

Avaliação de Cenários 5G



Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Avaliação de Cenários 5G

Elijah Malcolm Graça do Nascimento Vera Cruz

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,

ISCTE – Instituto Universitário de Lisboa

Setembro, 2018

Avaliação de Cenários 5G

Avaliação de Cenários 5G



Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Avaliação de Cenários 5G

Elijah Malcolm Graça do Nascimento Vera Cruz

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático,

ISCTE – Instituto Universitário de Lisboa

Setembro, 2018

Avaliação de Cenários 5G

Avaliação de Cenários 5G

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família:

Aos meus pais que me conceberam, a minha professora primaria que me ensinou as primeiras letras e números;

A minha irmã e o meu compadre por me incentivarem a não desistir do curso;

A minha companheira e filho pela paciência, compreensão, e por me darem conforto e coragem para realizar este projeto;

«À minha mãe (in memoriam)»

Agradecimentos

Para a realização desta dissertação de mestrado, contei com apoios e incentivos, sem os quais não seria possível a realização desta tese, ficarei sempre grato.

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Em segundo lugar a Universidade ISCTE-IUL, seu corpo docente, direção e administração pela oportunidade da realização do curso.

Quero também agradecer ao Professor Catedrático Américo Correia, pela sugestão do tema, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Agradeço aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Também agradeço à minha família que sempre me apoiou de forma motivadora.

Por fim, quero também agradecer a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Resumo

A procura de aplicações de multimédia e voz nas comunicações sem fio tem vindo a crescer imenso nos últimos anos. Além disso, há novas classes de aplicações tais como as comunicações entre móveis de banda larga (*eMBB*), as comunicações ultra fiáveis e de baixa latência (*URLLC*), as comunicações massivas entre máquinas (*mMTC*) e a internet das coisas (*IoT*) ganharam recentemente muito interesse dentro das redes de comunicação de rádio móvel da quinta geração (5G).

Nesta dissertação exploram-se alguns cenários de comunicações 5G. Analisam-se três cenários, um com ligações D2D *device-to-device*, outro com acesso assistido por *Drones* além do cenário comum das comunicações celulares como parte dos cenários 5G. As aplicações associadas incluem Automação industrial, Conetividade Automóvel e Comunicações Urbanas.

Tomando como base a tecnologia e a estrutura de rede celular *Long Term Evolution-Advanced* (LTE-A), nesta dissertação alterou-se o simulador de sistema celular existente para incluir os três cenários representativos da multi-conetividade da rede 5G. São apresentados os resultados obtidos em termos de *throughput* médio, distribuição do *throughput*, distribuição da relação sinal interferência, potência transmitida dos *Drones*, sua velocidade e altura.

Palavras-chaves:

Cenários 5G, Multi-conetividade, D2D, Acesso assistido por Drones, IoT.

Avaliação de Cenários 5G

Abstract

The demand for wireless access in voice and multimedia applications has increased tremendously. In addition to these, new application classes, such as enhanced mobile broadband (eMBB) communication, ultra-reliable low latency communications (URLLC), massive machine type communications (mMTC), and the Internet of Things (IoT), have gained significant interest recently for 5G wireless networks.

In this dissertation some 5G scenarios are explored. Three different scenarios, one with *device-to-device* (D2D) connections, another with Drone assisted communications beside the common mobile cellular network communications, as part of the 5G scenarios. The applications associated include industrial automation, automatic driving connection and urban area communications.

In this dissertation, it was taken as reference the structure of the cellular network with LTE-Advanced technology. The previous version of the cellular system level simulator was updated with two additional scenarios, the Drone based and D2D connections to achieve the multi-connectivity of 5G. The obtained results include average throughput, distribution of throughput, distribution of signal to interference plus noise ratio, Drone transmitted power its velocity and altitude.

Keywords:

5G Scenarios, Multiple Connectivity, Drone-assisted link, D2D link, IoT,5G

Avaliação de Cenários 5G

Índice

Dedicatória.....	vi
Agradecimentos.....	vii
Resumo.....	viii
Abstract.....	x
Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Software.....	xviii
Lista de acrónimos.....	xix
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Enquadramento.....	3
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Estrutura e contribuições da dissertação.....	6
Capítulo 2.....	8
2.1. Visão geral da Tecnologia LTE.....	8
2.2 Evoluções na Comunicação Móvel 4G.....	9
2.2.1 Arquitetura do 4G.....	9
2.2.2 Perspetivas Técnicas do 4G.....	10
2.3 Tecnologia 5G Principais Características.....	13
2.3.1 Visão preliminar da tecnologia 5G.....	13
2.3.3 Arquitetura de rede 5G.....	14
2.3.4 Requisitos Técnicos 5G.....	18
Capítulo 3.....	25
3.1 Visão Geral da Comunicação assistida por Drones.....	25
3.2 Comunicação por Drones Aplicações e Desafios.....	32
3.2.1 Aplicações de célula-Drone.....	32
3.2.2 Implementação e Otimização de Células Drone.....	35
Capítulo 4.....	43

Avaliação de Cenários 5G

4.1 Implementação em Java.....	43
4.1.1 Modelo do Sistema	44
4.2 Resultados das simulações	44
4.2.1 Cenário 1	46
4.2.2 Cenário 2	50
4.2.3 Cenário 3	53
4.2.4 Cenário 4	56
4.2.5 Cenário 5	59
4.2.6 Cenário 6	61
4.2.7 Cenário7	63
4.2.8 Cenário 8	65
Capítulo 5	69
Conclusões.....	69
5.1 Sumário dos Resultados	69
5.2 Trabalho Futuro	75
Bibliografia.....	77
Anexo A.....	82
Anexo B.....	85
B1 Cenário 9.....	85
B2 Cenário 10.....	87

Lista de Figuras

Figura 1- Tráfego móvel global por tipo de conexão.	2
Figura 2- Diversos cenários representativos da multi-conetividade 5G	4
Figura 3-Arquitetura 4G tendo em conta o QOS	10
Figura 4-Visões e domínios do 4G	11
Figura 5- Desenho da Arquitetura de rede 5G	14
Figura 6- Desenho da Arquitetura baseada em nuvem para 5G	18
Figura 7- Requisitos técnicos do 5G em três dimensões	20
Figura 8- 5G opera em bandas que rondam os 6GHz e acima dos 6GHz	21
Figura 9- Previsões de vendas para Drones entre 2013 e 2017	26
Figura 10- Fenómenos de interferência na banda ISM	29
Figura 11- Estrutura de um <i>Drone</i> , projetado para comunicação LTE	31
Figura 12- Exemplo de cenário de rede de células Drone multicamada	32
Figura 13- Redes de acesso de rádio assistidas por <i>Drone</i>	35
Figura 14- Modelo A2G de perdas de percurso (<i>pathloss</i>)	38
Figura 15- Exemplo de cenário com três possíveis colocações de célula <i>Drone</i>	40
Figura 16- Ilustração da topologia para os cenários 1 e 2.	47
Figura 17 - CDF de Geometria vs. SINR Max CI, 2 UEs por Drone no Cenário 1.	48
Figura 18 - CDF de Geometria vs. SINR Max CI, 10UEs por Drone no Cenário 1.	48
Figura 19 - Throughput médio Max CI, 2 UEs por Drone para o Cenário 1.	49
Figura 20 - Throughput médio Max CI, Drone 10 UEs para o Cenário 1.....	49
Figura 21 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs por Drone para o Cenário 1.....	50
Figura 22 - CDF de Throughput Max CI, Drone 10 UEs para o Cenário 1.	50
Figura 23 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, 2UEs para o Cenário 2.	51
Figura 24 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, 10 UEs para o Cenário 2.	51
Figura 25 - Média de Throughput Max CI 2 UEs para o Cenário 2.....	52
Figura 26 - Média de Throughput Max CI 10 UEs para o Cenário 2.....	52
Figura 27 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs para o Cenário 2.	52
Figura 28 - CDF de Throughput Max CI, 10 UEs para o Cenário 2.	52

Avaliação de Cenários 5G

Figura 29 - Ilustração da topologia para os cenários 3 e 4.	54
Figura 30 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, 2 UEs para o Cenário 3.	54
Figura 31 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, 10 UEs para o Cenário 3.	54
Figura 32 - Throughput médio Max CI, UE 2 para o Cenário 3.	55
Figura 33 - Throughput médio Max CI, UE 10 para o Cenário 3.	55
Figura 34 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs para o Cenário 3.	56
Figura 35 - CDF de Throughput Max CI 10 UEs para o Cenário 3.	56
Figura 36 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, 2 UEs Cenário 4.	57
Figura 37 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, 10 UEs Cenário 4.	57
Figura 38 - Throughput médio Max CI 2 UEs no Cenário 4.....	58
Figura 39 - Throughput médio Max CI 10 UEs no Cenário 3.....	58
Figura 40 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs, para o Cenário 4.	58
Figura 41- CDF de Throughput Max CI, 10 UEs, para o Cenário 4.	58
Figura 42 - CDF de Geometria vs. SINR, RR, P=30dBm para o Cenário 5.	59
Figura 43 - CDF de Geometria vs. SINR, RR, P=40dBm para o Cenário 5.	59
Figura 44 - Throughput médio vs. tempo, Round Robin P=1W para o Cenário 5.....	60
Figura 45 - Throughput médio vs. tempo, Round Robin P=10W para o Cenário 5.....	60
Figura 46 - CDF de Throughput, Round Robin P=1W, para o Cenário 5.....	61
Figura 47- CDF de Throughput, Round Robin, P=10W para o Cenário 5.....	61
Figura 48 - Throughput médio utilizando LDF, P=1W para o Cenário 6.	62
Figura 49 - Throughput médio utilizando LDF, P=10W para o Cenário 6.	62
Figura 50 - CDF de Throughput utilizando LDF, P=1W para o Cenário 6.....	63
Figura 51- CDF de Throughput LDF, P=10W para o Cenário 6.....	63
Figura 52 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, Pmin para o Cenário 7.....	64
Figura 53 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, Pmax para o Cenário 7.	64
Figura 54 - Média de Throughput Max CI, Pmin para o Cenário 7.	65
Figura 55 - Média de Throughput Max CI, Pmax para o Cenário 7.	65
Figura 56 - CDF de Throughput, Max CI, Pmin, para o Cenário 7.....	65
Figura 57 - CDF de Throughput, Max CI, Pmax, para o Cenário 7.....	65
Figura 58 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, Pmin para o Cenário 8.....	66
Figura 59 - CDF de Geometria vs. SINR, Max CI, Pmax para o Cenário 8.	66
Figura 60 - Média de Throughput, Max CI, Pmin para o Cenário 8.	67

Avaliação de Cenários 5G

Figura 61 - Média de Throughput, Max CI, Pmax para o Cenário 8.	67
Figura 62 - CDF de Throughput Max CI, Pmin para o Cenário 10.....	68
Figura 63 - CDF de Throughput Max CI, Pmax para o Cenário 10.....	68
Figura 64 - Topologias de comunicação do D2D	82
Figura 65 - CDF de Geometria vs. SINR com Round Robin, Pmin para o Cenário 9... 85	
Figura 66 - CDF de Geometria vs. SINR com Round Robin Pmax para o Cenário 9. .. 85	
Figura 67 - Throughput médio, Round Robin, Pmin, para o Cenário 9.....	86
Figura 68 - Throughput médio, Round Robin, Pmax, para o Cenário 9.	86
Figura 69 - CDF de Throughput utilizando Round Robin Pmin para o Cenário 9.	86
Figura 70- CDF de Throughput utilizando Round Robin Pmax para o Cenário 9.....	86
Figura 71 - CDF de Geometria vs. SINR com LDF, Pmin para o Cenário 10.....	87
Figura 72 - CDF de Geometria vs. SINR com LDF, Pmax para o Cenário 10.	87
Figura 73 - Throughput médio com LDF, Pmin para o Cenário 10.....	88
Figura 74 - Throughput médio com LDF, Pmax para o Cenário 10.	88
Figura 75 - CDF de Throughput com LDF, Pmin, para o Cenário 10.	88
Figura 76- CDF de Throughput LDF, Pmax, para o Cenário 10.....	88

Lista de Tabelas

Tabela 1- Categorização de Células 5G .	16
Tabela 2- Exemplo de requisitos técnicos para a rede 5G	19
Tabela 3- Aumento no número de dispositivos WLAN de 2.4 GHz	28
Tabela 4- Aumento no número de dispositivos WLAN de 5 GHz em 2016	29
Tabela 5- Dados de velocidade de <i>upload</i> e <i>download</i> LTE do SP na Hungria	30
Tabela 6- Teste de células Drone tendo em conta os diversos cenários	33
Tabela 7- Parâmetros de simulação para o cenário 1.	47
Tabela 8 - Parâmetros de simulação para o cenário 2.	50
Tabela 9 - Parâmetros de simulação para o cenário 3.	53
Tabela 10 - Parâmetros de simulação para o cenário 4.	57
Tabela 11 - Parâmetros de simulação para o cenário 5.	59
Tabela 12 - Parâmetros de simulação para o cenário 6.	62
Tabela 15 - Parâmetros de simulação para o cenário 9.	64
Tabela 16 - Parâmetros de simulação para o cenário 8.	66
Tabela 15- Parâmetros de simulação para o cenário 9.	85
Tabela 16 - Parâmetros de simulação para o cenário 10.	87

Lista de Software

Eclipse	Ambiente de Desenvolvimento Integrado a Java
JAVA	Linguagem de programação
MATLAB	Ferramenta computacional de simulação e matemática
Microsoft Excel	Ferramenta de cálculo
Microsoft Word	Editor de texto

Lista de acrónimos

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
3D	Three-Dimensional
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
AMPS	Analog Mobile Phone Service
AI	Artificial Intelligent
BBU	Baseband Processing Units
BDMA	Beam Division Multiplex Access
BS	Base Station
CAPEX	Capital expenditure
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
C-RAN	Cloud-RAN
CH	Coverage Holes
CoMP	Coordinated Multi-Point Transmission and Reception
CQI	Channel Quality Indicator
CRNs	Cognitive Radio Networks
CSI	Channel State Information
CUs	Cellular Users
DA	Demanding Area
DA-RAN	Drone Assisted Radio Access Networks
D2D	Device-to-Device
DL	Download
DSL	Digital Subscriber Line
DPSK	Differential Phase Shift Keying

Avaliação de Cenários 5G

DVB	Digital Video Broadcasting
EDGE	Enhanced Data Rate for GSM Evolution
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications standards Institute
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
EVDO	Evolution-Data Optimized
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
FBMC	Filter Bank Multi Carrier
FDM	Frequency Division Multiplexing
FH-CDMA	Frequency Hopping - Code-Division Multiple Access
GA	Genetic Algorithm
GIS	Geographical Information System
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
HetNet	Heterogeneous Networks
HSDPA	High Speed Data Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Up
IMT	International Mobile Communications
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITS	Intelligent Transportation Systems
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Recommendation
IoT	Internet-of-Things
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol Version 6

IPTV	Internet Protocol Television
ISM	Industrial Scientific and Medical
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LDF	Largest Delay First
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
LTE	Long Term Evolution
LoS	Line-of-Sight
MAC	Media Access Control
M2M	Machine-to-Machine
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MM-Wave	Millimeter Wave
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service
MS	Mobile Station
MTC	Machine Type Communication
mMTC	Massive MTC
mcMTC	Mission-Critical MTC
NDA	Number of Demanding Area
NGNs	Next Generation Networks
NFC	Near Field Communication
NGNs	Next Generation Networks
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NFV	Network Functions Virtualization
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
PSO	Particle Swarm Optimization
ProSe	Proximity Services
PWM	Pulse-Width Modulated
PSTN	Public switched telephone network
QoE	Quality of Experience

Avaliação de Cenários 5G

QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Networks
RATs	Radio Access Technology
RBs	Resource Bocks
RF	Radio Frequency
RN	Radio Network
RRH	Remote Radio Head
RSSI	Receive Signal Strength Indicators
RSU	Roadside Unit
Rx	Receiver
SC-FDMA	Single Carrier Frequency-Division Multiple Access
SDN	Software Defined Networking
SINR	Signal-to-Interference Plus-Noise Ratio
SIP	Session Initiation Protocol
SC-FDMA	Single Carrier Frequency-Division Multiple Access
SON	Self-Organizing Networks
SRD	Short-Range Radio Devices
SISO	Single Input Single Output
SMS	Short Message Service
TBS	Traffic Burst Spots
TTI	Transmission Time Interval
Tx	Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UE	User Equipment
U2D	User-to-Drone
UFMC	Universal Filtered Multi-Carrier
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UL	Uplink
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
UWB	Ultra-Wide Bandwidth
VHF	Very High Frequency
VLC	Visible Light Communication

Avaliação de Cenários 5G

VOIP	Voice Over Internet Protocol
WAN	Wide Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WNV	Wireless Network Virtualization
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPA2	Wi-Fi Protected Access II

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo faz uma pequena introdução da dissertação, onde é apresentada a motivação, enquadramento e os objetivos da dissertação, bem como algumas questões relevantes da investigação, seguidamente descreve-se a estrutura da dissertação.

1.1 Motivação

Atualmente, diferentes vendedores, operadores e programas de investigação dedicam-se ao desenvolvimento de novas tecnologias de acesso via rádio para garantir o exponencial aumento de tráfego de dados móvel que se observa e se espera continuar a crescer dessa forma colossal nos próximos anos. A capacidade do nível físico necessita de ser incrementada, usando MIMO ¹ massivo, maior largura de banda disponível nas ondas milimétricas de rádio e aumento da densidade da topologia da rede celular.

Faz-se o desvio do processamento de sinal de banda de base das extremidades da rede ultra densa atual para uma localização central onde a gestão de recursos coordenados é desenvolvida [1].

Por outro lado, na indústria do IoT², os serviços de mMTC ³ têm potencial para criar negócios muito rentáveis, onde se incluem, os sistemas de transporte inteligentes, o controlo inteligente de energia, os serviços de segurança públicos e outras aplicações [2].

¹ *Multiple-Input and Multiple-Output*, é um método de transmissão para sistemas de comunicação sem fio.

² *The Internet of things*, rede de objetos físicos, veículos, prédios e outros sistemas embebidos, dotados de sensores, com ligação à rede capaz de coletar e transmitir dados.

³ *Mission-critical Machine-Type Communication*, Serviços com requisitos específicos, tais como: baixo consumo de energia, alta fiabilidade e baixa latência da conectividade.

Avaliação de Cenários 5G

Consequentemente nas redes sem fio 5G⁴, os serviços mMTC impõem uma gama ampla de requisitos nas tecnologias que o suportam, tais como, baixo consumo de energia, alta fiabilidade e baixa latência da conectividade. A norma LTE⁵ tem sido melhorada recentemente com vista a incorporar uma cobertura ampla de baixo custo, latência reduzida e alta mobilidade para os dispositivos com diferentes níveis de mobilidade.

Neste contexto, pretende-se discutir os potenciais ganhos da introdução das comunicações D2D e das comunicações assistidas por Drones na conectividade 5G [3].

No que diz respeito ao impacto no tráfego, a conectividade 5G com a sua largura de banda muito alta (100 MHz) e latência ultrabaixa (1 milissegundo) deve gerar volumes de tráfego muito altos, como nos é mostrada na figura 1 em que se ilustra o tráfego móvel global, tendo em conta o tipo de conexão [4].

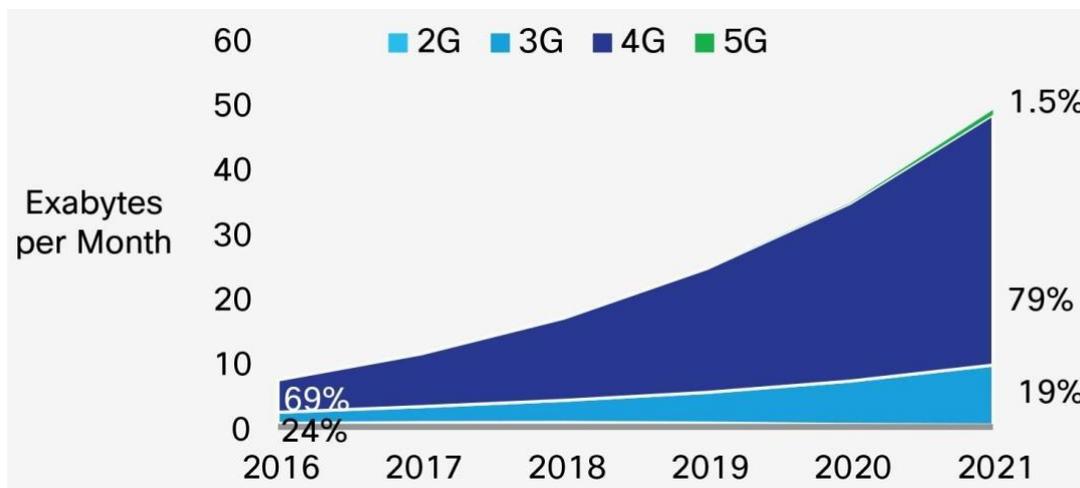


Figura 1- Tráfego móvel global por tipo de conexão[4].

⁴ *5th Generation Wireless Systems*, Quinta Geração de sistemas sem fio, representa a futura geração de telecomunicações móvel.

⁵ *Long Term Evolution*, Padrão de redes de comunicação móvel que sendo a tecnologia de base da quarta geração (4G), é compatível com anteriores tecnologias, GSM, W-CDMA e HSPA e também CDMA.

Avaliação de Cenários 5G

De acordo com este relatório [4], até 2021 o 5G será responsável por 1,5% do tráfego móvel global e o 2G será responsável por apenas 0,6%.

Face a esta questão, de forma a atender aos requisitos das aplicações mMTC em diversos cenários. propôs-se a disponibilização de alternativas de conectividade, tais como: D2D, e acesso assistido por Drones, contribuindo assim para satisfazer aos requisitos de aplicações mMTC em diversos cenários de multi-conetividade em rede 5G.

1.2 Enquadramento

A Transformação Digital tem sido um ponto crítico, onde várias indústrias têm vindo a fazer alterações que transformam substancialmente o estilo de vida e o quotidiano da sociedade atual. Essas mudanças têm sido o motor de avanços na indústria, transportes, economia, nas instituições governamentais, e em muitos outros setores. A inovação nas tecnologias e infraestruturas de banda larga móvel, tem vindo a ser a principal força motriz seguida da digitalização de todas as esferas da vida.

A norma LTE tem sido melhorada recentemente com vista a incorporar uma cobertura ampla de baixo custo, latência reduzida e alta mobilidade para os dispositivos com diferentes níveis de mobilidade.

Surge a necessidade de examinar os efeitos de utentes heterogéneos com diferente mobilidade de dispositivos no desempenho da mMTC, escolhendo cenários representativos dentro da multi-conetividade 5G. Cenários com ligações D2D “device-to-device” e acesso assistido por Drones fazem parte dos cenários 5G onde se incluem automação industrial, conectividade automóvel e comunicações urbanas, como podemos verificar na figura 2 nos cenários A, B, e C [3].

Avaliação de Cenários 5G

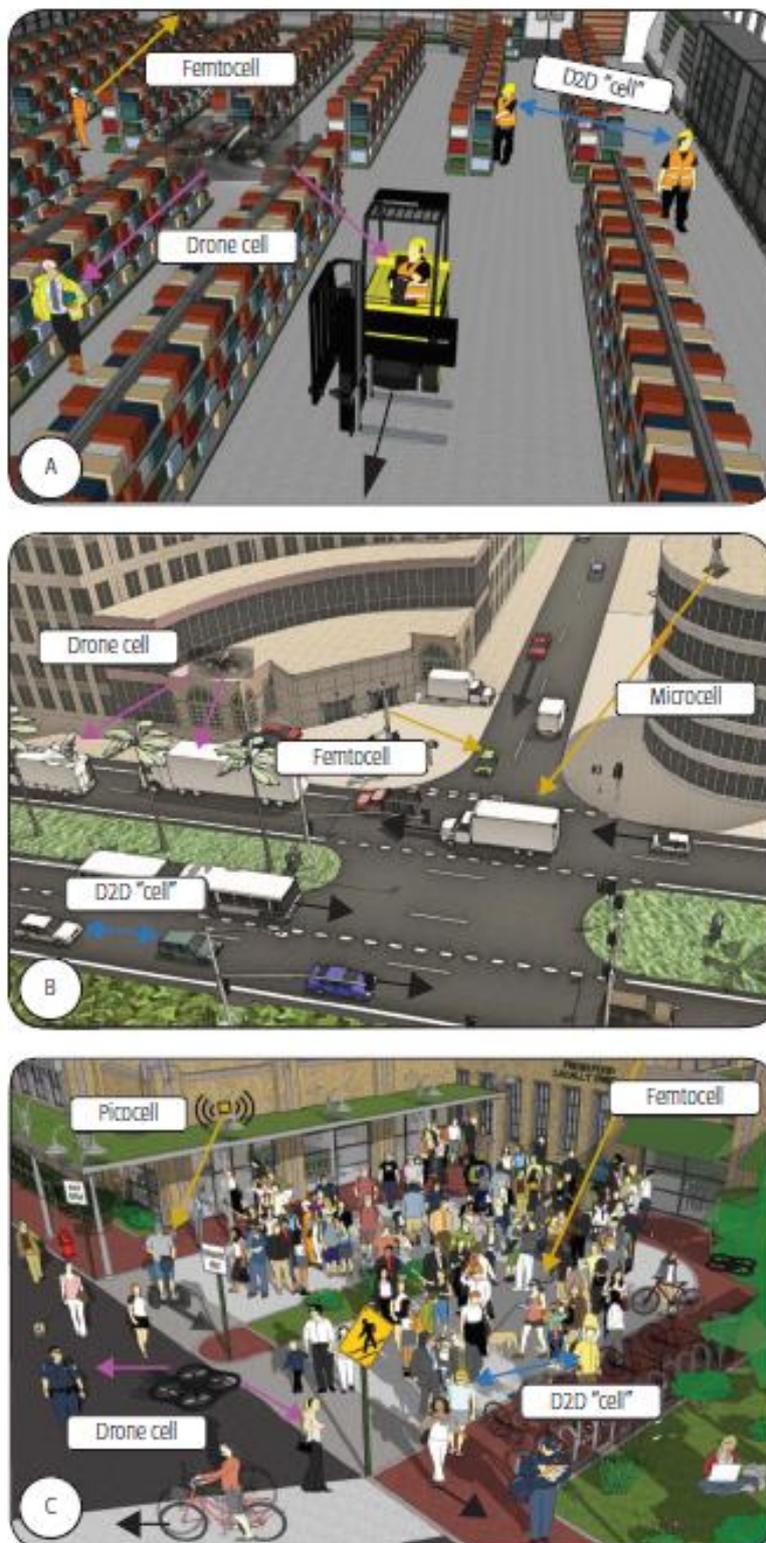


Figura 2- Diversos cenários representativos da multi-conetividade 5G [3].

O caso A representa o cenário de **Automação Industrial**: onde nos é mostrado o conceito de fábricas do futuro que será algo do tipo “ilhas de conectividade” *connectivity islands*,

ou melhor, nota-se uma tendência para a conectividade como parte integrante de um amplo ecossistema industrial.

O caso B representa o cenário de **Conectividade Veicular**, em que os veículos em estudo, envolvem-se em trocas de dados entre os mesmos permitindo assim a conectividade entre veículos:

O caso C representa o cenário de **Comunicações Urbanas**, expondo algumas situações práticas em que um número amplo de utilizadores móveis finais, normalmente dispõem de diversos dispositivos versáteis, que habitualmente estão saturados e emparelhados em locais tais como: estádios, centros comerciais, festivais ao ar livre e outras áreas.

1.3 Objetivos

Com o rápido desenvolvimento da 5G, um número crescente de novas aplicações e modelos de negócio irão remodelar a formação social e económica. Deste modo, o objetivo desta dissertação é examinar e avaliar cenários de multi-conetividade 5G, tendo por base os cenários com ligações D2D, acesso assistido por Drone, além das ligações celulares. Na avaliação dos cenários, teremos em conta os seguintes cenários: automação industrial, conectividade automóvel e comunicações urbanas.

Em termos práticos, desenvolver-se-ão rotinas que irão permitir a análise de cenários com ligações D2D e acesso assistido por Drones, como parte integrante dos cenários 5G. Dentro da estrutura de rede celular LTE-A, baseando-se nos simuladores já existentes e já desenvolvidos anteriormente, nomeadamente, simulador de sistema em JAVA e simulador de ligação em MatLab.

No final desta dissertação pretende-se obter as respostas para as seguintes questões:

- Num cenário de multi-conetividade 5G os terminais irão ter ritmos binários mais elevados e atrasos mais baixos?
- Os resultados obtidos por simulação confirmaram o que se esperava?

- Qual é o potencial ganho de uma ligação assistida por Drone face à ligação D2D e às do tipo celular?

1.4 Estrutura e contribuições da dissertação

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo consiste na introdução ao que é proposto na mesma. O segundo capítulo ocupa-se da contextualização bem como do estado da arte. O terceiro capítulo evidencia os principais aspetos da comunicação assistida por Drones. No quarto capítulo é descrito pormenorizadamente os três cenários 5G em análise, assim como os resultados da avaliação dos mesmos. Finalmente, no quinto capítulo expõe-se as conclusões do estudo efetuado nesta dissertação.

A principal contribuição desta dissertação é o desenvolvimento em software JAVA, do cenário de simulação das comunicações móveis assistidas por Drone. Para tal, foi necessário fazer a sua integração dentro dos outros cenários já existentes no simulador de sistema, nomeadamente, comunicações D2D e comunicações celulares.

Avaliação de Cenários 5G

Capítulo 2

Evolução para a Tecnologia 5G

Neste capítulo apresenta-se a evolução das tecnologias de comunicações móveis sem fios, da quarta geração e de seguida contextualiza-se o estado da arte da tecnologia da quinta geração, dando ênfase às expectativas, principais características, inovações, e melhorias em comparação com a tecnologia anterior.

2.1. Visão geral da Tecnologia LTE

Principais Características da Quarta Geração (4G)

4G é a quarta geração da tecnologia de rádio móvel celular, é o sucessor da 3G e o predecessor da 5G. O *International Mobile Telecommunications Advanced Standard* (IMT-Advanced), é um conjunto de requisitos definidos pela [ITU-R \(International Telecommunication Union\)](#) Radio (ITU-R) em 2008, que definem o que deve ser considerado como sistema de 4ª geração (4G). Eis o mais importante desses requisitos básicos:

- Interfaces de rádio com taxa de transmissão de dados binários de 1Gbps para comunicação de baixa mobilidade e 100 Mbps para alta mobilidade de comunicação.

Para serviços de comunicação móvel de alta qualidade, a tecnologia 4G permite facilidades de *world wide web* (www) no serviço de *Roaming* o que a torna um grande sucesso. O exemplo mais importante da Rede 4G é a equipada com interface de rádio IMT-Advanced e com tecnologia *Long Term Evaluation-Advanced* (LTE-Advanced). [5].

Desde 6 de dezembro de 2010 tem sido utilizado pela indústria a rede LTE-Advanced, que é uma rede de alta velocidade para dispositivos móveis, com diferentes tecnologias, *Internet Protocol address* (IP), *HD-Mobile TV*⁶, Vídeo Conferência, computação na nuvem e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing/ Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDM/OFDMA) do LTE.

⁶ *High-definition Mobile television* é uma televisão suportada por um pequeno dispositivo portátil ou móvel, mas que suporta formato de vídeo de Alta definição.

A rede LTE é compatível e usa as seguintes tecnologias de rede:

Global System for Mobile Communications (GSM) / Enhanced data Rates for GSM (EDGE) e *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) / High Speed Packet Access (HSPA)*. Deste modo, consegue aumentar a sua capacidade e a sua velocidade pelo facto de usar um conjunto de diversas tecnologias de rádio. 4G garante o mínimo de 100 Mbps de taxa de cobertura numa área ampla (*wide área*) com qualquer mobilidade e o máximo de 1Gbps numa cobertura de área local de baixa mobilidade.

A velocidade de base da 3G ronda é 2Mbps, sendo por isso, muito mais lento que as velocidades do 4G. A rede de acesso por rádio é um dos componentes da Rede LTE *Advanced* que permite alcançar altas taxas de capacidade [6].

O LTE usa a tecnologia OFDM/OFDMA na ligação descendente. Assim sendo, introduziu-se uma rede plana que diminui a quantidade de interface e dos elementos da rede o que também reduz a quantidade de atraso na rede. Por outro lado, também usa a tecnologia *Multiple Input and Multiple Output (MIMO)*, múltiplas antenas na emissão e na receção.

O MIMO é uma tecnologia chave para aumentar os débitos binários e também é usado por outras tecnologias como WiMax e Wi-Fi - 802.11n. A agregação de portadoras *Carrier Aggregation (CA)* é outro dos elementos chaves para aumentar o ritmo binário. Para aqueles operadores que não têm espectro contínuo adequado para fornecer elevadas larguras de banda necessárias para obter as altas taxas de dados, é necessário desenvolver a CA para que com mais bandas de frequência se forneça a largura de banda necessária (máximo de 100MHz).

O LTE Relaying é um esquema que permite aos sinais transmitidos de uma *Base Station (BS)* o encaminhamento por estações remotas (*Relays*) melhorar a área de cobertura dos sinais.

2.2 Evoluções na Comunicação Móvel 4G

2.2.1 Arquitetura do 4G

No 4G a segurança e a mobilidade é dividida entre três elementos da rede que são:

Core Network (CN), *Access Network (AN)* e *QOS Broker*, no entanto, todos os três estão relacionados uns aos outros no processamento e fluxo entre rede e CN.

O *QOS Broker* gere recursos, controla o fluxo de pacotes de forma a equilibrar a carga dos utilizadores, para além disso também gere recursos da rede principal como a comunicação com outros domínios administrativos.

O AN fornece serviços QOS como *Service Provisions platform* (SPP) na rede principal, as Sessões Multimédia (Imagens, Áudio, Vídeo) são geridas pela Proxy, como se mostra na figura 3 [5].

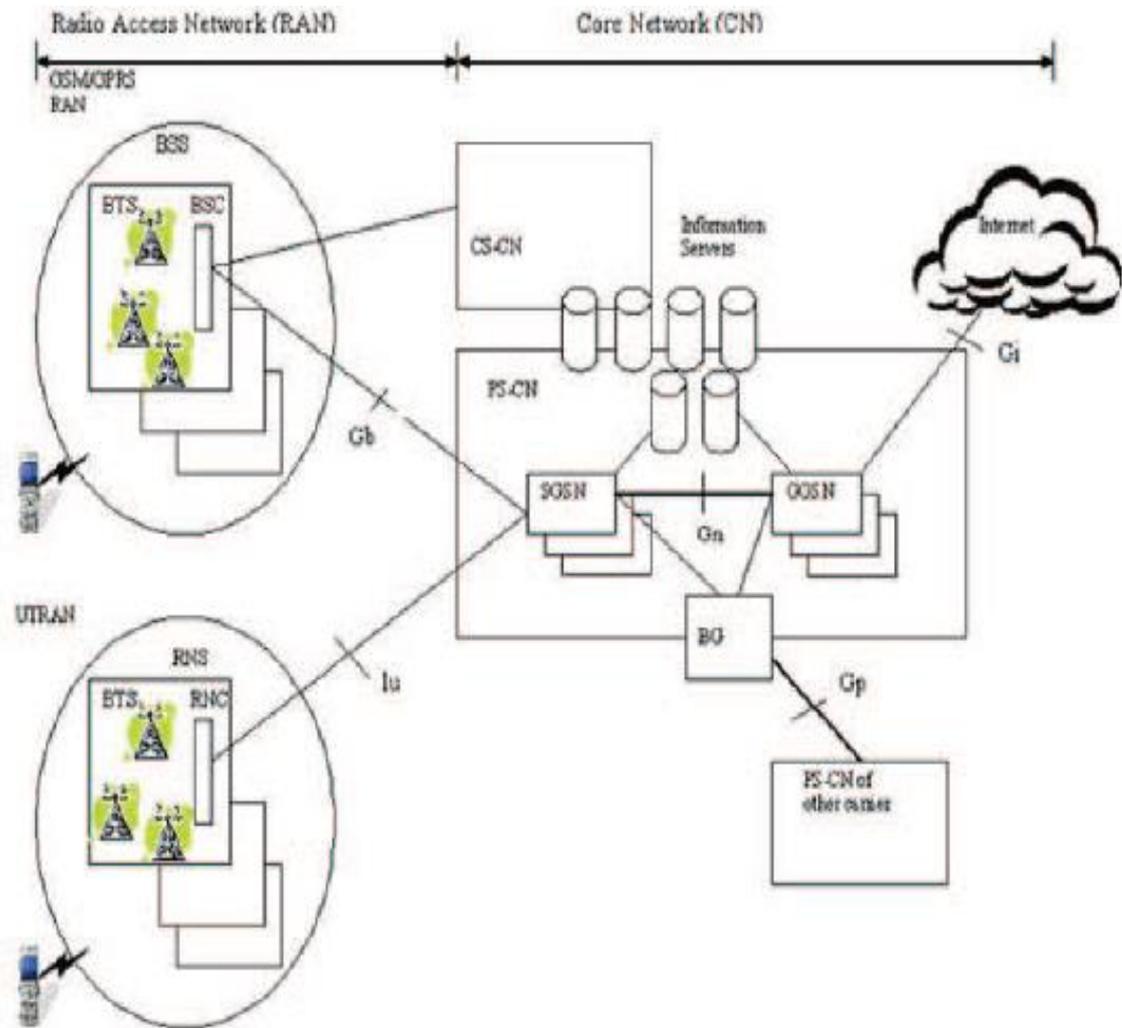


Figura 3-Arquitetura 4G tendo em conta o QOS [5].

2.2.2 Perspetivas Técnicas do 4G

A tecnologia 4G concentra-se principalmente nas técnicas de suporte à principal característica da adaptabilidade e diversidade interna de alvos 4G. Tal como as gerações anteriores, o 4G é impulsionado não só pela tecnologia, mas também pelos requisitos do mercado, bem como algumas questões de investigação e tecnologias promissoras como podemos verificar na figura 4 [7].

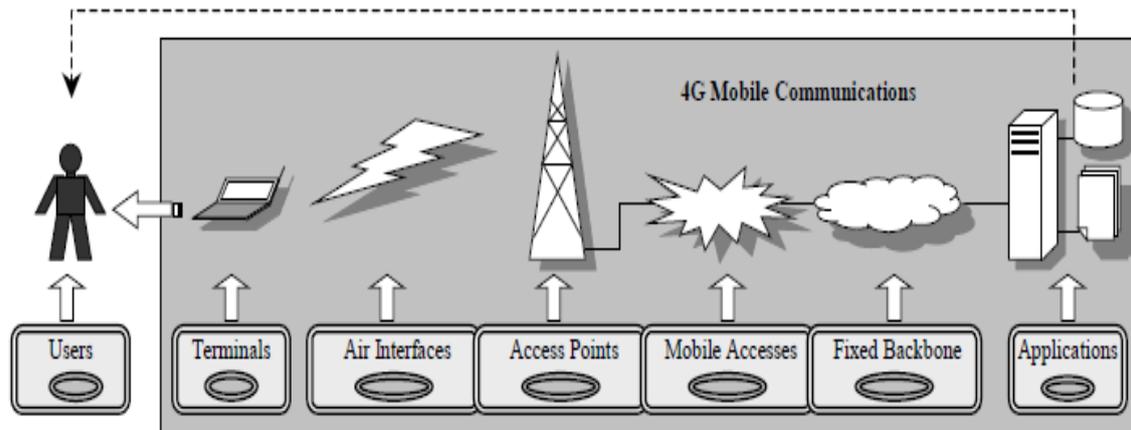


Figura 4-Visões e domínios do 4G[7]

A. Terminais

Para se adaptar às diversas aplicações e redes, e tendo em conta os vários requisitos de utilizadores, o terminal do domínio deve possuir diversidade interna e externa, podendo incluir as seguintes técnicas de suporte:

- 1). As interfaces de utilizador dos terminais variam desde teclado tradicional, monitor e tablet, para novas interfaces baseadas em fala, toque, visão, botões suaves, etc.
- 2) Técnicas adaptáveis, como antenas inteligentes, software rádio e transceptores inteligentes, melhorando assim a interoperabilidade através do suporte simultâneo de várias interfaces de rádio em terminal único, útil para roaming e BSs inteligentes avançadas.
- 3). Os terminais estarão cientes da localização e contexto, muitas vezes com base em alguns sensores sem fio de baixa potência que permitem a monitorização e interação com o mundo físico.
- 4). Um terminal inteligente é capaz de melhorar dinamicamente a sua capacidade de processamento, a fim de suportar vários serviços, sendo que algumas funcionalidades podem ser adaptadas ao terminal quando necessárias.

B. Redes

Os avanços nas redes são necessários devido ao aumento exponencial de terminais e das aplicações que mudam de forma dinâmica. Eis alguns tópicos associados:

- 1) **Smart antenna (antena inteligente)**, software de rádio, juntamente com BSs avançadas são as principais técnicas para alcançar a adaptabilidade de *access points*(AP) sem fios a diversos terminais, ou seja, construção de sistemas e redes de interfaces de rádio reconfiguráveis.

2) Rede Hierárquica, devida à sobreposição de sistemas celulares, incluindo pico célula, micro célula e macro célula, implementam a interconexão de rede contínua tanto de natureza simétrica e assimétrica como terminal de níveis horizontal e vertical.

3) Network layer (Camada de Rede) Gestão de mobilidade hierárquica de camada de rede com base em *Mobile IPv6* (IPv6 Móvel) e celular IP, trazendo rapidez e facilidade ao encaminhamento dos terminais, o IPv6 Móvel também apresenta uma ótima contribuição para a adaptabilidade de redes heterogêneas.

4) redes sem fio Ad hoc (Redes sem nó) redes sem fio auto implantada para tornar as redes portáteis e adaptáveis, compartilhando dinamicamente o espectro de rádio não licenciado [7].

5) A reconfiguração da rede pode ser obtida pelo reconfiguração de pilhas de protocolos e programação de nós da rede, pode adaptar-se dinamicamente a alteração das condições do canal e aos utilizadores com baixa ou alta taxa de dados.

6) Serviços diversos podem ser entregues através de mistura de redes de transmissão incluindo *unicast*⁷, *multicast*⁸ e *broadcast*⁹, consoante o tipo de serviço. Por exemplo, atributo em tempo real, importância, demanda de largura de banda ou tipo de fluxo de dados, vários níveis de *Quality of service* (QoS) podem ser definidos por vários serviços.

7) Os recursos de rede podem ser alocados dinamicamente para lidar com carga de tráfego variável, condição de canal e serviço dependente do meio ambiente. As condições de tráfego serão dinamicamente monitoradas e controladas por meio de técnicas como é o controle descentralizado de funcionalidades de rede [7].

C. Aplicações

A adaptabilidade é um dos requisitos básicos para o desenvolvimento de novos serviços móveis como iremos analisar de seguida:

1) A aplicação para dispositivos móveis deve se referir ao perfil do utilizador que pode ser entregue da forma preferida pelo subscritor, como serviços personalizados baseados em contexto, trazendo as aplicações com adaptabilidade aos terminais que se movem em locais e velocidades diversas, onde se destacam micro sensores e recetores GPS.

2) Técnicas como multimédia adaptativa e mensagens consoante as características do terminal de forma a garantir que o serviço possa ser recebido e executado num terminal adequado ao tipo de tráfego.

⁷ *Unicast* é um endereçamento para um pacote através de um único destino.

⁸ *Multicast* é Transmissão de informação para múltiplos destinatários simultaneamente.

⁹ *Broadcast* é um método de transferência de mensagem para todos os recetores simultaneamente.

- 3) Agente de software móvel inteligente é uma técnica com três alvos, que funciona como uma plataforma para desenvolvimento de serviço, encaminhamento e configuração automática.
- 4) Aplicações capazes de ajustar as redes de suporte a transferência de pacotes optando pelo canal mais eficiente.
- 5) Serviços e Aplicações também podem ser diretamente entregues num domínio múltiplo de operadores e fornecedores de serviços.

2.3 Tecnologia 5G Principais Características

2.3.1 Visão preliminar da tecnologia 5G

No século XXI, as redes de dados com elevadas taxas de débitos são alcançadas através de uma grande evolução em todos os domínios possíveis tais como na variedade de serviços, de equipamentos, de possibilidades etc. Mas esta enorme e diversificada oferta também traz enormes desafios, tais como a gestão de energia. Face a esta questão surge um novo conceito de aplicações, ou seja, a possibilidade do uso de apenas um dispositivo universal que visa interconectar-se através de infraestruturas de comunicação já existentes.

Cognitive Radio (CR) e 5G são consideradas as tecnologias futuras, possibilitando o aumento significativo da eficiência de espectro, por parte dos utilizadores inteligentes e secundários através do uso de buracos do espectro para utilizadores licenciados gratuitamente [8].

Tecnologia CR e redes integradas fornecem o uso eficiente de espectro de rádio, sendo um recurso natural e adaptado ao serviços dirigidos ao utilizador, a taxa de dados para a tecnologia 5G é acima de 1Gbps, considerando-se assim um sistema inovador [9] [10], onde existem buracos no espectro através da qual blocos de sinais são transmitidos.

No 5G, as chamadas são conectadas e controlados por software e hardware, ou seja, software no âmbito da computação em nuvem, hardware, bem como correspondência para sistemas de interface de rede através do endereço IP [9] [10].

Na ocupação do espectro o sistema monitoriza continuamente o sistema CR que usa o espectro sem interferência de base para o utilizador, quando o utilizador principal retorna o espectro o sistema CR deve ter um espectro alternativo disponível para que ele possa alternar entre ele e o utilizador.

O CR deve ter conhecimento do tipo de transmissão usada pelos utilizadores para que a interferência possa ser ignorada [11].

A taxa máxima de dados a suportar em 5G é de até 20 Gbps, as principais características das redes móveis 5G é que o utilizador pode se conectar simultaneamente e através de várias tecnologias sem fio e pode alternar entre eles, e deve ser suportada pelo IPv6.

2.3.3 Arquitetura de rede 5G

As tecnologias 5G têm uma capacidade extraordinária para suporte e consultoria de software, fornece alta conectividade, uma vez que utiliza tecnologia de router e computadores. A tecnologia 5G tem um crescente recurso, caracterizado pela conexão global (WWW) [5].

Através da mobilidade total, compatibilidade e acessibilidade entre as aplicações, interativas e que suportam a *Artificial Intelligent (AI)*, e tendo especial atenção ao benefício da saúde humana, e são caracterizados pelos seguintes conceitos: Nanotecnologia, computação em nuvem, toda a plataforma sobre IP, tal como vemos na figura 5 [5].

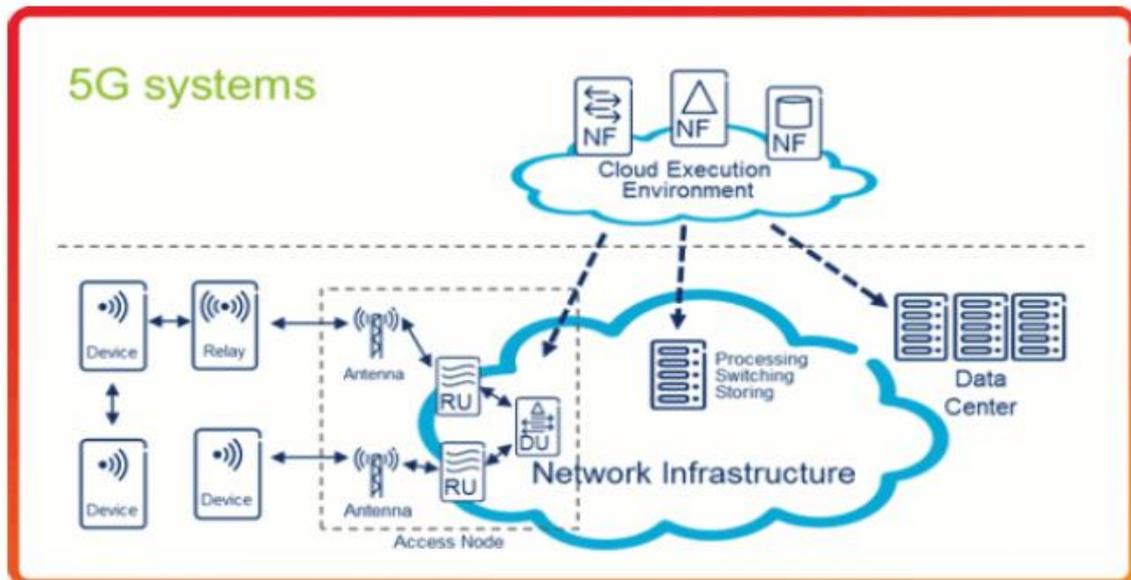


Figura 5- Desenho da Arquitetura de rede 5G [5].

A figura 5 mostra-nos o desenho da arquitetura da tecnologia 5G baseada em três conceitos principais:

1. **Nanotecnologia**
2. **Computação em Nuvem**
3. **Toda a plataforma sobre IP**

A **Nanotecnologia**: é a engenharia de sistemas funcionais, consiste na manipulação da matéria numa escala atômica e molecular. Geralmente lida com estruturas com medidas

entre 0,1 a 10 *nm* (nanómetros), ao menos numa dimensão, e incluindo também o desenvolvimento de materiais ou componentes e está associada a diversas áreas (como a medicina, eletrônica, ciência da computação, física, química, biologia e engenharia dos materiais) de pesquisa e produção na escala nano (escala atômica) [5].

Computação em Nuvem: é uma partilha de recursos/serviços com a ajuda da Internet, no custo mínimo disponível sendo uma das tecnologias mais emergentes por toda a parte do mundo. Muitos dos utilizadores e organizações isolados tem grande aceitação da computação em nuvem uma vez que podem aceder à base de dados através da internet, do outro lado estão os utilizadores com acesso aos dados, em qualquer lugar e a qualquer momento.

All IP Network: é uma rede simplesmente baseada em pacotes na qual todos os dados são transferidos da mesma maneira e independente do acesso ou tecnologia de transporte. Suporta mobilidade generalizada, o que permite a prestação consistente e onipresente de serviços comerciais de acesso irrestrito a utilizadores através de diferentes fornecedores de serviço.

Principais Arquiteturas em Rede 5G

Propomos apresentar a *Cognitive Radio Networks* (CRN), *Cloud RAN* (CRAN), e *Device to Device communication* (D2D), como sendo as principais arquiteturas da camada de rede 5G, pois as mesmas já tinham sido propostas em trabalhos de pesquisa anteriores, onde a estação base móvel *Mobile Base Station* (MBS), permanece no nível superior à *Smart base station* (SBS) [12].

Small cells (Pequenas células) e *Macrocell*¹⁰ partilham a mesma banda de frequência, sendo que a macro célula cobre todas as pequenas células como *femtocell*¹¹, *picocell*¹² e *microcell*¹³. As pequenas células fortalecem a cobertura e os serviços de uma macro célula.

Baseado em CRN e D2D, esta arquitetura melhora passando de duas camadas para multicamada, permitindo a um grupo de pessoas o acesso à rede móvel dentro de transportes públicos considerando-o como sendo um sistema interno.

O sistema de utilizadores ao ar livre também especifica a rede móvel, o MBS assegura o alcance para antenas grandes e distribuição de alguns elementos de antena ao redor da

¹⁰ *Macrocell* (*macro célula*) é uma célula de uma rede de telefonia móvel que fornece cobertura de rádio servida por um site de célula de alta potência (torre, antena ou mastro).

¹¹ *Femtocell* é uma estação base celular pequena e de baixo consumo de energia, normalmente projetada para uso doméstico ou em pequenas empresas.

¹² *Picocell* é uma pequena estação de base celular que cobre tipicamente uma pequena área, como edifícios ou, aeronaves.

¹³ *Microcell* (*Micro células*) são as maiores e as mais poderosas células pequenas, geralmente são instalados ao ar livre em semáforos ou sinais.

Avaliação de Cenários 5G

célula macro o MBS conecta-se através de fibra ótica, como se mostra na Tabela 1, onde se categoriza as células 5G [12].

Cells	Series	User equipment
Macro cell	30-35 km	many
Micro cell	2 km	>100
Pico cell	200 m	20-40
Femto cell	10-20 m	few

Tabela 1- Categorização de Células 5G [12].

Agregados de antena SBS são vistos em todos os edifícios para comunicar com o MBS, Todos os tipos de equipamento do utilizador num edifício podem conectar-se através do SBS ou *Millimeter wave* (mm-wave), Wi-Fi¹⁴, *Visual Light Communication* (VLC)

Arquitetura CRN

CRN é um agrupamento de rádios cognitivos, nós ou processadores denominados *Secondary User* (SU). O SU tem algumas propriedades como inteligência, eficiência, confiabilidade e adaptabilidade para operar e supervisionar múltiplos canais.

Os *Primary Users* (PU) têm uma largura de banda fixa através de alta potência de transmissão e alta confiabilidade, qualquer MBS ou SBS com propriedades cognitivas pode operar em diferentes canais [13].

Tipos de arquitetura CRN

i) Cooperative CRN (CRN Cooperativa): A SBS comunica através de um MBS que utiliza serviços licenciados para o seu *User Equipment* (EU) e para servir o EU. O SBS acede ao canal aprovado para transferir os dados para o MBS.

ii) Non-cooperative CRN (CRN não cooperativa): CRN implementa sistemas *Multi-Radio Access Technology* (Multi-RAT) com duas interfaces de rádio separadas, a PU tem canal cognitivo desocupado e SU torna-se um CRN com duas redes separada por duas camadas: Camada superior e a Camada física [13].

Canais cognitivos e certificados são usados por utilizadores próximos ou extremamente longe do MBS, também é usado para requisitos de QOS menos exigente, e QOS estritos respetivamente.

¹⁴ *Wi-Fi* é uma Marca registrada da Wi-Fi Alliance, utilizada por produtos certificados que pertencem à classe de dispositivos de rede local sem fios (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.11.

Comunicações D2D

D2D para 5G: permite que os UEs comuniquem entre eles com Frequência de banda larga licenciada exclusiva do MBS [14].

Tipos de dispositivos D2D:

- i) Dispositivo de retransmissão com ligação controlada pelo Operador.
- ii) Comunicação Direta do D2D com ligação controlada pelo Operador.
- iii) Dispositivo de retransmissão com ligação controlada por D2D.
- iv) D2D direto com ligação controlada por D2D.

Arquitetura RAN baseada em nuvem

Foi introduzido no instituto móvel da China o primeiro C-RAN. O MBS está implementando as funções; a nuvem divide a funcionalidade do MBS em dados da camada de controle separadas em duas camadas:

1. Control layer of C-RAN (Camada de controle de C-RAN): controla o processamento de banda base e gestão de rede, gestão de recursos sem mobilidade, controle de potência, e segurança.

2. Data layer of C-RAN (Camada de dados de C-RAN): utiliza vários recursos, realiza tarefas de processamento de sinal e canal, multiplexação por descodificação, e transformação rápida de Fourier [12] [15].

Vantagens da C-RAN:

- Gestão de rede fácil.
- Redução de custos.
- Economia de energia de MBS, *User Equipments* (UEs).
- Melhoria na utilização do espectro.

Desenho da Arquitetura C-RAN

Na figura 6 podemos verificar algumas das vantagens oferecidas pela Arquitetura C-RAN.

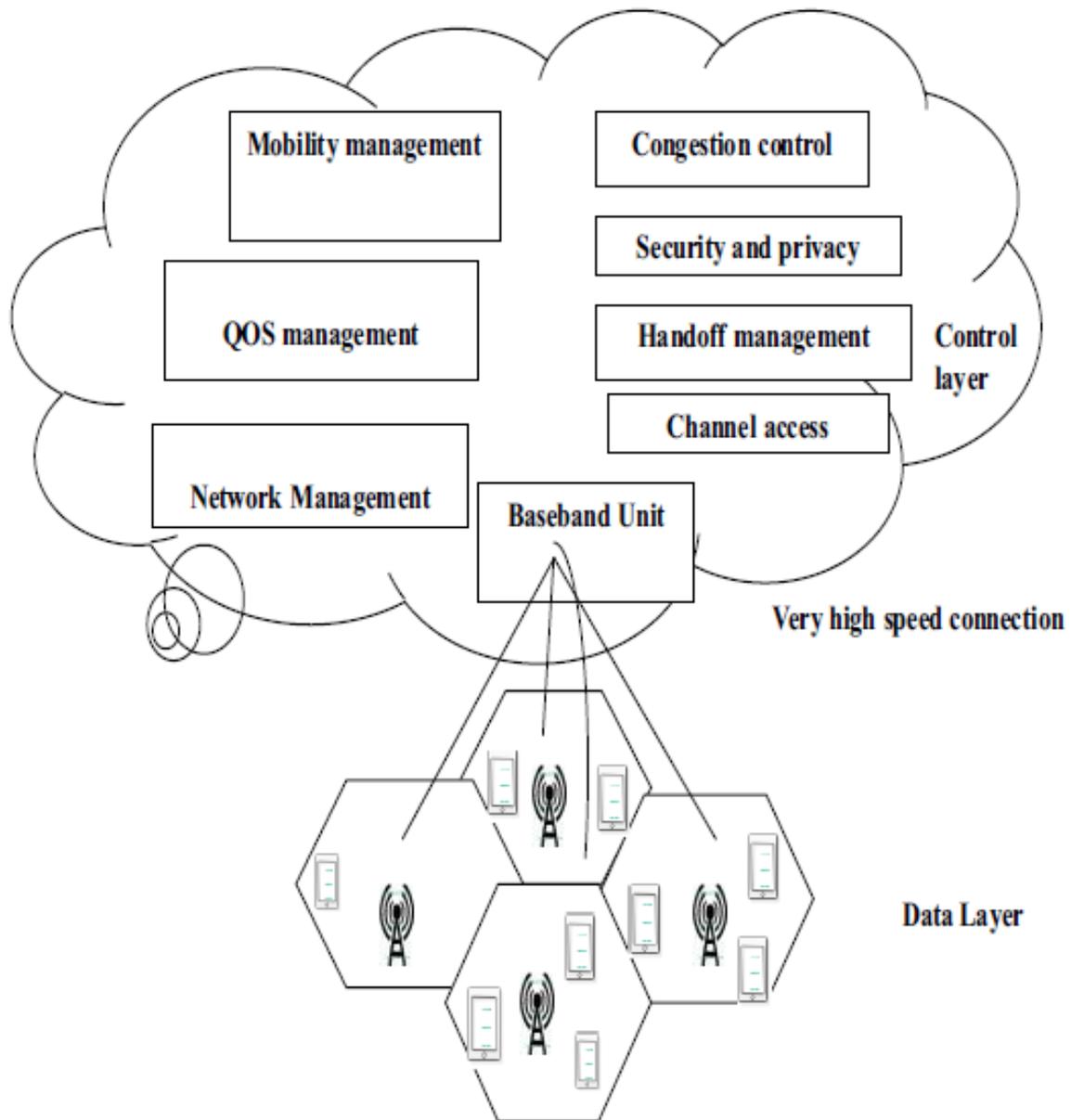


Figura 6- Desenho da Arquitetura baseada em nuvem para 5G [12].

2.3.4 Requisitos Técnicos 5G

Na sequência do *International Mobile Communications Advanced (IMT-Advanced)*, a *International Telecommunication Union* estabeleceu um novo grupo para identificar os requisitos de padronização de rede para serviços 5G a partir de 2020 [16], identificado como IMT-2020. Na Tabela 2 descreve-se os requisitos técnicos para a rede 5G.

Avaliação de Cenários 5G

Requirements	Desired Value	Application example
Data Rate	1 to 10 Gbps	Virtual reality office
Data Volume	9 GB/hour in busy period 500 GB/month/subscriber	Stadium Dense urban information society
Latency	Less than 5 ms	Traffic efficiency and safety
Battery Life	One decade	Massive deployment of sensors and actuators
Connected devices	300000 devices per AP	Massive deployment of sensors and actuators
Reliability	99.999%	Teleprotection in smart grid network Traffic efficiency and safety

Tabela 2- Exemplo de requisitos técnicos para a rede 5G [17].

Tecnologias e Principais Componentes 5G

A fim de atender aos requisitos dos sistemas 5G é necessária uma mudança na arquitetura e no design das redes celulares, nas principais tecnologias sem fio que satisfazem os requisitos 5G ao nível do desempenho. A rede massiva e de elevada capacidade, bem como a maior experiência dos utentes exigida para sistemas 5G sugerem investigação em três dimensões, como apresentado em [18]. A figura 7 ilustra os requisitos técnicas do 5G, traduzindo-se em necessidade de uma maior largura de banda, através da mudança para o *mmWave* e um melhor uso do espectro não licenciado, o que significa um desafio tecnológico acrescido, e consequentemente uma revolução. Uma vez que a alta taxa de transferência de dados está omnipresente, e também pelo facto de se necessitar de baixa latência para utilizadores de rede.

Por outro lado, a maior eficiência na utilização espectral, é possível através do uso do MIMO massivo, tornando possível a densificação extrema. O *offload* das redes celulares também é um fator-chave do aumento de capacidade, para além dos requisitos acima apresentados, o 5G também dá ênfase à eficiência energética dos sistemas em todos os seus componentes à medida que a rede se torna muito mais densa.

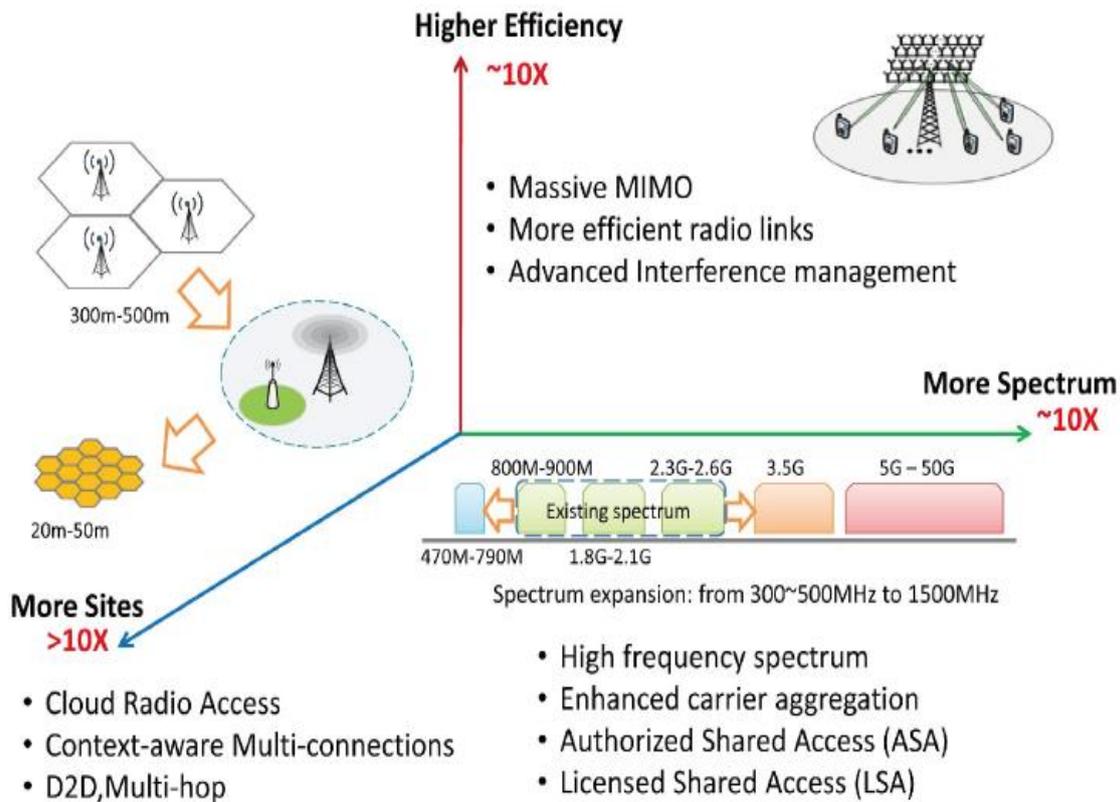


Figura 7- Requisitos técnicos do 5G em três dimensões [18].

Utilização de espectro

O 5G apresenta uma nova interface de rádio, que por sua vez torna possível a convergência entre os sistemas existentes, com novas formas de onda, tecnologias de acesso múltiplo, esquemas de modulação e codificação, etc.

1) Atribuição de espectro: No 5G a rede é heterogênea e o seu espectro provavelmente consistirá numa combinação de bandas já estabelecidas e novas bandas diferentes que servirá diferentes propósitos e será um desafio fundamental para as operadoras móveis integrar o uso das várias bandas, com o foco na melhoria de utilização do espectro e não apenas a eficiência do espectro.

É consensual que as bandas de frequência mais altas serão as bandas complementares para 5G, enquanto que as bandas de baixa frequência (<6GHz) serão as bandas primárias do espectro 5G. Adicionalmente, novo espectro abaixo dos 6GHz espera-se que seja atribuído para comunicações móveis na *World Radio Conference (WRC)* de 2015, e a banda acima de 6 GHz, serão atribuídos na WRC de 2019 [19], como nos é ilustrado na figura 8.

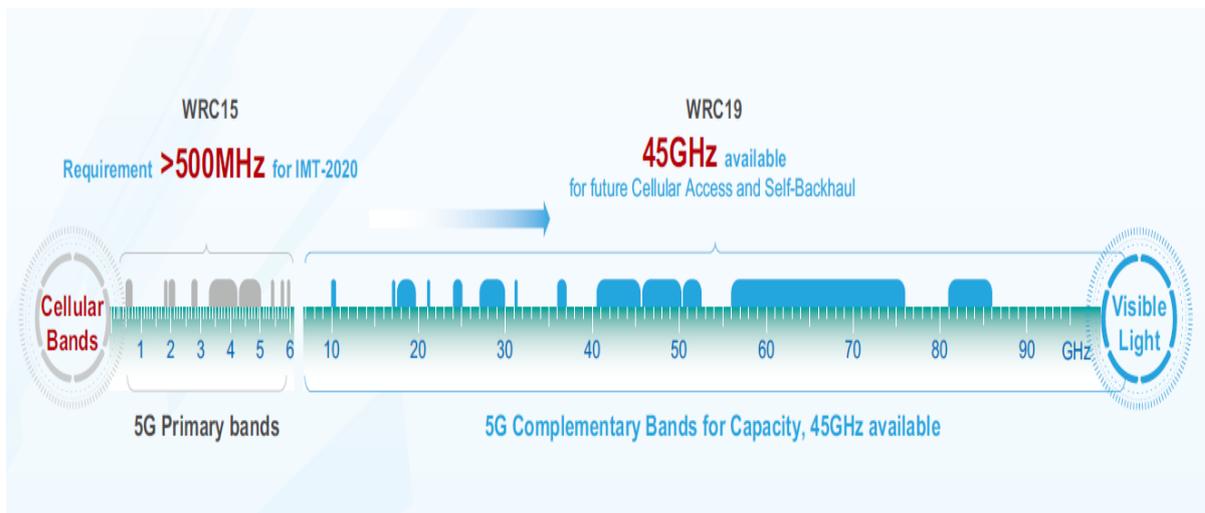


Figura 8- 5G opera em bandas que rondam os 6GHz e acima dos 6GHz [19].

2) Carrier Aggregation (CA): É um requisito multi-RAT para sistemas 5G que implica a necessidade de agregar diferentes RATs a ser atribuídos ao utilizador final, tornando mais eficiente a utilização do espectro fragmentado e congestionado, bem como coordenação e balanceamento de carga entre os diferentes RATs. O conceito de CA já foi proposto para o LTE no *3rd Generation Partnership Project (3GPP) 'Release 10* no caso de agregação LTE-Advanced, e a agregação da multiplicidade de bandas que serão usadas em 5G, requer a redefinição e o estudo, como por exemplo da agregação entre LTE-WiFi [20]. Alguns desafios têm que ser resolvidos neste caso para configurar o IP, coordenar a interferência e o tempo de sincronização.

3) mmwave: As redes sem fio devem enfrentar o congestionamento se nenhum espectro novo for usado. Estudos recentes sugerem que as frequências mm-wave para complemento das bandas saturadas de espectro de rádio de 700 MHz a 2,6 GHz é essencial [21],[22]. O uso da Onda Milimétrica é um desafio, pois os conhecimentos disponíveis sobre propagação celular de ondas de mm em ambientes internos e externos densamente povoados, ainda é restrito comparando com as outras bandas mais usadas.

Os ambientes de propagação nessas frequências ainda são bastante hostis, além dos custos com equipamentos de hardware. Apenas com o uso da técnica *beamforming*¹⁵ verificam-se melhorias.

Problemas de eficiência de espectro

¹⁵*Beamforming* é uma técnica de processamento de sinal usada em matrizes de sensores para transmissão ou recepção de sinal direcional.

1) **MIMO massivo**: é uma importante tecnologia no 5G, no caso de utilizador único, o número de antenas por dispositivo é limitado pela restrição da separação de antenas enquanto que para múltiplos utilizadores o MIMO permite um ganho de diversidade espacial.

O *Coordinated Multi-Point Transmission and Reception* (CoMP) pode transformar a interferência no sistema em vantagem, já usado em LTE, mas deve ser estendido a uma densa rede onde as BSs têm um número muito grande de antenas [23], para suportar um número maior de utilizadores por frequência.

Aumentaria o número de utilizadores mesmo sem muita densificação da rede num simples caminho, mas ainda requer uma estimativa de canal fino, além do possível grande *Overhead*¹⁶, o que requer uma arquitetura totalmente nova para realizar o *MIMO Full-Dimension* (FD-MIMO)[24].

2) **Formas de onda de sinal (*Signal waveforms*)**: O LTE foi baseado em *Orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM) e *Single-carrier frequency-division multiple access* (SC-FDMA) e alguns esperam que isso sobreviva na 5G com adaptação do prefixo cíclico como OFDM filtrado [25]. Também são propostas para a interface de rádio [26] da 5G o seguinte: *Filter Bank Multicarrier Modulation* (FBMC), *Universal Filtered Multi-Carrier* (UFMC) e *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM). De acordo com [26], e considerando a eficiência de tempo para pequenos pacotes, como nas comunicações *machine to machine* (M2M), ou em requisitos de tempo de resposta muito crítico, comunicações *car to car* (C2C), o *Universal Filtered Multi-Carrier* (UFMC), é a melhor escolha, enquanto que FBMC é bom para sequências mais longas, o OFDM é considerado ineficiente devido ao prefixo cíclico [27].

Embora se sugere o FBMC como um candidato para 5G, devido à sua propriedade de auto equalização, que pode reduzir o número de subportadoras do sistema. A estimação de canal *blind* usada para lidar com a contaminação de pilotos, é uma das principais limitações dos sistemas MIMO massivos. O GFDM sendo uma adaptação do OFDM como um esquema de multiportadora não ortogonal com modelo de pulso flexível [28], inclui flexibilidade que implica em interferência autocriada que é tratada usando alguns métodos de receção e cancelamento de interferência iterativa.

3) **Acesso múltiplo**: numa rede densa e com uso do MIMO, o esquema *Beam Division Multiplex Access* (BDMA) é um sério candidato a sistemas 5G. Para este esquema, a comunicação entre a BS e a *Mobile Station* (MS) usa um feixe ortogonal, dividindo feixes de antena de acordo com os locais das MS [29]. Para alcançar maior capacidade esquemas, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) também são propostos [30], [31], o que remove a exclusividade de alocação de recursos e permite que mais de um utilizador compartilhe a mesma subportadora sem redundância de codificação / espalhamento.

O recetor implementa um conjunto de processamento para separar os sinais dos utilizadores, auxiliado pela subportadora e algoritmos de gestão de energia para

¹⁶ *Overhead*, em ciência da computação, é geralmente considerado qualquer processamento ou armazenamento em excesso.

maximizar as taxas oferecidas. A multiplexação de dispositivos também pode ser feita usando *Sparse Code Multiple Access* (SCMA), onde os sinais são sobrepostos em domínios de código e de energia e transportados no tempo compartilhado recursos [32].

Densificação de Rede

1) **Rede Ultradensa:** tem que preservar a divisão do ganho das células, em particular com a restrição de BSs de baixa potência. A limitação causada por interferência em tal rede pode ser cuidadosamente manipulada. As técnicas de manipulação de interferência têm de ser adaptadas para o caso particular de mmWave.

Além disso, a associação de utilizadores e BSs em tais redes multi-RAT heterogénea precisa de ser otimizada usando conceitos de desempenho, como teoria dos jogos e modelos para suporte de mobilidade, como células virtuais. Sendo a implantação dessa rede tão densa, com muitas pequenas BSs de baixa potência, envolvendo um custo relativamente alto para a instalação, manutenção e *backhaul*.

2) C-RAN: O processamento no nível de estações base pode ser feito por *Baseband Processing Units* (BBUs), e unidades de acesso de rádio designadas por *Remote Radio Heads* (RRHs) separadamente. A parte da BBU pode ser movida para uma *pool*, ou mais geralmente para a nuvem, para padronizar e otimizar recursos.

A transmissão do sinal de rádio é então executada por RRHs baseados em sinais computados da nuvem. O pool da BBU é um cluster virtualizado conectado à rede principal através do *backhaul*. A computação baseada na nuvem torna os RRHs mais baratos e simples, permitindo mais escalabilidade e oportunidades de densificação. Também reduz o atraso da coordenação entre células e permite uma otimização conjunta no processamento, e também CoMP, etc. [33]

3) **CoMP:** o CoMP já foi apresentado no LTE além da versão 9. Advanced CoMP No entanto, espera-se que sejam adotados para os sistemas 5G, juntamente com a densificação e o MIMO massivo [34]. O CoMP é considerado como uma ferramenta eficiente para combater a interferência no caso multiutilizador, além do aumento da cobertura, do rendimento na fronteira e / ou eficiência do sistema [35].

No caso de redes heterogéneas densas enfrenta alguns desafios devido ao número de pequenas células não coordenadas, diferentes conexões de *backhaul* potencialmente limitadas, diferentes condições para macro e pequena camada celular, etc.

4) *Wireless Network Virtualization* (WNV): Este é um dos principais *drivers* de sistemas 5G. Facilita a partilha dos recursos entre muitos operadores, como há necessidade de dissociar o hardware do software e de mover as funções de rede para o software, assumindo também a separação entre a gestão de dados e os dados.

Assim, a pesquisa de virtualização de função de rede está sendo conduzida por vários parceiros industriais, Isso melhora a adaptabilidade de rede e torna-a facilmente escalável, com uma simples operação. Novos recursos de rede provavelmente serão implantados mais rapidamente.

De fato, permite compartilhar recursos comuns através da abstração de recursos físicos para um número de recursos virtuais.

As principais vantagens do WNV incluem: alta utilização de recursos, melhor desempenho do sistema, redução do *capital expenditure* (CAPEX) e do *Operational Expenditure* (OPEX), melhor qualidade de experiência *Quality of Experience* (QoE) para os utilizadores finais e facilita a migração para novas tecnologias isolando a parte da rede [36].

Eficiência energética

É um desafio central para os sistemas 5G, devido à diversidade de aplicações esperadas. A duração da bateria apresenta uma importante restrição, que deve ser alongada e tal como a energia global a eficiência da rede deve ser melhorada. Uma solução pode ser a captação da energia através de fontes de energia ambiental para exemplo.

A diversidade dos níveis de energia disponíveis ao longo do tempo, locais, condições meteorológicas, etc. apresenta, no entanto, um desafio para as aplicações sem fios de QoS restrito. Outra solução pode ser captação de energia de sinais de rádio ambiente: através da tecnologia de rede de captação de energia alimentada por RF, *RF-powered energy-harvesting network* (RF-EHN) [37], [38].

A eficiência energética no lado da rede também é um problema para 5G e nela propõe-se a redução do consumo de energia da BS de forma mais inteligente, através do *Cellular Partition Zooming* (CPZ) por exemplo: onde a BS pode adaptar-se (*zooming*) para manter a área de cobertura de acordo com os utilizadores atuais e introduzindo o modo de suspensão para poupar energia [39].

Capítulo 3

Comunicação móvel assistida por *Drones*

Neste capítulo começa-se por um breve resumo sobre a comunicação assistida por Drones, bem como as principais características e vantagens.

3.1 Visão Geral da Comunicação assistida por Drones

Perspetivas da comunicação móvel assistida por Drones

Os Drones controlados por rádio (*radio controlled* (RC)) tiveram uma franca expansão nos últimos anos [40]. Tal difusão da tecnologia Drone deve-se à sua precisão mecânica e à sua microeletrónica, à melhoria das técnicas de gestão da bateria, à variedade de drones, e ao preço e disponibilidade do mercado, para além disso, verifica-se um desenvolvimento na fonte de alimentação de dispositivos, porque o níquel, o cádmio (Ni-Cd) e o hidreto de níquel-metal (*NiMH*) foram alterados para *Lithium Polymer* (*LiPo*) dando origem a uma nova geração de baterias de lítio-enxofre (S-Li).

As novas baterias criaram uma oportunidade para a maior autonomia e o fornecimento de acessórios eletrónicos. Durante o desenvolvimento, a prioridade era o alcance e comunicação rádio entre o Drone e seu piloto, além de criar uma "inteligência interna" para ajudar a navegação com sensores, também permite a comunicação bidirecional em que o operador pode ver e controlar todos os dados de telemetria do Drone e do sensor auxiliar em tempo real.

O sensor auxiliar disponível a bordo pode ser diferente da metodologia utilizada e da tecnologia base do Drone. Este fator pode determinar as possíveis fontes de interferência na comunicação de rádio frequência (RF), pois durante o projeto deve-se ter em consideração o uso de *drones* específicos para cada tarefa.

O termo "Drone" foi considerado um termo técnico, desde a disseminação do uso civil. Anteriormente, o chamado *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) serviu um propósito militar, mas o desenvolvimento de tecnologia e a demanda fez aparecer o uso civil também.

Avaliação de Cenários 5G

Os Drones são usados principalmente para fins de hobby - existem várias áreas e indústrias, onde eles são usados para fins lucrativos ou não lucrativos.

As agências de prevenção e assistência aos desastres, outros grupos e organizações usam drones ou sistemas de Drones para o trabalho: geralmente fornecem assistência em tarefas planejadas, mas no caso de uma catástrofe natural os mesmos também podem desempenhar um papel útil na decisão de suporte de resgate.

Existiam mais de 100 fabricantes na produção de Drones civis em 2016. Surgiram alguns Drones, cujas manobras dependiam não apenas dos comandos dados pelo piloto, mas também da tomada de decisão independente, anulando o piloto, a fim de garantir a segurança e a eficiência das missões, contribuindo para a aplicabilidade dos Drones para tarefas especiais. A orientação geralmente usa uma conexão ponto a ponto, neste caso, o piloto está no chão com um controlo remoto na mão e controla o dispositivo através da sua própria visão, num intervalo máximo de 4-5 km, usando os sistemas de controle de hoje.

O potencial de mercado é claramente demonstrado pelo fato de que mais de 100.000 unidades foram vendidas em 2013 nos EUA, enquanto que em 2015, mais de um milhão de unidades foram vendidas, criando assim uma indústria de 1,7 bilhões de dólares.

A previsão de vendas de Drones excederá entre 2013 e 2017 mostra-se na figura 9 [41].

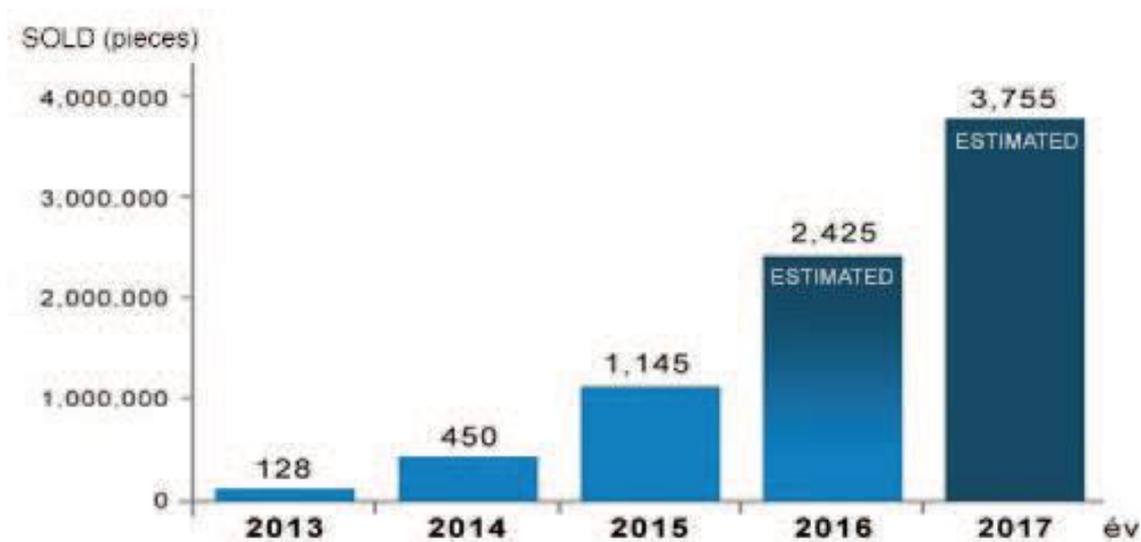


Figura 9- Previsões de vendas para Drones entre 2013 e 2017 [41].

Evolução do Canal de Comunicação

Os sistemas de controlo remoto e *Drones* têm sofrido grandes mudanças nos últimos anos. A comunicação unidirecional foi substituída por uma comunicação bidirecional, assim como, o sistema de controlo remoto de terceira geração não usa uma comunicação convencional ponto-a-ponto, mas sim redes móveis existentes.

O sistema era sensível a perturbações devido ao uso da frequência da portadora em VHF e ao pequeno número de canais. Quanto mais modelos estavam no ar, havia mais interferência, pois num sistema *simplex* não era possível devolver as informações ao controlador do *Drone*, que só poderia interpretar e executar comandos.

Para sequestrar o *Drone* era necessário um transmissor apropriado mais poderoso do que aquele que é usado pelo utilizador para o bloqueio por canal direito. Outro grande problema da comunicação *simplex* é que nenhuma informação retorna ao operador.

Nos últimos anos, a transmissão em tempo real com uma pequena câmara *on-board*¹⁷ tornou possível a navegação assistida por câmaras; embora o sistema da próxima geração já tenha sido desenhado com a solução baseada em IP, sendo exemplos disso as conexões por WLAN, e LTE (4G). Ambas as formas de comunicação despertam a atenção dos fabricantes, devido à relação custo-eficiência; o objetivo é transferir toda a comunicação, controlo, dados de telemetria, vídeo em tempo real, através de um só canal. Para o efeito, há que ter em conta os seguintes aspetos:

- Requisitos de conexão de dados
- Estabilidade do sistema
- Transferência de dados em alta velocidade
- Baixa latência
- Alta cobertura
- Ressincronização rápida em caso de perda de conexão
- Conformidade com os regulamentos legais para a comunicação de *Drones* [42], [43].

Comunicação por WLAN

A conexão IP bidirecional entre um *Drone* e o operador, através de comunicação sem fio usando o padrão IEEE 802.11, Este tipo de comunicação para além da operação confiável do canal de comunicação permite também um aumento da largura de banda. A velocidade

¹⁷ *On-board* é uma câmara de bordo uma câmara colocada num objeto em movimento, como um veículo.

Avaliação de Cenários 5G

de transmissão da conexão depende da distância, características topográficas, localização geográfica, construções na área, as condições atmosféricas e a carga dos canais.

A banda de rádio (industriais, científicas e médicas) *Industrial, Scientific and Medical radiobands* (ISM) foram definidas pela ITU em 1947, propondo várias larguras de banda para o uso de dispositivos de rádio de curto alcance *Short-Range Radio Devices* (SRD). As diferentes bandas de frequência podem ser encontradas em vários domínios, na Europa. A potência máxima do transmissor é de 100mW e as frequências mais utilizadas são 433 MHz, 868 MHz, 2,4 GHz e 5,8 GHz.

Nos dispositivos de controlo remoto atuais a frequência da portadora de controlo remoto de *Drones* ronda os 2.4 GHz, mas isso também inclui fornos de micro-ondas, telefones sem fio, WLAN e dispositivos Bluetooth.

Estes dispositivos não necessitam de permissão, desde que o conteúdo técnico seja adequado e os parâmetros técnicos mantidos, o uso livre também significa que não há garantia para um uso de frequência sem interferência, como também não se pode interferir aplicações protegidas.

Com a introdução de cada vez mais dispositivos, a banda de frequência também fica cada vez mais saturada. Medições regulares numa rota específica em Budapeste mostra que as redes sem fio estão cada vez mais difundidas em áreas densamente povoadas.

A rota deste experimento foi sempre o mesmo, continha os seguintes zonas:

- zona do projeto habitacional
- zona de habitação familiar
- zona do centro da cidade
- Parque industrial.

Tendo em conta os dados das medições dos anos 2012, 2014 e 2016, ao longo de uma rota de 30 km, com base nos dados obtidos, verificamos que no ano 2016 o número de dispositivos, WLAN, usando Frequência de 2,4 GHz aumenta quase 5 vezes, face ao ano 2012, como se mostra na Tabela 3 [41].

	Year		
	2012	2014	2016
2.4 GHz device	2650	9605	9049

Tabela 3- Aumento no número de dispositivos WLAN de 2.4 GHz [41].

Avaliação de Cenários 5G

Para além do aumento do número de dispositivos, WLAN, que usam a Frequência de 2,4 GHz, verifica-se também um aumento exponencial nos dispositivos WLAN que usam a Frequência de 5 GHz como nos é mostrado na Tabela 4 [41].

	Year		
	2012	2014	2016
5 GHz device	583	249	4704

Tabela 4- Aumento no número de dispositivos WLAN de 5 GHz em 2016 [41].

A saturação das bandas ISM causa cada vez mais problemas no funcionamento dos dispositivos, por exemplo, em áreas densas, dezenas de dispositivos WLAN podem ser detetados ao mesmo tempo, o que pode levar a problemas de comunicação.

Diferentes tipos de dispositivos de rádio interferem uns com os outros, o que causa deterioração nos parâmetros técnicos e de confiabilidade.

O diagrama da figura10 mostra a distribuição de potência (em dBm) de WLAN da Banda ISM de 2,4 GHz, onde vemos uma grande interferência no sinal no canal 13.

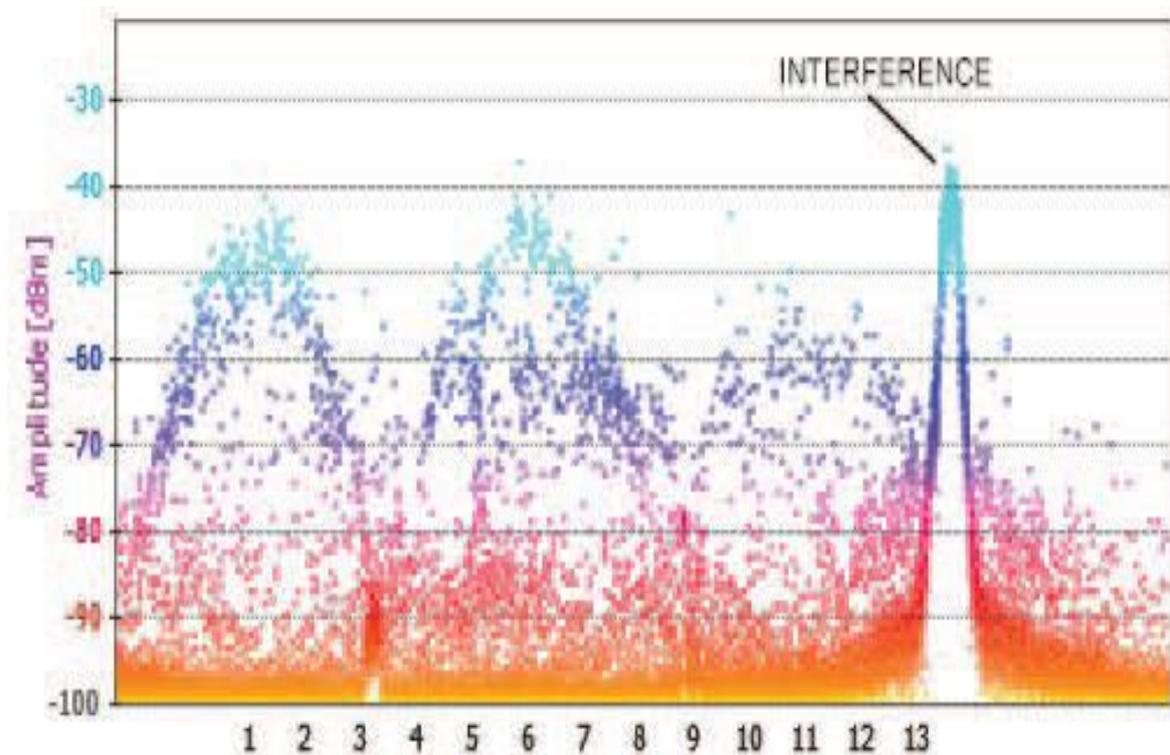


Figura 10- Fenómenos de interferência na banda ISM [41].

Em alguns casos, mesmo com a interferência e alta densidade de dispositivos, a cobertura de rádio WLAN é estável e permite comunicação entre o *Drone* e o seu operador, dentro dos níveis legais de desempenho. No caso de uma perda de conexão, resincronizar o *Drone* pode levar vários segundos [44], [45].

Comunicação via LTE

O acesso em banda larga também pode ser assegurado pelo LTE, neste caso, o *Drone* usa uma rede móvel celular, em vez de comunicação tradicional de 2,4 GHz, com uma conexão ponto-a-ponto [41]; isso também implica, que podemos sair do alcance indoor, já que onde quer que haja cobertura de telefone, o *Drone* é capaz de voar.

Atualmente, a latência do LTE é inferior a 50 ms, no caso de um *Drone* voando a 50 km/h, significa 0,7 metros por segundo. Esses dados só são relevantes quando o *Drone* é controlado manualmente, no caso de voo com rota pré-programada a latência significa pouco ou nada, nem mesmo com *streaming*¹⁸ de vídeo.

As velocidades de *upload*¹⁹ e *download*²⁰ dos três fornecedores de serviços de internet, *Service Provider* (SP) disponíveis na Hungria são adequados aos valores como vemos na Tabela 5.

	Telenor	Vodafone	<u>T-mobile</u>
Download	150 Mbit/s	75 Mbit/s	300 Mbit/s
Upload	150 Mbit/s	25 Mbit/s	50 <u>Mbits</u>

Tabela 5- Dados de velocidade de pico de *upload* e *download* LTE do SP na Hungria [41].

A conexão pode ser afetada pela carga das células móveis e condições geográficas. As medições mostram que a ligação LTE pode estar disponível até uma altura de 100 metros. Este é um parâmetro menos favorável oposto ao ponto de conectividade, mas esta altura serve a maioria das tarefas.

A maior vantagem da comunicação LTE é que a comunicação entre o *Drone* e o piloto pode ser feita a qualquer distância, pode até ser controlada de um outro continente, com a ajuda de uma interface do computador ou uma outra aplicação de telefone celular.

¹⁸ *Streaming* consiste na transmissão contínua, também conhecida por fluxo de média.

¹⁹ *Upload* é enviar dados para um sistema remoto.

²⁰ *Download* é receber dados de um sistema remoto.

Avaliação de Cenários 5G

Isso também significa que não podemos sair do alcance, já que onde quer que haja cobertura de telefone celular, o *Drone* pode voar. Além das vantagens, o sistema também tem as suas desvantagens, que terão que ser geridas com a disseminação do sistema.

A figura 11 mostra os componentes básicos do circuito de um *Drone*, que suporta a conectividade LTE, bem como os seus componentes adicionais:

- Raspberry Pi
- Placa NAVIO 2
- Modem LTE
- Recetor GPS
- Vídeo FPV

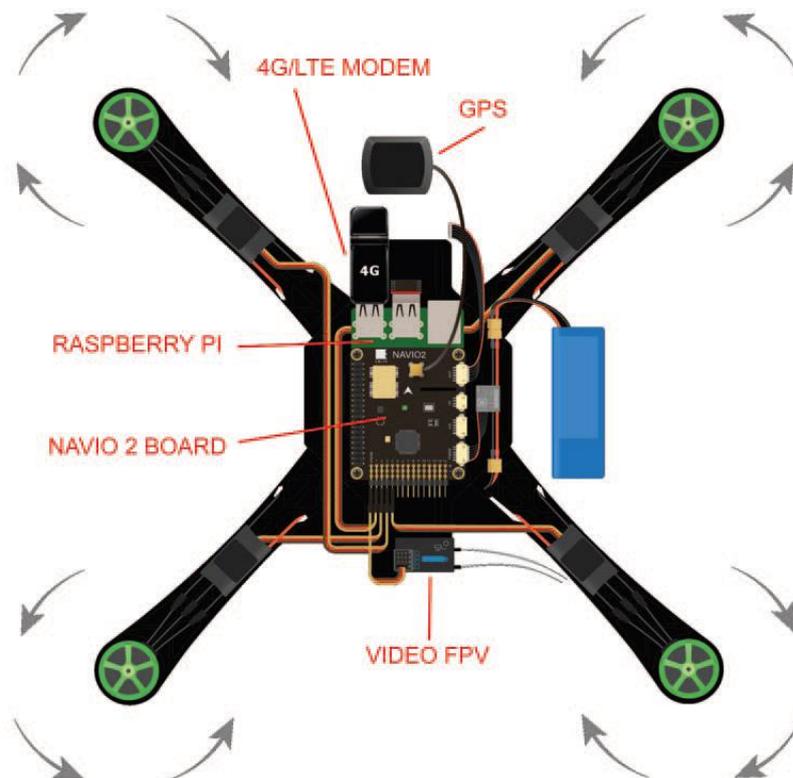


Figura 11- Estrutura de um *Drone*, projetado para comunicação LTE [41].

Foi criada este ano para o campeonato mundial de futebol em Moscovo, uma rede piloto 5G em que a taxa de transferência de dados de pico é de 10 *Gbit /s* e com cobertura adequada aos estádios de futebol e seus arredores [46], [47].

3.2 Comunicação por Drones Aplicações e Desafios

3.2.1 Aplicações de célula-Drone

Uma BS *Drone* é uma antena não tripulada de baixa altitude ²¹(UAV) equipado com transceptores para auxiliar redes [48], e uma célula Drone é a correspondente área de cobertura. O tamanho de uma célula-Drone varia de acordo com altitude, localização, potência de transmissão do BS *Drone*, da tecnologia de acesso rádio (RAT), da diretividade da antena, tipo de *Drone*, e das características do ambiente.

Conseqüentemente, redes de células Drone multicamadas podem ser construídas através da utilização de vários tipos de Drones, tornando-a semelhante as *Heterogeneous Networks* (HetNets), terrestres com macro, pequenas, femtocélulas ²²e relés²³.

A arquitetura de rede com célula *Drone* multicamada, fornece o suporte as HetNets terrestres em vários casos, tal como nos é representado na figura 12 [49].

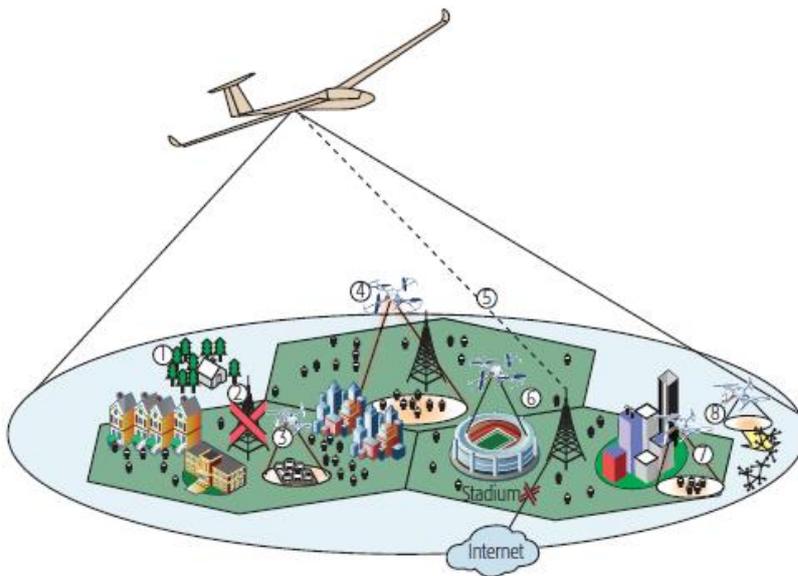


Figura 12- Exemplo de cenário em que a rede de células Drone multicamada é aplicado [49].

As redes de célula *Drone* multicamada podem ser usadas em diversos cenários tais como:

1. Prestação de serviços em zonas rurais (macro-células-*Drone*);
2. Mal funcionamento da macro célula BS (macro-células-*Drone*);

²¹ UAV é um veículo aéreo não tripulado.

²² Femtocélula é pequena estação base celular de baixa potência.

²³ Relé é um dispositivo eletromecânico, com inúmeras aplicações possíveis em comutação de contatos elétricos, servindo para ligar ou desligar dispositivos.

Avaliação de Cenários 5G

3. Assistir os utilizadores com alta mobilidade (femto-células-*Drone*);
4. Incrementando uma macro célula em caso de congestionamento de RAN (pico-células-*Drone*);
5. Auxiliando uma macro célula em caso de congestionamento da rede principal (macro-células-*Drone*);
6. Fornecimento de recursos adicionais para eventos (por exemplo, concertos e eventos desportivos);
7. Viabiliza a cobertura para pontos temporariamente cegos,
8. Compromisso de reduzir a dissipação de energia nas redes de sensores movendo-se em direção a eles (femto-células-*Drone*).

As células *Drone* são úteis em cenários que exigem eficiência e resiliência de redes sem fio porque eles podem evitar o excesso de engenharia, estes tipos de cenários podem ser categorizados como temporários, inesperados e críticos. Como mostra a Tabela 6, onde se lista casos de teste relevantes do projeto METIS ²⁴[50]. Com base no cenário, o benefício para a rede de uma célula *Drone* variam.

Test case	Temporary	Unexpected	Critical
Stadium	X		
Teleprotection in smart grid		X	
Traffic jam	X	X	
Blind spots	X	X	
Open air festival	X		
Emergency communications	X	X	X
Traffic efficiency and safety			X
Dense urban information society	X		
Massive deployment of sensor-type devices	X	X	X

Tabela 6- Teste de células Drone tendo em conta os diversos cenários [49].

²⁴ *METIS* é uma sociedade de Informação responsável pelos serviços de comunicações móveis sem fio para 2020.

Ao analisarmos a Tabela 6., por exemplo, no caso em que os requisitos de conectividade requerem a integração para um único evento de caráter temporário (por exemplo, estádio) pode ser resolvido por excesso de engenharia ou, por despesas de operações da BS *Drone*. Pode ser vantajoso na comparação com as despesas de engenharia excessiva, incluindo custos de energia e manutenção.

Por outro lado, tanto para eventos temporários como eventos inesperados (por exemplo, engarrafamento), os BSs *Drone* podem ser utilizados oportunisticamente. Por exemplo, num engarrafamento, num estádio ou em áreas de densa informação urbana e nos diversos cenários da sociedade, uma célula-*Drone* pode ajudar a prevenir congestionamento inesperado ou temporário na rede; alternativamente, as células-*Drone* podem melhorar as redes sem fio, fornecendo recursos adicionais e cobertura em caso de desastre natural, ou permitir a tele proteção para a rede inteligente.

Os cenários críticos evidenciam grandes desafios, tais como taxas de débitos elevadíssimas, alta confiabilidade ou baixo consumo de energia. Além dos benefícios para a rede, fornecer conectividade em alguns destes cenários é importante a prevenção de perdas, por exemplo, salvamento de vidas em comunicações de emergência ou aumentando o tempo de vida (sensores e atuadores) em áreas de difícil acesso.

Nas comunicações de emergência e aplicações de tele controlo, as células *Drone* podem permitir taxas e confiabilidade especialmente para situações nas quais os modos convencionais de acesso sem fio não estão presentes ou são difíceis de estabelecer. A mobilidade de células *Drone* permite-lhes servir utilizadores com alta mobilidade e alta taxa de dados (por exemplo, para a eficiência e segurança do tráfego) [50].

Alternativamente, dispositivos do tipo sensor que requerem baixa consumo de energia podem beneficiar das células-*Drone*, em vez de forçar dispositivos de baixa potência a transmitir para BSs mais longe, ou a implantação densa de pequenas células móveis. Uma BS *Drone* pode mover-se em direção a *clusters* de dispositivos e fornecer comunicação de baixa potência devido à sua proximidade, e conectividade de linha de vista *Line-of-Sight* (LoS). Em particular, quando eventos inesperados acionam uma atividade massiva de sensores, as células-*Drone* podem reduzir o *stress* geral sobre a rede e aumentar a vida útil dos sensores.

Desafios das Células-Drone

Design eficiente: Os *Drones* são usados para operações militares, vigilância e reconhecimento já há algum tempo. O uso em comunicações celulares como BSs *Drones* é muito recente e experimental.

Geralmente são projetados para tarefas específicas, pois aí reside o facto da sua grande variedade [51]; os seus requisitos exclusivos podem beneficiar projetos especiais, tais

como flutuar durante um grande intervalo de tempo, longa resistência, robustez face à turbulência, envergadura mínima permitindo sistemas com múltiplas antenas (MIMO), e fornecimento de energia para transmissão (além de voar). Por exemplo, um *Drone* híbrido pode ser projetado com descolagem vertical capacidade de *rotorcraft*²⁵ e com asas dobráveis (equipadas com elementos de antena MIMO e painéis solares para a captação de energia), que pode ser desdobrado para deslizamento eficiente. O projeto da carga de BSs-*Drone*, é tão importante como a composição da sua mecânica, como o tamanho, aerodinâmica e máxima peso de descolagem [51], Para o uso eficiente dos recursos limitados, volume, peso e energia dos BSs Drones, a carga útil pode variar de acordo com o cenário.

3.2.2 Implementação e Otimização de Células Drone

Adaptação e otimização da célula por Drone

A arquitetura das Redes de Acesso de Rádio Assistidas por Drones, *Drone Assisted Radio Access Networks* (DA-RAN), são similares à arquitetura C-RAN, em que as células-*Drone* funcionam como RRHs aéreas que se conectam através das BSs correspondentes. Para cada BS, em DA-RAN, um enxame de células-*Drone* são implantadas sobre as áreas solicitadas *demanding areas* (DAs), onde os utilizadores não podem ter conexões efetivas com a BS [52],[53].

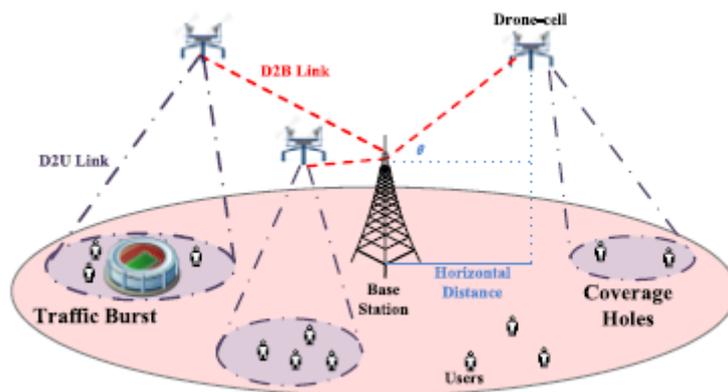


Figura 13- Redes de acesso de rádio assistidas por *Drone*. [53].

Tal como vemos na figura 13, existem dois tipos típicos de DA: *Traffic Burst Spots* (TBSs) e *Coverage Holes* (CHs).

²⁵ *Rotorcraft* é uma máquina voadora mais pesada que o ar, usa o elevador gerado pelas asas, (asas rotativas/pás de rotor), giram em torno de um mastro.

Nos TBSs, o tráfego massivo de dados entre os utilizadores e a BS é gerado ao mesmo tempo. O que não pode ser suportado simultaneamente pelo número insuficiente de *Resource Blocks* (RBs). Nos CHs, as ligações efetivas dos utilizadores para a BS estão bloqueadas por obstáculos, como edifícios altos.

Desde que as células-*Drone* sejam implantadas adequadamente de forma manter as ligações confiáveis em LoS (Linha de vista). Nas ligações *User-to-Drone* (U2D) e *Drone-to-BS* (D2B), os utilizadores não atendidos nas DAs poderão comunicar se com a BS através do acesso a células *Drone* que atuam como relés.

De acordo com as variações espaciais e temporais de DAs, as implantações de células-*Drone* podem ser ajustadas pela BS de forma dinâmica, o que aumenta a capacidade da RAN para lidar com o tráfego dinâmico.

A rede DA-RAN envolve três tipos de ligações:

Ligações *User-to-BS* (U2B), ligações *Drone-to-User* (D2U) e ligações *Drone-to-BS* (D2B): As ligações U2B são ligações clássicas *Up / Down Link* entre utilizadores e BSs sem o envolvimento da célula-*Drone*.

Na DA-RAN, as ligações U2B coexistem com ligações D2U e D2B em DAs sem interferências entre ambas. Não existindo ligação U2B efetiva para utilizadores na CHs, enquanto partes de utilizadores em TBSs podem aceder BSs via ligações U2B.

Ligações D2U: ligações D2U conectam células *Drone* e utilizadores em DAs. Para aliviar a interferência e trazer recursos adicionais para utilizadores no TBSs, as ligações D2U devem operar no espectro diferente das bandas U2B licenciadas, [54], [55];

Ligações D2B: as células-*Drone* comunicam-se com as correspondentes BSs através de ligações D2B. Têm o recurso da LoS da ligação D2B, devido ao mesmo nível de altura dos *Drones* e altura da antena da BS, garantindo assim a confiabilidade, e a capacidade das ligações D2B permanecerem estáveis, já que cada ligação D2B deve transmitir todos os dados entre a BS e os utilizadores abrangidos pela célula-*Drone*.

Uma solução promissora para a questão da capacidade é a tecnologia de mmWave que pode fornecer transmissão de dados até 20Gbps [56]. A tecnologia mmWave torna-se atraente neste contexto no sentido em que é possível usá-la em comunicações D2B pelas seguintes razões:

Primeiro, espera-se que as células-*Drone* mantenham uma posição fixa e mantenham também o status quase-estático face às BS correspondentes durante o intervalo entre as reimplementações. O frequente redirecionamento de feixes pode ser evitado, o que resulta em mais tempo para a transmissão efetiva de dados mmWave [57].

Em segundo lugar, o ambiente de transmissão ideal da tecnologia mmWave são as ligações. LoS, que são naturalmente suportados por comunicações D2B [58], enquanto

isso, o protocolo MAC de ligações D2B pode ser personalizado para promover o desempenho [59], Por exemplo, a autenticação do processo pode ser simplificado para reduzir a latência [60].

Modelos de Perdas de Percurso na ligação de Células *Drone*

Tendo em conta a altura e mobilidade das células *Drone*, as ligações D2U e D2B no DA-RAN têm um canal com características exclusivas, e que não podem ser adequadamente modeladas através do modelo comum do pathloss²⁶ do U2B.

Seguidamente apresentamos alguns modelos de pathloss de ligação de célula *Drone* no contexto da análise da ligação D2U e da ligação D2B, respetivamente. O modelo A2G de perdas de percurso proposto em [6] é usado para analisar ligações D2U e D2B. A probabilidade das ligações em linha de vista LoS do modelo A2G é dada pela seguinte expressão [61]:

$$P(LoS) = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\arctan(\frac{h}{r}) - a))}, \quad (1)$$

Onde h é a altitude de uma célula *Drone*, r é a distância horizontal entre a célula-*Drone* e o outro nó de comunicação (utilizador em DAs ou BS). Sendo que a e b são constantes determinados por diferentes tipos de ambiente, como rural, urbano, etc. Não levando em conta as alturas das antenas da BS, o modelo das perdas médias dado por A2G pode ser expresso da seguinte forma [61]:

$$PL(h, r) = 20 \log\left(\frac{4\pi f_c \sqrt{h^2 + r^2}}{c}\right) + P(LoS)\eta_{LoS} + (1 - P(LoS))\eta_{NLoS}, \quad (2)$$

onde f_c (em Hz) e c (em m/s) são a frequência da portadora e a velocidade da luz, respetivamente. η_{LoS} e η_{NLoS} são perdas médias adicionais para as ligações LoS e NLoS que são dependentes do ambiente. Por exemplo, em ambiente urbano a lista de parâmetros (a , b , η_{LoS} , η_{NLoS}) toma os seguintes valores (9, 61, 0, 16, 1, 20).

As perdas do modelo A2G versus altitude para diferentes r e f_c são mostrados na figura 14. Aumentando a altitude, em todas as curvas inicialmente diminuem e de seguida aumentam lentamente, isto porque no espaço de baixa altitude, as perdas são

²⁶ *Pathloss* em telecomunicações é a perda de percurso no espaço livre *free-space path loss* (FSPL) é a atenuação de energia de rádio entre os pontos de duas antenas considerando a área de captura da antena de receção livre de obstáculos (LoS).

determinadas principalmente pela probabilidade de ligação LoS aumentar com a altitude levando a um aumento acentuado de $P(\text{LoS})$, o que diminui as curvas de *pathloss*.

Enquanto que para altitude elevada $P(\text{LoS})$ permanece quase constante para todos os valores da altitude; logo as curvas de *pathloss* são dominadas pela atenuação de espaço livre. Além da altitude, o *pathloss* A2G é também influenciado pela distância horizontal r e frequência de portadora f_c .

Se aumentarmos o r também aumentam todos os valores de *pathloss* em cada curva mudando assim a forma da curva, ou seja, o aumentar f_c afeta o primeiro termo na Equação 2, e desloca toda a curva um valor constante [52].

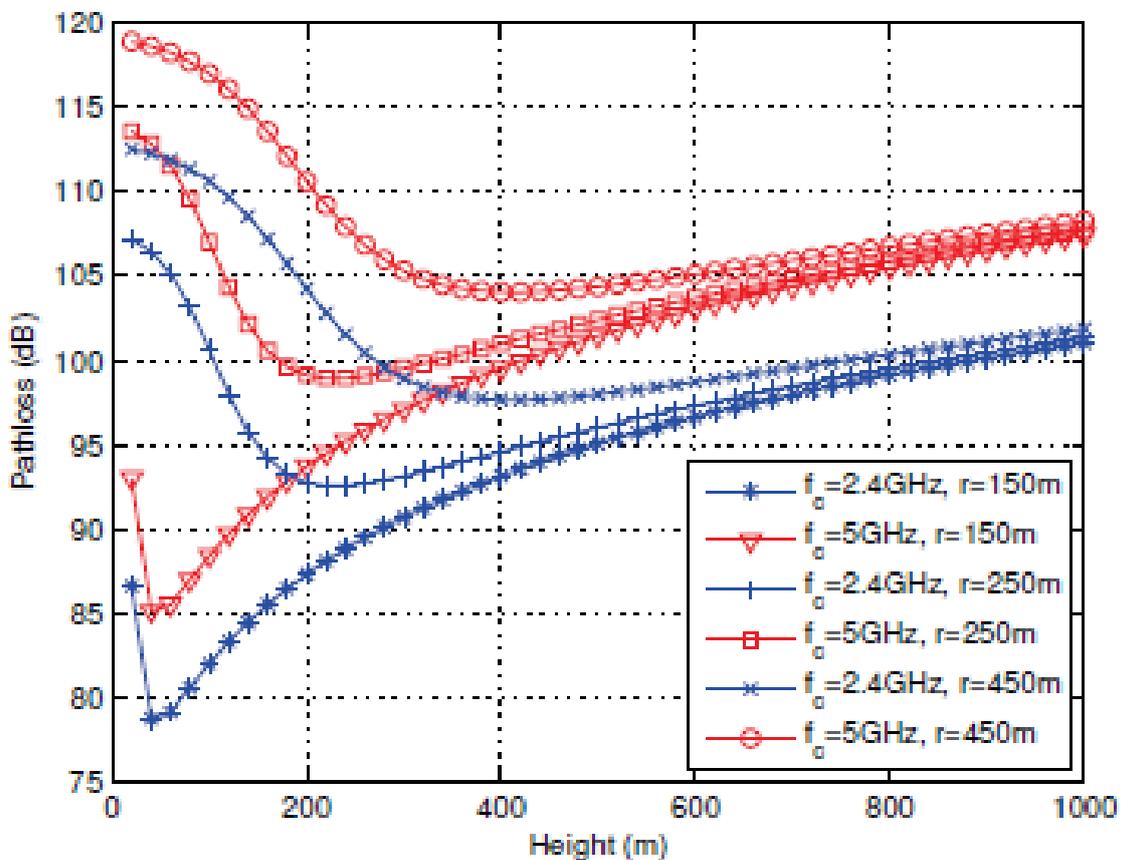


Figura 14- Modelo A2G de perdas de percurso (*pathloss*) [52].

Principais Configurações de Células-Drone

Apresentamos algumas configurações possíveis a serem integradas nas células-Drone:

Drone-relay (Drolay): comparado com uma BS de macro, os relés requerem menos poder de processamento, porque o seu RRH pode ser relativamente simples, e eles não podem exigir uma BBU de bordo. Consequentemente, operam com cargas leves, isto é, sem equipamentos adicionais para além dos necessários para a operação do *Drone* e potencialmente consumir menos energia [49].

O tamanho e peso dos nós RAN pode não ser crítico para HetNets terrestres; contudo, uma carga mais leve melhora a resistência e diminui as despesas de capital e operacionais (CAPEX e OPEX) significativamente em operações de células-*Drone*.

Small-Drone-BS (Pequenos Drones): assemelham-se a small-BSs terrestres com transporte (*backhaul*) sem fio. Se uma ligação confiável (*fronthaul*) sem fio poder ser mantida apesar a mobilidade dos BSs *Drones*, a sua vantagem é dupla:

Primeiro, alivia o peso e o processamento da potência necessária para uma BBU a bordo.

Em segundo lugar, se combinado com C-RAN, pode permitir cooperação.

O C-RAN é particularmente útil para redes HetNets densas [62], ou quando uma frota de BSs-*Drone* é implantada.

Macro-Drone-BS: eles assemelham-se a macro-BSs terrestres com backhaul sem fio. Podem ser implantados para maior durabilidade, cobertura mais ampla, ou aumento da confiabilidade da rede, por exemplo, nas áreas rurais. Como a cobertura está fortemente relacionada à altitude e potência, as macro-*Drone* BSs podem ter um tamanho maior, o que permite mais carga útil (por exemplo, *Drones* de altitude média de longa duração) [51].

Além da discussão acima, o design eficiente da célula-*Drone* pode ser aperfeiçoado pelos avanços no armazenamento de energia a um custo reduzido. E sendo mais leves, os amplificadores de potência de alta eficiência, e combustíveis alternativos, para algumas regiões.

Ligação de Backhaul/Fronthaul: em redes terrestres, o *backhaul* / *fronthaul* sem fio é considerado quando a conectividade de fibra é inacessível (por exemplo, HetNets densas ou BSs rurais).

No entanto, é inevitável para redes de células *Drone* multicamadas. O uso de FSO e mmWave são promissores pelas características de taxas binárias elevadas e baixo custo do espectro, no entanto, sua confiabilidade e cobertura são limitados, especialmente para as alterações das condições climáticas [63], [64]. Embora a mobilidade de células-*Drone* ajuda a manter a LOS, é necessária robustez contra as variações rápidas de canal.

Placement (Colocação): As BSs terrestres são implantadas com base no comportamento de tráfego de longo prazo. No entanto, as células-*Drone* exigem colocação rápida e eficiente. Assim sendo, é de importância crítica determinar os parâmetros que afetam o

desempenho de uma célula-*Drone*, como a sua altitude, localização e trajetória, com base nas demandas de rede [48],[65]. Por exemplo, se uma células-*Drone* é utilizada para libertar o congestionamento na RAN dentro de uma célula congestionada, o objetivo é descarregar (*offload*) um número de utilizadores para a célula *Drone* [48]. Particularmente, se o congestionamento está na borda da célula, a célula-*Drone* pode ser colocada na fronteira da célula. Por outro lado, se o congestionamento é no *backhaul*, alguns dos conteúdos mais populares podem ser armazenados em cache numa célula *Drone* para posicionamento centrado do conteúdo, como podemos ver na figura 15.



Figura 15- Exemplo de um possível cenário com três possíveis colocações de célula *Drone* [48].

Além das configurações acima apresentadas, a integração de redes de células *Drone* multicamada requer a avaliação integrada de muitos outros desafios.

Desafios das Células-*Drone*

Na implantação de redes de células-*Drone* multicamada existem desafios adicionais associados às múltiplas camadas que integram as células-*Drone*.

Embora esses desafios sejam semelhantes aos das redes terrestres HetNets, o detalhe particular relacionado com as células-*Drone* é o seguinte:

Processamento de sinal da camada física: Ligação entre os nós das células dos *Drones* e os nós terrestres (isto é, ligações ar-terra) têm características diferentes dos canais terrestres [48],[66]: a pesquisa sobre as ligações ar-terra ainda está em desenvolvimento, e os modelos de canais propostos variam dependendo de fatores como temperatura, vento, folhagem, ambientes próximos do mar, ambientes urbanos e aeronaves utilizadas para campanhas de medição, para alguns locais específicos.

Por exemplo, a maior velocidade no solo provoca rápida variação da diversidade espacial; isto é, diferentes locais em relação ao BS *Drone* podem ter diferentes características de canal simultaneamente [66]. Portanto, o desenho robusto de mecanismos de sinalização com restrições específicas de energia do BSs *Drone* é um desafio.

Dinâmica de interferência: As células *Drone* nas proximidades podem sofrer interferência *co-channel* (co canal) nas ligações ar-terra e *backhaul/fronthaul*. Além disso, a mobilidade de um BS *Drone* cria um desvio Doppler²⁷, que causa severa interferência entre portadoras para RATs nas altas frequências (por exemplo, mmWave).

Em HetNets, a interferência de sistemas terrestres e canais ar-terra podem diminuir a capacidade, portanto, esquemas de gestão avançada de interferências, e mobilidade são consideradas requisitos característicos entre as ligações terrestres e as células-*Drone*.

Cooperação entre as células-*Drone*: A natureza das redes de células *Drone* multicamada requer cooperação entre as células *Drone* para eficiência na gestão de recursos de rádio. Além disso, as células-*Drone* podem cooperar para se adaptarem à mobilidade dos utilizadores para diminuir a entrega, otimizar o poder e alocação de recursos e evitar colisões.

Decisão e planeamento de infraestrutura: o número das células-*Drone* ativas (sua tecnologia de acesso, memória e velocidade) a ser utilizada para uma rede de *Drones* multicamada depende das circunstâncias, tais como condições meteorológicas adversas, tamanho da área a ser abrangida, tipo de serviço (por exemplo, realidade virtual, IoT), benefício-alvo da rede (por exemplo, alívio de congestionamento, resiliência, baixa latência) ou duração do serviço.

Gestão da Célula-Drone

²⁷ *Doppler* é um fenómeno físico observado nas ondas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento com relação ao observador.

A estrutura de uma célula-*Drone* não é uma solução única para todos casos; em vez disso, é adaptada com base no benefício-alvo, juntamente com a gestão individual das células-*Drone*. Para além disso, as redes de células *Drone* multicamada exigem organização e monitorização ativa (por exemplo, nós de localização dinâmica ou células congestionadas).

São necessárias três competências para integrar células-*Drone* que já possuem redes celulares sofisticadas, a seguir indicadas. As informações coletadas por BSs sozinhas podem ser inadequadas para gerar inteligência para gerir células *Drone*.

Informações globais: as informações globais incluindo localização, tipo e hábitos dos utilizadores, funcionalidade de BSs e conteúdo a encaminhar deve ser armazenadas e analisadas centralmente, sendo que *Big Data* ²⁸ e *Cloud Computing* (computação em nuvem) podem ser soluções eficazes para esse fim.

Programabilidade: Ambas as células-*Drone* e ferramentas de rede precisam de ser programadas com base nas atualizações de rede, além disso, compartilhar os recursos disponibilizados por uma célula-*Drone* pode reduzir o CAPEX e OPEX.

Controlo: A *Network Functions Virtualization* (NFV) pode fornecer capacidades de controlo nas redes sem fio, que devem ser configuradas eficientemente e de forma contínua para integração/desintegração das células-*Drone*, de forma a que a mudança protocolos venha possibilitar novos caminhos. *Software Defined Networking* (SDN) pode também ser útil para atualizar a rede automaticamente através de estratégia de controlo baseado em software.

A arquitetura atual do LTE pode não incorporar todas estas competências, mas a nuvem, o SDN, e as tecnologias NFV podem permitir um sistema de comunicação sem fio eficiente [62].

²⁸ *Big Data* refere-se a um grande conjunto de dados armazenados.

Capítulo 4

Resultados das Simulações

O presente capítulo faz a descrição de vários cenários de multi-conetividade 5G, onde serão avaliados cenários com ligações D2D e acesso assistido por Drones criados no simulador de sistema em Java, ²⁹dentro de uma estrutura de rede celular LTE-A. Para fazer os gráficos usou-se o MatLab³⁰.

Os resultados obtidos dos cenários são diferenciados, nomeadamente, pelo número de utilizadores, distância entre os utilizadores, tipos de algoritmos de scheduling e diferentes KPIs³¹.

4.1 Implementação em Java

Inicialmente a estrutura típica de rede celular LTE-A já se encontrava desenvolvida num simulador de sistema em Java. Partindo deste ponto, desenvolveu-se a introdução de acesso assistido por Drones na rede celular LTE-A. Para tal, foi necessário implementar várias funcionalidades, de modo a obter uma metodologia similar à comunicação D2D do acesso assistido por Drones. Posteriormente, serão apresentadas algumas especificações desenvolvidas no simulador de sistema com base nos conhecimentos adquiridos.

Principais Alterações no Algoritmo do simulador

²⁹ Java é uma linguagem de programação orientada a objetos desenvolvida na década de 90.

³⁰ MatLab é de um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico.

³¹ KPI é uma métrica que fornece visibilidade sobre o desempenho.

Inicialmente no simulador já se encontrava desenvolvida a topologia celular e a D2D. Foi necessário implementar novas funcionalidades, para que o simulador incluísse a comunicação por Drone. De seguida, serão apresentadas algumas alterações executadas no simulador de sistema.

Adicionou-se na classe *Topology* o método *createDroneCells* que permitiu a criação da topologia Drone, em que esta define as posições iniciais dos Drones, assim como a dos utentes servidos por Drones. Posteriormente criou-se o método *moveDrone* na classe *NodeB*, que permitiu a deslocação dos Drones num movimento espiral.

Estas inovações foram as principais alterações efetuadas no simulador que passou a permitir a comunicação via Drones. Entretanto, houve mais alterações no simulador, fruto destas alterações, mas estas foram elaboradas a partir da cópia das outras topologias já existentes, como por exemplo exportação de dados para ficheiros de texto, a possibilidade de alteração de parâmetros do Drone (número de utentes servidos por Drone, número de Drones, altura dos Drones, velocidade dos utentes servidos por Drones, potência de transmissão dos Drones, altura dos Drones, etc) entre outros. Os programas de avaliação do desempenho (atrasos, *throughput*, CDF do *throughput*, *throughput* médio, etc) também tiveram todos de ser alterados para incluir as comunicações via Drones.

4.1.1 Modelo do Sistema

Consideramos o problema de partilha de espectro entre múltiplas ligações D2D, com Drones e celulares na ligação descendente (*downlink*). Começamos com o conjunto de ligações celulares como $K_C = \{1, 2, \dots, K_C\}$, o conjunto de ligações D2D com $K_D = \{K_C + 1, K_C + 2, \dots, K_C + K_D\}$ e o conjunto de ligações com Drones com $K_E = \{K_C + K_D + 1, K_C + K_D + 2, \dots, K_C + K_D + K_E\}$ $K = K_C + K_D + K_E$ é o conjunto de todas as ligações no sistema com tamanho $|K|$. O conjunto de subportadoras do LTE-A é N com tamanho $|K| > N$, assumindo que cada subportadora é atribuída no máximo a uma ligação celular, no entanto, cada ligação D2D ou via Drone pode reutilizar todas as subportadoras para aumentar a eficiência do espectro, explorando a diversidade espacial [14].

4.2 Resultados das simulações

Avaliação de Cenários 5G

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos de todo o desenvolvimento efetuado no simulador de sistema. Para tal, foram criados vários cenários que permitissem explorar as comunicações assistidas por drone, D2D, e Downlink, incorporado num ambiente de macro células.

Para cada cenário foram utilizados dois *schedulers* diferentes que possibilitassem entender melhor o funcionamento das comunicações assistidas por drone, D2D, Downlink, no contexto de uma rede celular.

O *scheduler* Max C/I (*Maximum carrier-interference*) usa um algoritmo que beneficia a troca de informação entre os utilizadores com máxima relação C/I o que resulta no aproveitamento do melhor canal proporcionando um throughput ³²elevado, ou seja, favorece utilizadores com melhor relação sinal/ruído (SINR - *Signal-to-Interference plus Noise Ratio*). Deste modo dá-se prioridade à comunicação entre os dispositivos que estão mais próximos uns dos outros.

A medição de SINR é realizada periodicamente através do indicador de qualidade do canal, *Channel Quality Indicator* (CQI) por cada utilizador.

O *scheduler* Max C/I não é justo, conseqüentemente, dá menos oportunidade aos utilizadores com pior relação sinal/ruído de transmitir/receber os seus dados. Os utilizadores com menor potência recebida, ou que se encontram na fronteira da célula de transmissão ficam desfavorecidos.

Neste contexto, avaliou-se também um *scheduler* justo. O *scheduler* Round Robin (RR) usa um algoritmo justo, trata todos os utilizadores com a mesma prioridade independentemente da sua localização. O que significa também que os utilizadores com SINR mais baixa vão transmitir os seus dados ainda que estejam bastante afastados uns dos outros com a mesma duração e com a mesma prioridade de qualquer outro utente.

Nas estações de base eNB usou-se apenas o *scheduler* Proportional Fairness que sendo justo considera o SINR do canal de comunicação de cada utente antes de dar prioridade ao utente com melhor relação entre o máximo throughput instantâneo e o throughput médio transmitido até esse instante.

A fonte de tráfego utilizada quer na eNB como nas comunicações D2D e via Drones foi a CBR (*Constant Bit Rate*) gerando-se sempre a mesma quantidade de dados, com exatamente os mesmos intervalos de tempo entre dados consecutivos.

³² Throughput de rede ou taxa de transferência é a quantidade de dados transferidos de um lugar a outro.

Avaliação de Cenários 5G

Foram utilizados diferentes indicadores de performance, tais como:

- *Throughput* a quantidade de dados transferidos, ou processados, num determinado espaço de tempo.
- Distribuição do SINR (geometria) que corresponde à relação entre a potência do sinal recebido na própria célula e a soma da interferência total de todas as outras células vizinhas mais a potência do ruído branco gaussiano.
- CDF - Cumulative Distribution Function, consiste na distribuição de probabilidade de uma variável aleatória. Calculou-se o CDF do *Throughput* e o CDF do SINR.

4.2.1 Cenário 1

Este cenário considera 2 e 10 UEs por cada célula Drone que tem um raio de 25m, e com a potência de transmissão mínima (30 dBm).

A Tabela 7, mostra todas as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
Global	Tempo de Simulação (s)	500
	TTI (ms)	0,5
	Tipo de Mobilidade	Dentro de Sector
	CQI	15
	PRB	50
	Modelo de Propagação	Hata 3GPP
	Reuso de Frequência	1
	Modelo de Tráfego	CBR
Celular	Scheduler	MaxCI
	Número de Setores	9
	Número de CUEs por Setor	10
	Raio (m) de Célula de eNB	289
	Velocidade (Km/h)	30

Avaliação de Cenários 5G

	Potência de Transmissão	46 dBm
D2D	Scheduler	MaxCI
	Número D2D _{TX}	36
	Número de D2DR _x por D2D _{TX}	2
	Raio (m) de D2D _{TX}	50
	Velocidade (Km/h)	3
	Potência de Transmissão	24 dBm
Drone	Schedulers	MaxCI
	Número de UEs por Drone	2&10
	Raio (m) da Célula Drone	25
	Velocidade (Km/h)	30
	Velocidade do BS Drone	Normal
	Potência de Transmissão	30 dBm
	Altura dos Drones(m)	1,5

Tabela 7- Parâmetros de simulação para o cenário 1.

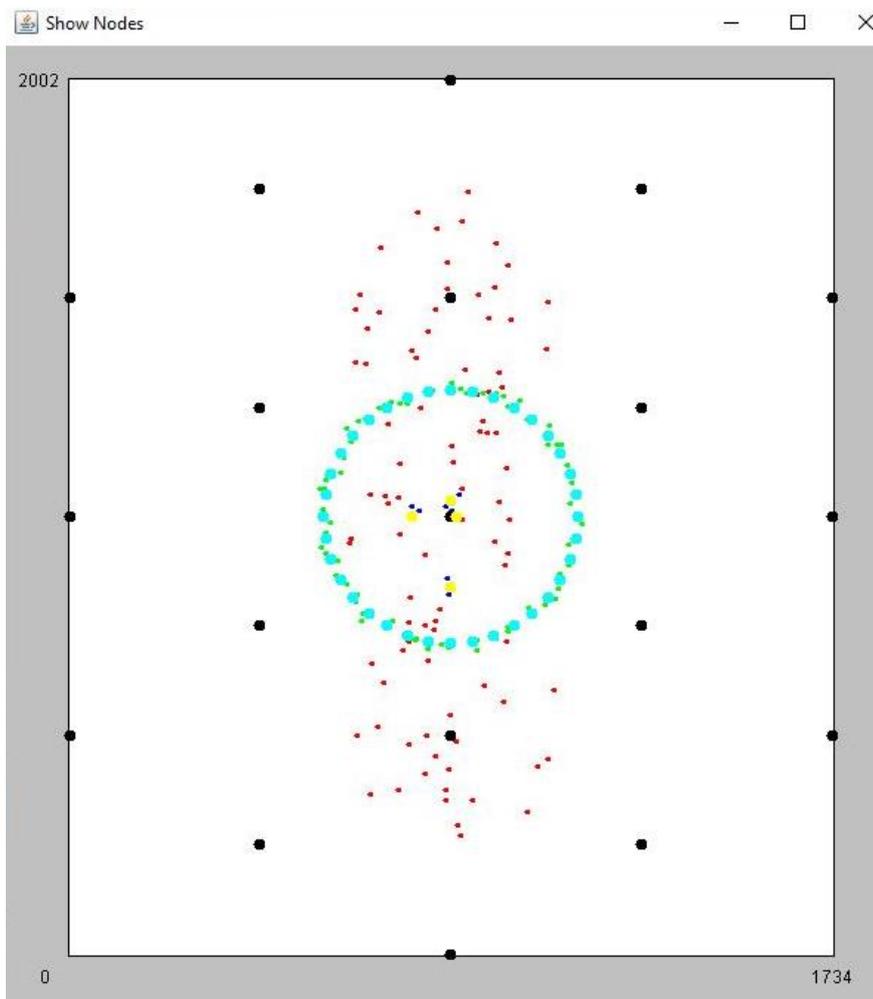


Figura 16- Ilustração da topologia para os cenários 1 e 2.

Avaliação de Cenários 5G

Na figura acima podemos visualizar a topologia para os cenários 1 e 2, e conseguimos perceber a existência de 4 células Drone (pontos amarelos) na zona central do eNB central, em que cada célula Drone contém 2 a 10 UEs que se deslocam ao longo do tempo de simulação. A comunicação assistida por drone requer que o drone esteja constantemente a transmitir, A comunicação direta entre os dispositivos D2D (pontos azuis) é realizada em simultâneo com o caso da comunicação celular. Cada célula associada a um eNB (pontos negros) é composta por três setores (uma antena por setor), em que cada setor contém 10 UEs, o que significa que existem no total 30 UEs (pontos vermelhos) por cada um dos três eNBs no centro da figura.

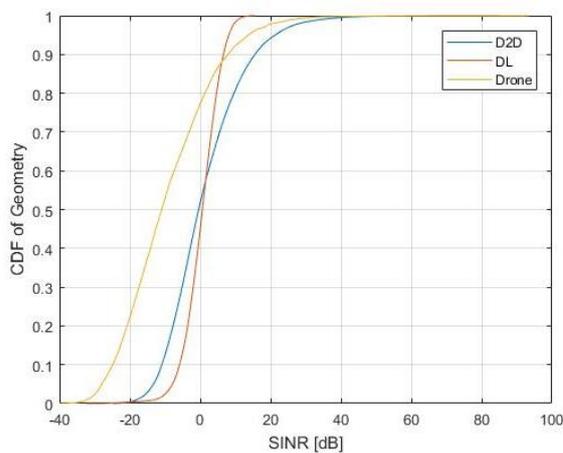


Figura 17 - CDF de Geometria em função do SINR Max CI, 2 UEs por Drone no Cenário 1.

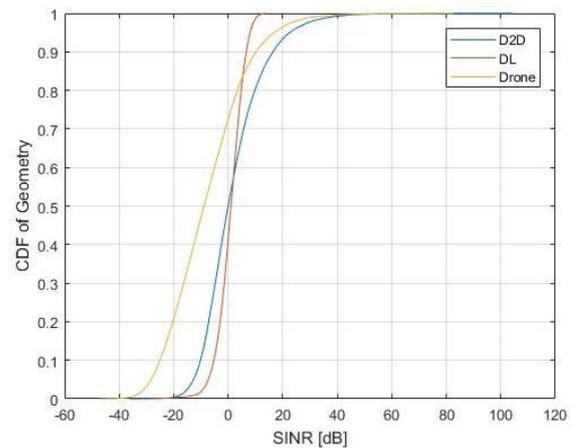


Figura 18 - CDF de Geometria em função do SINR Max CI, 10UEs por Drone no Cenário 1.

Para este primeiro cenário, em que temos 2 UEs, tal como podemos observar através da figura 17 o CDF do SINR (Geometria) para 50% dos utentes Drone, é de -11 dB, para 50% dos utentes D2D é de -0.4dB, enquanto que a SINR média correspondente a 50% dos utentes celulares 0.5dB. Isto indica que as comunicações via Drone são as que têm pior SINR médio, seguindo-se as comunicações D2D e as comunicações têm melhor SINR médio.

No caso de 10 UEs por Drone, verificamos que a SINR média correspondente a 50% de utentes Drone, é de -8.9dB, no caso dos utentes D2D é -0.59dB, em contraste com a SINR média dos utentes celulares de 0.8dB. A introdução de mais UEs servidos por Drones aumentou a interferência não só dentro das células Drone, mas também nas áreas cobertas pelos Drone onde há comunicações celulares e D2D.

Avaliação de Cenários 5G

Espera-se que venha a ocorrer uma redução na taxa de transmissão das comunicações via Drone, pois houve o aumento de utentes de 2 para 10, mas a fonte de tráfego mantém o seu ritmo binário constante.

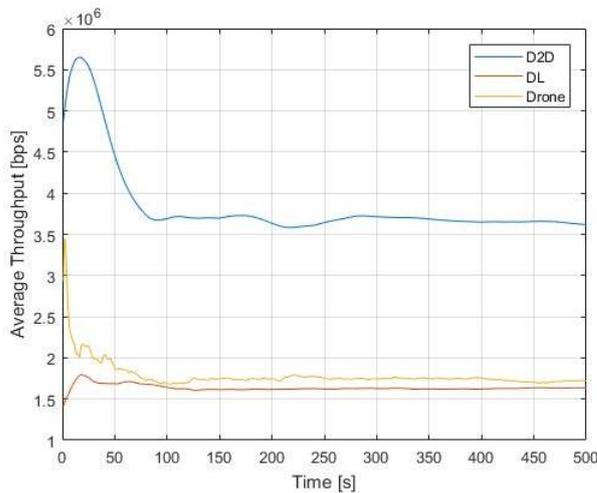


Figura 19 - Throughput médio Max CI, 2 UEs por Drone para o Cenário 1.

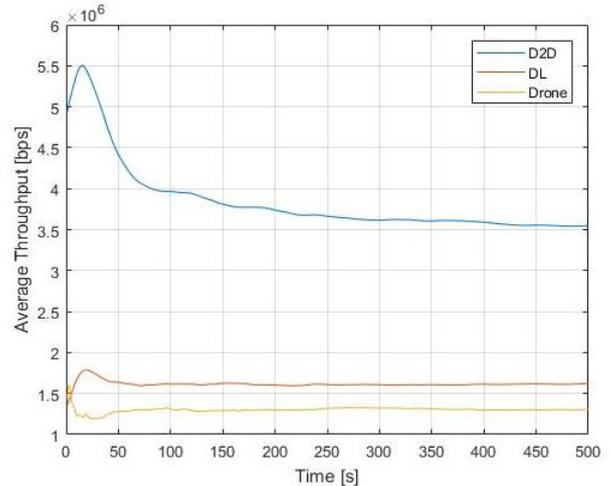


Figura 20 - Throughput médio Max CI, Drone 10 UEs para o Cenário 1.

Os resultados associados ao *Throughput* médio em função do tempo de simulação para este primeiro cenário, em que o número de utentes é 2, estão ilustrados na figura 19. É facilmente perceptível que nos utentes Drone, a taxa de transmissão ronda os 1.8Mbps, enquanto que para os utentes D2D as taxas de transmissão rondam os 3.6Mbps, já nos utentes celulares a média da taxa de transmissão ronda os 1.6Mbps. Ou seja, os utentes D2D face a um mesmo raio de cobertura que os Drones, mas sendo estáticos obtêm um melhor resultado de *throughput* face às comunicações por Drone ou mesmo as celulares.

No caso de termos 10 UEs, e de acordo com a figura 20, a média da taxa de transmissão dos utentes Drone baixa para os 1.3Mbps, em comparação com os utentes D2D e os utentes celulares cuja média se mantém nos 3.6Mbps, e 1.6Mbps, respetivamente. Ou seja, o D2D continua a apresentar o melhor resultado face a comunicação por Drone e a comunicação celular como vimos anteriormente.

Avaliação de Cenários 5G

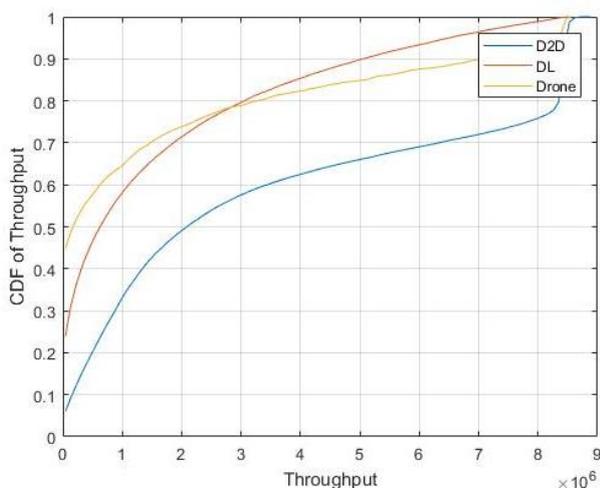


Figura 21 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs por Drone para o Cenário 1.

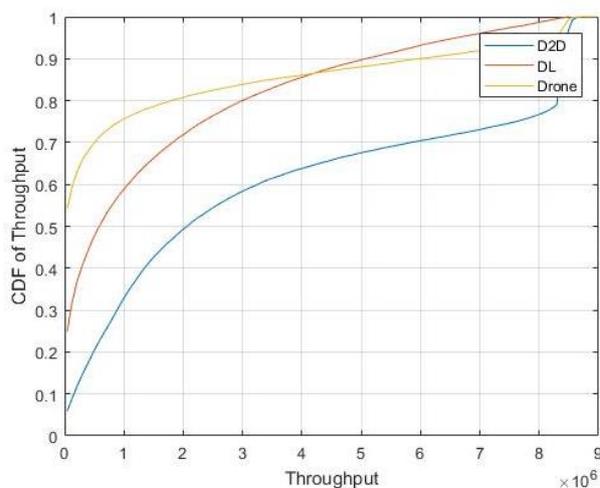


Figura 22 - CDF de Throughput Max CI, Drone 10 UEs para o Cenário 1.

Analisando o gráfico da figura 21, correspondente ao CDF de *Throughput* para este cenário, quando temos 2 UEs por Drone, podemos verificar que a curva com melhor desempenho é a D2D segue-se a DL (celular) e por último o Drone. Isto já era esperado face ao *throughput* médio ao longo do tempo. Pode-se verificar que 45% das ligações via Drone têm *throughput* muito baixos. Há, no entanto 10% de utentes Drones que recebem *throughputs* maiores do que 7 Mbps, devido à maior proximidade do Drone.

No caso em que o número de utentes por Drone é igual a 10, analisando o gráfico do CDF de *Throughput*, podemos observar na figura 22, que o desempenho das curvas D2D e DL se mantém exceto a dos Drones que piora. Agora há mais de 50% das ligações via Drone que têm *throughput* muito baixos. Há, no entanto 10% de utentes Drones que recebem *throughputs* maiores do que 6 Mbps.

4.2.2 Cenário 2

O cenário 2 contém 2 e 10 UEs por Drone, a transmitirem/receberem num raio máximo de 25m com aumento da potência de transmissão máxima para 40 dBm.

Na Tabela 8 estão as informações associadas a este cenário, sendo que os outros dados são os mesmos do cenário 1.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Schedulers	MaxCI
	Número de UEs por Drone	2 & 10
	Raio (m) da Célula Drone	25
	Velocidade (Km/h)	30
	Potência de Transmissão	40 dBm

Tabela 8 - Parâmetros de simulação para o cenário 2.

Avaliação de Cenários 5G

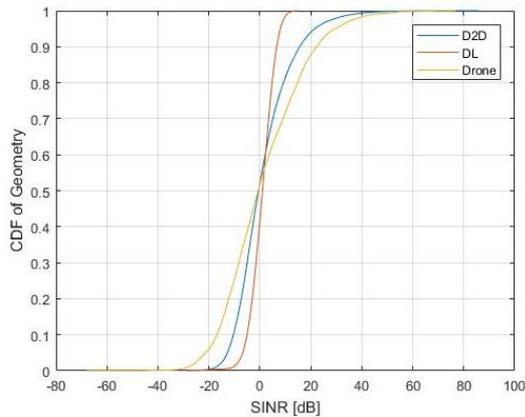


Figura 23 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, 2UEs para o Cenário 2.

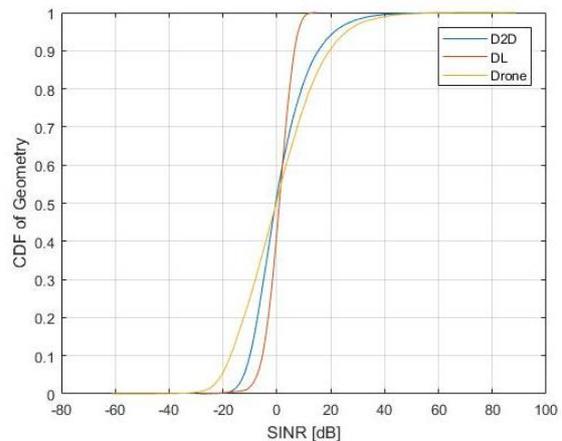


Figura 24 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, 10 UEs para o Cenário 2.

Na figura 23 podemos observar o gráfico de CDF da Geometria (i.e., SINR) em função de SINR, no caso de termos 2 UEs por Drone. Os resultados indicam que o desempenho das comunicações Drone e D2D são superiores à comunicação celular ainda que sejam idênticos para 50% dos casos. Verifica-se que a SINR média correspondente a 50% de utentes Drone, é de -0.3dB, no caso dos utentes D2D é -0.2dB, e a SINR média dos utentes celulares de 0.0dB. Para valores elevados de SINR as comunicações via Drone e D2D apresentam valores de desempenho superior ao das comunicações DL.

No caso em que temos 10 UEs por Drone, tendo em conta o gráfico da figura 24 podemos observar que os resultados são muito idênticos aos da figura anterior com 2 UEs por Drone. As comunicações via Drone e D2D continuam superiores à comunicação celular para os valores mais elevados de SINR. Isso significa que o aumento de número de utentes das células Drone não teve impacto sobre os valores de Geometria em função SINR.

Avaliação de Cenários 5G

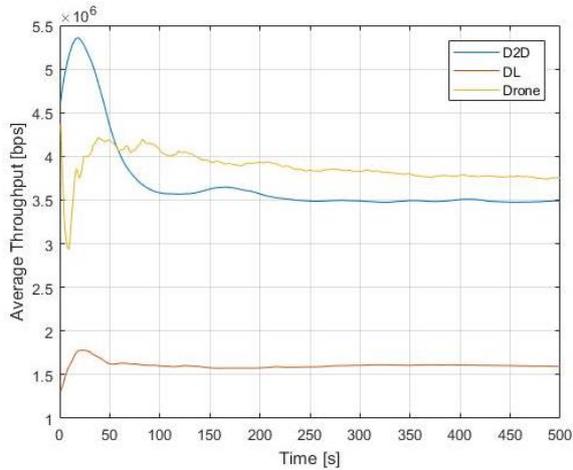


Figura 25 - Média de Throughput Max CI 2 UEs para o Cenário 2.

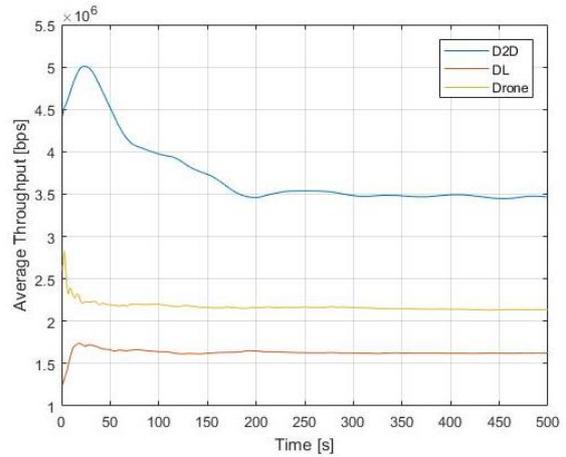


Figura 26 - Média de Throughput Max CI 10 UEs para o Cenário 2.

Em relação ao *throughput* médio em função de tempo para este cenário, ilustrado na figura 25, podemos dizer que nas ligações via Drone, os seus utentes têm uma média de *throughput* um pouco superior ao das comunicações D2D e com *throughput* médio muito superior ao dos utentes celulares. Nos utentes Drone a média de *throughput* é de 3.8Mbps, 3.5Mbps para os utentes D2D, e para os utentes celulares a média de *Throughput* é de apenas 1.6Mbps, o que corresponde a menos de metade do *throughput* médio dos utilizadores das ligações por Drone.

No caso em que o há 10 UEs por Drone, como nos é ilustrado na figura 26, as ligações por Drone têm um *throughput* médio inferior ao das D2D, mas ainda assim superior ao dos utentes celulares. Nos utentes Drone a média de *throughput* é 2.2Mbps, 3.5Mbps para os utentes D2D, enquanto que para os utentes celulares a média de *throughput* é de aproximadamente 1.6Mbps. Como se esperava, o aumento do número de utilizadores das células Drone teve impacto apenas nas ligações por Drone, onde a fonte de tráfego CBR transmitiu a mesma informação para 10 UEs que antes era transmitida para apenas 2 UEs.

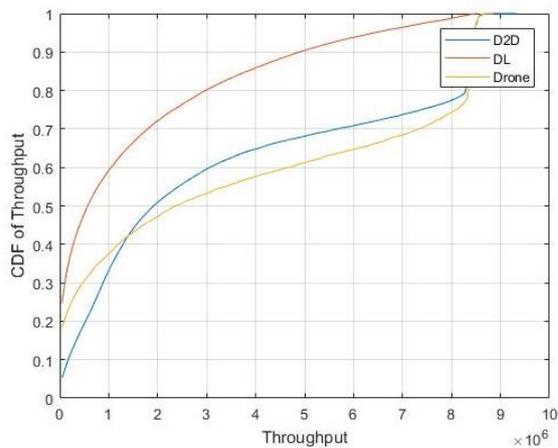


Figura 27 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs para o Cenário 2.

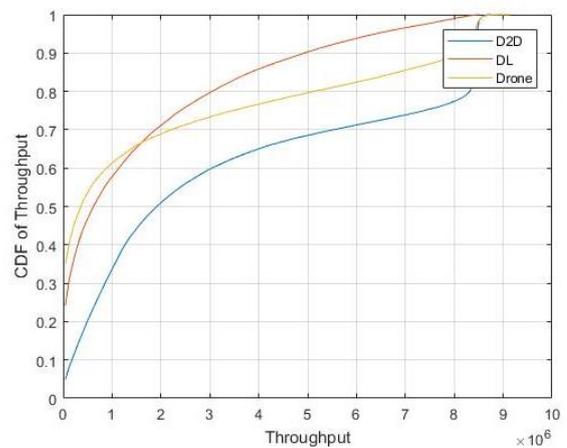


Figura 28 - CDF de Throughput Max CI, 10 UEs para o Cenário 2.

Avaliação de Cenários 5G

No caso de termos 2 UEs por Drone, no gráfico do CDF de *throughput* da figura 27, observamos que as comunicações via Drone e D2D têm desempenhos próximos e ambos superiores ao da comunicação celular. Ainda assim, devido à deslocação dos Drones verifica-se que há cerca de 18% de utentes Drone que têm ritmos binários quase nulos, sendo 5% de utentes D2D nesta situação e 24% dos utentes celulares com ritmos binários quase nulos.

No caso de termos 10 UEs por Drone, no gráfico do CDF de *throughput* da figura 28, observamos a esperada degradação do desempenho das comunicações via Drone face à anterior situação com 2 UEs por Drone. Pode-se verificar que agora há 33% de utentes Drone com ritmos binários quase nulos. As restantes comunicações D2D e celulares mantêm a mesma distribuição de *throughput*.

Podemos verificar também que há 10% de utentes Drone (e utentes D2D) com valores de *throughput* acima de 8.5 Mbps em ambas as figuras.

4.2.3 Cenário 3

O cenário 3 deve ser comparado com o cenário 1, onde se mantém 2 e 10 UEs por Drone, tendo o raio das células Drone ou das comunicações D2D o valor máximo de 50 m, mantendo-se a potência de transmissão mínima (30 dBm) de cada Drone.

Na Tabela 9 e figura 29 estão as informações associadas a este cenário. Os outros dados são os mesmos do cenário 1.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Schedulers	MaxCI
	Número de UEs por Drone	2 & 10
	Raio (m) da Célula Drone	50
	Velocidade (Km/h)	30
	Potência de Transmissão	30 dBm

Tabela 9 - Parâmetros de simulação para o cenário 3.

Avaliação de Cenários 5G

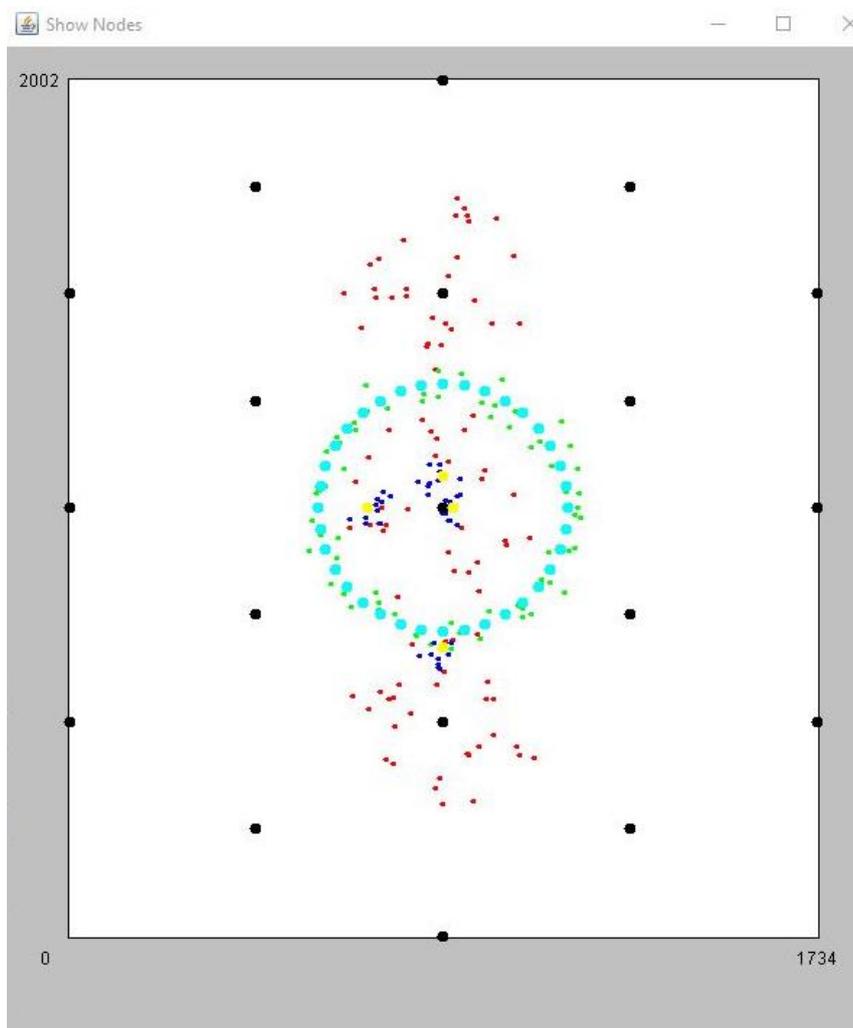


Figura 29 - Ilustração da topologia para os cenários 3 e 4.

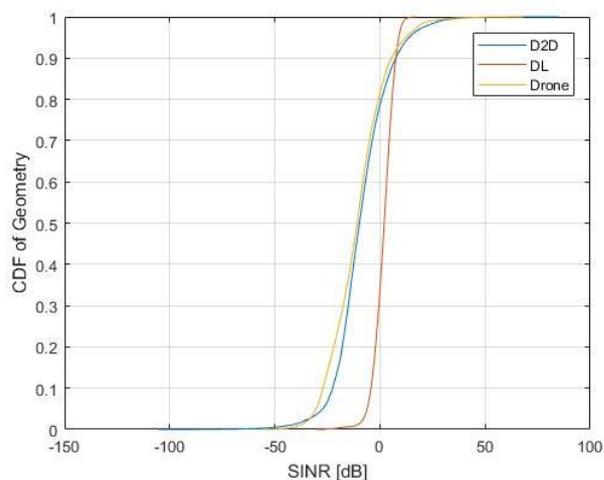


Figura 30 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, 2 UEs para o Cenário 3.

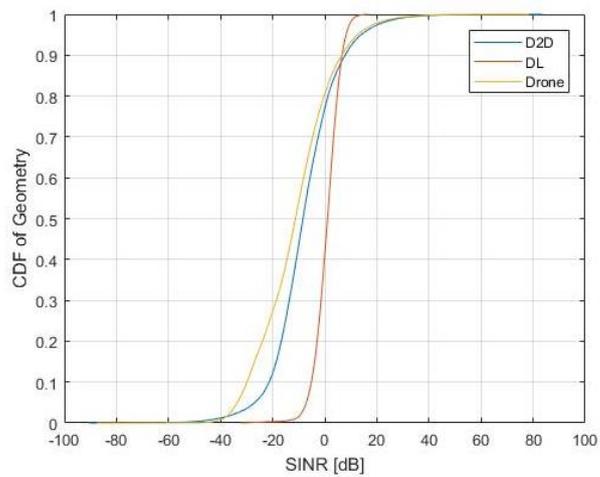


Figura 31 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, 10 UEs para o Cenário 3.

Avaliação de Cenários 5G

Neste cenário, ilustrado nas figuras 30 e 31, os gráficos de CDF da Geometria (SINR) em função de SINR, em ambos os casos (2 UEs e 10 UEs), apresentam resultados de CDF do SINR semelhantes para a comunicação por Drone e para a comunicação D2D. Convém lembrar que nesta dissertação o raio das células Drone é sempre o mesmo que o raio das comunicações D2D. No entanto, há sempre 2 UEs nas comunicações D2D, mas varia-se o número de UEs das células Drone. As diferenças são um pouco mais nítidas quando se aumenta para 10 UEs por Drone. Se compararmos com os correspondentes gráficos do cenário 1, onde o raio das células é 25m, nota-se um deslocamento das curvas de CDF D2D e Drone, para a esquerda. Isto é, há uma diminuição do SINR devido ao aumento do raio para 50m. Mantendo a mesma potência de transmissão o aumento do raio implica na redução da potência recebida que ocorre entre 25m e 50m. A curva de CDF do SINR das comunicações celulares DL mantém-se quase sem alteração comparativamente à do cenário 1.

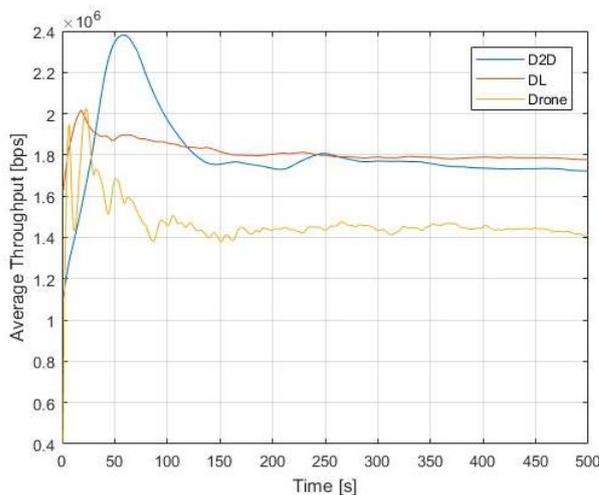


Figura 32 - Throughput médio Max CI, UE 2 para o Cenário 3.

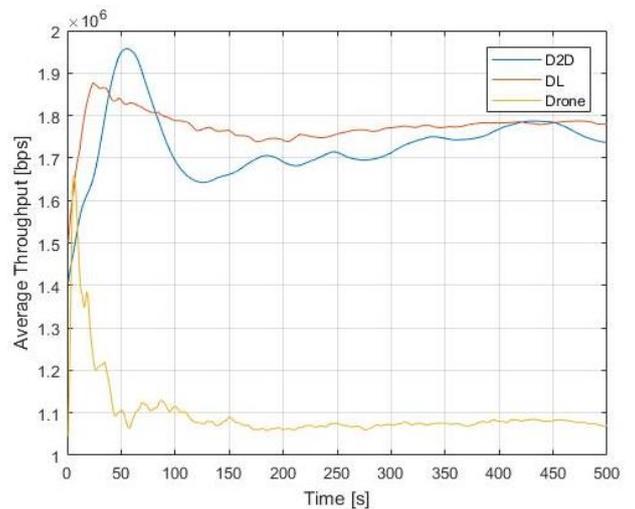


Figura 33 - Throughput médio Max CI, UE 10 para o Cenário 3.

Na análise do *throughput* médio em função do tempo de simulação, tendo em conta 2 UEs por Drone, verifica-se que a comunicação D2D e a comunicação celular apresentam um *throughput* médio idêntico e ligeiramente superior ao da comunicação via Drone, tal como podemos observar na figura 32. Houve uma redução esperada no *throughput* médio devido ao aumento do raio das células nas comunicações via Drone e D2D. Há um ligeiro aumento do *throughput* das comunicações celulares devido a uma redução do raio onde estão os utentes celulares. O simulador de sistema coloca os utentes celulares e D2D em zonas separadas. Quando se aumenta o raio das zonas D2D automaticamente se reduz o raio das zonas onde estão os utentes celulares.

Na análise do *throughput* médio para 10 UEs por Drone, verifica-se que a comunicação por Drone apresentam uma média de *throughput* em função de tempo de quase 1.1 Mbps

Avaliação de Cenários 5G

enquanto que as outras comunicações D2D e DL obtêm cerca de 1.75Mbps, tal como podemos observar na figura 33. O resultado indica que com o aumento de número de utentes servidos por Drones há uma diminuição esperada do *throughput* médio de cada utente visto o débito global da fonte CBR se manter constante.

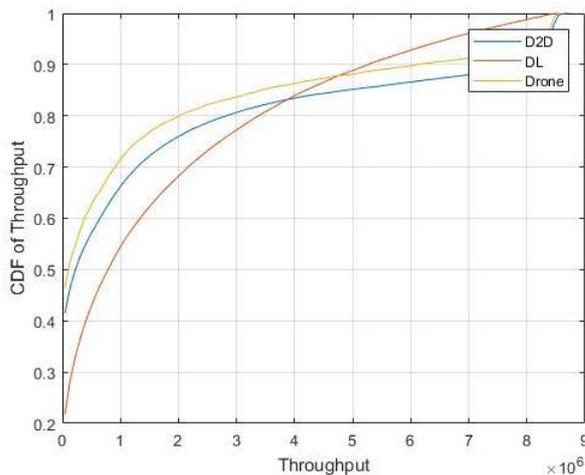


Figura 34 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs para o Cenário 3.

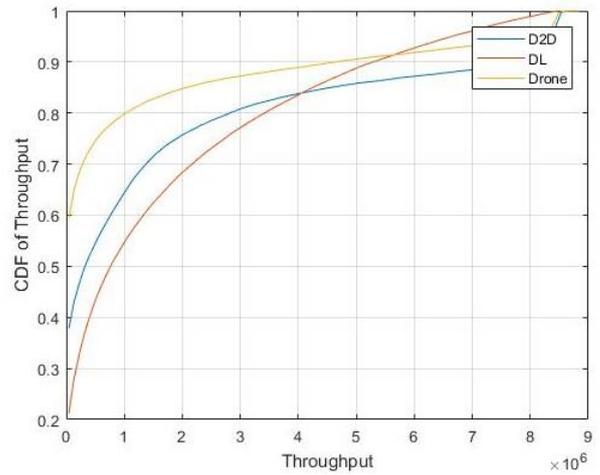


Figura 35 - CDF de Throughput Max CI 10 UEs para o Cenário 3.

No caso do CDF de *throughput*, tendo em conta as figuras 34 e 35, em ambos os casos 2UEs e 10UEs por Drone, nota-se que a comunicação por Drone é a que apresenta os piores resultados. O que se torna mais evidente quando se aumenta para 10UEs por Drone.

Quando há 2UEs por Drone, há cerca de 46% de utentes Drone com ritmos binários quase nulos, enquanto que são 41% os utentes D2D que têm ritmos binários quase nulos. Já os utentes celulares, com ritmos binários são quase nulos são cerca de 21%.

No caso do número de utentes por Drone ser 10, há cerca de 60% de utentes servidos por Drones com ritmos binários quase nulos, enquanto que são 38% os utentes D2D com ritmos binários quase nulos. Já os utentes celulares, com ritmos binários quase nulos mantém-se nos 21%, tal como no caso de 2 UEs.

4.2.4 Cenário 4

O cenário 4 contém 2 e 10 UEs por Drone, transmite-se num raio máximo de 50 m com a potência de transmissão máxima $P_{max}=40$ dBm, tal como no cenário 2.

Na Tabela 10 estão as informações associadas a este cenário. Os outros dados são os mesmos do cenário 2.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Schedulers	MaxCI

Avaliação de Cenários 5G

	Número de UEs por Drone	2 & 10
	Raio (m) da Célula Drone	50
	Velocidade (Km/h)	30
	Potência de Transmissão	40 dBm

Tabela 10 - Parâmetros de simulação para o cenário 4.

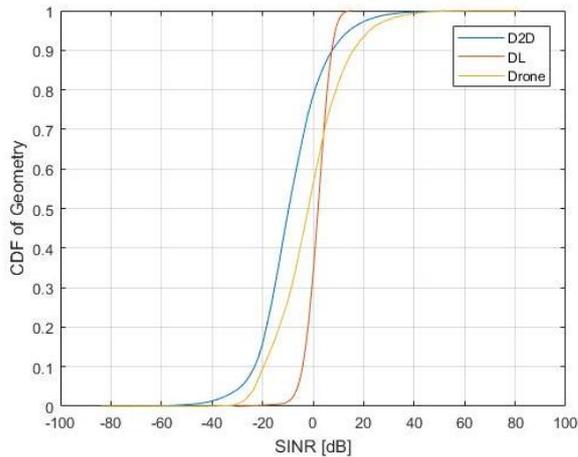


Figura 36 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, 2 UEs Cenário 4.

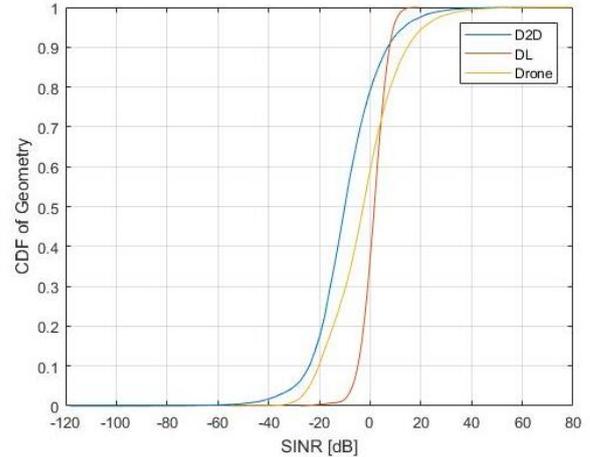
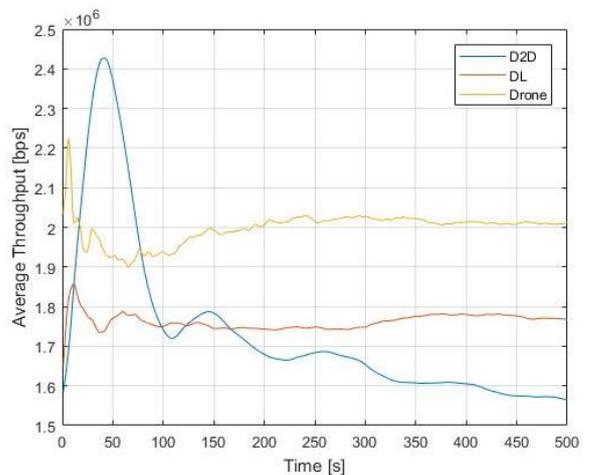
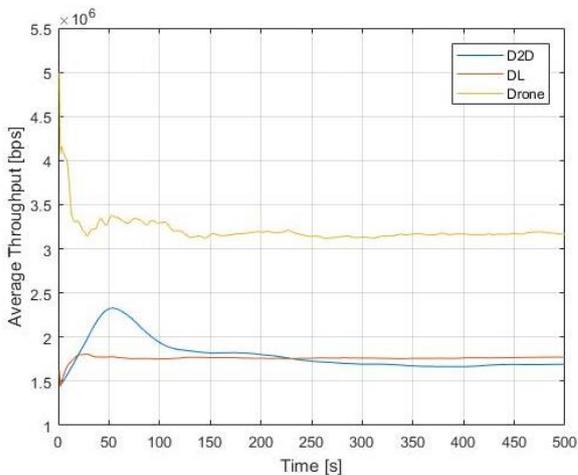


Figura 37 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, 10 UEs Cenário 4.

Neste cenário 4, conforme se ilustra nas figuras 36 e 37, a comunicação D2D apresenta melhores desempenhos comparativamente aos resultados do CDF de SINR do cenário 3, devido ao aumento da potência de transmissão de 1 para 10 Watts (40dBm). Nota-se um muito ligeiro deslocamento da curva Drone para a esquerda, quando se passa dos 2 para 10 UEs, devido à diminuição de SINR dos utentes mais afastados dos Drones, mas servidos por eles. As curvas do CDF do SINR relativas ao desempenho de D2D e DL são as mesmas do cenário 3.



Avaliação de Cenários 5G

Figura 38 - Throughput médio Max CI 2 UEs no Cenário 4.

Figura 39 - Throughput médio Max CI 10 UEs no Cenário 3.

Através das figuras 38 e 39, observamos o *throughput* médio onde se destaca a comunicação via Drone (2 UEs por Drone) que alcança a média de 3.2Mbps de *throughput*, enquanto que as restantes comunicações alcançam apenas 1.75Mbps.

No caso em que o número de utentes sobe para 10, os utentes Drone mantêm o *throughput* médio mais elevado de cerca 2Mbps, ainda que seja mais reduzido do que quando havia apenas 2 UEs por Drone. Segue-se o *throughput* médio dos utentes celulares e muito próximo está o dos utentes D2D. No entanto, estas comunicações D2D apresentam mais variações de *throughput* ao longo do tempo, o que pode ser devido à interferência dos utentes da célula Drone mais exterior que se sobrepõe à zona das comunicações D2D.

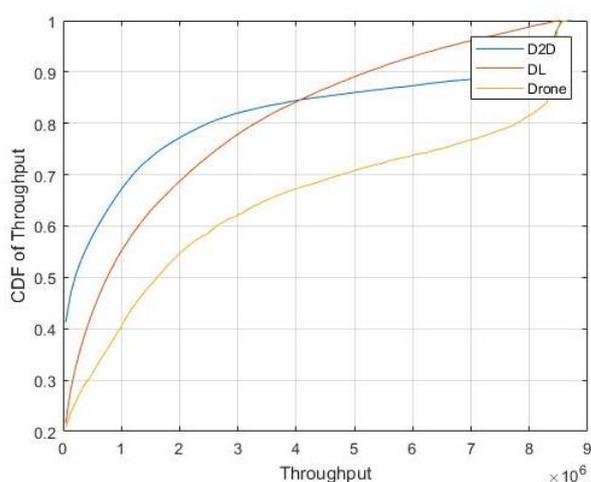


Figura 40 - CDF de Throughput Max CI, 2 UEs, para o Cenário 4.

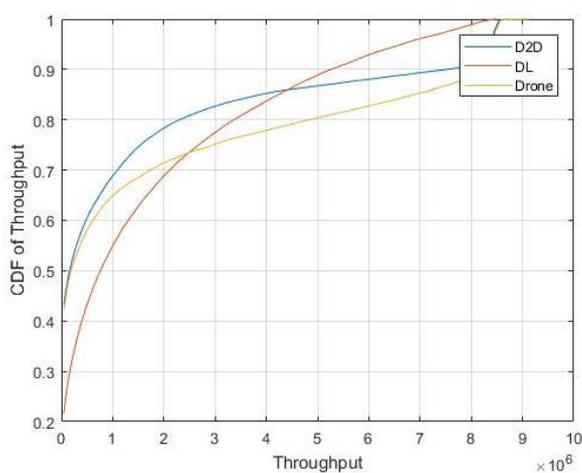


Figura 41- CDF de Throughput Max CI, 10 UEs, para o Cenário 4.

Analisando o gráfico da figura 40, correspondente ao CDF de Throughput para este cenário, quando temos 2 UEs, podemos verificar que a comunicação D2D é a que consegue obter melhores resultados. Segue-se a comunicação celular quando os valores de *throughput* são baixos, e depois as comunicações D2D. Note-se que 42% dos utentes D2D recebem ritmos binários muito baixos ao passo que nos outros tipos de comunicação esta percentagem baixa para os 21%.

Quando número de utentes em cada célula Drone sobe para 10, podemos observar na figura 41, um deslocamento da correspondente curva do CDF do *throughput* para a esquerda. Isto significa que há uma diminuição de *throughput* para os utentes Drone. Já o desempenho das curvas D2D e da comunicação celular (DL) mantém-se. Ao olharmos para o número dos utentes com ritmos binários quase nulos, vemos que cerca de 42% dos utentes Drone têm ritmos binários quase nulos, os mesmos 42% de utentes D2D com ritmos binários quase nulos; enquanto que na comunicação celular apenas 21% dos utentes têm ritmos binários quase nulos.

4.2.5 Cenário 5

No cenário 5 temos 10 UEs por Drone, a transmitirem/receberem num raio máximo de 25m, onde se varia também a potência de transmissão entre $P_{min}=30$ dBm e a potência máxima de transmissão $P_{max}=40$ dBm. A principal alteração está no *scheduler* que passa de MaxCI para Round Robin (RR).

Na Tabela 11 mostra-se todas as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Scheduler	Round Robin(RR)
	Número de UEs por Drone	10
	Raio (m) da Célula Drone	25
	Velocidade (Km/h)	30
	Potência de Transmissão(P)	30 &40 dBm

Tabela 11 - Parâmetros de simulação para o cenário 5.

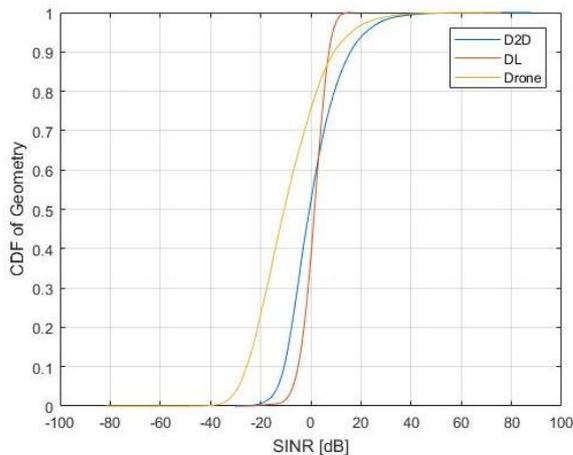


Figura 42 - CDF de Geometria em função SINR, RR, P =30dBm para o Cenário 5.

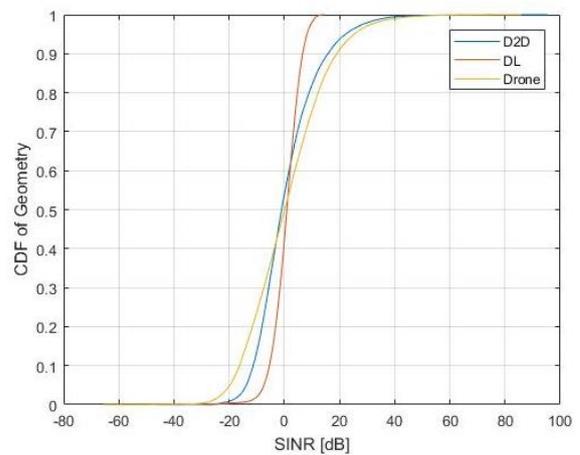


Figura 43 - CDF de Geometria em função SINR, RR, P=40dBm para o Cenário 5.

Neste cenário, ilustra-se na figura 42 o CDF do SINR (Geometria) em função do SINR, com *scheduler* Round Robin no Drones, sendo a potência de transmissão mínima (30 dBm). Para os parâmetros deste cenário, verificamos que no CDF de 50% a SINR da comunicação D2D é de -0.4dB, a das comunicações celulares 0.5dB e a da comunicação por Drone -11dB. Estes são exatamente os mesmos valores de CDF do cenário 1. Daqui conclui-se que não é a mudança de *scheduler* que vai alterar a distribuição do SINR.

No caso da potência de transmissão máxima (40 dBm) nas células Drone, ilustrada no gráfico da figura 43, verificamos que o aumento da potência de transmissão dos drones

Avaliação de Cenários 5G

fez deslocar para a curva de Drone para a direita, resultando em maiores valores de SINR. Verificam-se exatamente os mesmos valores de CDF do SINR do cenário 2. Isto é, a SINR correspondente a 50% de utentes Drone, é de -0.3dB, no caso dos utentes D2D é -0.2dB, e a SINR dos utentes celulares de 0.0dB. Para valores elevados de SINR as comunicações via Drone e D2D apresentam valores de desempenho superior ao das comunicações DL.

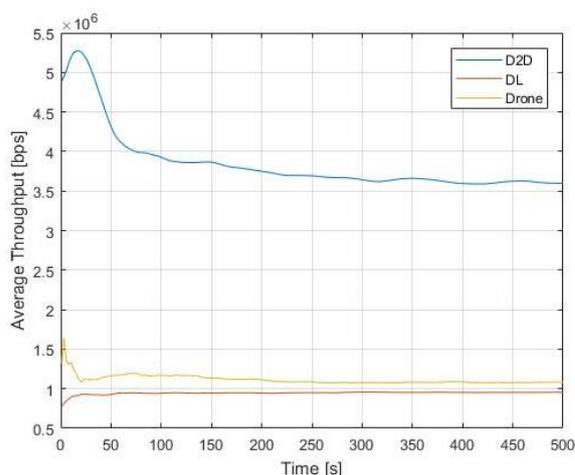


Figura 44 - Throughput médio vs. tempo, Round Robin P=1W para o Cenário 5.

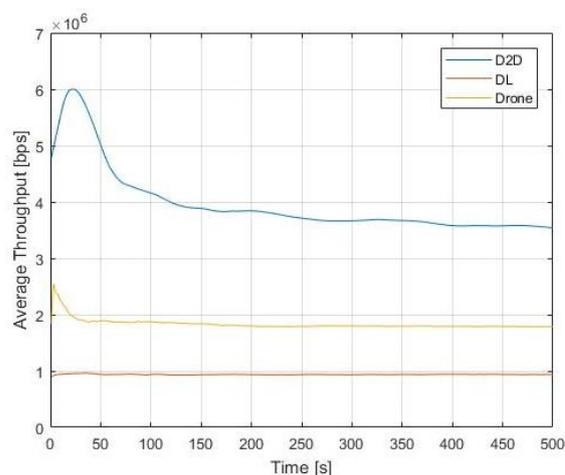


Figura 45 - Throughput médio vs. tempo, Round Robin P=10W para o Cenário 5.

Na figura 44, apresenta-se o *throughput* médio em função do tempo de simulação para este cenário, com $P_{min}=1W$ (30dBm). Observamos que na comunicação por Drone, a taxa de transmissão com sucesso dos utentes Drone rondam os 1.1Mbps. Há uma redução de *throughput* devido à mudança de *scheduler*. Passou-se de 1.8Mbps com Max CI para 1.1Mbps com RR. Nos utentes D2D as taxas de transmissão mantêm-se nos 3.7Mbps pois não há mudança de *scheduler*. Já na comunicação celular a taxa de transmissão fica-se pelos 0.9Mbps. Isto deve-se também à mudança do *scheduler* Max CI do cenário 1 para o *scheduler Proportional Fair* do cenário 5. O anterior *throughput* era de 1.6Mbps.

Como vemos na figura 45, onde se transmite com $P_{max}=2W$ (40dBm) nos Drones, não há alteração do *throughput* médio nem nos utentes D2D nem nos utentes celulares. Mas, a taxa de transmissão dos utentes Drone passa de 1.1Mbps para 1.8Mbps, devido ao aumento de potência transmitida.

Avaliação de Cenários 5G

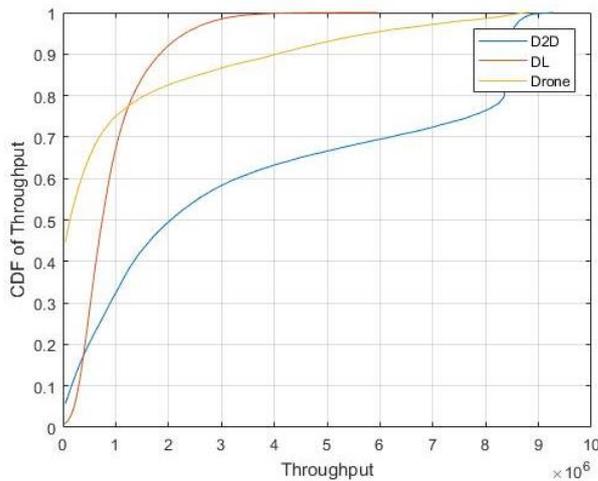


Figura 46 - CDF de Throughput, Round Robin P=1W, para o Cenário 5.

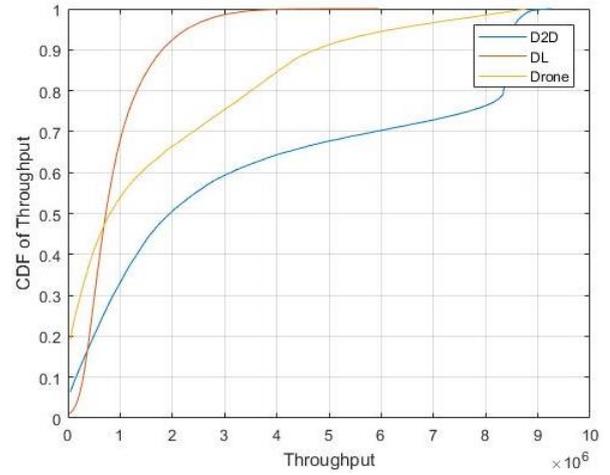


Figura 47- CDF de Throughput, Round Robin, P=10W para o Cenário 5.

Na figura 46 observamos o CDF de throughput para este cenário, quando a potência de transmissão é mínima. A curva com melhor desempenho é a da legenda D2D segue-se a DL e por último a Drone. Devido ao uso do *scheduler Proportional Fair* nas comunicações celulares não há utentes com ritmos quase nulos. Nas comunicações via Drone há cerca de 41% de utentes nestas circunstâncias, apesar de se usar um *scheduler* justo como é o RR. Os utentes D2D com ritmos quase nulos são cerca de 5%.

No caso da potência de transmissão dos Drones ser máxima, observa-se na figura 47 um deslocamento para a direita (aumento do *throughput*) da curva correspondente Drone, relativamente à da figura 46. É um resultado esperado, este aumento do *throughput* devido a ter-se aumentado em dez vezes a potência transmitida pelos Drones. No entanto, não se observa um aumento linear de *throughput* equivalente ao aumento da potência transmitida. Isso deve-se às diferentes posições nas células dos utentes Drone.

4.2.6 Cenário 6

No seguinte cenário temos 10 UEs por Drone, a transmitirem num raio máximo de 50m, para P=[30dBm,40dBm]. A principal modificação é o *scheduler* que passa de Round Robin para Largest Delay First (LDF).

Na Tabela 12, mostra-se todas as informações associadas a este cenário 6.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Schedulers	Largest Delay First(LDF)
	Número de UEs por Drone	10
	Raio (m) da Célula Drone	25
	Velocidade (Km/h)	30

Avaliação de Cenários 5G

Potência de Transmissão	30 & 40 dBm
-------------------------	-------------

Tabela 12 - Parâmetros de simulação para o cenário 6.

Como a mudança de *scheduler* não altera a distribuição do CDF do SINR estes gráficos são exatamente iguais ao do cenário 5 pelo que não se repetem aqui. Vamos analisar apenas as distribuições do *throughput* médio e do CDF do *throughput*.

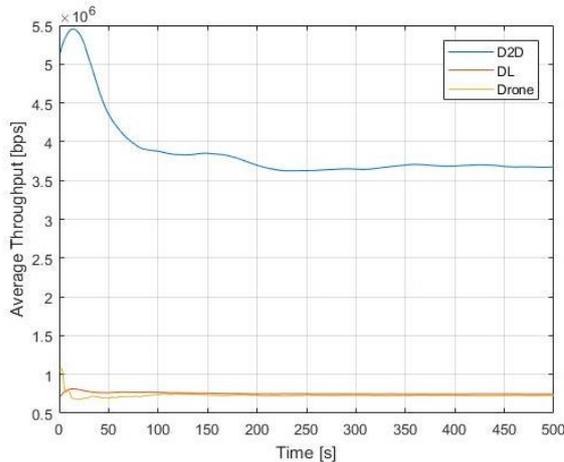


Figura 48 - Throughput médio utilizando LDF, P=1W para o Cenário 6.

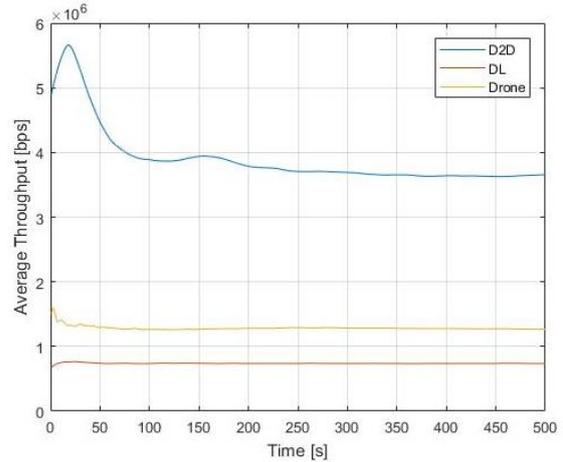


Figura 49 - Throughput médio utilizando LDF, P=10W para o Cenário 6.

Na figura 48, está o *throughput* médio em função do tempo de simulação para este cenário 6. A curva respeitante às comunicações D2D é a mesma do cenário 5 pois não há alteração de *scheduler*. Regista-se uma taxa de transmissão com sucesso nos utentes Drone de 0.7Mbps, que é a mesma dos utentes celulares. Este *scheduler* ao dar prioridade aos utentes mais afastados provoca uma redução do *throughput* médio.

Quando se aumenta a potência de transmissão nos Drones, vemos na figura 49 um aumento do *throughput* médio de 0.7Mbps para 1.2Mbps. Um pequeno aumento de *throughput* médio apesar de se ter aumentado dez vezes mais a potência transmitida. Isto deve-se ao modo de funcionamento do *scheduler* que dá prioridade aos utentes mais afastados do Drone que têm menor *throughput*. Não há alteração tanto nos utentes D2D, como nos utentes celulares, devido a não se ter alterado nenhum dos seus parâmetros.

Avaliação de Cenários 5G

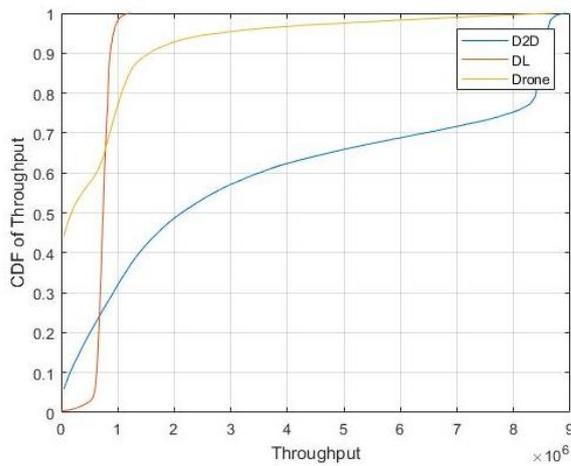


Figura 50 - CDF de Throughput utilizando LDF, $P=1W$ para o Cenário 6.

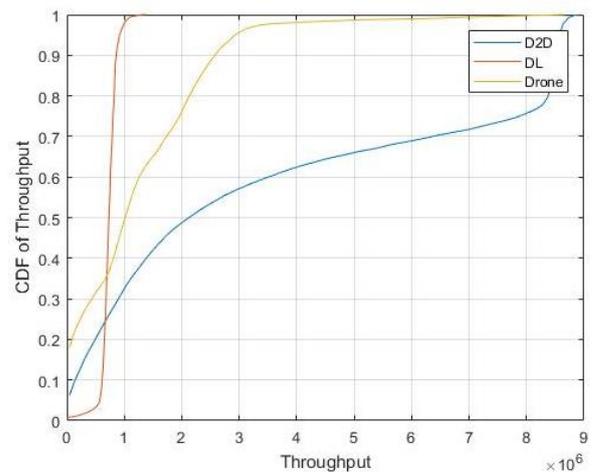


Figura 51- CDF de Throughput LDF, $P=10W$ para o Cenário 6.

Observamos na figura 50, o CDF do *throughput*, onde praticamente todos utentes celulares mantêm a mesmo *throughput* de cerca de 0.7Mbps. Nos utentes Drone há cerca de 45% que transmitem/recebem ritmos binários quase nulos. A curva dos utentes D2D é a mesma do cenário 5.

No caso em que se aumenta a potência de transmissão dos Drones ilustrada na figura 51, regista-se apenas um deslocamento da curva Drone para a direita, relativamente à anterior figura. Isso é um sinónimo de aumento de *throughput*. Passa para 18% os utentes Drone com ritmos binários quase nulos.

4.2.7 Cenário 7

O cenário 7 é similar aos cenários 1 e 2 devido à paridade entre a potência máxima e a potência mínima dos drones, o *scheduler* é MaxSIR. A distinção reside no facto da velocidade do BS Drone ser reduzida. Existem 10 UEs por célula Drone a transmitirem/receberem num raio máximo de 25m.

Na Tabela 15 estão as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Schedulers	MaxCI
	Número de UEs por Drone	10

Avaliação de Cenários 5G

	Raio (m) da Célula Drone	25
	Altura dos Drones(m)	1,5
	Velocidade do BS Drone	Reduzida
	Potência de Transmissão	30 & 40 dBm

Tabela 13 - Parâmetros de simulação para o cenário 9.

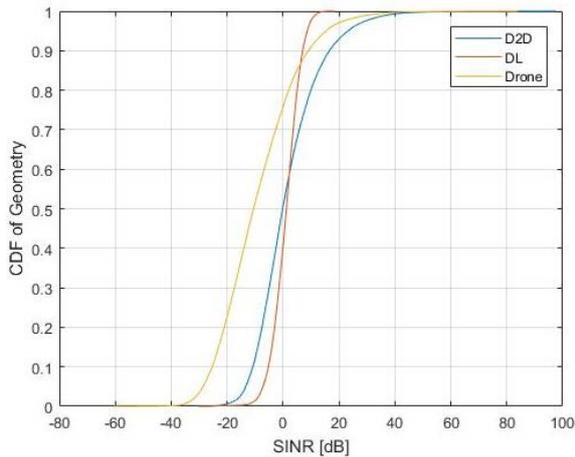


Figura 52 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, Pmin para o Cenário 7.

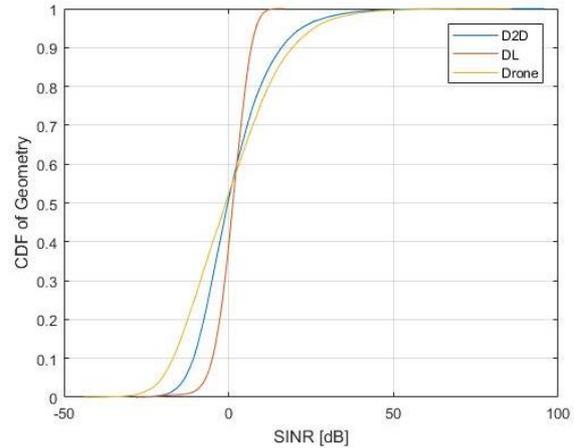
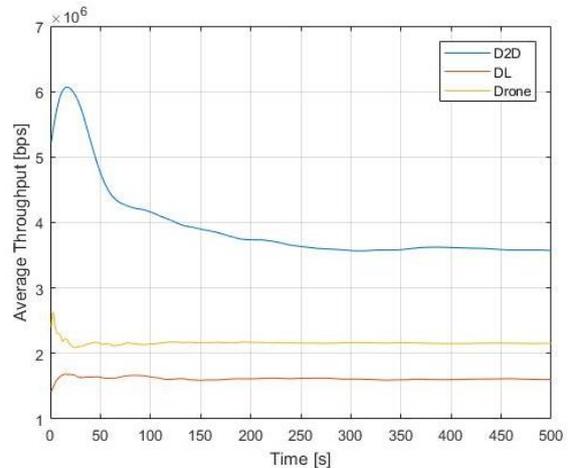
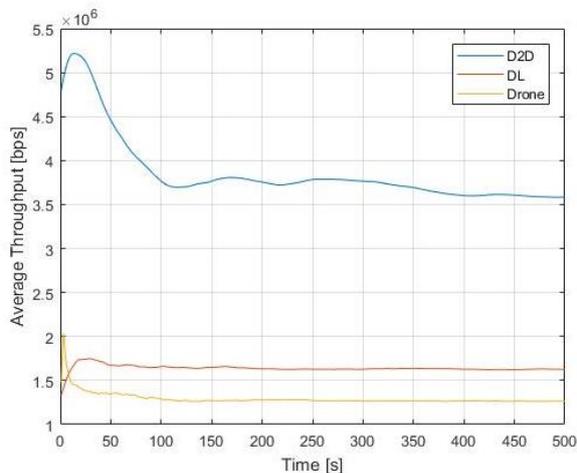


Figura 53 - CDF de Geometria em função do SINR, Max CI, Pmax para o Cenário 7.

Na figura 52 mostra-se o CDF do SINR (Geometria) em função do SINR, e deve ser comparada com a correspondente figura do cenário 1. Constata-se que se mantém a distribuição do CDF do SINR que se observou no cenário 1. Isso significa que a redução de velocidade dos Drones não influenciou este indicador de desempenho.

No caso de se aumentar a potência de transmissão para 40 dBm, obtém-se o CDF do SINR ilustrado na figura 53. Quando comparado com a correspondente figura do cenário 2 conclui-se novamente manter-se a distribuição do CDF. Isto é, a redução da velocidade do Drone não altera esta distribuição.



Avaliação de Cenários 5G

Figura 54 - Média de Throughput Max CI, Pmin para o Cenário 7.

Figura 55 - Média de Throughput Max CI, Pmax para o Cenário 7.

No cenário 7, conforme se ilustra na figura 54, apresenta-se o *throughput* médio em função do tempo. Este gráfico deve ser comparado com o correspondente do cenário 1. Verifica-se que não há qualquer alteração no *throughput* médio de qualquer tipo de comunicação comparando com o cenário 1. Isto é, os utentes D2D obtêm a média de *throughput* de aproximadamente 3.8Mbps, enquanto que os utentes celulares obtêm a média de *throughput* de aproximadamente 1.6Mbps, e os utentes Drone obtêm a média de *throughput* de aproximadamente 1.3Mbps.

Ao analisarmos o gráfico da figura 55, onde se aumentou a potência de transmissão dos Drones, verificamos um aumento esperado no *throughput* médio dos utentes Drone. Quando se compara este gráfico com o correspondente do cenário 2 conclui-se que não há alteração de registo.

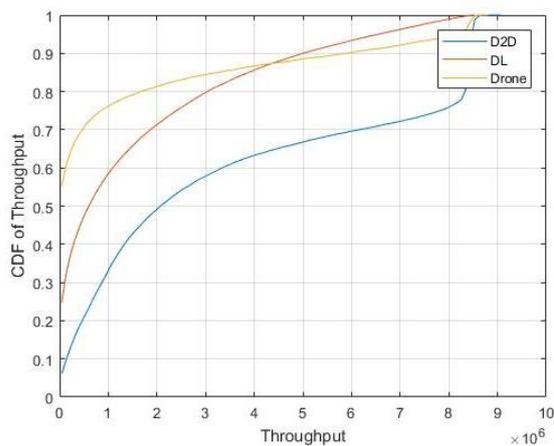


Figura 56 - CDF de Throughput, Max CI, Pmin, para o Cenário 7.

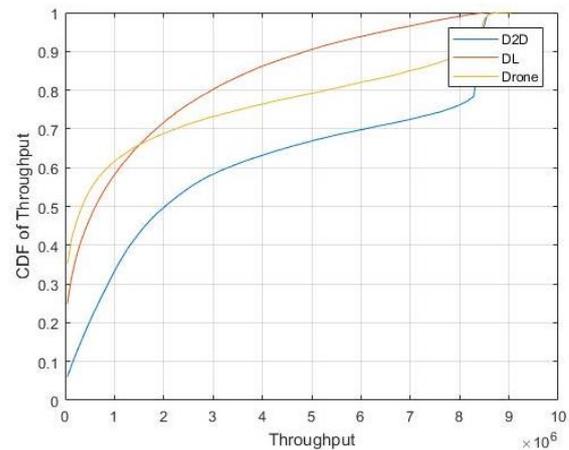


Figura 57 - CDF de Throughput, Max CI, Pmax, para o Cenário 7.

Analisando os gráficos do CDF de *throughput* para este cenário 7, ilustrados nas figuras 56 e 57 pode-se concluir que o aumento da potência de transmissão dos Drones, desloca para a direita a correspondente curva Drone. Isto é, espera-se um aumento do *throughput* associado ao aumento da potência de transmissão que passa de mínima (figura 56), para máxima (figura 57). Fazendo a comparação com os devidos gráficos dos cenários 1 e 2, conclui-se que não há alteração nas curvas do CDF devido à redução de velocidade dos Drones

4.2.8 Cenário 8

Avaliação de Cenários 5G

O cenário 8 é parecido com o cenário 7 em todos os parâmetros, com exceção do raio da célula Drone que passa de 25 para 50, e sobretudo da altura dos Drones que passa de 1,5m para 32m. 1,5m é a altura dos dispositivos D2D e 32m é a altura das antenas das estações de base (eNBs).

Na Tabela 16 estão as informações associadas a este cenário 8. Os outros dados são os mesmos do cenário 7.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Raio (m) da Célula Drone	50
	Altura dos Drones(m)	32

Tabela 14 - Parâmetros de simulação para o cenário 8.

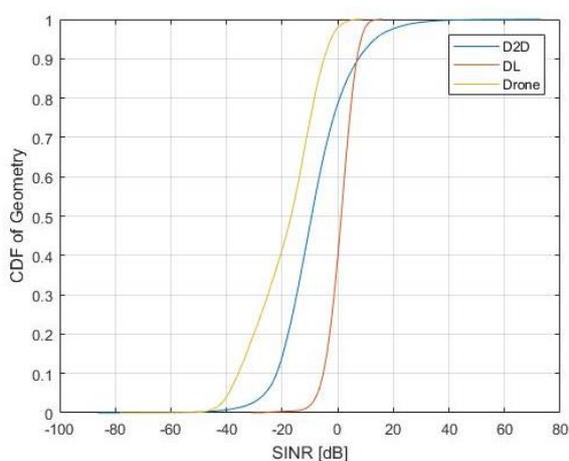


Figura 58 - CDF de Geometria em função SINR, Max CI, Pmin para o Cenário 8.

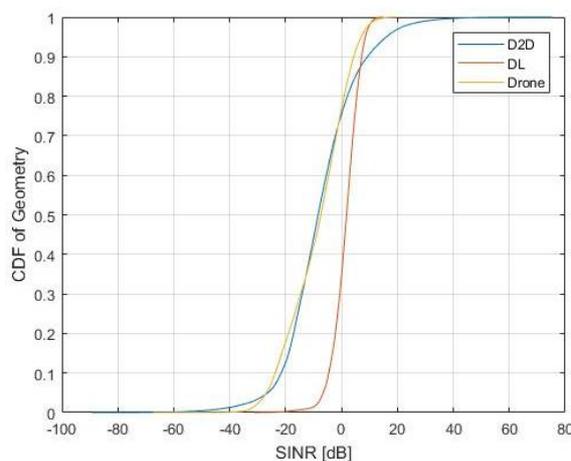


Figura 59 - CDF de Geometria em função SINR, Max CI, Pmax para o Cenário 8.

Ilustra-se na figura 58, o CDF de Geometria em função do SINR para este cenário, onde se pode observar que os utentes servidos por Drones são os que apresentam os piores resultados de CDF do SINR devido à associação da maior altura dos Drones com o raio máximo e a potência mínima. Seguem-se as curvas de CDF dos D2D e dos celulares que não são afetados por estes parâmetros.

Se a potência de transmissão dos Drones for máxima (40 dBm), obtemos o gráfico da figura 59, onde se constata o deslocamento para a direita da curva com legenda Drone, comparativamente à figura anterior. Há um aumento esperado do SINR devido ao aumento da potência de transmissão dos Drones. Observa-se uma sobreposição quase completa com a curva de legenda D2D. Mas ambas as curvas Drone e D2D estão à esquerda do DL (para a maior parte dos casos) o que significa que os utentes Drone e D2D têm SINR mais baixos do que os utentes celulares. Com base nos valores do CDF do SINR para 50% dos utentes Drone, verifica-se a $SINR \leq -7.6\text{dB}$, que é a mesma dos utentes D2D. Para 50% dos utentes celulares tem-se $SINR \leq 1.7\text{dB}$.

Avaliação de Cenários 5G

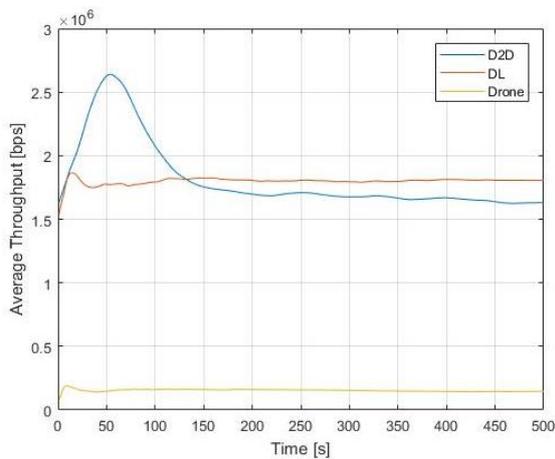


Figura 60 - Média de Throughput, Max CI, Pmin para o Cenário 8.

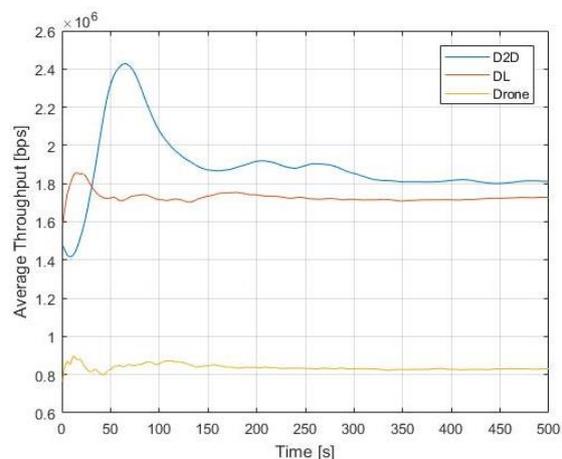


Figura 61 - Média de Throughput, Max CI, Pmax para o Cenário 8.

Ilustra-se na figura 60 o *throughput* médio em função do tempo deste cenário. Podemos dizer que os utentes D2D e celulares, obtêm um *throughput* médio de aproximadamente 1.7Mbps e 1.8Mbps, respetivamente. Os utentes Drone obtêm apenas 0.2Mbps de *throughput* médio.

No caso de se aumentar a potência de transmissão máxima para Pmax, o gráfico da figura 61, indica que ocorre um aumento do *throughput* médio dos utentes Drone para 0.8Mbps. Observa-se também uma ligeira subida do *throughput* dos D2D para 1.8Mbps e, uma pequena descida do *throughput* dos utentes celulares para 1.7Mbps. Isto pode ser explicado pela maior interferência que os Drones causam nas comunicações celulares devido ao aumento da potência de transmissão dos Drones que estão neste cenário à mesma altura do que as antenas das estações de base eNBs (32m). E por outro lado uma menor interferência com os D2D por estarem a uma altura superior.

Avaliação de Cenários 5G

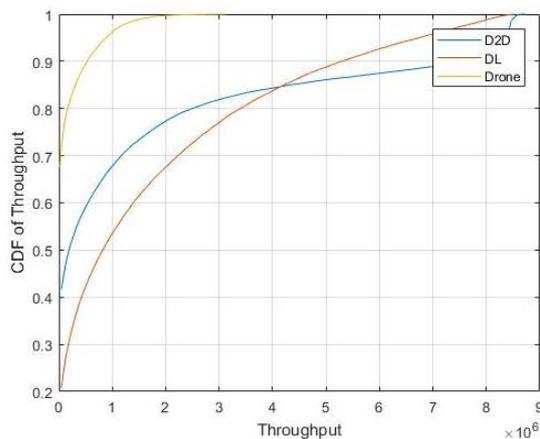


Figura 62 - CDF de Throughput Max CI, Pmin para o Cenário 10.

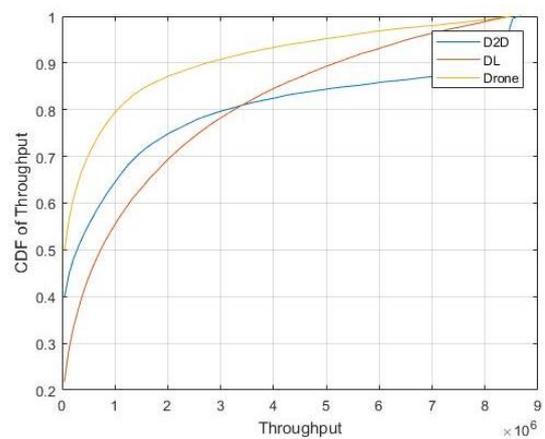


Figura 63 - CDF de Throughput Max CI, Pmax para o Cenário 10.

Nos gráficos do CDF de *throughput* para este cenário com Pmin, observamos na figura 62, que os utentes Drone apresentam os piores resultados de todos os tipos de ligações. Há cerca de 70% de utentes com quase zero bits transmitidos. Isto reforça a ideia de ser muito insuficiente a transmissão de potência mínima de 1W nos Drones, quando estes estão à mesma altura do que as antenas das estações de base celulares e há dez utentes para serem servidos.

O aumento da potência de transmissão dos Drones para Pmax, ilustrado na figura 63, apresenta um deslocamento da curva de CDF dos Drones para a direita (em relação à figura 62). Isto é, obtém-se valores de *throughput* mais elevados. Mesmo assim ainda há quase 50% de utentes Drone com ritmos binários quase nulos. Comparando as curvas com legenda DL e D2D das figuras 62 e 63 observa-se um ligeiro deslocamento para a direita (aumento de *throughput*) da curva D2D e um ligeiro deslocamento para a esquerda (diminuição de *throughput*) da curva DL. Isto está de acordo com os valores apresentados de *throughput* médio versus tempo. Reforçando a ideia de maior interferência dos Drones a esta altura com as antenas das eNBs e uma redução de interferência com os D2D.

Capítulo 5

Conclusões

O presente capítulo destina-se a expor as principais conclusões não só dos resultados obtidos das simulações mas também dos outros capítulos, e por fim apresentar o trabalho futuro que poderá ser realizado com base nesta dissertação.

5.1 Sumário dos Resultados

A presente dissertação de mestrado teve como propósito a avaliação de cenários de multi-conetividade 5G, tendo por base os cenários com ligações D2D, acesso assistido por Drone e as ligações celulares. Nesta avaliação, foram considerados estes cenários tomando por base a automação industrial, a conectividade automóvel e as comunicações urbanas.

Para tal, esta dissertação apoiou-se no desenvolvimento de diversas rotinas que permitiram a análise dos cenários com ligações D2D e acesso assistido por Drones, como integrante parte dos cenários 5G, dentro da estrutura de rede celular LTE-A. Baseando-se nos simuladores já existentes e já desenvolvidos anteriormente, nomeadamente, simuladores de sistema em JAVA e simulador de ligação em MatLab.

No capítulo 2 procedeu-se a uma revisão de literatura, relativamente à evolução das tecnologias de comunicações móveis sem fios da quarta geração para a quinta geração, onde observamos que o 4G suporta mais de 10 vezes a taxas de dados da 3G, a transmissão de multimédia é otimizada, permite uma maior eficiência espectral, e um menor custo por bit: a interface 4G é otimizada para o tráfego IP, incluindo novas tecnologias como MIMO e OFDM, cuja arquitetura supera os desafios de relação sinal ruído, através da eliminação da interferência de canal não adjacente, ganho de diversidade de frequência, melhorando assim o desempenho da camada física.

Avaliação de Cenários 5G

Para além disso, existe a compatibilidade com tecnologias em evolução, como antenas inteligentes, MIMO, all-IP, a largura de banda do canal vai até 100 MHz no LTE-Advanced.

A par do 4G, o 5G é caracterizado pela transmissão de taxas de dados mais elevadas, e evolução em vários domínios. Possibilita uma grande variedade de aplicações, serviços, equipamentos, onde apenas um dispositivo universal é interligado a infraestruturas já existentes. A inclusão de tecnologias futuras como rádio cognitivo, o aumento significativo da eficiência de espectro através do uso de buracos no espectro de utilizadores licenciados, admissão de um novo tipo utilizador de serviços avançado.

O controlo das chamadas é efetuado através de software e hardware, com computação na nuvem, endereço IP de correspondência para sistemas de interface de rede, a taxa de dados ultrapassa os 10 Gbps, as taxas máximas de dados vão até 20 Gbps. O utilizador pode conectar-se simultaneamente e através de várias tecnologias sem fio, podendo ainda alternar entre elas, permite o suporte do IPv6.

O capítulo 3 referiu-se ao desenvolvimento das comunicações via Drones. As suas vantagens são devidas à sua arquitetura, a par da melhoria das técnicas de gestão de bateria, assim como a variedade e a disponibilidade de preço. Considerou-se a comunicação assistida por Drones como sendo segura e estável, a qualidade da conexão depende especialmente da saturação do espectro de radiofrequência. Usa uma conexão ponto a ponto com a BS, e outra conexão ponto multiponto. A utilização de BSs Drone em redes sem fio, em particular a rede de células Drone multicamada complementam os HetNets terrestres.

As redes de células Drone servem diversas demandas, definindo novas fronteiras para a heterogeneidade em redes 5G. Os avanços no uso das células Drone trazem novos desafios associados à sua operação e gestão. As células Drone melhoram tanto a capacidade de cobertura, como as redes de acesso rádio através da transmissão de dados entre BS e UE. Também, explorou-se o problema de implantação de células Drone, propondo algoritmos capazes de resolver o problema de implantação de células Drone, maximizando o índice de cobertura dos utilizadores, mantendo a qualidade das ligações entre células Drone e a rede de acesso rádio RAN, como é o caso do algoritmo PSO.

Avaliação de Cenários 5G

O trabalho prático foi desenvolvido no capítulo 4 e constou de oito cenários com diferentes números de utilizadores por célula, diferentes raios de cobertura das zonas com comunicação Drone (D2D e celular) e altura e velocidade dos Drones.

Nos cenários houve a uma variação do raio das zonas para as diferentes tecnologias (D2D, Drone, Celular). As comunicações celulares basearam-se num cenário hipotético com 19 eNBs, correspondentes a 57 células, ainda que em apenas 9 células fossem distribuídos uniformemente 10 utentes móveis, no início de cada simulação.

Houve sempre 36 zonas de comunicação D2D, situadas na fronteira da macro célula central, onde foram colocados 2 utentes de mobilidade reduzida em cada zona de comunicação D2D. O raio das zonas D2D coincidiu com o raio das células Drone, embora seja variável nos diferentes cenários. e variando entre 25 e 50m. Para a comunicação celular, as células têm sempre o raio de 289m, o que implica numa distância entre eNBs de 500m. A colocação dos utentes celulares, contudo não se sobrepõe às zonas de comunicação D2D. O que implica que os utentes celulares estarão mais próximos das suas eNBs, de modo a evitar as células D2D. A potência de transmissão da eNB é constante e igual a 40W (46dBm). Os terminais D2D transmitem com uma potência constante e igual a 0.25W (24dBm).

Nas células servidas por Drones são colocados ou 2 ou 10 utentes (UEs) por cada célula Drone. Há no total quatro células Drone situadas na zona da célula central, mas separadas geograficamente uma das outras e tendo os Drones diferentes velocidades associadas às suas posições. Todos os Drones transmitem num percurso em forma de hélice. Sendo o Drone mais afastado do centro o que tem maior velocidade angular. A potência de transmissão mínima dos Drones é de 1W (30 dBm) e a máxima 10W (40dBm).

Os resultados apresentados no quarto capítulo são o CDF da SINR (Geometria) em função da SINR: o *Throughput* médio em função do tempo de simulação e o CDF do *Throughput* em função do *Throughput*.

Começamos pelo primeiro resultado, o CDF do SINR. Face à topologia dos três tipos de conexões, isto é, celulares, D2D e via Drone o formato das curvas de CDF tem tendência a manter-se. Em especial no caso das comunicações celulares em que a variação entre o

Avaliação de Cenários 5G

SINR mínimo e o máximo é constante e com menor variação. As comunicações Drone (e D2D) apresentam uma maior variação entre o SINR mínimo e máximo devido ao tamanho mais reduzido das células e da variação da potência de transmissão.

Em função dos parâmetros das células Drone, nomeadamente, potência de transmissão dos Drones o CDF do SINR dos utentes Drone varia de acordo com o esperado. Isto é, quando se aumenta a potência de transmissão há um aumento do SINR e quando se diminui a potência regista-se uma redução do SINR.

Quando se aumenta o número de utentes servidos por Drones não se regista variação na curva do CDF do SINR devido a ocorrer uma diminuição quer da potência recebida, quer da interferência. Existe de fato, uma estatística do CDF do SINR mais exata devida ao aumento de utentes por Drone.

Quando se aumenta a altura dos Drones de 1.5m (altura dos D2D) para 32m (altura das antenas das eNBs) regista-se um deslocamento da curva do CDF do SINR para a esquerda indicadora de diminuição do SINR. Isto era esperado pois mantendo-se a mesma potência de transmissão o aumento da altura dos Drones significa haver uma maior distância entre Drones e os seus utentes, daí a ocorrência de menos potência recebida.

Uma vez que (quase) não se altera os parâmetros das ligações D2D e celulares não se registam alterações no CDF do SINR destes tipos de comunicações. Contudo, podem ocorrer ligeiras variações nas curvas do CDF do SINR dos D2D quando se aumenta a potência dos Drones devido a um aumento da interferência com os D2D, de uma das células Drone (a que está próxima das células D2D) e quando os Drones estão à mesma altura dos D2D. Ocorre igualmente ligeiras variações nas curvas do CDF do SINR dos utentes celulares quando se aumenta a potência dos Drones devido à maior interferência das células Drone com as estações de base estando os Drones estão à mesma altura dos eNBs.

Quando se aumenta o raio das células Drone (também das células D2D pois optou-se por ter o mesmo raio nos dois tipos de células) observa-se uma diminuição do CDF do SINR devido a uma menor potência recebida na fronteira de ambas as células.

Quando se muda de *scheduler* não existe alteração na distribuição do CDF do SINR em todos os tipos de ligação, Drone, D2D e celular.

Em relação à variação do *throughput* médio em função do tempo esta é quase nula nas comunicações celulares pois o raio das células e a potência de transmissão são sempre os mesmos. Na maior parte dos casos o *throughput* médio das comunicações celulares é o menor de todos os tipos de comunicações. A comunicação entre dispositivos D2D é a que apresenta no geral os maiores valores de *throughput* médio, com exceção do caso em que os Drones estão a transmitir no máximo da potência e com o menor raio de cobertura. Neste caso obtém-se o valor mais elevado de *throughput* na comunicação via Drones.

Quando se aumenta a potência de transmissão dos Drones há um aumento do *throughput* médio e quando se diminui a potência regista-se uma redução do *throughput*. Uma vez que não se altera a potência das ligações D2D não se registam alterações no *throughput* médio deste tipo de comunicação, sendo frequentemente o que garante o maior *throughput*. Contudo, podem ocorrer ligeiras variações nas curvas do *throughput* dos D2D quando se aumenta a potência dos Drones devido a um aumento da interferência da célula Drone que está próxima das células D2D e quando os Drones estão à mesma altura dos D2D.

Há, no entanto, mudanças acentuadas no *throughput* médio quando se muda de *scheduler*. O *scheduler* Max CI é o que fornece os valores mais elevados não só do *throughput* máximo, mas também do *throughput* médio. Seguem-se os *schedulers* justos, nomeadamente Round Robin e finalmente o Largest Delay First. Isto é válido para todos os tipos de comunicação, celular, D2D e via Drone.

Quando se aumenta o raio das células Drone e das células D2D observa-se uma diminuição do *throughput* médio devido a uma menor potência recebida em ambas as células.

Em relação ao desempenho do CDF do *Throughput* em função do *Throughput* as menores variações ocorrem nas comunicações celulares pois o raio das células e a potência de transmissão são sempre os mesmos. Há, no entanto, mudanças claras quando se muda de *scheduler*. Apesar do *scheduler* Max CI ser o que garante o máximo de *throughput* é também aquele que tem o maior número de utentes com ritmos binários

transmitidos/recebidos quase nulos. Isso é devido ao modo de operação do *scheduler* que dá prioridade a quem está próximo dos emissores. Sejam eles, os eNBs, os Drones ou os dispositivos D2D. Com o *scheduler* Round Robin, mas principalmente com o Largest Delay First, todos os utentes transmitem/recebem o mesmo valor de *throughput* que é mínimo com o LDF e ligeiramente superior com o RR.

Com a introdução do aumento da potência de transmissão dos Drones ocorre um aumento geral do *throughput* e que se traduz num deslocamento da curva do CDF para a direita. Verifica-se também uma diminuição dos utentes que quase não transmitem/recebem dados. Visto não se alterar a potência de transmissão das ligações D2D não se registam alterações no CDF do *throughput* neste tipo de comunicação. Podem ocorrer ligeiras variações nas curvas do CDF do *throughput* dos D2D quando se aumenta a potência dos Drones devido a um aumento da interferência da célula Drone que está próxima das células D2D e quando os Drones estão à mesma altura dos D2D.

Com o aumento da altura dos Drones para a das antenas dos eNBs, mantendo-se a potência transmitida, ocorre uma redução do *throughput* que se traduz num deslocamento da curva do CDF para a esquerda. Verifica-se também um aumento dos utentes que transmitem/recebem ritmos binários quase nulos devido a menor potência recebida. Podem ocorrer ligeiras variações nas curvas do CDF do *throughput* do *downlink* (celular) quando se aumenta a altura dos Drones devido a um aumento da interferência das células Drone com as estações de base (eNBs).

Com o aumento do raio da célula dos Drones (e D2Ds), mantendo-se a potência transmitida, ocorre uma redução do *throughput*, observado pelo deslocamento da curva do CDF para a esquerda. Verifica-se igualmente um aumento dos utentes que transmitem/recebem ritmos binários quase nulos devido a menor potência recebida, sobretudo na fronteira das células. Ocorrem idênticas variações nas curvas do CDF do *throughput* dos D2Ds devido a uma maior distância entre dispositivos.

Quando se reduziu a velocidade dos Drones o estudo revelou que não havia alteração de registo em nenhum dos indicadores de desempenho. Isso pode ser explicado porque os resultados estatísticos se referem de fato a 4 células Drone as quais têm diferentes raios de ação e diferentes velocidades angulares. É sabido que com o tempo de simulação o

Drone afasta-se da sua posição inicial, logo afasta-se de alguns dos seus utentes que não acompanham o movimento do Drone. Contudo esse afastamento é maior ou menor nas 4 diferentes células. Mas, o simulador recolhe os dados das quatro células, pelo que no global, não se verificaram alterações de registo. Teria de se obter uma estatística individual de cada uma das 4 células Drone.

Em resumo, pode-se concluir que as comunicações via Drone são possíveis de obter o *throughput* médio equiparado ao das comunicações entre dispositivos D2D. Que por sua vez garantem um maior *throughput* médio do que o das comunicações celulares. Isso deve-se à maior proximidade entre emissor e recetor nos dispositivos D2D. Nas comunicações via Drone há uma maior distância entre emissor e recetores o que tem de ser combatido com um aumento da potência transmitida. No entanto, o Drone tem limites no peso que pode transportar. Os 10W de potência máxima transmitida podem reduzir-se para 5W desde que a antena no Drone garanta um ganho de 2 (3dB). A antena no Drone não pode ser muito diretiva para não restringir a zona de cobertura.

5.2 Trabalho Futuro

Nesta dissertação, a implementação da comunicação assistida por Drone teve como suporte o simulador LTE-A já existente em JAVA, e neste simulador a comunicação é feita apenas no sentido descentente (*downlink*). Numa rede celular a comunicação é realizada em ambos os sentidos ascendente (*uplink*) e descendente. Há por isso, a necessidade do desenvolvimento da parte do simulador que implemente a ligação ascendente nas comunicações celulares, nas comunicações via Drone e inclusivé na comunicação D2D devido à mudança do tipo de tecnologia acesso que passa a ser SC-FDMA em vez de OFDMA. Assim sendo, é proposto como trabalho futuro, a implementação de um simulador que permita a comunicação em ambos os sentidos.

Um dos desafios de futuro em redes sem fio é a utilização da BSs Drone de baixa altitude, em particular na rede de células Drone multicamada para complementar a HetNets terrestres. Um outro paradigma na comunicação assistida por Drone, é a rutura da

Avaliação de Cenários 5G

conexão ponto a ponto, em prol da rede móvel, oferecendo novas possibilidades de comunicação entre o Drone e o seu utilizador. Importa por isso, implementar no simulador a ligação ponto a ponto entre as estações de base eNBs e os Drones em movimento.

Como referido anteriormente este simulador recolhe os dados de quatro células Drone. Para se obter dados mais credíveis o simulador deveria fornecer uma estatística individual de cada uma das 4 células Drone.

Bibliografia

- [1] H. Tullberg *et al.*, “The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, pp. 132–139, 2016.
- [2] 5G Forum, “5G Vision, Requirements, and Enabling technologies,” no. March, pp. 1–173, 2015.
- [3] A. Orsino *et al.*, “Effects of Heterogeneous Mobility on D2D-and Drone-Assisted Mission-Critical MTC in 5G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 79–87, 2017.
- [4] E. Summary, “Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update , 2016 – 2021,” pp. 2016–2021, 2017.
- [5] T. Sharma, K. Ritesh, N. Chauhan, and S. Agarwal, “Analogous study of 4G and 5G,” *Proc. 10th INDIACom; 2016 3rd Int. Conf. Comput. Sustain. Glob. Dev. INDIACom 2016*, pp. 2137–2140, 2016.
- [6] B. Woerner and M. Howlader, “Research directions for fourth generation wireless,” pp. 1–2, 2001.
- [7] Jun-Zhao Sun, J. Sauvola, and D. Howie, “Features in future: 4G visions from a technical perspective,” *GLOBECOM’01. IEEE Glob. Telecommun. Conf. (Cat. No.01CH37270)*, vol. 6, no. C, pp. 3533–3537, 2001.
- [8] Y. L. Was, D. J. Sengupta, A. Kumar, and Divya, “Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G to 4G,” *Desenbre 2010*, vol. 7109, p. 5, 2010.
- [9] R. Jain, S. Katiyar, and N. Agrawal, “Survey of Latest Wireless Cellular Technologies for Enhancement of Spectral Density at Reduced Cost,” *IJCSI Int. J. Comput. Sci. Issues*, vol. 8, no. 3, pp. 491–497, 2011.
- [10] S. Patel, M. Chauhan, and K. Kapadiya, “5G : Future Mobile Technology-Vision 2020,” vol. 54, no. 17, pp. 6–10, 2012.
- [11] M. Arshad, A. Farooq, and A. Shah, “Evolution and development towards 4th generation (4G) mobile communication systems,” *J. Am. Sci.*, vol. 6, no. 12, p. 6, 2010.
- [12] E. Ezhilarasan and M. Dinakaran, “A Review on Mobile Technologies: 3G, 4G and 5G,” *Proc. - 2017 2nd Int. Conf. Recent Trends Challenges Comput. Model. ICRTCCM 2017*, pp. 369–373, 2017.
- [13] N. Panwar, S. Sharma, and A. K. Singh, “A survey on 5G: The next generation of mobile communication,” *Phys. Commun.*, vol. 18, pp. 64–84, 2016.
- [14] T. D. Hoang, L. B. Le, and T. Le-Ngoc, “Resource allocation for D2D communications under proportional fairness,” *2014 IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM 2014*, pp. 1259–1264, 2014.

- [15] A. Checko *et al.*, “Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015.
- [16] S. El Hassani and A. Haidine, “Roadmap towards beyond 4G: Key technologies and challenges for 5G,” *Int. Conf. Wirel. Networks Mob. Commun. WINCOM 2015*, pp. 1–6, 2016.
- [17] Metis 2020, “Deliverable D6.6 Final report on the METIS 5G system concept and technology roadmap,” 2014.
- [18] ZTE, “5G: Driving The Convergence of The Physical and Digital Worlds.” pp. 1–14, 2014.
- [19] Huawei Technologies, “5G: New Air Interface and Radio Access Virtualization,” no. April, pp. 1–11, 2015.
- [20] R. Alkhansa, H. Artail, and D. M. Gutierrez-Estevez, “LTE-WiFi carrier aggregation for future 5G systems: A feasibility study and research challenges,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 34, pp. 133–140, 2014.
- [21] Z. Pi and F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, 2011.
- [22] T. S. Rappaport *et al.*, “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [23] T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, 2010.
- [24] Y. Kim, H. Ji, H. Lee, J. Lee, B. L. Ng, and J. Zhang, “Evolution beyond LTE-advanced with Full Dimension MIMO,” *2013 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC 2013*, pp. 111–115, 2013.
- [25] J. Li, E. Bala, and R. Yang, “Resource block Filtered-OFDM for future spectrally agile and power efficient systems,” *Phys. Commun.*, vol. 11, pp. 36–55, 2014.
- [26] F. Schaich, T. Wild, and Y. Chen, “Waveform contenders for 5G - Suitability for short packet and low latency transmissions,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2015–Janua, no. January, 2014.
- [27] A. Farhan, N. Marchetti, F. Figueiredo, and J. P. Miranada, “Massive MIMO and Waveform Design for 5th Generation Wireless Communication Systems,” *Proc. 1st Int. Conf. 5G Ubiquitous Connect.*, pp. 70–75, 2014.
- [28] N. Michailow, R. Datta, S. Krone, M. Lentmaier, and G. Fettweis, “Generalized Frequency Division Multiplexing : A Flexible Multi-Carrier Modulation Scheme for 5th Generation Cellular Networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3060, 2012.
- [29] S. Corporation, “(12) Patent Application Publication (10) Pub . No .: US 2006 / 0283920 A1,” vol. 1, no. 19, 2006.

- [30] M. Al-Imari, P. Xiao, M. A. Imran, and R. Tafazolli, "Uplink Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Wireless Networks," *2014 11th Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, pp. 781–785, 2014.
- [31] S. Timotheou and I. Krikidis, "Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1647–1651, 2015.
- [32] H. Nikopour and H. Baligh, "Sparse code multiple access," *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, pp. 332–336, 2013.
- [33] W. Paper, "C-RAN The Road Towards Green RAN," vol. 5, 2011.
- [34] V. Jungnickel *et al.*, "The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G," vol. 52, no. 5, pp. 44–51, 2014.
- [35] L. Liu, J. C. Zhang, Y. Yi, H. Li, and J. Zhang, "Combating Interference: MU-MIMO, CoMP, and HetNet," *J. Commun.*, vol. 7, no. SPL.ISS.9, pp. 646–655, 2012.
- [36] Y. Zaki, L. Zhao, C. Goerg, and A. Timm-Giel, "LTE wireless virtualization and spectrum management," *2010 3rd Jt. IFIP Wirel. Mob. Netw. Conf. WMNC 2010*, 2010.
- [37] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. In Kim, S. Member, and Z. Han, "Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," *Ieee Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, 2015.
- [38] S. Devasenapathy, R. Venkatesha Prasad, V. S. Rao, and I. Niemegeers, "Impact of antenna directionality and energy harvesting rate on neighbor discovery in EH-IoTs," *2013 IEEE 10th Consum. Commun. Netw. Conf. CCNC 2013*, pp. 302–307, 2013.
- [39] D. Zhang, K. Yu, Z. Zhou, and T. Sato, "Energy Efficiency Scheme with Cellular Partition Zooming for Massive MIMO Systems," *Proc. - 2015 IEEE 12th Int. Symp. Auton. Decentralized Syst. ISADS 2015*, pp. 266–271, 2015.
- [40] J. A. P. Palacio and S. L. Ar??valo, "Control de vuelo a distancia de un helic??ptero RC mediante una interfaz de usuario natural," *Iber. Conf. Inf. Syst. Technol. Cist.*, 2014.
- [41] P. Hell, M. Mezei, and P. J. Varga, "Drone communications analysis," *SAMI 2017 - IEEE 15th Int. Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics, Proc.*, pp. 213–216, 2017.
- [42] R. Motooka, T. Katagiri, S. Murayama, J. Takahashi, Y. Tobe, and R. Nishikawa, "Distance control between multiple drones for stable communication," *2015 IEEE SENSORS - Proc.*, pp. 1–3, 2015.
- [43] J. H. Kang and K. J. Park, "Spatial retreat of net-drones under communication failure," *Int. Conf. Ubiquitous Futur. Networks, ICUFN*, vol. 2016–Augus, pp. 89–91, 2016.
- [44] F. J. Velez *et al.*, "Wireless sensor and networking technologies for swarms of

- aquatic surface drones,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, no. VOL, pp. 8–9, 2015.
- [45] A. Rodic, M. Jovanovic, S. Popic, and G. Mester, “Scalable experimental platform for research, development and testing of networked robotic systems in informationally structured environments: Experimental testbed station for wireless robot-sensor networks,” *IEEE SSCI 2011 Symp. Ser. Comput. Intell. - RIISS 2011 2011 IEEE Work. Robot. Intell. Informationally Struct. Sp.*, pp. 136–143, 2011.
- [46] F. Ahmed, J. Deng, and O. Tirkkonen, “Self-organizing networks for 5G: Directional cell search in mmW networks,” *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, 2016.
- [47] J. K. Tar, J. F. Bitó, and I. J. Rudas, “Contradiction resolution in the adaptive control of underactuated mechanical systems evading the framework of optimal controllers,” *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 13, no. 1, pp. 97–121, 2016.
- [48] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, “Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks,” *2016 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2016*, 2016.
- [49] I. Bor-Yaliniz and H. Yanikomeroglu, “The New Frontier in RAN Heterogeneity: Multi-Tier Drone-Cells,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 48–55, 2016.
- [50] M. Fallgren and B. Timus, ““Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system”,” *METIS Deliv. D*, vol. 1, p. 1, 2013.
- [51] K. Goebel and B. Saha, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. 2015.
- [52] D. B. Link and D. U. Link, “3D Drone-Cell Deployment Optimization for Drone Assisted Radio Access Networks,” no. Iccc, 2017.
- [53] W. Shi *et al.*, “Multiple drone-cell deployment analyses and optimization in drone assisted radio access networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12518–12529, 2018.
- [54] H. Zhou *et al.*, “TV White Space Enabled Connected Vehicle Networks: Challenges and Solutions,” *IEEE Netw.*, vol. 31, no. 3, pp. 6–13, 2017.
- [55] H. Zhou, B. Liu, L. Gui, X. Wang, and Y. Li, “Fast spectrum sharing for cognitive radio networks: A joint time-spectrum perspective,” *GLOBECOM - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, 2011.
- [56] S. Zhang, G. Wang, and L. I. Chih, “Is mmWave Ready for Cellular Deployment?,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 14369–14379, 2017.
- [57] T. Nitsche, A. B. Flores, E. W. Knightly, and J. Widmer, “Steering with eyes closed: Mm-Wave beam steering without in-band measurement,” *Proc. - IEEE INFOCOM*, vol. 26, pp. 2416–2424, 2015.
- [58] D. J. Deng, S. Y. Lien, J. Lee, and K. C. Chen, “On Quality-of-Service Provisioning in IEEE 802.11ax WLANs,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6086–6104, 2016.

- [59] Q. Ye and W. Zhuang, “Distributed and Adaptive Medium Access Control for Internet-of-Things-Enabled Mobile Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 4662, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [60] W. Xu, H. A. Omar, W. Zhuang, and X. S. Shen, “Delay Analysis of In-Vehicle Internet Access Via On-Road WiFi Access Points.,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2736–2746, 2017.
- [61] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, “Optimal LAP altitude for maximum coverage,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 569–572, 2014.
- [62] P. Demestichas *et al.*, “5G on the Horizon: Key challenges for the radio-access network,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 8, no. 3, pp. 47–53, 2013.
- [63] H. Kaushal and G. Kaddoum, “Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques,” vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2015.
- [64] U. Siddique, H. Tabassum, E. Hossain, and D. I. Kim, “Wireless backhauling of 5G small cells: Challenges and solution approaches,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 22, no. 5, pp. 22–31, 2015.
- [65] E. Kalantari, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, “On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2017.
- [66] W. Xiong, S. Member, X. Hu, and S. Member, “Measurement and Characterization of Link,” vol. 12, no. 5, pp. 1702–1713, 2016.
- [67] M. Tehrani, M. Uysal, and H. Yanikomeroglu, “Device-to-device communication in 5G cellular networks: Challenges, solutions, and future directions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 86–92, 2014.
- [68] R. Chevillon, G. Andrieux, and J.-F. Diouris, “Energy optimization of D2D communications using relay nodes and data entropy,” *Natl. Work. GDR SoC-SiP*, 2016.
- [69] Z. Zhao and T. Braun, “Topology Control and Mobility Strategy for UAV Ad-hoc Networks: A Survey,” *Jt. ERCIM eMobility MobiSense Work.*, no. 200021, pp. 27–32, 2012.

Anexo A

Topologias Diversas

Topologias de comunicações D2D

Tendo em conta as topologias de comunicação D2D em redes celulares e o modelo básico das topologias de comunicação D2D analisadas em [67] são classificadas de acordo com 4 tipos distintos, o que chamamos de “topologias”: (1) *Device Relaying with Operator Controlled link establishment (DR-OC)*, (2) *Direct D2D Communications with Operator Controlled link establishment (DC-OC)*, (3) *Device Relaying with Device Controlled link establishment (DR-DC)* e (4) *Direct D2D Communication with Device Controlled link establishment (DC-DC)*, como mostrado na figura. 64 [68].

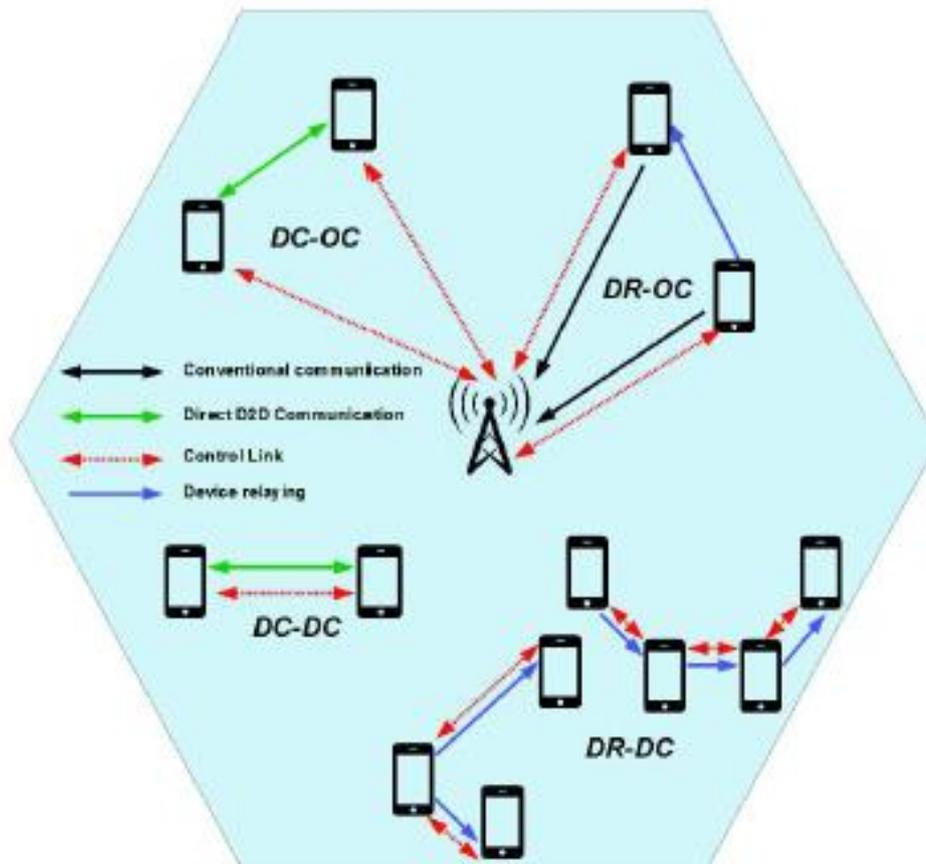


Figura 64 - Topologias de comunicação do D2D [68].

- **DR-OC:** O dispositivo que retransmite com operador controlado estabelecimento de ligações, um dispositivo localizado na fronteira da célula pode comunicar-se com a BS através de outro dispositivo que retransmite seus dados. Esta topologia permite (1) obter uma melhor qualidade de serviço (QoS) para o dispositivo de origem e (2) aumenta a autonomia da bateria para este dispositivo. Nesta topologia, a BS envia previamente uma mensagem de controle para a fonte dos dispositivos relé, de modo a iniciar a comunicação entre ambos os dispositivos, logo, a fonte envia seus dados para a BS e o dispositivo de relé.
- **DC-OC,** a comunicação entre dois UEs sincronizados graças ao BS que está reservado aos recursos, no entanto, os dados são enviados diretamente da fonte do dispositivo de destino, sem transitar pela rede principal.
- **DR-DC,** Não há supervisão de nenhuma entidade reserva de recursos, claro, isso pode levar a sério problemas de interferência, O link de controle é criado pelo destino e os dispositivos de relé (com um sinalizador), e os dados são transmitidos de um dispositivo para outro para alcançar o dispositivo de destino.
- **DC-DC,** não tem qualquer ligação / comunicação com a rede principal. De fato, a ligação de controle (por exemplo, através de uma referência) é enviado pelo dispositivo de destino para a fonte, então, o dispositivo de origem envia seus dados diretamente para o dispositivo de destino. Para pré-desoprimir o sistema de interferências, várias abordagens são estudadas, como o poço de recursos, jogo não-cooperativo, controle de admissão e atribuição de potência, cluster ³³de particionamento e seleção de relés [67].

Topologia de redes assistidas por Drones

A ausência de infraestrutura central implica que uma rede *ad hoc* não tem uma topologia fixa associada[69], com efeito, uma das importantes tarefas de uma rede *ad hoc* consiste na especificação de uma topologia sobre as quais os protocolos de encaminhamento de alto nível são implementados tendo em conta os nós geograficamente dispersos.

Os algoritmos de controle para redes *ad hoc* sem fio são baseados principalmente no controle e adaptação a potência de transmissão dos nós. Esmiuçando a alta mobilidade de nós, tais como os Drones, surgem alguns desafios tais como a conectividade versus cobertura.

Conectividade versus Cobertura

³³ *Cluster* é um aglomerado de computadores que trabalham como se fossem uma única máquina

Avaliação de Cenários 5G

Atualmente o controlo do movimento dos sistemas da rede *ad hoc* é feita por algoritmos totalmente autónomos com dois objetivos:

Primeiro para conectividade de rede permitir a comunicação em tempo real entre UAVs e dispositivos terrestres;

Segundo, para o aumento da cobertura de perceção de forma a identificar rapidamente os alvos.

Tendo em conta que as principais restrições de recursos do uso de UAVs são a autonomia da bateria, largura de banda e capacidades de processamento; consequentemente a vida útil e a distância de transmissão de rádio a bordo são limitadas. Assim sendo o comportamento do UAV sobre as rotas e a comunicação devem ser eficientes. O requisito global de obtenção de cobertura espacial e a exigência de manter a conectividade pode ser adverso[69].

Por um lado, é necessária uma elevada cobertura no espaço de forma a obter informações pertinentes e de diversas perspetivas para a cobertura de uma grande região de interesse.

Por outro lado, é indispensável a conectividade livre de interrupções, o que depende principalmente do sinal sem degradação devido à perda de propagação. Assim, as configurações de distâncias nestas redes não devem exceder a sensibilidade do recetor e precisa ainda de ser restrito aos limites do SNR mínima ou *Receive Signal Strength Indicators* (RSSI), respetivamente.

Anexo B

Outros Cenários

B1 Cenário 9

No seguinte cenário temos 10 UEs por Drone, a transmitirem num raio máximo de 50m, com diferentes potências de transmissão. O *scheduler* é Round Robin (RR).

Na Tabela 15 mostra-se todas as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Schedulers	Round Robin
	Raio (m) da Célula Drone	50
	Potência de Transmissão	30 & 40 dBm

Tabela 15- Parâmetros de simulação para o cenário 9.

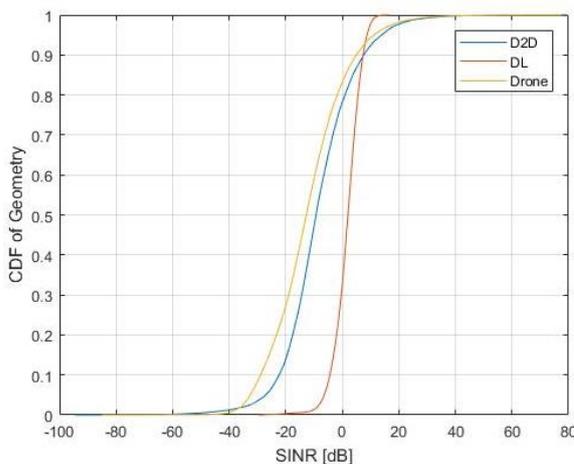


Figura 65 - CDF de Geometria em função SINR utilizando Round Robin, Pmin para o Cenário 9.

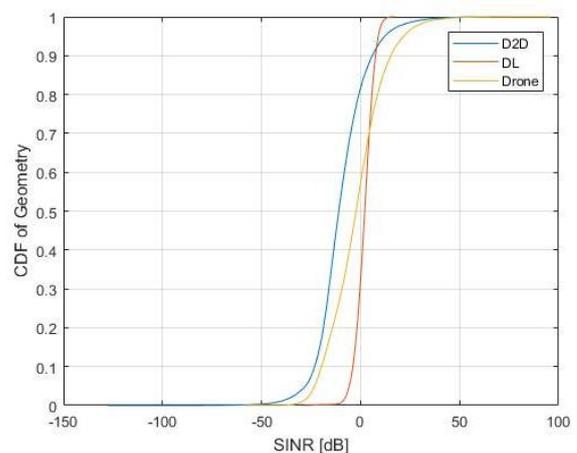


Figura 66 - CDF de Geometria em função SINR utilizando Round Robin Pmax para o Cenário 9.

Neste cenário, o CDF de Geometria em função do SINR ilustra-se nas figuras 65 (com Pmin) e 66 (com Pmax). Estes gráficos correspondem aos dos cenários 3 e 4, respetivamente. A mudança de *scheduler* para Round Robin não altera o CDF do SINR.

Avaliação de Cenários 5G

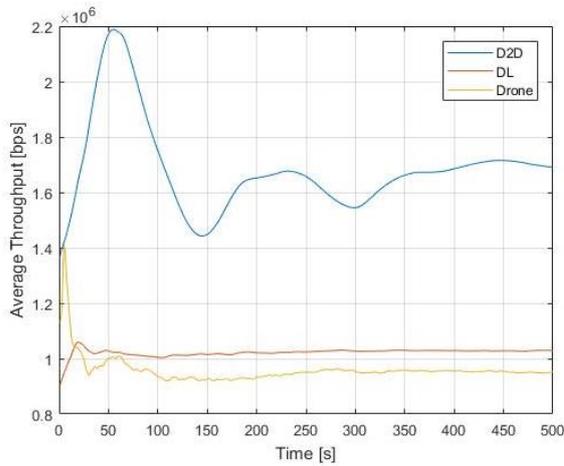


Figura 67 - Throughput médio, Round Robin, Pmin, para o Cenário 9.

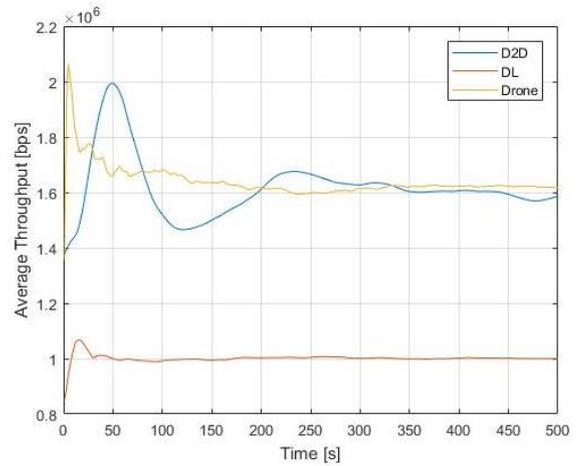


Figura 68 - Throughput médio, Round Robin, Pmax, para o Cenário 9.

Nas figuras 67 (com Pmin) e 68 (com Pmax), está o *throughput* médio em função do tempo de simulação para este cenário. Observamos que na comunicação por Drone, quando a potência de transmissão é mínima (figura 67), a taxa de transmissão dos utentes Drone é de 0.9Mbps e sobe para 1.6Mbps devido ao aumento da potência para Pmax na figura 68. Os utentes D2D passam de um ritmo binário médio de 1.7Mbps para 1.6Mbps, enquanto que para os utentes celulares as taxas de transmissão com sucesso mantêm-se em 1Mbps. Estes valores de *throughput* médio obtidos com o *scheduler* RR são inferiores aos obtidos com o *scheduler* Max CI usado nos cenários 3 e 4. O Max CI dando prioridade à transmissão dos utentes que estão mais próximos das fontes de transmissão maximiza não só o *throughput* máximo, mas também o médio.

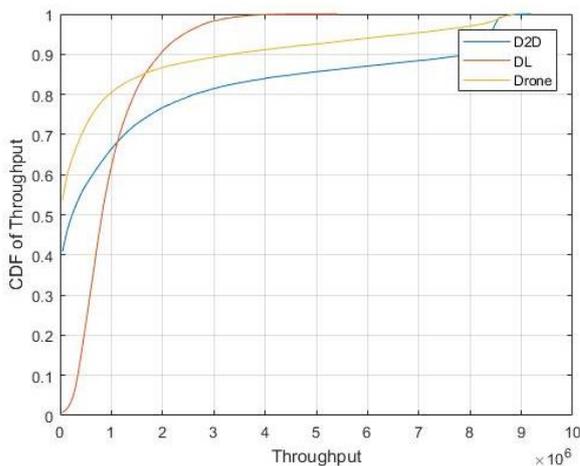


Figura 69 - CDF de Throughput utilizando Round Robin Pmin para o Cenário 9.

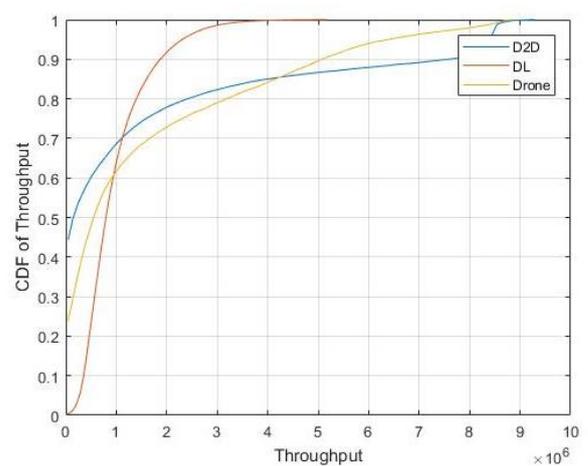


Figura 70- CDF de Throughput utilizando Round Robin Pmax para o Cenário 9.

Observamos nas figuras 69 e 70, o CDF de *throughput* para este cenário. Na figura 69 a comunicação por Drone é a que apresenta os piores resultados com cerca de 53% dos utentes Drone a transmitir/receber ritmos binários quase nulos. Quando a potência de

Avaliação de Cenários 5G

transmissão é máxima os utentes Drone conseguem melhores resultados de *throughput*, diminuindo para 23% os utentes a transmitir/receber ritmos binários quase nulos. Na comunicação D2D comparando as figuras 69 e 70 observa-se uma ligeira degradação do CDF do *throughput* quando se aumenta a potência de transmissão dos Drones. Há um aumento de 40% para 45% de utentes D2D que quase não transmitem/recebem. Isto indica existência de interferência das comunicações Drone nas ligações D2D. Nas comunicações celulares não é visível qualquer interferência proveniente dos Drones e a curva DL mantém-se inalterada nas duas situações.

B2 Cenário 10

No cenário 10 temos 10 UEs por Drone, a transmitirem num raio máximo de 50m, a modificação é no *scheduler* que passa de Round Robin para Largest Delay First (LDF). Na Tabela 16 mostra-se todas as informações associadas a este cenário.

Características	Parâmetros	Valores
Drone	Schedulers	Largest Delay First
	Raio (m) da Célula Drone	50
	Potência de Transmissão	30 & 40 dBm

Tabela 16 - Parâmetros de simulação para o cenário 10.

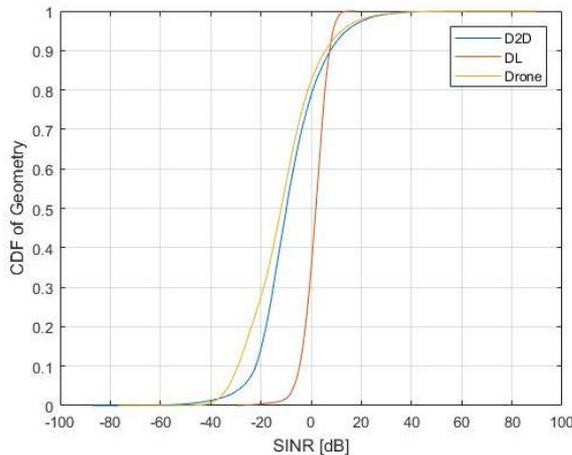


Figura 71 - CDF de Geometria em função SINR utilizando LDF, Pmin para o Cenário 10.

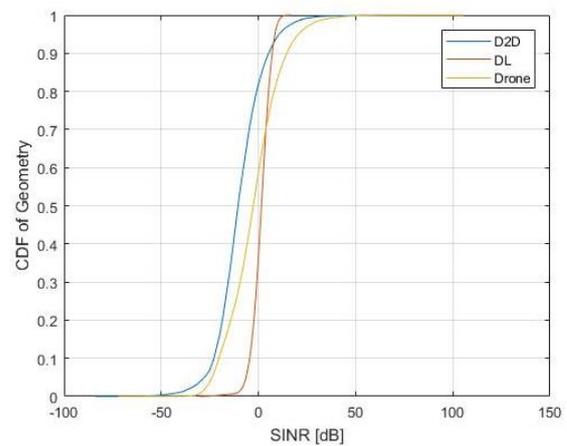


Figura 72 - CDF de Geometria em função SINR utilizando LDF, Pmax para o Cenário 10.

Como se ilustra nas figuras 70 e 71 não há qualquer alteração no CDF de Geometria em função do SINR, quando se muda de *scheduler*. Estes gráficos são exatamente os mesmos das figuras 70 e 71.

Avaliação de Cenários 5G

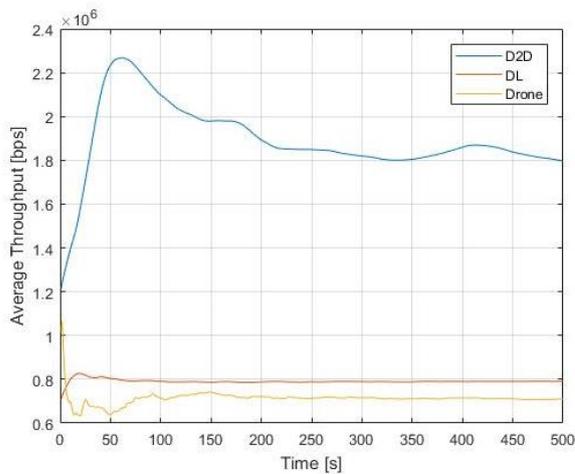


Figura 73 - Throughput médio utilizando LDF, Pmin para o Cenário 10.

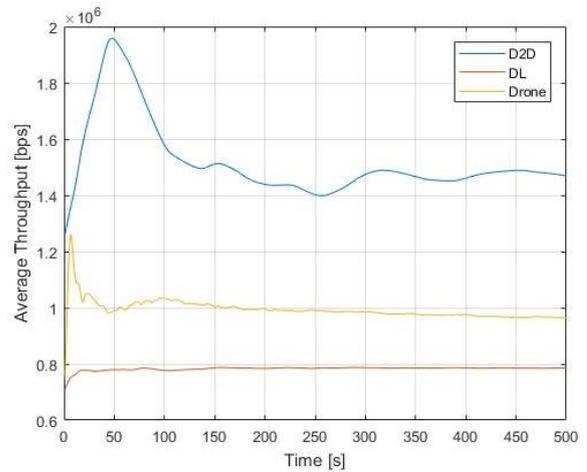


Figura 74 - Throughput médio utilizando LDF, Pmax para o Cenário 10.

Nas figuras 73 (com Pmin) e 74 (com Pmax), ilustra-se o *throughput* médio em função do tempo de simulação para o cenário 10. Observamos que na comunicação por Drone, quando a potência de transmissão é mínima (figura 73), a taxa de transmissão dos utentes Drone é de 0.7Mbps e sobe para 1.0Mbps devido ao aumento da potência para Pmax na figura 70. Os utentes D2D passam de um ritmo binário médio de 1.8Mbps para 1.5Mbps, enquanto que para os utentes celulares as taxas de transmissão com sucesso mantêm-se em 0.8Mbps. Comparando com os resultados do anterior *scheduler* RR estes ritmos binários são inferiores devido à prioridade que se dá aos utentes nas fronteiras das células, que só conseguem transmitir com baixos ritmos binários. Isto acontece em qualquer tipo de ligação pois estas usam o mesmo *scheduler* LDF em todas as comunicações, quer seja Drone, D2D ou DL.

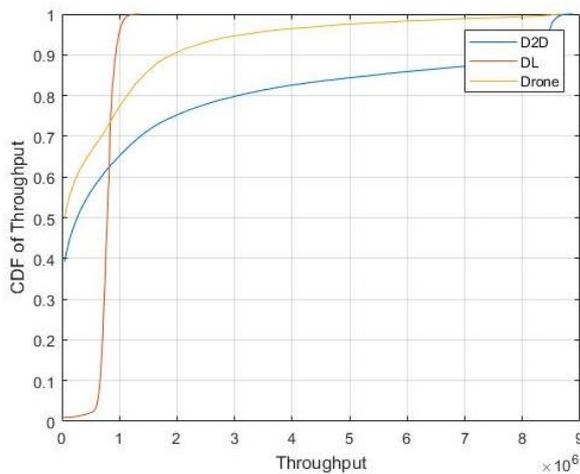


Figura 75 - CDF de Throughput utilizando LDF, Pmin, para o Cenário 10.

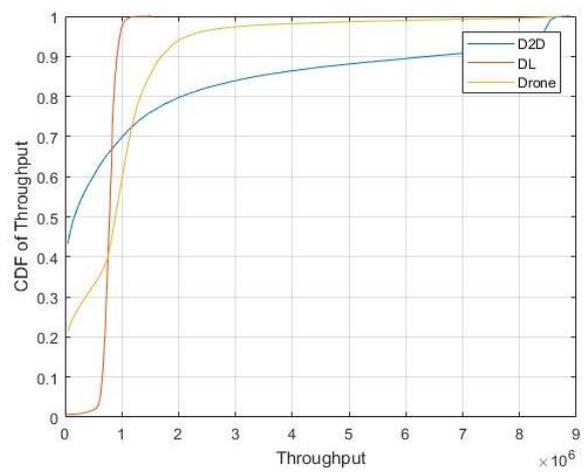


Figura 76- CDF de Throughput LDF, Pmax, para o Cenário 10.

Avaliação de Cenários 5G

Observamos nas figuras 75 e 76, o CDF de *throughput* para o cenário 10. Na figura 75 a comunicação por Drone é a que apresenta os piores resultados com cerca de 50% dos utentes Drone a transmitir/receber ritmos binários quase nulos. Quando a potência de transmissão é máxima os utentes Drone conseguem melhores resultados de *throughput*, diminuindo para 21% os utentes a transmitir/receber ritmos binários quase nulos. Na comunicação D2D comparando as figuras 75 e 76 observa-se uma ligeira degradação do CDF do *throughput* quando se aumenta a potência de transmissão dos Drones. Há um aumento de 39% para 44% de utentes D2D que quase não transmitem/recebem. Isto indica existência de interferência das comunicações Drone nas ligações D2D. Nas comunicações celulares não é visível qualquer interferência proveniente dos Drones e a curva DL mantém-se inalterada nas duas situações. Comparando com os gráficos das figuras 75 e 76, observa-se uma ligeira redução dos utentes Drone e D2D que transmitem ritmos binários quase nulos. Isto explica-se pela prioridade dada pelo LDF aos utentes nas fronteiras das células.