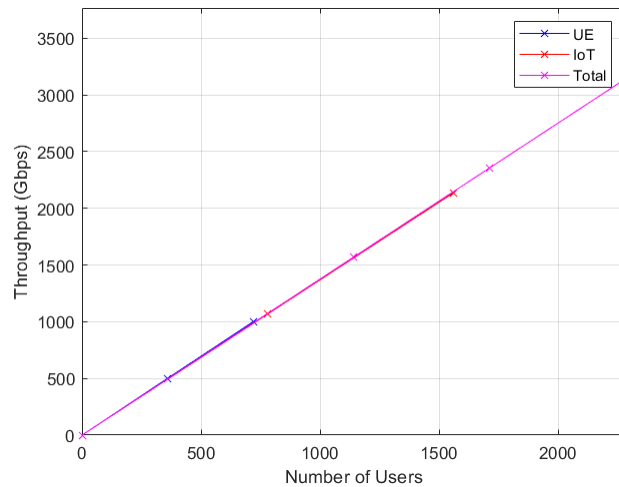


Figura 28. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário com 38BS a 8m de altura

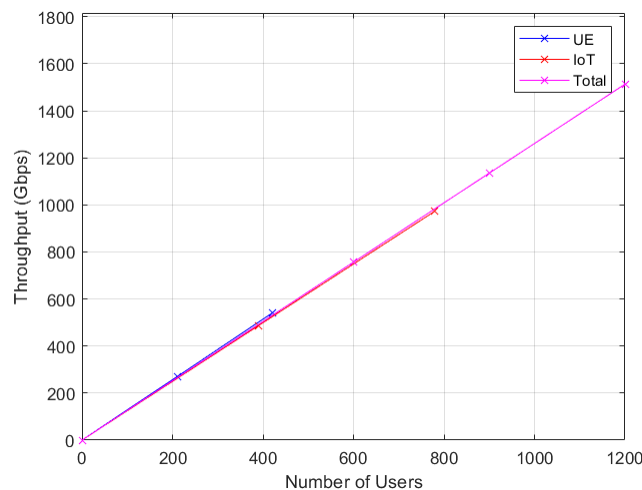


Figura 29. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário com 20BS a 8m de altura

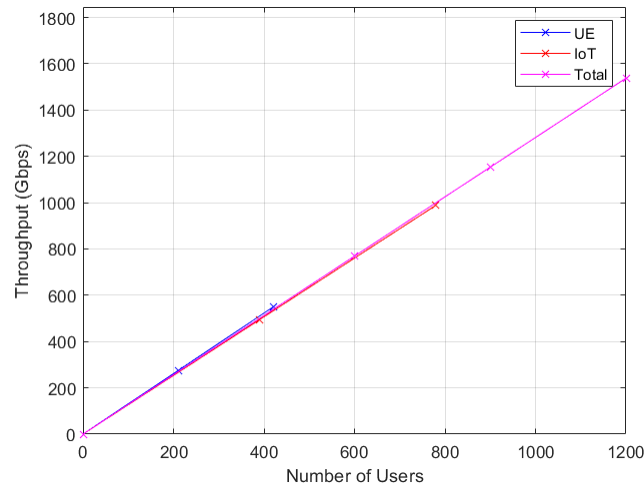


Figura 30. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário com 20BS a 10m de altura

Analisando os gráficos da Figura 28, da Figura 29 e da Figura 30, é possível observar que o valor máximo de Throughput em cada um dos casos é respetivamente 3139.07 Gbps, 1513.19 Gbps e 1537.17 Gbps. O número máximo de utilizadores considerados em cada um dos casos é respetivamente de 2280 UEs/IIoT, 1200 UEs/IIoT e 1200 UEs/IIoT. Com isto podemos obter o valor médio aproximado de Throughput por utilizador em cada um dos casos: no caso de 38BS o valor é de 1376.79 Mbps; no caso de 20BS a 8m de altura o valor é de 1260.99 Mbps; no caso de 20BS a 10m de altura o valor é de 1280.98 Mbps.

Analisando primeiramente os casos com 20BS a 8m de altura e 20BS a 10m de altura, podemos constatar que a altura a que se encontrar a BS tem impacto no Throughput médio por utilizador, sendo possível observar que o cenário 20BS a 10m de altura tem um valor de Throughput 1.59% maior que o caso 20BS a 8m de altura.

Comparando agora os casos 38BS e 20BS, ambos a 8m de altura, temos que o valor de Throughput no cenário com 38BS é 9.18% maior do que no cenário com 20BS a 8m de altura. É de salientar que o cenário com 38BS possui 1.9 vezes o número de BS que o cenário Std3D 20BS a 8m de altura. Este incremento de 90% do número de BS, implica um aumento no número de setores, e por consequência, do número de antenas na implementação da rede. Assim um incremento de 90% do número de BS, apenas se traduz num incremento de 9.18% do valor de Throughput por utilizador. Fazendo a mesma comparação, mas agora com o cenário com 20BS a 10m de altura, temos que o valor de Throughput no cenário com 38BS é 7.48% maior do que no cenário com 20BS a 10m de altura, deve ser tido em conta que este cenário implica um incremento de 90% do número de BS.

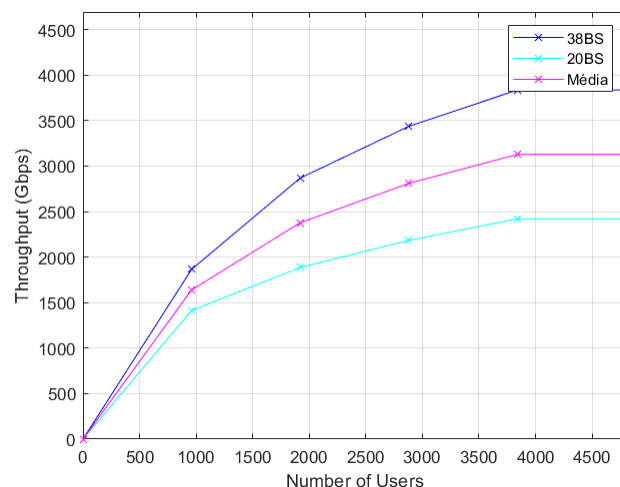


Figura 31. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário 20BS VS 38BS

A Figura 31 apresenta a evolução do Throughput total em função do número de utilizadores para os cenários com 20 e 38 BS, ambos com as BS a 8 metros de altura. De referir que a partir do número máximo de utilizadores por setor o throughput total mantém-se constante. Este máximo de utilizadores depende do uso de mMIMO com total de $M=576$ antenas por setor e do número de antenas usado para transmitir para cada utilizador que pode ser de $M/K=18$ ou $M/K=9$ antenas.

Dos valores apresentados no gráfico da Figura 31, foi possível produzir o seguinte gráfico da Figura 32, que apresenta a evolução do Throughput médio por UEs/IoTs em função do número de utilizadores para os cenários com 20 e 38 BS, ambos com as BS a 8 metros de altura.

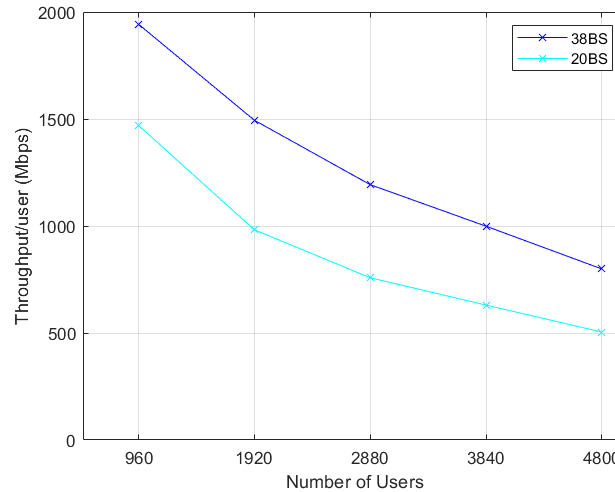


Figura 32. Throughput/User (Mbps) Vs Number of Users, Cenário 20BS VS 38BS

Analisando primeiramente o gráfico da Figura 31, temos que em relação ao crescimento do número de utilizadores, podemos observar que sendo o crescimento linear do número de UEs/IoTs o valor do Throughput total em ambos os cenários não apresenta a mesma tendência. Inicialmente o crescimento é praticamente linear e a diferença no valor de Throughput total entres os dois cenários é baixa, visto que quando o número de UEs/IoTs é 960, o cenário com 38BS atinge um valor de Throughput total de 1865.28 Gbps, enquanto o cenário com 20BS apresenta um valor de Throughput total de 1411.4 Gbps. É assim possível analisar o valor de Throughput médio por utilizador em cada um dos cenários, para o cenário com 38BS temos 1943.0 Mbps enquanto no cenário com 20BS temos 1470.21 Mbps. Apresentando o cenário com 38BS um valor de Throughput total 32.16% maior que o cenário com 20BS.

Passando agora aos valores de Throughput total quando o número de UEs/IoTs é 1920 e 2880, o cenário com 38BS atinge respetivamente um valor de Throughput total de 2868.65 Gbps e 3436.38 Gbps. Já o cenário com 20BS atinge um valor de Throughput total de 1886.15 Gbps, quando o número de UEs/IoTs é 1920, e um valor de Throughput total de 2183.39 Gbps, quando o número de UEs/IoTs é 2880. Analisando o valor de Throughput médio por utilizador em cada um dos cenários para cada um dos pontos com número de UEs/IoTs de 1920 e de 2880, temos que, quando o número de UEs/IoTs é 1920 o cenário com 38BS apresenta um valor de 1494.09 Mbps e o cenário com 20BS apresenta um valor de 982.37 Mbps. Assim, o cenário com 38BS apresenta um valor de Throughput total e por utilizador 52.09% maior do que o cenário com 20BS, quando número de UEs/IoTs é 1920, e apresenta um valor de Throughput total e por utilizador 57.39% maior do que o cenário com 20BS, quando número de UEs/IoTs é 2880.

Por fim, analisando agora os valores de throughput total quando o número de UEs/IoTs é 3840 e 4800, o cenário com 38BS atinge exatamente o mesmo valor de Throughput total em ambos os casos, sendo um valor de 3836.25 Gbps, o cenário com 20BS também atinge valores iguais em ambos os casos, sendo neste 2121.1 Gbps. Sendo assim, o valor de Throughput total estabiliza quando o número de utilizadores é 3840. Analisando o valor de Throughput médio por utilizador em cada um dos cenários, para o cenário com 38BS temos 999.02 Mbps, quando o número de UEs/IoTs é 3840, e 799.22 Mbps quando o número de UEs/IoTs é 4800. Já no cenário com 20BS temos 630.50 Mbps,

quando o número de UEs/IoTs é 3840 e 504.40 Mbps quando o número de UEs/IoTs é 4800. Apresentando o cenário com 38BS um valor de Throughput total e por utilizador 58.45% maior que o cenário com 20BS para ambos os valores do número de UEs/IoTs.

Analisando agora o gráfico da Figura 32, podemos constatar que o valor do Throughput médio por UEs/IoTs diminui à medida que o número total de utilizadores aumenta. Apresentando uma diminuição de 94.49% no valor de Throughput médio por UEs/IoTs, entre o primeiro valor e o último valor do número total de utilizadores, respetivamente 960 e 3840. Olhando agora para quando o número de utilizadores total é 3840 e 4800, temos que a diminuição do throughput por utilizador é de 25%. Isto quando estamos a falar do cenário com 38BS.

Podemos então elaborar o seguinte gráfico da Figura 33, no qual é possível visualizar a evolução da diferença entre valores de Throughput do cenário com 38BS com valores de Throughput do cenário com 20BS, isto à medida que o número de utilizadores aumenta.

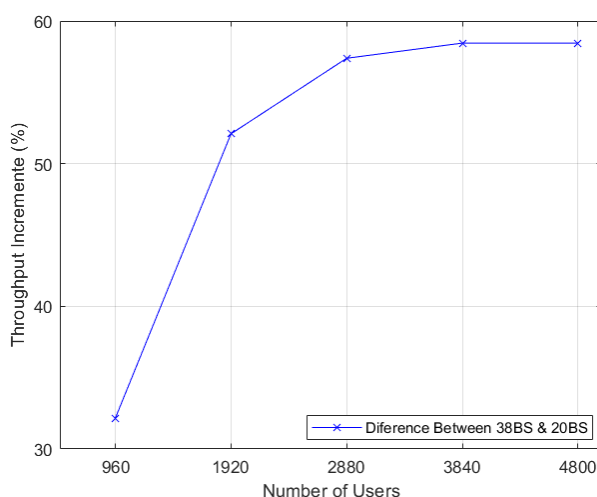


Figura 33. Throughput Increment (%) Vs Number of Users, Cenário 20BS VS 38BS

No cenário com 20BS, apresenta-se uma diminuição de 133.18% no valor de Throughput médio por UEs/IoTs, entre o primeiro valor e o último valor do número total de utilizadores, respetivamente 960 e 3840. Uma diminuição bastante superior quando comparado com o cenário com 38BS. Já quando olhamos para quando o número de utilizadores total é 3840 e 4800, temos que a diminuição de Throughput por utilizador é de 24.9%, uma diminuição praticamente idêntica a do cenário com 38BS.

Em síntese, analisando os gráficos das figuras, Figura 31, Figura 32 e Figura 33, podemos constatar que o aumento do número total de utilizadores, não se traduz num aumento linear no Throughput total, e que o Throughput por utilizador diminui não linearmente à medida que o número de utilizadores total aumenta. Para além disso a rede fica saturada, ou seja, quando o Throughput total não aumenta com o aumento do número de utilizadores total, o que ocorre quando o número de utilizadores total é muito elevado. Analisando ambos os cenários é de notar que o cenário 38BS apresenta melhores resultados de Throughput total quando a rede está saturada, com uma melhoria de 58.45%, quando comparado com o cenário 20BS. O cenário com 38BS apresenta uma diminuição do Throughput médio por utilizador de 94.49%, menor do que a do cenário de 20BS, que a diminuição é de 133.18%.

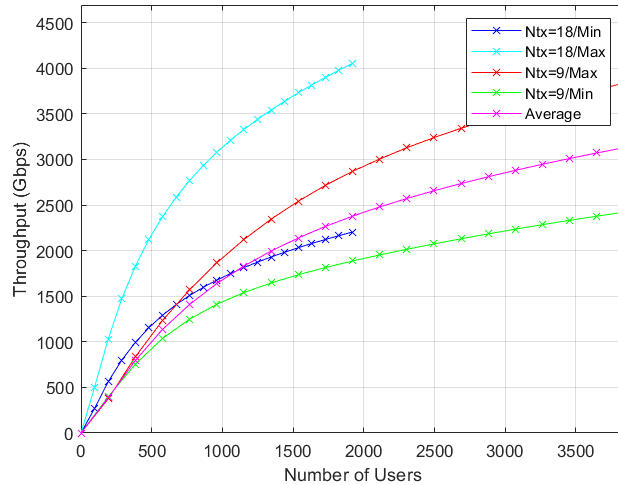


Figura 34. Throughput (Gbps) Vs Number of Users, Cenário 20BS M/K=9 e M/K=18

A Figura 34 apresenta a evolução do Throughput total em função do número de utilizadores para dois cenários diferentes com 20BS, um onde a razão M/K=9 antenas de transmissão e outro onde M/K=18 antenas de transmissão, ou seja, num dos cenários com 20BS para cada utilizador há 9 antenas e noutro 18 antenas.

Para um número de utilizadores igual a 1920, o valor de Throughput total é de 4053.65 Gbps valor máximo, e 2203.71 Gbps, valor mínimo no cenário M/K = 18. Assim a diferença entre o valor mínimo e o máximo do caso M/K=18 é de 83.95%. No caso de M/K = 9, os valores de Throughput total são 2868.65 Gbps, valor máximo, e 1886.15 Gbps, valor mínimo. Assim a diferença entre o valor mínimo e o máximo do caso M/K=9 é de 52.09%.

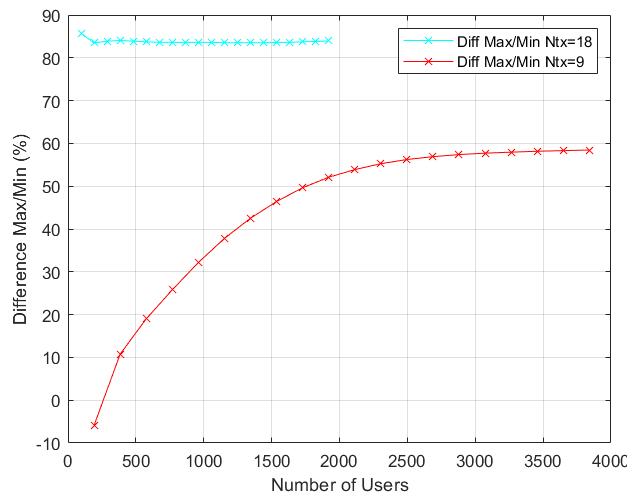


Figura 35. Diferença entre valores de Throughput Max e Min

O seguinte gráfico da Figura 35 apresenta a evolução da diferença entre Throughput máximo e Throughput mínimo em função do número de utilizadores. Comparando agora o valor máximo para cada um dos cenários, o Throughput total com M/K = 18 é 41.30% superior ao registado com M/K = 9. Já entre os valores mínimos, a diferença é de 16.84%, ou seja, o cenário M/K=18 é 16.84% maior quando comprado com o cenário M/K=9.

Adicionalmente, é de notar que o cenário com M/K=9 permite um número de utilizadores de 3840, valor definido pela razão entre o número total de antenas disponíveis e o número de utilizadores. Já no cenário com M/K=18, o número máximo de utilizadores é de 1920. Assim, não existem valores de Throughput para M/K=18 além deste ponto. Quando o número de utilizadores atinge os 3840, o cenário com M/K=9 atinge um valor mínimo de Throughput total de 2421.1 Gbps,

e um valor máximo de Throughput total de 3836.25 Gbps, o que representa uma diferença entre o valor mínimo e o máximo de 58.45%.

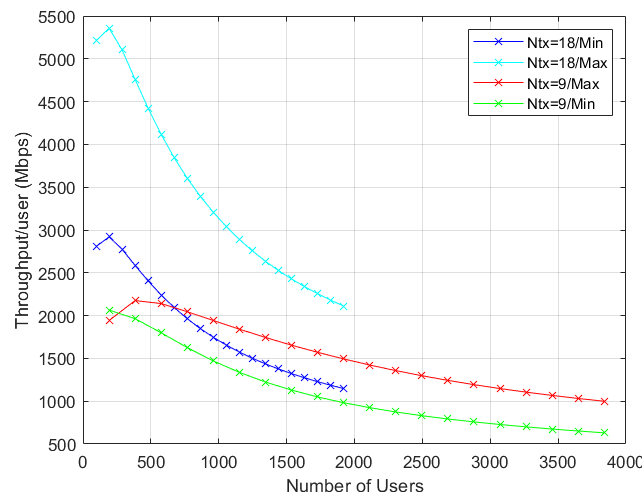


Figura 36. Throughput/User (Mbps) Vs Number of Users

Tendo em conta estes valores, é possível calcular o Throughput médio por utilizador para cada cenário, obtendo o gráfico anterior da Figura 36. No caso de $M/K=18$, com 1920 UEs/IoTs, o Throughput médio por utilizador varia entre 1147.76 Mbps, valor mínimo correspondente a um Throughput total de 2203.71 Gbps, e 2111.25 Mbps, valor máximo correspondente a um Throughput total de 4053.65 Gbps. Já no cenário $M/K = 9$, para o mesmo número de 1920 UEs/IoTs, o Throughput médio por utilizador varia entre 982.40 Mbps, valor mínimo correspondente a um Throughput total de 1886.15 Gbps, e 1494.11 Mbps, valor máximo correspondente a um Throughput total de 2868.65 Gbps.

Comparando os valores médios por utilizador entre os dois cenários para o mesmo número de utilizadores, o cenário $M/K=18$ apresenta um Throughput médio por utilizador 16.83% superior quando comparando os valores mínimos de cada cenário, e 41.30% superior quando comparando os valores máximos de cada cenário.

No ponto com maior número de utilizadores no cenário $M/K=9$, ou seja, com 3840 UEs/IoTs, o Throughput médio por utilizador varia entre 630.50 Mbps, correspondente ao valor mínimo de Throughput total de 2421.1 Gbps, e 999.04 Mbps, correspondente ao valor máximo de Throughput total de 3836.25 Gbps. Comparando com os valores obtidos para 1920 utilizadores no mesmo cenário, observa-se uma redução de 55.81% no valor mínimo e de 49.55% no valor máximo do Throughput médio por utilizador.

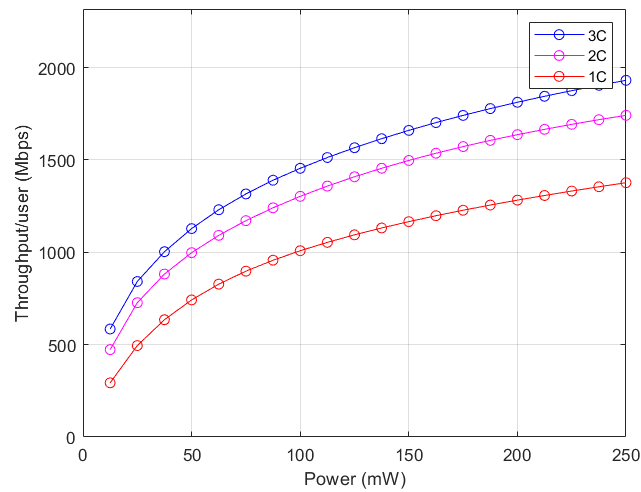
Por fim, comparando o Throughput médio por utilizador no ponto com maior número de utilizadores de cada cenário, 3840 UEs/IoTs para $M/K=9$ e 1920 para $M/K=18$. Podemos constatar que, com o dobro de utilizadores, o cenário $M/K=9$ garante um Throughput médio por utilizador máximo, 14.89% inferior ao Throughput médio por utilizador mínimo do cenário $M/K=18$, já se compararmos com o valor máximo do cenário $M/K=18$, o valor de $M/K=9$ máximo é 111.33% inferior. Se compararmos os valores mínimos de $M/K=9$ com os valores de Throughput médio por utilizador máximos e mínimos do cenário $M/K=18$, este é respetivamente 234.85% e 82.04% inferior.

Em síntese, estes resultados demonstram que o cenário com $M/K=18$ oferece, para o mesmo número de utilizadores que $M/K=9$ até um máximo de 1920, um desempenho superior em termos de Throughput total e médio por utilizador. No entanto, este cenário apresenta uma menor capacidade de utilizadores, 1920 UEs/IoTs, quando comparado com o cenário $M/K = 9$, que possui capacidade para acomodar o dobro dos UEs/IoTs do cenário $M/K=18$, ou seja, 3840 UEs/IoTs. Por sua vez, o cenário com $M/K = 9$, apesar de apresentar valores de Throughput por utilizador inferiores, garante uma maior flexibilidade por conseguir acomodar um número mais elevado de UEs/IoTs. Para além disso, o cenário $M/K=18$ apresenta uma maior diferença entre os valores tanto de Throughput total como Throughput médio por utilizador, 85.71% no pior caso e 83.47% no melhor, mas apresenta uma

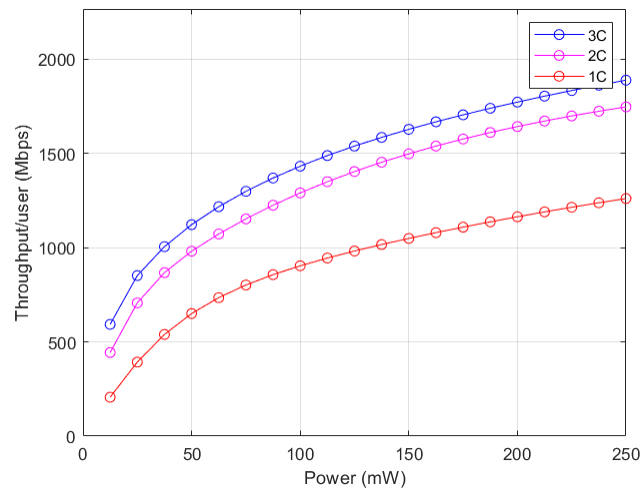
variação baixa nestes valores a medida que o número de UEs/IoTs aumenta. Enquanto $M/K=9$ apresenta apenas uma diferença de 58.45%, no pior caso, e 10.75% no melhor, por outro lado este possui uma variação muito elevada nestes valores, com o aumento do número de UEs/IoTs.

4.1.2. Resultados do Throughput Vs Potência

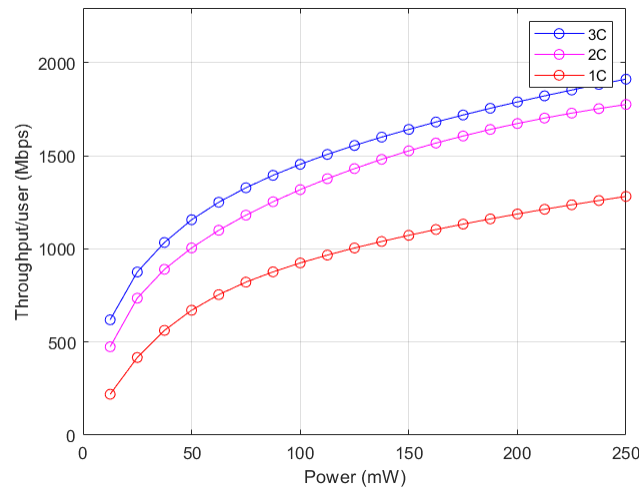
Nesta subsecção são apresentados os resultados do Throughput médio por utilizador em função da potência de transmissão.



**Figura 37. Throughput/User (Mbps) Vs Potência (mW),
Cenário com 38BS a 8m de altura**



**Figura 38. Throughput/User (Mbps) Vs Potência (mW),
Cenário com 20BS a 8m de altura**



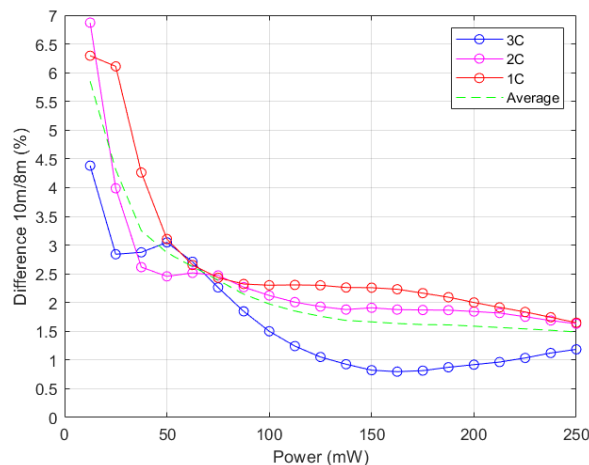
**Figura 39. Throughput/User (Mbps) Vs Potência (mW),
Cenário com 20BS a 10m de altura**

Analisando os gráficos da Figura 37, Figura 38 e Figura 39 é possível observar a evolução do Throughput por utilizador em função da potência de transmissão, considerando diferentes tamanhos de cluster para cada um dos três cenários, com 38BS, com 20BS a 8m de altura e com 20BS a 10m de altura. Em todos os cenários, verifica-se um crescimento do Throughput com o aumento da potência.

No gráfico da Figura 37, correspondente ao cenário com 38BS, os valores Throughput por utilizador obtidos para uma potência de 250 mW são, 1376.78 Mbps com o 1C, 1741.58 Mbps com o 2C, o que representa um incremento de 26.50% face a 1C, por fim, 1931.03 Mbps com o 3C, o que representa um incremento de 10.88% face a 2C e um incremento de 40.26% face a 1C.

No gráfico da Figura 38, correspondente ao cenário com 20BS a 8 metros de altura, os valores Throughput por utilizador obtidos para uma potência de 250 mW são, 1260.99 Mbps com o 1C, 1747.26 Mbps com o 2C, o que representa um incremento de 38.56% face a 1C, por fim, 1889.16 Mbps com o 3C, o que representa um incremento de 8.12% face a 2C e um incremento de 49.82% face a 1C.

No gráfico da Figura 39, correspondente ao cenário com 20BS a 10 metros de altura, os valores Throughput por utilizador obtidos para uma potência de 250 mW são, 1281.81 Mbps com o 1C, 1775.8 Mbps com o 2C, o que representa um incremento de 38.54% face a 1C, por fim, 1911.55 Mbps com o 3C, o que representa um incremento de 7.64% face a 2C e um incremento de 49.13% face a 1C.



**Figura 40. Diferença (%) entre os valores Throughput/User dos cenários com
20BS a 10m e a 8m**

Em síntese, para uma mesma potência de transmissão, o aumento do tamanho do cluster impacta diretamente o Throughput médio por utilizador. O tamanho 3C apresenta valores superiores aos

registados com 2C e 1C, com incrementos de 1C que variam entre 40.26% e 49.82%, dependendo do cenário em causa. De notar também, que a altura a que se encontram as BS impacta os valores do Throughput por utilizador, tal como é possível observar no gráfico da Figura 40, neste gráfico é de notar que os tamanhos de cluster 1C e 2C apresentam as maiores diferenças entre os dois cenários, para além disso, à medida que a potência de transmissão aumenta a altura da BS impacta menos o valor do Throughput por utilizador, passando de uma diferença inicial de 5.85% a 12mW para uma diferença de 1.49% a 250mW.

4.1.3. Resultados da Cobertura Vs Potência

Nesta subsecção são apresentados os resultados obtidos relativamente à cobertura em função da potência de transmissão.

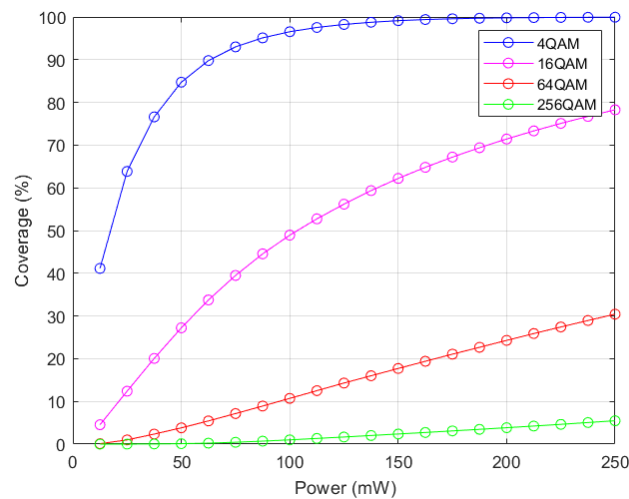


Figura 41. Coverage (%) Vs Power (mW), Cenário com 38BS a 8m de altura

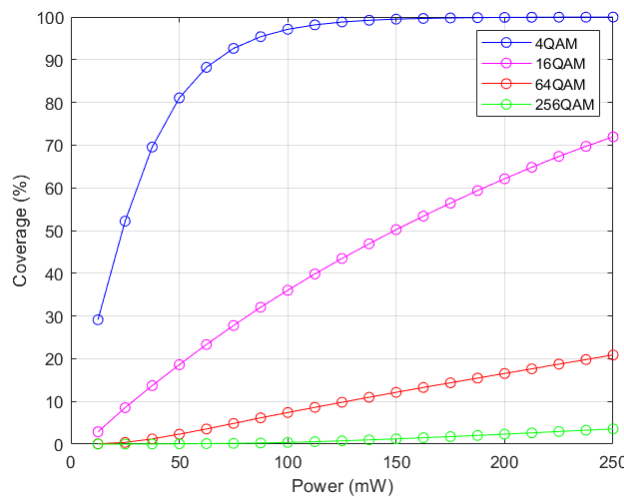


Figura 42. Coverage (%) Vs Power (mW), Cenário com 20BS a 8m de altura

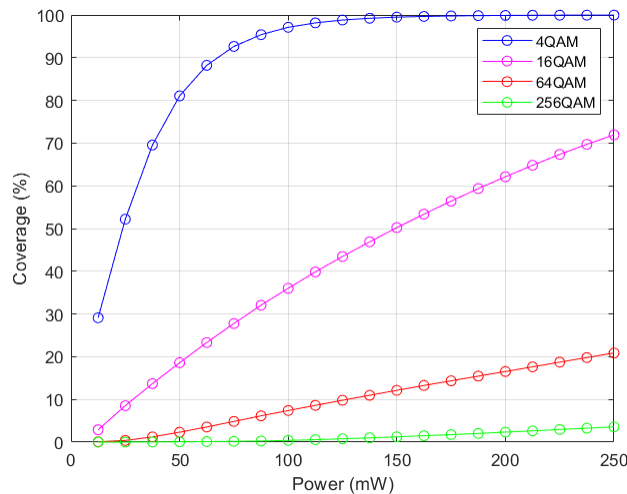


Figura 43. Coverage (%) Vs Power (mW), Cenário com 20BS a 10m de altura

Analisando os gráficos da Figura 41, Figura 42 e Figura 43, é possível observar a evolução da percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, para cada um dos três cenários, com 38BS, com 20BS a 8m de altura e com 20BS a 10m de altura. Em todos os casos, estão representadas as coberturas das quatro modulações utilizadas, sendo elas 256QAM, 64QAM, 16QAM e 4QAM.

No gráfico da Figura 41, correspondente ao cenário com 38BS, observa-se que para uma potência de transmissão de 250 mW, os níveis de cobertura por modulação atingem os seguintes valores, 99.95% com 4QAM, 78.27% com 16QAM, 30.42% com 64QAM e 5.47% com 256QAM.

No gráfico da Figura 42, correspondente ao cenário com 20BS a 8 metros de altura, verifica-se que, para a mesma potência de 250 mW, a cobertura atinge valores como 99.98% com 4QAM, 71.93% com 16QAM, 20.87% com 64QAM e 3.57% com 256QAM.

No gráfico da Figura 43, correspondente ao cenário com 20BS a 10 metros de altura, os valores de cobertura para uma potência de 250 mW são de 99.98% com 4QAM, 73.66% com 16QAM, 21.11% com 64QAM e 4.85% com 256QAM.

Avaliando agora, o desempenho de cada uma das quatro modulações utilizadas nos três cenários, temos os seguintes gráficos da Figura 44, Figura 45, Figura 46 e Figura 47.

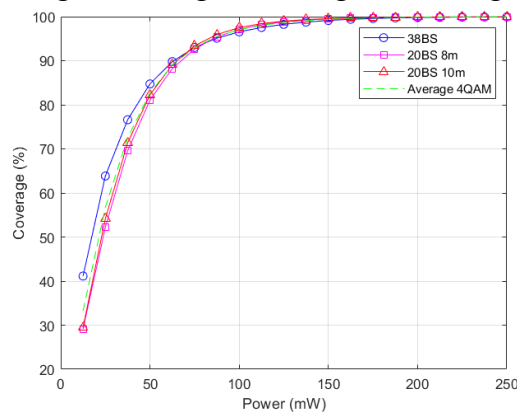


Figura 44. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 4QAM

O gráfico da Figura 44 mostra a evolução da cobertura para a modulação 4QAM conforme o aumento da potência de transmissão nos três cenários, assim como a média da percentagem de cobertura dos três cenários. Esta modulação apresenta valores elevados de cobertura mesmo em valores de baixa potência de transmissão. A partir de 150 mW, todos os cenários ultrapassam os 98% de cobertura, atingindo valores próximos dos 100% a 250 mW. O cenário com 20BS a 10 metros de altura apresenta os melhores resultados de cobertura com esta modulação, com uma cobertura máxima de 99.979%, valor similar ao registado pelo cenário com 20BS a 8 metros, 99.976%, enquanto o cenário com 38BS atinge 99.949% de cobertura máxima.

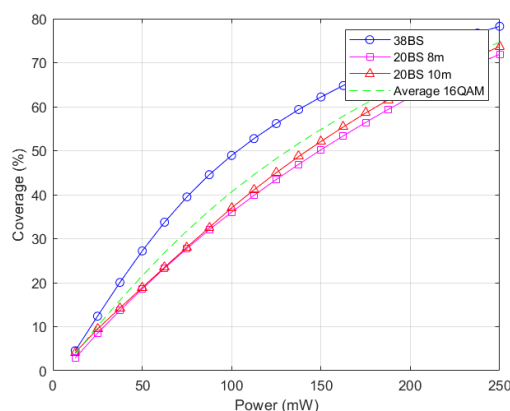


Figura 45. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 16QAM

No gráfico da Figura 45, que representa a evolução da cobertura para a modulação 16QAM, observa-se que o cenário com 38BS garante sempre os melhores resultados de cobertura. Para uma potência de 250 mW, o cenário com 38BS atinge uma cobertura de aproximadamente 78.27%. Enquanto o cenário com 20BS a 10 metros de altura registra uma cobertura de 73.66%, e o cenário com 20BS a 8 metros de altura apresenta uma cobertura de 71.93%.

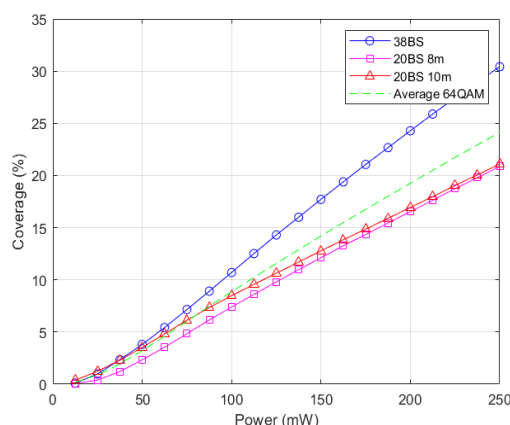


Figura 46. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 64QAM

No gráfico da Figura 46, que representa a evolução da cobertura para a modulação 64QAM, observa-se que o cenário com 38BS continua a garantir um melhor resultado, atingindo 30.42% de cobertura a 250 mW. Enquanto o cenário com 20BS a 10 metros de altura registra uma cobertura de 21.11%, e o cenário com 20BS a 8 metros de altura apresenta uma cobertura de 20.87%.

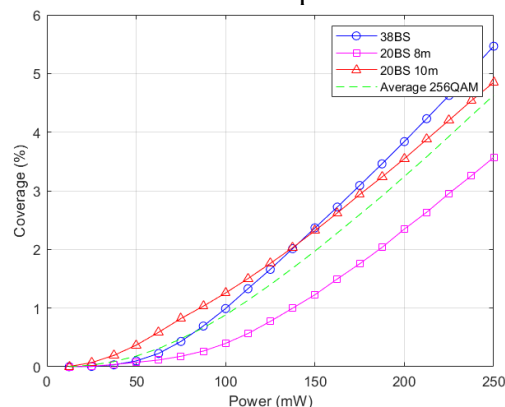


Figura 47. Coverage (%) Vs Power (mW), Modulação 256QAM

No gráfico da Figura 47, que representa a evolução da cobertura para a modulação 256QAM, os valores de cobertura são muito inferiores comparando com qualquer uma das modulações anteriores. O cenário com 38BS apresenta novamente o melhor desempenho, atingindo valores de cobertura de 5.47%, seguido pelo cenário com 20BS a 10 metros de altura, com 4.85%, e o cenário com 20BS a 8 metros de altura, com apenas 3.57%.

4.1.4. Resultados do CDF do SINR e do CDF do Throughput

Nesta subsecção são apresentados os resultados obtidos relativamente à Cumulative Distribution Function (CDF) do *Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio* (SINR) e à CDF do throughput.

Primeiramente é necessário entender o que podemos analisar numa CDF. Nesta podemos visualizar a percentagem de amostras são inferiores ou iguais a esse valor, utilizando como exemplo a Figura 48, cerca de 70% das amostras do total do cenário C1 têm SINR até 5dB.

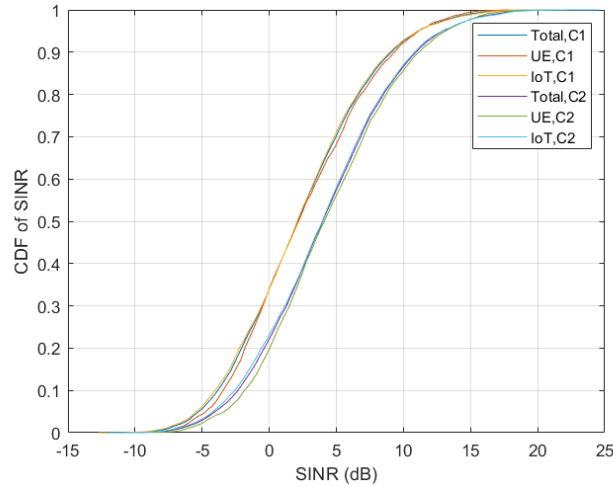


Figura 48. CDF do SINR

Analisando o gráfico da Figura 48, podemos observar que as curvas designadas por C2 (duas conexões entre os terminais e as BS) apresentam-se consistentemente deslocadas à direita em relação às do cenário C1 (uma conexão), mostrando que o aumento do número de conexões do cluster resulta numa melhoria global do SINR, permitindo que uma maior percentagem de utilizadores atinja valores mais elevados de qualidade de sinal. Comparando agora os diferentes tipos de dispositivos, verificamos que os UEs apresentam em ambos os casos um desempenho superior aos IoTs, especialmente no intervalo entre -5dB e 0dB, e no intervalo entre 5 dB e 10 dB. É de salientar que o número de UEs é equivalente a 31.58% do número total de utilizadores, enquanto o número de IoTs é 68.42% do número total de utilizadores, ou seja, o número de IoTs é 2.17 vezes maior que o número de UEs. Em síntese, a análise da CDF do SINR demonstra que o aumento do número de conexões do cluster promove uma melhoria geral da rede, deslocando as curvas para valores mais elevados de SINR, devido a uma redução da interferência entre células proporcionada pelas duas conexões do cluster.

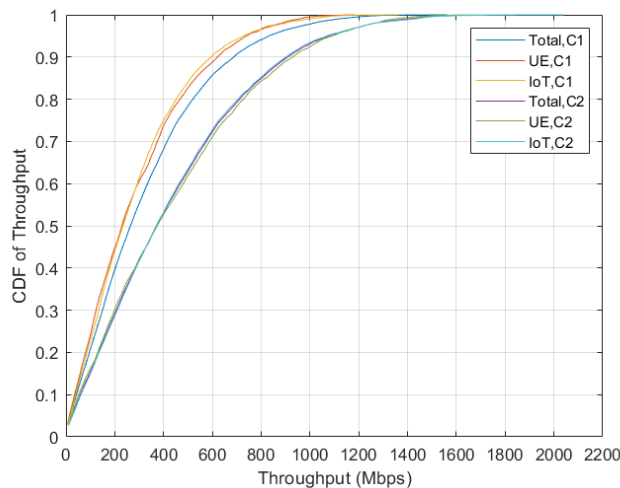


Figura 49. CDF do Throughput

Na análise do gráfico da Figura 49, verificamos que as curvas designadas por C2 estão deslocadas mais à direita em relação às do cenário C1, representando um ganho global de throughput. Ao aumentar o número de conexões, é possível oferecer débitos mais elevados a uma fração maior de

utilizadores. Em ambos os casos, os UEs apresentam throughput superior aos IoTs. Esta diferença é mais acentuada quando há apenas uma conexão entre as BS e os terminais C1, onde as curvas referentes aos UEs e aos IoTs são perfeitamente distinguíveis entre si, tendo uma dispersão mais acentuada no intervalo entre 400Mbps e 800Mbps. Enquanto em C2 as curvas de UEs e IoTs convergem progressivamente à medida que o valor de throughput aumenta. Existe uma correspondência entre estes valores do CDF do Throughput com os valores de Throughput vs Potência no caso da máxima potência de transmissão de 250 mW.

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

Esta dissertação centrou-se no planeamento de uma rede 5G NR em ambiente industrial, tendo como caso de estudo o cenário designado por Std3D, implementado com base na planta da Fábrica da Volkswagen Autoeuropa em Palmela, com o propósito de avaliar o desempenho do sistema em termos de cobertura e throughput. Para tal recorreu-se a simulações realizadas num ambiente desenvolvido em JAVA, no qual foram testados três cenários distintos, variando o número e a altura das BS.

Em termos de parâmetros, foram considerados diferentes cenários de implementação, variando o número de BS, a altura de instalação das BS e a razão M/K, sendo M o número de antenas e K o número de utilizadores em cada setor. Foram simulados quatro casos principais: um cenário com 38BS e três cenários com 20BS, variando-se a altura (8 e 10 metros) e a razão M/K (9 e 18). Em todos os casos, foi utilizada uma frequência portadora de 28 GHz, largura de banda de 200 MHz, modulações de 4QAM, 16QAM, 64QAM e 256QAM, e sistemas mMIMO com $M=576$ antenas por setor.

A avaliação do desempenho do sistema centrou-se no throughput e na cobertura. Em termos de throughput, analisou-se a evolução em função do número de utilizadores e da potência de transmissão. Os resultados das análises demonstraram que o aumento do número de BS, de 20 para 38, resulta tanto em melhorias de throughput médio por utilizador como em throughput total, especialmente quando existe saturação da rede. No entanto, verificou-se que um incremento de 90% no número de BS traduz-se em ganhos de throughput menores, não proporcionais ao incremento do número de BS, situados entre os 7.48% e os 9.18%, dependendo do número de utilizadores e a altura das BS. Comparando os cenários com 20BS, constatou-se que a altura das BS tem influência no desempenho, pois no caso a 10 metros obtêm-se valores de throughput ligeiramente superiores, com diferenças em torno de 1.59% face ao cenário com 20BS a 8 metros. Em relação à razão M/K, ou seja, o número de antenas de transmissão por utilizador, embora o caso com $M/K=18$ apresente maiores valores de throughput médio por utilizador, este possui apenas capacidade para 1920 utilizadores, enquanto o caso com $M/K=9$ consegue assegurar uma capacidade de até 3840 utilizadores, existindo assim um compromisso entre desempenho e capacidade de rede.

Relativamente à potência de transmissão, os resultados demonstraram que o aumento da potência promove ganhos consistentes no throughput por utilizador. O tamanho de cluster 3C apresentou valores de throughput por utilizador entre 40.26% e 49.82% superiores aos do tamanho de cluster 1C. Observou-se ainda que a altura das BS influencia os resultados, sobretudo para potências mais baixas, efeito que tende a diminuir à medida que a potência de transmissão aumenta.

No que diz respeito à cobertura, verificou-se que as modulações de ordem inferior (4QAM e 16QAM) apresentam percentagens de cobertura superiores, atingindo nos três cenários valores próximos dos 100% com 4QAM, e entre 71.93% e 78.27% com 16QAM, dependendo do cenário. Já as modulações mais elevadas (64QAM e 256QAM), registaram níveis de cobertura mais baixos, situando-se entre 20.87% e 30.42% para 64QAM, e entre 3.57% e 5.47% para 256QAM. O cenário com 38BS apresentou os melhores resultados de cobertura para três das quatro modulações, registando sensivelmente os mesmos valores em 4QAM, quer no cenário com 20BS a 8 metros de altura quer no cenário com 20BS a 10 metros de altura.

Por fim, a análise das CDF do SINR e do Throughput reforçou as conclusões anteriores, demonstrando que o aumento do número de conexões traduz-se em melhorias de SINR e throughput, sobretudo para os UEs quando comparados com os IoTs (robots para fabrico de viaturas).

Em síntese, os resultados obtidos mostram que a performance da rede 5G NR em ambiente industrial é fortemente condicionado pela configuração estrutural da rede, ou seja, pelo número de BS utilizados, pela sua disposição, pela sua altura, pela razão M/K e pelo tamanho de cluster utilizado. Das simulações realizadas, constatou-se que o cenário com 38BS apresenta um melhor desempenho global, sobretudo em termos de throughput total e de cobertura quando utilizadas modulações elevadas. Dos cenários com 20BS, o cenário a 10 metros apresentou valores ligeiramente superiores aos registados no cenário a 8 metros. Quando analisados os valores de M/K, M/K=9 proporcionou uma maior capacidade para acomodar utilizadores, enquanto M/K=18 apresentou maiores valores de throughput. Da análise do tamanho do cluster, o tamanho 3C apresentou consistentemente em todos os cenários os melhores valores de throughput. Contudo o ganho em relação ao cluster 2C situa-se em cerca de 10%.

5.2. Trabalhos Futuros

No que diz respeito a trabalhos futuros, um primeiro ponto consistiria em desenvolver o estudo do número ótimo de BS para o caso em estudo. Os resultados mostraram que o incremento de 1.9 vezes no número de BS, passando de 20 para 38, resultou apenas numa melhoria de 9.18% no throughput. Uma análise mais aprofundada poderia identificar um ponto de equilíbrio que maximize os ganhos em throughput e cobertura, evitando incrementos excessivos de infraestruturas com benefícios desproporcionais.

Outra vertente de investigação futura seria uma análise sobre a altura ideal de instalação das BS. Verificou-se que o aumento de apenas 2 metros, de 8 para 10 metros, resultou numa melhoria de 1.59% no throughput, sugerindo que a altura das BS tem um impacto considerável no desempenho. A definição da altura ótima, associada às especificidades do ambiente industrial em estudo, poderá permitir uma configuração mais eficiente da rede.

Outra melhoria futura seria obter junto do dono da rede privada de um conhecimento mais detalhado sobre os robots de fabrico automóvel de modo a maximizar o desempenho.

Referências

- [1] K. Peffers, T. Tuunanen, C. E. Gengler, et al., “Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research,” 2020. arXiv: 2006.02763 [cs.SE] [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.02763>.
- [2] M. A. M. Albreem, ‘5G wireless communication systems: Vision and challenges’, in 2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT), Kuching, Sarawak, Malaysia: IEEE, Apr. 2015, pp. 493–497. doi: 10.1109/I4CT.2015.7219627.
- [3] H. Fehmi, M. F. Amr, A. Bahnasse, and M. Talea, ‘5G Network: Analysis and Compare 5G NSA /5G SA’, *Procedia Computer Science*, vol. 203, pp. 594–598, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.07.085>.
- [4] A. Gupta and R. K. Jha, ‘A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies’, *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [5] L. Guevara and F. Auat Cheein, ‘The Role of 5G Technologies: Challenges in Smart Cities and Intelligent Transportation Systems’, *Sustainability*, vol. 12, no. 16, p. 6469, Aug. 2020, doi: 10.3390/su12166469.
- [6] N. Panwar, S. Sharma, and A. K. Singh, ‘A survey on 5G: The next generation of mobile communication’, *Physical Communication*, vol. 18, pp. 64–84, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.phycom.2015.10.006.
- [7] “Ericsson Mobility Report,” Ericsson, Stockholm, Sweden, Sep. 2024. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/4a4b71/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2024/ericsson-mobility-report-q2-2024-update.pdf>
- [8] “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” International Telecommunication Union, Geneva, Recommendation M.2083-0, Set. 2015. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/r-rec-m.2083-0-201509-i!!pdf-e.pdf
- [9] “Making 5G NR a Reality,” Qualcomm, San Diego, CA, USA, Dec. 2016. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/draft_whitepaper_-_leading_the_technology_inventions_for_a_unified_more_capable_air_interface_v.1.0.pdf
- [10] “Exploring the Potential of mmWave for 5G Mobile Access,” Qualcomm, San Diego, CA, USA, June 2016. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/heavyreading_qualcomm_mmwave_whitepaper.pdf
- [11] “Huawei 5G Wireless Network Planning Solution White Paper,” Huawei, Shenzhen, China, 2018. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/white%20paper/2018/5g_wireless_network_planning_solution_en_v2.pdf?la=en
- [12] “Who & How: Making 5G NR Standards,” Samsung, Seoul, South Korea, June 2018. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white-paper/who-and-how_making-5g-nr-standards/white-paper_who-and-how_making-5g-nr-standards.pdf
- [13] “Road to 5G: Introduction and Migration,” GSMA, London, UK, Apr. 2018. Accessed: Feb. 2025. [Online]. Available: https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf
- [14] A. El Rhayour and T. Mazri, ‘5G Architecture: Deployment scenarios and options’, in 2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies

- (ISAECT), Rome, Italy: IEEE, Nov. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISAECT47714.2019.9069723.
- [15] I. Zaame, T. Mazri, and A. Elrhayour, ‘5G: ARCHITECTURE OVERVIEW AND DEPLOYMENTS SCENARIOS’, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XLIV-4/W3-2020, pp. 435–440, Nov. 2020, doi: 10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-435-2020.
- [16] R. Mohamed, S. Zemouri, and C. Verikoukis, ‘Performance Evaluation and Comparison between SA and NSA 5G Networks in Indoor Environment’, in 2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom), Athens, Greece: IEEE, Sep. 2021, pp. 112–116. doi: 10.1109/MeditCom49071.2021.9647621.
- [17] "5G Standalone Architecture," Samsung, Suwon, South Korea, Jan. 2021. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: https://images.samsung.com/is/content/samsung/assets/global/business/networks/insights/white-papers/0107_5g-standalone-architecture/5G_SA_Architecture_Technical_White_Paper_Public.pdf
- [18] S. K. Rao and R. Prasad, ‘Impact of 5G Technologies on Industry 4.0’, *Wireless Pers Commun*, vol. 100, no. 1, pp. 145–159, May 2018, doi: 10.1007/s11277-018-5615-7.
- [19] "Massive MIMO for 5G Networks," Ericsson, Stockholm, Sweden, Feb. 2023. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/49318c/assets/local/reports-papers/white-papers/massive-mimo-for-5g-networks.pdf>
- [20] C.-X. Wang *et al.*, ‘Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks’, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736752.
- [21] R. Chataut and R. Akl, “Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction,” *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2753, May 2020, doi: 10.3390/s20102753.
- [22] "Designing 5G NR: The 3GPP Release 15 Global Standard for a Unified, More Capable 5G Air Interface," Qualcomm Technologies Inc., San Diego, CA, USA, Sep. 2018. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/powerpoint_presentation_-_designing_5g_nr_september_2018_web.pdf
- [23] "Utilities Spectrum Simplified," Ericsson, Stockholm, Sweden, 2023. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/4a1b1a/assets/local/reports-papers/further-insights/doc/ericsson-utilities-spectrum-simplified.pdf>
- [24] A. A. Barakabitze, A. Ahmad, R. Mijumbi, and A. Hines, “5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges,” *Computer Networks*, vol. 167, p. 106984, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2019.106984.
- [25] J. Ordóñez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez, J. J. Ramos-Munoz, J. Lorca, and J. Folgueira, “Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, pp. 80–87, May 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600935.
- [26] J. Ordóñez-Lucena, J. Folgueira Chavarria, L. M. Contreras, and A. Pastor, “The use of 5G Non-Public Networks to support Industry 4.0 scenarios,” in 2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), GRANADA, Spain: IEEE, Oct. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1109/CSCN.2019.8931325.
- [27] "5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios," 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA), Frankfurt, Germany, Sep. 2021. Accessed: Nov. 2025. [Online]. Available: <https://5g-acia.org/download/18734/?tmstsv=1706108824>
- [28] M. Wen *et al.*, “Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape,” *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 16, no. 1, pp. 7–25, Jan. 2022, doi: 10.1109/JSTSP.2021.3137669.

Anexo A

Pretende-se fazer o planeamento celular considerando um cenário hipotético indoor com 20 BS/AP e 60 setores no total. Neste cenário cada BS tem 4 zonas com diferentes ritmos binários dependendo da distância à BS. Símbolos 256QAM com $R_c=7/8$, símbolos 64QAM com $R_c=5/6$, símbolos 16QAM com $R_c=3/4$ e símbolos 4QAM com $R_c=1/2$.

Considera-se 5G NR com MIMO Massivo em que em cada setor de célula tem mMIMO com $M=576$ antenas, para servir $K=[32,64]$ utentes, $M/K=[18,9]$ antenas por utente, sendo o sistema TDD. Há no total $3 \times 20 = 60$ setores.

- Considera-se $f_c=3.6\text{GHz}$ com numerologia 1, largura de banda total 100MHz, $\Delta f=30\text{kHz}$, OFDM com 28 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1.0ms.
- Considera-se $f_c=28\text{GHz}$ com numerologia 2, largura de banda total 200MHz, $\Delta f=60\text{kHz}$, OFDM com 56 símbolos transmitidos em cada subtrama com 1.0ms.

O tempo de coerência do canal é de $T_c=25\text{ms}$ e a largura de banda de coerência do canal $B_c=8\text{MHz}$. Usa-se TDD, com tempo de transmissão do DL igual ao do UL mais a duração dos pilotos.

Assim, a seguinte Tabela 5 apresenta os parâmetros considerados para a realização do planeamento teórico do cenário designado por St3D.

Parâmetros	Valores
Frequência Portadora (f_c)	28 GHz
Largura de Banda por Portadora (B_t)	200 MHz
Espaçamento de Sub-portadoras (Δf)	60 kHz
Número de Símbolos por Subtrama (OFDM)	56
Número de Antenas por Utilizador (M/K)	[18,9]
Número de UEs por Setor (K) , para $M/K=9$	64
Número de UEs por Setor (K) , para $M/K=18$	32
Número de Setores	60
Número de Antenas Massivas por Setor (M)	576
Tempo de Coerência do Canal (T_c)	25 ms
Largura de Banda de Coerência do Canal (B_c)	8 MHz
Duração de Símbolo (T_s)	1 ms
Densidade Espectral de Potência do Ruído Térmico ($10 \log(kT)$)	-174 dBm
Número de Sub-portadoras (N_{sc})	3300
Potência de Transmissão ($EIRPTX$)	24 dBm
Ganho da Antena de Receção (GRX)	2 dB
Perda na Antena de Receção (LRX)	0 dB
Ganho de Propagação em dB ($10 \log(F)$)	8 dB
Margem de Desvanecimento (MF)	7 dB

Tabela 5. Parâmetros para o Planeamento Teórico

Assim, serão realizados os cálculos para 2 casos, o caso em que o número de antenas por utilizador é 9 (M/K=9) e o caso em que o número de antenas por utilizador é 18 (M/K=18)

No caso em que M/K=9:

- Cálculo da Potência do Ruído:

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

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

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

$$10 \log(P_n) = -174 + 83 + 8 = -83 \text{ dBm}$$

- Cálculo do Número de Bits e Ritmo Binário:

Para calcular o número de bits de uma dada modulação, foi utilizada a seguinte equação:

$$[2] \quad N_b = N_{\text{simb}} \times N_{\text{SC}} \times \log_2(M) \times R_c$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

- Para 256 QAM:

$$N_{b,256\text{QAM}} = 56 \times 3300 \times \log_2 256 \times \frac{7}{8} = 1\,293\,600 \text{ bits}$$

- Para 64 QAM:

$$N_{b,64\text{QAM}} = 56 \times 3300 \times \log_2 64 \times \frac{5}{6} = 924\,000 \text{ bits}$$

- Para 16 QAM:

$$N_{b,16\text{QAM}} = 56 \times 3300 \times \log_2 16 \times \frac{3}{4} = 554\,400 \text{ bits}$$

- Para 4 QAM:

$$N_{b,4\text{QAM}} = 56 \times 3300 \times \log_2 4 \times \frac{1}{2} = 184\,800 \text{ bits}$$

Para calcular o ritmo binário de uma dada modulação, foi utilizada a seguinte equação:

$$[3] \quad R_b = N_b \div T_s$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

- Para 256 QAM:

$$R_{b,256\text{QAM}} = 1\,293\,600 \div (1 \times 10^{-3}) = 1\,293.6 \text{ Mbps}$$

- Para 64 QAM:

$$R_{b,64\text{QAM}} = 924\,000 \div (1 \times 10^{-3}) = 924 \text{ Mbps}$$

- Para 16 QAM:

$$R_{b,16\text{QAM}} = 554\,400 \div (1 \times 10^{-3}) = 554.4 \text{ Mbps}$$

- Para 4 QAM:

$$R_{b,4\text{QAM}} = 184\,800 \div (1 \times 10^{-3}) = 184.8 \text{ Mbps}$$

- Cálculo da Relação Sinal-Ruído:

Para calcular a relação sinal-ruído, foi utilizada a seguinte equação:

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

Para tal é preciso primeiro calcular o valor de E_b/N_0 , ou seja, o valor da relação entre energia média por bit e a densidade espectral.

$$[5] \quad 10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 10 \log\left(\frac{E_{sc}}{N_0}\right) - 10 \log(R_c \times \log_2 M)$$

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de $10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$:

- Para 256 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 13.6 - 10 \log\left(\frac{7}{8} \times \log_2 256\right) = 5.1 \text{ dB}$$

- Para 64 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 8.9 - 10 \log\left(\frac{5}{6} \times \log_2 64\right) = 1.9 \text{ dB}$$

- Para 16 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 4.9 - 10 \log\left(\frac{3}{4} \times \log_2 16\right) = 0.1 \text{ dB}$$

- Para 4 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = -2.4 - 10 \log\left(\frac{1}{2} \times \log_2 4\right) = -2.4 \text{ dB}$$

Tendo os valores de $10 \log(E_b/N_0)$, podemos agora calcular o valor da relação sinal-ruído para cada uma das modulações:

- Para 256 QAM:

$$10 \log(SNR_{256QAM}) = 5.1 + 10 \log\left(\frac{1 \text{ 293.6}}{200}\right) = 13.3 \text{ dB}$$

- Para 64 QAM:

$$10 \log(SNR_{64QAM}) = 1.9 + 10 \log\left(\frac{924}{200}\right) = 8.6 \text{ dB}$$

- Para 16 QAM:

$$10 \log(SNR_{16QAM}) = 0.1 + 10 \log\left(\frac{554.4}{200}\right) = 4.6 \text{ dB}$$

- Para 4 QAM:

$$10 \log(SNR_{4QAM}) = -2.4 + 10 \log\left(\frac{184.8}{200}\right) = -2.7 \text{ dB}$$

- Cálculo da Sensibilidade (Para a numerologia 2, $f_c=28$ GHz, $B_t=200$ MHz):
Para a sensibilidade, foi utilizada a seguinte equação:

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

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de $10 \log(S)$:

- Para 256 QAM:

$$10 \log(S_{256QAM}) = 13.3 - 83.0 = -69.7 \text{ dBm}$$

- Para 64 QAM:

$$10 \log(S_{64QAM}) = 8.6 - 83.0 = -74.4 \text{ dBm}$$

- Para 16 QAM:

$$10 \log(S_{16QAM}) = 4.6 - 83.0 = -78.4 \text{ dBm}$$

- Para 4 QAM:

$$10 \log(S_{4QAM}) = -2.7 - 83.0 = -85.7 \text{ dBm}$$

- Cálculo das Perdas de Percurso:

Os valores das perdas de percurso são calculados utilizando a seguinte equação:

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

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de perdas de percurso:

- Para 256 QAM:

$$L_{path,256QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-69.7) = 88.7 \text{ dBm}$$

- Para 64 QAM:

$$L_{path,64QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-74.4) = 93.4 \text{ dBm}$$

- Para 16 QAM:

$$L_{path,16QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-78.4) = 97.4 \text{ dBm}$$

- Para 4 QAM:

$$L_{path,4QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-85.7) = 104.7 \text{ dBm}$$

- Cálculo do Raio de Cobertura num cenário genérico, para cada zona:

O valor do raio de cobertura de uma dada zona é calculado recorrendo a seguinte equação:

$$[8] \quad L_{path} = 61.4 + 32 \log(d) \Rightarrow R = 10^{(L_{path}-61.4)/32}$$

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de raio de cobertura das suas respetivas zonas:

- Para 256 QAM:

$$R_1 = 10^{(L_{path,256QAM}-61.4)/32} = 10^{(88.7-61.4)/32} = 7.15 \text{ m}$$

- Para 64 QAM:

$$R_2 = 10^{(L_{path,64QAM}-61.4)/32} = 10^{(93.4-61.4)/32} = 10.02 \text{ m}$$

- Para 16 QAM:

$$R_3 = 10^{(L_{path,16QAM}-61.4)/32} = 10^{(97.4-61.4)/32} = 13.37 \text{ m}$$

- Para 4 QAM:

$$R_4 = 10^{(L_{path,4QAM}-61.4)/32} = 10^{(104.7-61.4)/32} = 22.60 \text{ m}$$

Analisar a capacidade do mMIMO deste cenário hipotético com M/K=9 (antenas/utente):

- Número máximo de símbolos para transmitidos no canal com mMIMO:

$$[9] \quad \tau_C = B_C \times T_C$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

$$\tau_C = 8 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3} = 200\,000 \text{ símbolos}$$

Assim, considerando que τ_P é equivalente ao número de utilizadores K=64. Temos que:

- No *Downlink* (DL) transmite-se em cada T_C , $N_S = 100\,000$ símbolos;
- No *Uplink* (UL) transmite-se em cada T_C , $N_S = 100\,000 - 64$ símbolos.

- A taxa de símbolos no *Downlink*:

Para calcular a taxa de símbolos no *Downlink* recorre-se equação:

$$[10] \quad R_S = \frac{N_S}{T_C}$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

$$R_S = \frac{100\,000}{25 \times 10^{-3}} = 0.4 \times 10^7 \text{ sps em cada } B_C$$

- Área de Cobertura por Zona:

A área total de cobertura por setor é dado por:

$$[11] \quad A_T = \pi \times (R_4)^2 = 1\,604.95 \text{ m}^2$$

A percentagem de cobertura de cada zona é dada por A_{Zona}/A_T

Assim, as respetivas percentagens de cobertura e áreas de cada zona são as seguintes:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$A_1 = \pi \times (R_1)^2 = 160.49 \text{ m}^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 1} = 10.0\%$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$A_2 = \pi \times ((R_2)^2 - (R_1)^2) = 155.16 \text{ m}^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 2} = 9.7\%$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$A_3 = \pi \times ((R_3)^2 - (R_2)^2) = 245.67 \text{ m}^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 3} = 15.3\%$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$A_4 = \pi \times ((R_4)^2 - (R_3)^2) = 1\,043.63 \text{ m}^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 4} = 65.0\%$$

- Taxa de Símbolos da Rede:

A taxa de símbolos total da rede é dada pela seguinte equação:

$$[12] \quad R_{st} = \frac{B_t}{B_c} \times R_S$$

Assim aplicando tanto os valores presentes Tabela de parâmetros, como outros valores calculados anteriormente, obtém-se:

$$R_{st} = \frac{200 \times 10^6}{8 \times 10^6} \times 0.4 \times 10^7 = 10^8 \text{ sps}$$

Para obter os valores da taxa de símbolos para cada uma das zonas recorre-se a seguinte equação:

$$[13] \quad R_{st,zona} = R_{st} \times R_c$$

Assim, aplicando os valores tabelados:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$R_{st1} = 10^8 \times \frac{7}{8} = 88 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$R_{st2} = 10^8 \times \frac{5}{6} = 83 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$R_{st3} = 10^8 \times \frac{3}{4} = 75 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$R_{st4} = 10^8 \times \frac{1}{2} = 50 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Taxa de símbolos e Ritmo Binário por setor por Zona:

A taxa de símbolos por setor para cada zona, é calculado tendo em conta o número de UEs por setor (K), a percentagem da área total correspondente á zona em questão (A_{zona}/A_T) e a taxa de símbolos da respetiva zona.

Portanto, A taxa de símbolos por setor por zona é dada pela seguinte equação:

$$[14] \quad R_{sc,zona} = R_{st,zona} \times K \times (A_{zona}/A_T)$$

Assim, aplicando os valores tabelados e calculados:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$R_{sc1} = 88 \times 10^6 \times 64 \times 0.1 = 560 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$R_{sc2} = 83 \times 10^6 \times 64 \times 0.097 = 516 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$R_{sc3} = 75 \times 10^6 \times 64 \times 0.153 = 735 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$R_{sc4} = 50 \times 10^6 \times 64 \times 0.65 = 2\,081 \times 10^6 \text{ sps}$$

O ritmo binário por setor por zona é obtido através da seguinte equação:

$$[15] \quad R_{bc,zona} = R_{sc,zona} \times \log_2 M$$

Assim, aplicando os valores tabelados e calculados:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$R_{bc1} = 560 \times 10^6 \times \log_2 256 = 4\,480 \text{ Mbps}$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$R_{bc2} = 516 \times 10^6 \times \log_2 64 = 3\,093.6 \text{ Mbps}$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$R_{bc3} = 735 \times 10^6 \times \log_2 16 = 2\,938.9 \text{ Mbps}$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$R_{bc4} = 2\,081 \times 10^6 \times \log_2 4 = 4\,161.6 \text{ Mbps}$$

Possuindo os valores do Ritmo binário de cada zona, podemos calcular o valor Ritmo binário Total por Setor:

$$[16] \quad R_{bc} = \sum_{i=1}^{zona} R_{bc,zona}$$

Assim, neste caso tendo apenas quatro zonas, podemos calcular o ritmo binário total por setor da seguinte forma:

$$R_{bc} = R_{bc1} + R_{bc2} + R_{bc3} + R_{bc4}$$

Aplicando os valores calculados anteriormente:

$$R_{bc} = 4\,480 + 3\,093.6 + 2\,938.9 + 4161.6 = 14\,674.2 \times 10^6 \text{ bps}$$

- Eficiência Espectral e Eficiência Espectral por UE:

A eficiência espectral é calculado recorrendo a seguinte equação:

$$[17] \quad \varepsilon = R_{bc}/B_t$$

Assim, aplicando tanto o valor tabelado como o calculado anteriormente:

$$\varepsilon = 14674.2 \times 10^6 / 200 \times 10^6 = 73.4 \text{ bps/Hz/setor}$$

O valor da eficiência espectral por EU é dado pela seguinte equação:

$$[18] \quad \varepsilon_K = \varepsilon / K$$

Aplicando os valores obtemos o seguinte resultado:

$$\varepsilon = 73.4 / 64 = 1.146 \text{ bps/Hz/utilizadors}$$

- Throughput:

Considerando que há 60 setores no cenário hipotético, 3 por cada uma das 20 BS, podemos calcular o valor do Throughput Total da seguinte forma:

$$[19] \quad \text{Throughput}_{Total} = \varepsilon \times N^{\circ} \text{ Setores} \times B_t$$

Assim, aplicando os valores tabelados e calculados anteriormente, obtemos:

$$\text{Throughput}_{Total} = 73.4 \times 60 \times 200 \times 10^6 = 880.4 \text{ Gbps}$$

No caso em que $M/K=18$:

- Cálculo da Potência do Ruído:

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

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

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

$$10 \log(P_n) = -174 + 83 + 8 = -83 \text{ dBm}$$

- Cálculo do Número de Bits e Ritmo Binário:

Para calcular o número de bits de uma dada modulação, foi utilizada a seguinte equação:

$$[2] \quad N_b = N_{\text{symb}} \times N_{\text{SC}} \times \log_2(M) \times R_C$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

○ Para 256 QAM:

$$N_{b,256\text{QAM}} = 56 \times 3300 \times \log_2 256 \times \frac{7}{8} = 1\,293\,600 \text{ bits}$$

○ Para 64 QAM:

$$N_{b,64\text{QAM}} = 56 \times 3300 \times \log_2 64 \times \frac{5}{6} = 924\,000 \text{ bits}$$

- Para 16 QAM:

$$N_{b,16QAM} = 56 \times 3300 \times \log_2 16 \times \frac{3}{4} = 554\,400 \text{ bits}$$

- Para 4 QAM:

$$N_{b,4QAM} = 56 \times 3300 \times \log_2 4 \times \frac{1}{2} = 184\,800 \text{ bits}$$

Para calcular o ritmo binário de uma dada modulação, foi utilizada a seguinte equação:

$$[3] \quad R_b = N_b \div T_s$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

- Para 256 QAM:

$$R_{b,256QAM} = 1\,293\,600 \div (1 \times 10^{-3}) = 1\,293.6 \text{ Mbps}$$

- Para 64 QAM:

$$R_{b,64QAM} = 924\,000 \div (1 \times 10^{-3}) = 924 \text{ Mbps}$$

- Para 16 QAM:

$$R_{b,16QAM} = 554\,400 \div (1 \times 10^{-3}) = 554.4 \text{ Mbps}$$

- Para 4 QAM:

$$R_{b,4QAM} = 184\,800 \div (1 \times 10^{-3}) = 184.8 \text{ Mbps}$$

- Cálculo da Relação Sinal-Ruído:

Para calcular a relação sinal-ruído, foi utilizada a seguinte equação:

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

Para tal é preciso primeiro calcular o valor de E_b/N_0 , ou seja, o valor da relação entre energia média por bit e a densidade espectral.

$$[5] \quad 10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 10 \log\left(\frac{E_{sc}}{N_0}\right) - 10 \log(R_c \times \log_2 M)$$

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de $10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$:

- Para 256 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 10.6 - 10 \log\left(\frac{7}{8} \times \log_2 256\right) = 2.1 \text{ dB}$$

- Para 64 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 5.9 - 10 \log\left(\frac{5}{6} \times \log_2 64\right) = -1.1 \text{ dB}$$

- Para 16 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 1.9 - 10 \log\left(\frac{3}{4} \times \log_2 16\right) = -2.9 \text{ dB}$$

- Para 4 QAM:

$$10 \log\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = -5.4 - 10 \log\left(\frac{1}{2} \times \log_2 4\right) = -5.4 \text{ dB}$$

Tendo os valores de $10 \log(E_b/N_0)$, podemos agora calcular o valor da relação sinal-ruído para cada uma das modulações:

- Para 256 QAM:

$$10 \log(SNR_{256QAM}) = 2.1 + 10 \log\left(\frac{1293.6}{200}\right) = 10.3 \text{ dB}$$

- Para 64 QAM:

$$10 \log(SNR_{64QAM}) = -1.1 + 10 \log\left(\frac{924}{200}\right) = 5.6 \text{ dB}$$

- Para 16 QAM:

$$10 \log(SNR_{16QAM}) = -2.9 + 10 \log\left(\frac{554.4}{200}\right) = 1.6 \text{ dB}$$

- Para 4 QAM:

$$10 \log(SNR_{4QAM}) = -5.4 + 10 \log\left(\frac{184.8}{200}\right) = -5.7 \text{ dB}$$

- Cálculo da Sensibilidade (Para a numerologia 2, $f_c=28$ GHz, $B_t=200$ MHz):
Para a sensibilidade, foi utilizada a seguinte equação:

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

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de $10 \log(S)$:

- Para 256 QAM:

$$10 \log(S_{256QAM}) = 10.3 - 83.0 = -72.7 \text{ dBm}$$

- Para 64 QAM:

$$10 \log(S_{64QAM}) = 5.6 - 83.0 = -77.4 \text{ dBm}$$

- Para 16 QAM:

$$10 \log(S_{16QAM}) = 1.6 - 83.0 = -81.4 \text{ dBm}$$

- Para 4 QAM:

$$10 \log(S_{4QAM}) = -5.7 - 83.0 = -88.7 \text{ dBm}$$

- Cálculo das Perdas de Percurso:

Os valores das perdas de percurso são calculados utilizando a seguinte equação:

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

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de perdas de percurso:

- Para 256 QAM:

$$L_{path,256QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-72.7) = 91.7 \text{ dBm}$$

- Para 64 QAM:

$$L_{path,64QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-77.4) = 96.4 \text{ dBm}$$

- Para 16 QAM:

$$L_{path,16QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-81.4) = 100.4 \text{ dBm}$$

- Para 4 QAM:

$$L_{path,4QAM} = 24 + 2 - 0 - 7 - (-88.7) = 107.7 \text{ dBm}$$

- Cálculo do Raio de Cobertura num cenário genérico, para cada zona:

O valor do raio de cobertura de uma dada zona é calculado recorrendo a seguinte equação:

$$[8] \quad L_{path} = 61.4 + 32 \log(d) \Rightarrow R = 10^{(L_{path}-61.4)/32}$$

Assim, para cada uma das modulações obtém-se os seguintes valores de raio de cobertura das suas respetivas zonas:

- Para 256 QAM:

$$R_1 = 10^{(L_{path,256QAM}-61.4)/32} = 10^{(91.7-61.4)/32} = 8.87 \text{ m}$$

- Para 64 QAM:

$$R_2 = 10^{(L_{path,64QAM}-61.4)/32} = 10^{(96.4-61.4)/32} = 12.44 \text{ m}$$

- Para 16 QAM:

$$R_3 = 10^{(L_{path,16QAM}-61.4)/32} = 10^{(100.4-61.4)/32} = 16.59 \text{ m}$$

- Para 4 QAM:

$$R_4 = 10^{(L_{path,4QAM}-61.4)/32} = 10^{(107.7-61.4)/32} = 28.05 \text{ m}$$

Analisar a capacidade do mMIMO deste cenário hipotético com M/K=18 (antenas/utente):

- Número máximo de símbolos para transmitidos no canal com mMIMO:

$$[9] \quad \tau_C = B_C \times T_C$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

$$\tau_C = 8 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3} = 200\,000 \text{ símbolos}$$

Assim, considerando que τ_P é equivalente ao número de utilizadores K=32. Temos que:

- No *Downlink* (DL) transmite-se em cada T_C , $N_S = 100\,000$ símbolos;
- No *Uplink* (UL) transmite-se em cada T_C , $N_S = 100\,000 - 32$ símbolos.

- A taxa de símbolos no *Downlink*:

Para calcular a taxa de símbolos no *Downlink* recorresse equação:

$$[10] \quad R_S = \frac{N_S}{T_C}$$

Aplicando os valores apresentado na Tabela de parâmetros obtém-se:

$$R_S = \frac{100\,000}{25 \times 10^{-3}} = 0.4 \times 10^7 \text{ sps em cada } B_C$$

- Área de Cobertura por Zona:

A área total de cobertura por setor é dado por:

$$[11] \quad A_T = \pi \times (R_4)^2 = 2471.50 \text{ m}^2$$

A percentagem de cobertura de cada zona é dada por A_{Zona}/A_T

Assim, as respetivas percentagens de cobertura e áreas de cada zona são as seguintes:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$A_1 = \pi \times (R_1)^2 = 247.15 \text{ m}^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 1} = 10.0\%$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$A_2 = \pi \times ((R_2)^2 - (R_1)^2) = 238.93 \text{ m}^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 2} = 9.7\%$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$A_3 = \pi \times ((R_3)^2 - (R_2)^2) = 378.31 \text{ m}^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 3} = 15.3\%$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$A_4 = \pi \times ((R_4)^2 - (R_3)^2) = 1\,607.11\,m^2$$

$$\text{Percentagem de Area de Cobertura da Zona 4} = 65.0\%$$

- Taxa de Símbolos da Rede:

A taxa de símbolos total da rede é dada pela seguinte equação:

$$[12] \quad R_{st} = \frac{B_t}{B_c} \times R_S$$

Assim aplicando tanto os valores presentes Tabela de parâmetros, como outros valores calculados anteriormente, obtém-se:

$$R_{st} = \frac{200 \times 10^6}{8 \times 10^6} \times 0.4 \times 10^7 = 10^8 \text{ sps}$$

Para obter os valores da taxa de símbolos para cada uma das zonas recorre-se a seguinte equação:

$$[13] \quad R_{st,zona} = R_{st} \times R_c$$

Assim, aplicando os valores tabelados:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$R_{st1} = 10^8 \times \frac{7}{8} = 88 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$R_{st2} = 10^8 \times \frac{5}{6} = 83 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$R_{st3} = 10^8 \times \frac{3}{4} = 75 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$R_{st4} = 10^8 \times \frac{1}{2} = 50 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Taxa de símbolos e Ritmo Binário por setor por Zona:

A taxa de símbolos por setor para cada zona, é calculado tendo em conta o número de UEs por setor (K), a percentagem da área total correspondente á zona em questão (A_{zona}/A_T) e a taxa de símbolos da respetiva zona.

Portanto, A taxa de símbolos por setor por zona é dada pela seguinte equação:

$$[14] \quad R_{sc,zona} = R_{st,zona} \times K \times (A_{zona}/A_T)$$

Assim, aplicando os valores tabelados e calculados:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$R_{sc1} = 88 \times 10^6 \times 32 \times 0.1 = 280 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$R_{sc2} = 83 \times 10^6 \times 32 \times 0.097 = 258 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$R_{sc3} = 75 \times 10^6 \times 32 \times 0.153 = 367 \times 10^6 \text{ sps}$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$R_{sc4} = 50 \times 10^6 \times 32 \times 0.65 = 1\,040 \times 10^6 \text{ sps}$$

O ritmo binário por setor por zona é obtido através da seguinte equação:

$$[15] \quad R_{bc,zona} = R_{sc,zona} \times \log_2 M$$

Assim, aplicando os valores tabelados e calculados:

- Para a Zona 1 (256 QAM):

$$R_{bc1} = 280 \times 10^6 \times \log_2 256 = 2\,240 \text{ Mbps}$$

- Para a Zona 2 (64 QAM):

$$R_{bc2} = 258 \times 10^6 \times \log_2 64 = 1\,546.8 \text{ Mbps}$$

- Para a Zona 3 (16 QAM):

$$R_{bc3} = 367 \times 10^6 \times \log_2 16 = 1\,469.5 \text{ Mbps}$$

- Para a Zona 4 (4 QAM):

$$R_{bc4} = 1040 \times 10^6 \times \log_2 4 = 2\,080.8 \text{ Mbps}$$

Possuindo os valores do Ritmo binário de cada zona, podemos calcular o valor Ritmo binário Total por Setor:

$$[16] \quad R_{bc} = \sum_{i=1}^{zona} R_{bc,zona}$$

Assim, neste caso tendo apenas quatro zonas, podemos calcular o ritmo binário total por setor da seguinte forma:

$$R_{bc} = R_{bc1} + R_{bc2} + R_{bc3} + R_{bc4}$$

Aplicando os valores calculados anteriormente:

$$R_{bc} = 2\,240 + 1\,546.8 + 1\,469.5 + 2\,080.8 = 7\,337.1 \times 10^6 \text{ bps}$$

- Eficiência Espectral e Eficiência Espectral por UE:

A eficiência espectral é calculado recorrendo a seguinte equação:

$$[17] \quad \varepsilon = R_{bc}/B_t$$

Assim, aplicando tanto o valor tabelado como o calculado anteriormente:

$$\varepsilon = 7\,337.1 \times 10^6 / 200 \times 10^6 = 36.7 \text{ bps/Hz/setor}$$

O valor da eficiência espectral por EU é dado pela seguinte equação:

$$[18] \quad \varepsilon_K = \varepsilon / K$$

Aplicando os valores obtemos o seguinte resultado:

$$\varepsilon = 36.7 / 32 = 1.146 \text{ bps/Hz/utilizadors}$$

- Throughput:

Considerando que há 60 setores no cenário hipotético, 3 por cada uma das 20 BS, podemos calcular o valor do Throughput Total da seguinte forma:

$$[19] \quad \text{Throughput}_{Total} = \varepsilon \times N^{\circ} \text{ Setores} \times B_t$$

Assim, aplicando os valores tabelados e calculados anteriormente, obtemos:

$$\text{Throughput}_{Total} = 36.7 \times 60 \times 200 \times 10^6 = 440.2 \text{ Gbps}$$

Para fazer uma comparação mais justa entre os dois casos, M/K=9 e M/K=18, é preciso considerar a área total onde se recebe os dados.

$$\frac{A_{T(M/K=18)}}{A_{T(M/K=9)}} = \frac{2\,471.50}{1\,604.95} = 1.54$$

A área total em M/K=18 é 1.54 vezes maior do que no caso M/K=9. Pelo que se deve multiplicar este valor do Throughput total inicialmente obtido no caso M/K=18:

$$Throughput_{Total,Justo} = Throughput_{Total} \times \frac{A_{T(M/K=18)}}{A_{T(M/K=9)}} = 677.9\, Gbps$$