



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Simulação ao Nível de Sistema de Comunicações por Drone

Flávio Alexandre Braga Cabral

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Prof. Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático
Iscte

Co-Orientador:

Prof. Doutor Pedro Joaquim Amaro Sebastião, Professor Auxiliar
Iscte

Setembro, 2022

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Simulação ao Nível de Sistema de Comunicações por Drone

Flávio Alexandre Braga Cabral

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Prof. Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor Catedrático
Iscte

Co-Orientador:

Prof. Doutor Pedro Joaquim Amaro Sebastião, Professor Auxiliar
Iscte

Setembro, 2022

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer à minha mãe, Ana Maria Braga Cabral, por todo o seu apoio, esforço e dedicação incomensurável, por me ter moldado na pessoa que sou hoje e por ter lutado sobre as dificuldades da vida para que eu conseguisse atingir os meus objetivos, sem ela não teria sido possível chegar aqui. Aos meus avós e tios, que me apoiaram nas minhas decisões e que sempre me proporcionaram todo o seu suporte. Em especial, ao meu primo, João Manuel Cabral, por estar sempre comigo em todas as situações da minha vida, pelo seu apoio incondicional, amizade e sorrisos, para mim será sempre como um irmão. Aos familiares que já partiram, resta a minha eterna saudade e gratidão.

Agradeço a todos os meus amigos que cresceram comigo e aos que conheci ao longo desta aventura, por se terem tornado parte da minha família, pelo seu suporte e compreensão nas fases boas e más da vida. Àqueles, que de uma maneira ou de outra, passaram por mim e deixaram um impacto na minha vida. A todos, recordo com saudade os momentos passados e guardarei um pedaço de cada um no meu coração.

Ao Iscte e à Residência do Iscte, por me acolherem e se terem tornado na minha segunda casa ao longo destes cinco anos, onde pode experienciar um novo conjunto de emoções e sentimentos, que me levaram a descobrir quem realmente sou e para onde quero ir.

Por fim, ao Professor Américo Correia, por ter aceitado ser meu orientador no desenvolvimento desta dissertação, pelo sua disponibilidade, suporte e diligência ao longo destes meses, o seu conhecimento e orientação proporcionou o progresso desta dissertação.

Resumo

A rede de acesso rádio de quinta geração, 5G NR, permite o acesso a uma vasta diversidade de novos serviços sobre a rede móvel, através da sua capacidade de fornecer aos clientes maiores ritmos binários, fiabilidade, eficiência espectral e uma latência reduzida.

Os *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), têm recebido grande atenção devido à sua mobilidade, capacidade de transporte, velocidade e adaptabilidade, o que poderá permitir o surgimento de novas ofertas no mercado. Uma das principais dificuldades impostas para a sua introdução são os requisitos necessários para o controlo do veículo, uma vez que deve ser garantida a segurança da missão, especialmente em missões para além da linha de vista.

A reutilização das infraestruturas de rede móvel poderá ser uma solução, através da sua elevada capacidade de cobertura e pelo surgimento das redes de nova geração, que poderão finalmente dar resposta às exigências impostas no controlo de UAVs, especialmente em termos de fiabilidade e ritmos binários.

Foi desenvolvido um simulador de nível de sistema que pretende analisar a performance de uma rede de acesso rádio 5G NR, em termos de *throughput* e de cobertura, quando esta, para além de servir os UEs terrestres convencionais, tem de servir os novos UEs aéreos, possibilitando o estudo do impacto da incorporação de UAVs nas redes móveis convencionais, nos cenários *Rural Macro with Aerial Vehicle* (RMa-AV), *Urban Macro with Aerial Vehicle* (UMa-AV) e *Urban Micro with Aerial Vehicle* (UMi-AV), utilizando-se a técnica de transmissão *Massive Multi-Input Multi-Output* (mMIMO) e uma técnica de *clustering* de TRPs.

Palavras-chave: 5G NR, *Massive Multi-Input Multi-Output* (mMIMO), UAVs, Simulador de Nível de Sistema, *Line-of-Sight* (LOS), Pontos de Transmissão/Receção (TRPs).

Abstract

The fifth generation of the new radio access network, 5G NR, allows access to a vast diversity of new services through the mobile network, through their capacity to provide clients with higher data rates, reliability, spectral efficiency, and reduced latency.

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have been receiving large attention due to their mobility, capacity of transport, speed, and adaptability, which may allow the emergence of new offers to the market. One of the main difficulties imposed for their launch is the necessary requirements on the control of the vehicle, since it must be guaranteed the security of the mission, especially during beyond-line-of-sight missions.

The reuse of the mobile network infrastructures may be one solution, through its high coverage capacity and the emergence of new mobile network generations, this could finally meet the demands imposed on the control of an UAV, especially in terms of reliability and data rate.

It was developed a system-level simulator that intends to analyze the performance of a 5G NR radio access network, in terms of throughput and coverage, which, in addition to serving the conventional terrestrials users, it will also serve the new aerial users, enabling the study of the impact of the incorporation of UAVs into the conventional mobile networks, in the scenarios Rural Macro with Aerial Vehicle (RMa-AV), Urban Macro with Aerial Vehicle (UMa-AV) and Urban Micro with Aerial Vehicle (UMi-AV), using the transmission technique Massive Multi-Input Multi-Output (mMIMO) and a TRPs clustering technique.

Keywords: 5G NR, Massive Multi-Input Multi-Output (mMIMO), UAVs, System-Level Simulator, Line-of-Sight (LOS), Transmission/Reception Points (TRPs).

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABELAS.....	13
SIGLAS E ABREVIATURAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	17
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO	19
1.2 QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO	20
1.3 OBJETIVOS	20
1.4 MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO.....	21
CAPÍTULO 2 ESTADO DA ARTE.....	23
2.1 UAVs	23
2.1.1 Caraterização de UAVs.....	23
2.1.2 Requisitos para a comunicação com UAVs	23
2.1.3 UAVs em redes celulares	25
2.2 MODELAÇÃO DE CANAL	26
2.3 INTERFERÊNCIA DE <i>UPLINK/DOWNLINK</i> COM UAVs	30
2.4 TÉCNICAS PARA AUMENTO DA PERFORMANCE	32
2.4.1 Introdução de MIMO em sistemas com UAVs	32
2.4.2 Multi-TRP	33
CAPÍTULO 3 SIMULADOR DE NÍVEL DE SISTEMA	36
3.1 DESCRIÇÃO BASE DO SIMULADOR.....	36
3.2 CENÁRIOS DE IMPLEMENTAÇÃO.....	40
3.3 IMPLEMENTAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DO SIMULADOR	42
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	49
4.1 RESULTADOS DE THROUGHPUT.....	49
4.2 RESULTADOS DE COBERTURA	59
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	65
5.1 CONCLUSÕES.....	65

5.2 PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICES.....	71
APÊNDICE I - CARATERIZAÇÃO DOS CANAIS DE TRANSMISSÃO	71
APÊNDICE II – PARÂMETROS DE SHADOWING	76
APÊNDICE III – PARÂMETROS DE GRANDE ESCALA.....	77

Índice de figuras

Figura 1 - Diagrama do método de investigação, retirado de [4].	22
Figura 2 – Incorporação de UAVs em redes celulares, (a) Cellular-Connected UAVs, (b) UAV-Assisted Wireless Communication, retirado de [6].	25
Figura 3 - Impacto das transmissões de UAVs para com os objetos terrestres, retirado de [3].	28
Figura 4 – Exemplos de interferência devido à incorporação de UAVs sobre a rede celular, retirado de [14].	31
Figura 5 - Modelo de transmissão MIMO com modulação OFDM, retirado de [16].	32
Figura 6 - Comparação entre o método de transmissão das BSs convencionais e transmissão com o uso de mMIMO, retirado de [17].	33
Figura 7 – UE servido simultaneamente por dois TRPs, retirado de [19].	34
Figura 8 - Relação entre os simuladores de nível de sistema e de ligação, adaptado de [22].	37
Figura 9 - Interface gráfica do simulador de nível de sistema implementado.	38
Figura 10 - Processos de configuração e execução do simulador implementado, adaptado de [22].	39
Figura 11 - Sequência de execução do simulador de nível de sistema, adaptado de [13] e de [22].	43
Figura 12 - Mobilidade do UAV, eixo vertical ou eixo horizontal.	43
Figura 13 - Definição das distâncias 2D e 3D sobre UEs terrestres e aéreos, retirado de [8] e [13].	44
Figura 14 – Estrutura de antena de painel retangular uniforme com polarização 1, adaptado de [13].	47
Figura 15 - Throughput VS N_u , cenário RMa-AV, respetivamente, 15 UEs + 0 UAVs e 10 UEs + 5 UAVs por setor, modulações 4-QAM (5), 4-QAM (8) e 64-QAM (8), cluster 1C e 3C.	50
Figura 16 - Throughput VS N_u , cenário UMa-AV, respetivamente, 15 UEs + 0 UAVs e 10 UEs + 5 UAVs por setor, modulações 4-QAM (5), 4-QAM (8) e 64-QAM (8), cluster 1C e 3C.	51
Figura 17 - Throughput VS N_u , cenário UMa-AV, modulação 4-QAM (8), com 0, 2, 5 e 10 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.	52
Figura 18 - Throughput VS N_u , cenário UMa-AV, modulação 4-QAM (5), com 0, 2, 5 e 10 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.	53
Figura 19 - Throughput VS N_u , cenário UMa-AV, modulação 64-QAM (8), com 0, 2, 5 e 10 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.	53
Figura 20 - Throughput VS N_u , cenário UMi-AV, respetivamente, 15 UEs + 0 UAVs e 10 UEs + 5 UAVs por setor, modulações 4-QAM (5), 4-QAM (8) e 64-QAM (8), cluster 1C e 3C.	55

Figura 21 - Throughput vs Antenas TRPs ativas, cenário RMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 3C.....	56
Figura 22 - Throughput vs Antenas TRPs ativas, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 3C.....	56
Figura 23 - Throughput vs Antenas TRPs ativas, cenário UMi-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 3C.....	57
Figura 24 - Throughput em função CDF do Throughput, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.	58
Figura 25 - CDF do Throughput em função do Throughput por TRP, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.	59
Figura 26 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário RMa, 15 UEs + 0 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.....	60
Figura 27 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário RMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.....	60
Figura 28 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMa, 15 UEs + 0 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.....	61
Figura 29 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.....	62
Figura 30 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMi, 15 UEs + 0 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.....	63
Figura 31 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMi-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.....	63
Figura 32 - Definição global do sistema cartesiano de coordenadas com ângulo de Zenith θ e ângulo de azimuth Φ , sobre um vetor n , retirado de [13].....	78

Índice de tabelas

Tabela 1 - Especificação dos requisitos associados às comunicações CNPC e PC, retirado de [8].	24
Tabela 2 - Esquemas de modulação mMIMO para 5G NR, adaptado de [20].	36
Tabela 3 - Parametrização do sistema de simulação implementado, adaptado de [8].	42
Tabela 4 - Rácio e distribuição dos terminais, adaptado de [8].	42
Tabela 5 - Padrão da potência de radiação e ganho de um elemento da antena, retirado de [13].	48
Tabela 6 - Probabilidade de LOS nos cenários RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV, adaptado de [8] e [13].	72
Tabela 7 - Perdas de percurso sobre os cenários RMa-AV, UMa-AV, UMi-AV, adaptado de [8] e [13].	74
Tabela 8 - Parametrização do desvanecimento de sombra, adaptado de [8] e [13].	76
Tabela 9 - Parâmetros de grande escala, adaptado de [13].	77

Siglas e Abreviaturas

3GPP - *3rd Generation Partnership Project*

5G - Rede de 5ª Geração

AOA – *Azimuth angle of Arrival*

ASA – *Azimuth angle Spread of Arrival*

BLER – *Block Error Rate*

BLOS - *Beyond-Line-of-Sight*

BS – *Base Station*

CDF – *Cumulative Distribution Function*

CNPC - *Control and Non-Payload Communication*

C-RAN – *cloud RAN*

D2D - *Device-to-Device*

DL - *Downlink*

DOF - *Degree-of-Freedom*

DS – *Delay Spread*

eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*

FD-MIMO - *Full-Dimensional MIMO*

FR1 – *Frequency Range 1*

GBS-UAV - *Ground Base Station-to-UAV*

ICAO - *International Civil Aviation Organization*

ICI – *Inter-Carrier Interference*

IoT - *Internet-of-Things*

ISD – *Intersite Distance*

ITU - *International Telecommunication Union*

K – *Ricean K-Factor*

LOS - *Line-of-Sight*

LTE - *Long Term Evolution*

MC-CDMA - *Multi-carrier Code-Division Multiple Access*

MIMO - *Multi-Input Multi-Output*

mMIMO – *massive MIMO*

mMTC - *massive Machine-type Communications*

NLOS - *Non-Line-of-Sight*

NR - *New Radio*

OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

PC - *Payload Communication*

PL – *Pathloss*

PRB - *Physical Resource Block*

QoS – *Quality of Service*

RAN - *Radio Access Network*

RMa-AV - *Rural Macro with Aerial Vehicle*

SE – *Spectral Efficiency*

SF – *Shadow Fading*

SNR – *Signal-to-Noise Ratio*

SWaP - *Size, Weight, and Power*

TBS – *Transport Block Size*

TRP – *Transmission/Reception Point*

TTI – *Transmission Time Interval*

U2U – *UAV-to-UAV*

UAS - *Unmanned Aerial Systems*

UAV-GT – *UAV-to-Ground Terminal*

UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*

UE – *User Equipment*

UG – *UAV-to-Ground*

ULA – *Uniform Linear Arrays*

UMa-AV – *Urban Macro with Aerial Vehicle*

UMi-AV – *Urban Micro with Aerial Vehicle*

UP – *Uplink*

URLLC – *Ultra-Reliable and Low-Latency Communications*

V2V – *Vehicle-to-Vehicle*

V2X – *Vehicle-to-Everything*

ZOA – *Zenith angle of Arrival*

ZSA – *Zenith angle Spread of Arrival*

Lista de símbolos

c – Velocidade de propagação em espaço livre

d_{2D} – Distância sobre um plano 2D

d_{3D} – Distância sobre um plano 3D

d_{BP} – Distância de *Breakpoint*

h'_x - Altitude efetiva de x

h_{BS} – Altitude da estação de base

h_E – Altitude efetiva *standard*

h_{UT} – Altitude do UE

N_{tx} – Número de antenas de transmissão

N_u – Número de utilizadores

P_{LOS} – Probabilidade de LOS

P_n – Potência do *cluster* n

P_{NLOS} – Probabilidade de NLOS

R_b – Ritmo binário

R_s – Ritmos de símbolo

X_δ - Desvanecimento de *shadowing*

σ_{SF} – *Shadow Fading*

ζ – *Cluster Shadowing*

Capítulo 1 Introdução

Este capítulo corresponde à introdução do tema desta dissertação, através de um enquadramento teórico, da definição das questões e objetivos de estudo e a apresentação do modelo de investigação sobre o qual assentará a concretização desta dissertação.

1.1 Motivação e enquadramento

Os *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) surgiram inicialmente para fins militares, todavia os avanços tecnológicos vieram a permitir a sua comercialização a preços reduzidos, para diversas aplicações como vigilância, monitorização, lazer e em missões de procura e salvamento [1].

A sua utilização possui diversas vantagens como a rápida capacidade de implementação, grande probabilidade de comunicações em *Line-of-Sight* (LOS), elevada mobilidade e adaptações dinâmicas em termos de altitude, velocidade e posicionamento, seguindo um modelo de movimento 3D [2]. Sendo que, a utilização de sistemas de comunicação com UAVs junto da rede móvel convencional, poderá trazer inúmeras vantagens e garantir os requisitos comunicacionais exigidos no controlo destes veículos.

O desenvolvimento da rede de 5ª Geração, o 5G NR, levou à apresentação de três casos de uso essenciais para as redes de geração futura, o *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), para o suporte de ritmos binários elevados, o *massive Machine-type Communications* (mMTC), para dar resposta ao elevado número de equipamentos que usam a rede como suporte aos seus serviços, como a *Internet-of-Things* (IoT), e *Ultra-Reliable and Low-Latency Communications* (URLLC), para dar suporte a comunicações que exijam uma elevada fiabilidade e baixa latência [3]. Este último, é particularmente favorável para permitir a integração de UAVs em sistemas de comunicações celulares, devidos aos seus elevados requisitos de fiabilidade e baixa latência que estes sistemas impõem.

A reutilização da rede móvel convencional para o controlo e transmissão de dados com UAVs, ou até mesmo a sua inserção temporária como meios de retransmissão de dados entre infraestruturas celulares e utilizadores (UEs) terrestres, poderá permitir o surgimento de novas soluções para além da linha de vista dos UEs. Podendo vir a ser, um recurso eficaz para a implementação de cenários de segurança pública nas comunicações móveis futuras, com potencial para contornar temporariamente falhas em estações de base (BSs) e para a extensão

da cobertura da rede até zonas remotas ou sobre catástrofe, assim como a sua utilização em outras aplicações comerciais.

1.2 Questões de investigação

As principais questões que sustentam o desenvolvimento desta dissertação são:

- Como é que a presença de novos terminais aéreos na rede móvel convencional irá impactar na qualidade de serviço oferecido aos terminais terrestres?
- Como é que a presença de UAVs irá afetar a performance da rede, ao nível de *throughput* e de cobertura, quando comparado com a presença de apenas UEs terrestres?
- Que esquemas de comunicação mMIMO serão mais adequados, tendo em conta o cenário de propagação pretendido?
- Que técnicas poderão ser utilizadas de forma a combater a interferência causada pela presença de UAVs?

1.3 Objetivos

O desenvolvimento desta dissertação irá focar-se na introdução de UAVs sobre as redes de comunicação móveis, de forma que seja perceptível o seu impacto na performance de um sistema de comunicação 5G NR. Através do desenvolvimento de um simulador de nível de sistema, que permitirá às operadoras de telecomunicações, compreenderem a influência dos UAVs sobre a sua rede.

O simulador de nível de sistema será desenvolvido em Java, no qual, terá como objeto de estudo o impacto da utilização de drones nas redes celulares futuras, os quais terão uma mobilidade linear sobre o ambiente de propagação e estarão equipados com elementos de transmissão que lhes permitirá transmitir/receber dados de BSs ao seu alcance. Será necessário que se estude a interferência causada pela presença dos UAVs sobre os sistemas de comunicação, através da perceção da complexidade que é exigida pela sua integração, a caracterização das condições únicas dos diversos canais de transmissão, o impacto sobre os UEs terrestres convencionais e que técnicas poderão ser aplicadas para favorecer a performance do sistema.

A utilização dos sistemas de comunicação modernos com antenas *Multi-Input Multi-Output* (MIMO) aplicado a drones, será alvo de análise para a compreensão do impacto da sua utilização sobre diferentes cenários de implementação.

1.4 Método de investigação

O desenvolvimento desta dissertação irá seguir o método de investigação segundo o modelo *Design Science Research*, figura 1.

Este modelo, especialmente organizado para áreas tecnológicas, foi estruturado para orientar e auxiliar investigações científicas com base no seguimento de um conjunto de várias etapas essenciais para o sucesso de uma investigação [4]. O modelo assenta em seis fases fundamentais, as quais especificam-se do seguinte modo:

1 Identificação do problema e motivação - Reconhecer qual o problema que sustenta a investigação e averiguar qual a contribuição de uma possível solução [4].

2 Objetivos – A partir da identificação do problema, definir quais os objetivos que motivam a investigação através da refutação de soluções já existentes ou com a apresentação de uma nova solução [4].

3 Desenho e implementação – Desenho e construção da arquitetura que irá suportar o sistema, conceção de algoritmos e desenvolvimento das funcionalidades que conduzam o sistema aos objetivos pré-definidos [4].

4 Demonstração – Verificar a eficácia da aplicação do sistema desenvolvido na resolução do problema que sustenta a investigação [4].

5 Avaliação – Avaliar a coerência entre os objetivos atingidos pelo sistema e os objetivos pré-definidos, através da análise dos resultados provenientes da implementação concretizada [4].

6 Comunicação – Divulgação do sistema através da comunicação, comprovação do rigor e eficácia da implementação desenvolvida, assim como a identificação do seu contributo para com a comunidade [4].

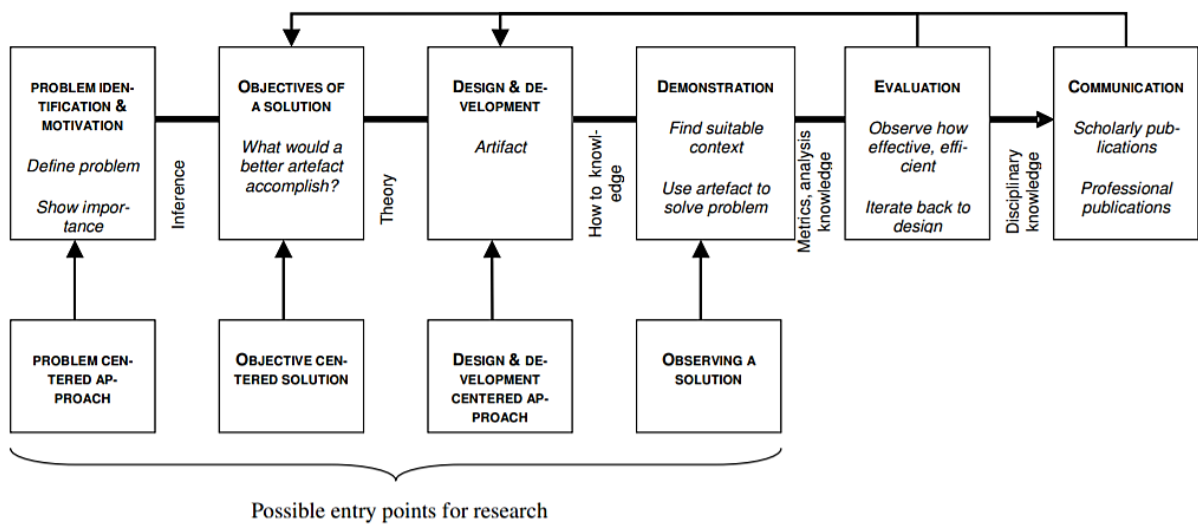


Figura 1 - Diagrama do método de investigação, retirado de [4].

Capítulo 2 Estado da arte

Este capítulo, destina-se à apresentação do estado da arte das tecnologias subjacentes à concretização desta dissertação. Este, servirá como um ponto de partida para o desenho e implementação do simulador, sendo que se baseará num estudo evolutivo dos UAVs, a sua estandardização no âmbito das comunicações móveis, as consequências da sua introdução sobre as redes celulares e técnicas que poderão colaborar na minimização do impacto sobre a performance da rede.

2.1 UAVs

2.1.1 Caracterização de UAVs

UAVs podem ser distinguidos através das várias características que representam o veículo, como a altitude e a velocidade de voo, capacidade de carga, dimensões, capacidade energética e estrutura das asas [5]. A escolha da tipologia adequada dependerá dos objetivos que devem ser cumpridos ao longo e no fim da missão à qual está destacado o veículo.

Uma das principais componentes que os diferenciam é configuração das asas, as quais normalmente englobam as seguintes categorias:

Fixed-Wing – caracterizam-se por asas fixas sobre a estrutura do veículo, possibilitando um voo a maior velocidade, como também uma maior capacidade de transporte, todavia necessitam de estar em constante movimento, de forma a sustentarem a sua aerodinâmica de voo, e requerem uma maior área terrestre para descolagem e aterragem [6].

Rotary-Wing – caracterizam-se por asas que giram sobre um sistema rotacional, permitindo manter o *drone* numa localização fixa e de forma constante, requerendo uma área reduzida para descolagem e aterragem, e distinguindo-se pelos seus movimentos verticais durante estes procedimentos [6]. A capacidade de carga é inferior quando comparado com os anteriores.

2.1.2 Requisitos para a comunicação com UAVs

A nível europeu, o programa *U-Space* regulou um conjunto de leis diretamente aplicáveis a sistemas *Unmanned Aerial Systems* (UAS). A altitude máxima de voo de UAVs está estipulada

para 120 m acima da superfície terrestre e sobre um espaço aéreo não-controlado, para espaços aéreos controlados, como áreas próximas de aeroportos, a sua altitude fica restringida até a um máximo de 80 m. Sistemas que impliquem risco superior de manuseamento, que pretendam voos com altitudes superiores a 120 m ou voos *Beyond-Line-of-Sight* (BLOS), encontram-se sujeitos a uma análise de risco de forma a autorizar a operação de voo, podendo ser incumbido a necessidade de certificação para a execução dos objetivos pretendidos [7].

O tipo de mensagens que suportam a missão à qual está destacado o UAV, podem ser categorizadas em dois tipos, *Control and Non-Payload Communication* (CNPC) correspondendo a mensagens de comando e controlo, como orientações de circulação ou velocidade, e mensagens *Payload Communication* (PC) correspondendo a mensagens para a transmissão de dados, como por exemplo *streaming* de vídeo, fotografias, análises de terreno ou leituras de sensores [6]. A troca eficiente de pacotes de ou para o UAV é fundamental para cumprir os objetivos, todavia as mensagens CNPC possuem uma maior responsabilidade no controlo e na segurança da missão, implicando que seja necessário a especificação de requisitos mais limitativos para garantir a eficiência da sua transmissão [5].

Deste modo, em [8], o *3rd Generation Partnership Project, 3GPP*, especificou os requisitos de transmissão associados a cada tipo de comunicação, apresentados na tabela 1. Comunicações do tipo CNPC, que requerem um ritmo binário reduzido, devem ter limitações quanto à probabilidade de erro e ao valor de latência de transmissão, garantindo deste modo uma elevada fiabilidade. Por outro lado, mensagens PC, que exigem ritmos binários mais elevados, possuem uma maior abrangência à ocorrência de erros e à latência, sendo que os requisitos poderão variar consoante os objetivos da missão [5], por exemplo, em missões de vigilância com UAVs poderão ter até 3000 ms de latência, todavia missões de busca e salvamento devem ter uma latência máxima de 500 ms [3].

Tipo de comunicação	Ligação	Ritmo de binário	Prob. de erro de bit	Latência
CNPC	DL	60 a 100 Kbps	10^{-3}	50 ms
	UP			-
PC	DL/UP	Até 50 Mbps	-	Equivalente aos utilizadores terrestres no LTE

Tabela 1 - Especificação dos requisitos associados às comunicações CNPC e PC, retirado de [8].

Devido à elevada importância das mensagens do tipo CNPC, o *International Civil Aviation Organization* (ICAO) estipulou que este tipo de comunicação deveria ser efetuado através de um espectro licenciado [3]. Por investigações da *International Telecommunication Union* (ITU),

poderá ser necessário a libertação dos espectros 34 MHz e 56 MHz de forma a suportar implementações futuras de UAS. Desse modo, no *World Radiocommunication Conference* de 2012 (WRC-12), foi libertado o espectro entre 5030 e 5091 MHz e, no WRC de 2015, foi estipulado a disponibilização de redes de satélites geoestacionários, *Fixed Satellite Service* (FSS), para a transmissão de comunicações CNPC [5].

2.1.3 UAVs em redes celulares

A expansão mundial das redes celulares traz inúmeras vantagens à integração de sistemas UAS sobre a rede, através do contorno das limitações de alcance para o controlo remoto do veículo, assim como o aproveitamento das técnicas de comunicação dos sistemas convencionais, que permitem garantir fiabilidade, segurança e eficiência comunicacional, poderão vir a possibilitar a exequibilidade da implementação dos sistemas com UAVs [3]. A combinação destes novos terminais aéreos com as infraestruturas tradicionais de comunicação terrestres, permitem uma solução flexível e de menor custo infraestrutural, o que poderá ser muito apelativo para cenários de segurança pública e em soluções comerciais.

A inserção de UAVs nas redes móveis pode ser categorizada tendo em conta vários aspetos, como o tipo de ligação ou a missão destacada, sendo que, a introdução de UAVs é frequentemente classificada em *Cellular-Connected*, onde os UAVs são vistos como UEs aéreos que recorrem à rede celular para transmitirem dados ou que podem estar equipados com infraestrutura de BS, fornecendo aos UEs conectividade para com a rede celular, sem dependerem das infraestruturas convencionais, figura 2-(a) [3].

Noutra perspetiva, *UAV-Assisted Wireless Communication*, o qual refere-se à utilização de UAVs como infraestruturas aéreas para o auxílio nas comunicações, funcionando como meios de retransmissão e/ou disseminação de dados entre BSs e UEs, figura 2-(b) [5]. Nestes sistemas, a ligação para com as BSs deve ser garantida quando se pretende fornecer um acesso à rede, uma vez que os UAVs funcionam apenas como suporte às infraestruturas terrestres [6].

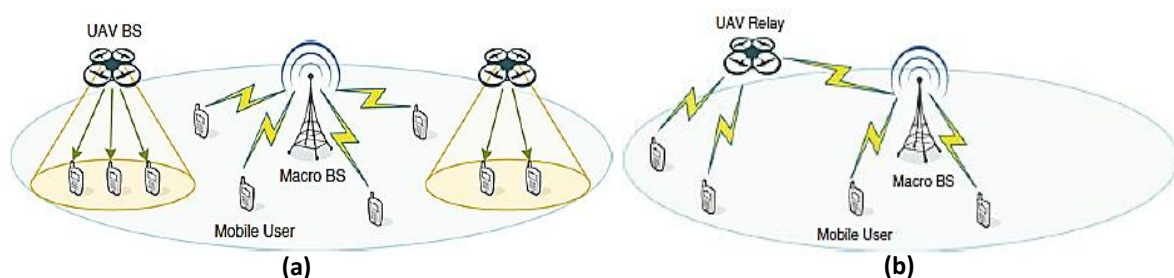


Figura 2 – Incorporação de UAVs em redes celulares, (a) *Cellular-Connected UAVs*, (b) *UAV-Assisted Wireless Communication*, retirado de [6].

Os sistemas UAS trazem consigo uma variedade de novas vantagens e possibilidades comparativamente com as infraestruturas terrestres, especialmente através de uma implementação dinâmica das redes, tendo em conta a procura pela sua utilização. A elevada altitude de posicionamento, consideravelmente superior à das BSs, implicará a consideração de uma cobertura de comunicação 3D, em contrapartida com o cobrimento 2D tradicionalmente aplicado nos UEs terrestres [5].

A elevada altitude irá influenciar o canal de comunicação *Ground Base Station-to-UAV* (GBS-UAV), através de uma componente de LOS dominante em vários cenários, fornecendo uma conectividade mais fiável entre os UAVs e as infraestruturas com as quais comunicam. Uma componente de LOS dominante irá permitir a concretização do *scheduling* e da alocação de recursos mais eficiente, uma vez que o canal será submetido a menores flutuações. Esta grande influência de LOS também poderá ter um impacto negativo nas comunicações, devido à interferência que poderá vir a causar sobre outras BSs, para além daquela a que está alocado e que tenham uma visão LOS para com o UAV ou para com outros terminais [3].

Os UAVs fornecem uma grande mobilidade aérea 3D, através de um controlo total ou parcial do seu posicionamento, velocidade, direção e altitude, permitindo um ajuste dinâmico tendo em conta os objetivos pretendidos e fornecendo um ângulo de visibilidade superior, regularmente denominado por *Degree-of-Freedom* (DOF). O planeamento da trajetória do UAV influenciará a performance do *scheduling* e da alocação de recursos, assim como elevadas velocidades poderão conduzir a uma maior concretização de *handovers* e oscilações nas ligações rádio [5].

Caraterísticas associadas ao veículo como o tamanho, peso e energia (SWaP) limitam a implementação de sistemas UAS, uma vez que o UAV não possui um fornecimento energético assente numa fonte de energia constante, como ocorre nos sistemas terrestres, impõem-se, deste modo, limitações na capacidade de carga montada sobre a infraestrutura do veículo e uma gestão adequada no total de energia gasta para a propulsão do veículo em conjunto com a energia despendida para comunicações [3].

2.2 Modelação de canal

Tendo em conta a integração dos UAVs nos sistemas comunicacionais celulares, faz-se a identificação de três canais de comunicação distintos, o UAV-to-UAV (U2U), *Ground Base Station-to-UAV* (GBS-UAV) e UAV-to-*Ground Terminal* (U-GT) [5].

2.2.1 Canal UAV-to-UAV

A caracterização adequada deste canal é essencial para os sistemas de comunicação que possuam um número considerável de UAVs e em que exista a necessidade de se garantir a comunicação entre os diversos veículos.

A elevada altitude, na qual ocorrem as transmissões sobre o canal U2U, caracteriza-se essencialmente por um baixo desvanecimento causado pelos múltiplos percursos, todavia poderá apresentar um efeito de *Doppler* superior aos canais GBS-UAV e UAV-GT, quando a diferença relativa entre as velocidades dos UAVs for consideravelmente elevada [9].

A modelação relativa a este tipo de canais ainda é muito limitada e requer a concretização de estudos mais minuciosos. Um modelo das perdas de percurso que costuma ser utilizado é o *Log-Distance*, que é usualmente considerado sobre cenários de comunicação como U2U e canais *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), o qual representa a atenuação da potência transmitida tendo em conta o distanciamento entre transmissores e recetores [9], sendo que o cálculo das perdas de percurso (PL) pode ser expresso como em [9]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\delta \text{ [dB]} \quad (1)$$

Onde, α corresponde ao expoente das perdas de percurso, d_0 corresponde uma distância de referência para as perdas de percurso e X_δ é o parâmetro que caracteriza o desvanecimento causado pelo *shadowing*, sendo esta uma variável aleatória gaussiana de valor médio 0 [9].

2.2.2 Canal GBS-to-UAV/UAV-to-GT

A modelação dos canais GBS-to-UAV/UAV-to-GT é dependente sobre o meio no qual se está a implementar o sistema, por isso a sua especificação deverá ser precisa e adaptada ao meio de propagação considerado, sendo fundamental para a eficiência do sistema em termos de frequências de transmissão, modulação, alocação de recursos, características de ligação e técnicas de transmissão [3].

A figura 3, demonstra que a elevada altitude dos UAVs, normalmente superior à das BSs, proporciona condições de propagação distintas daquelas observadas nas comunicações terrestres tradicionais. A utilização de veículos aéreos de transmissão, traz consigo uma maior probabilidade da existência de ligações em LOS, o que poderá permitir uma redução na potência de transmissão necessária para a comunicação, assim como um elevado ângulo de elevação que,

sobre condições de transmissão *Non-Line-of-Sight* (NLOS), poderá conduzir a menores perdas devido a efeitos de difração e *shadowing* [3].

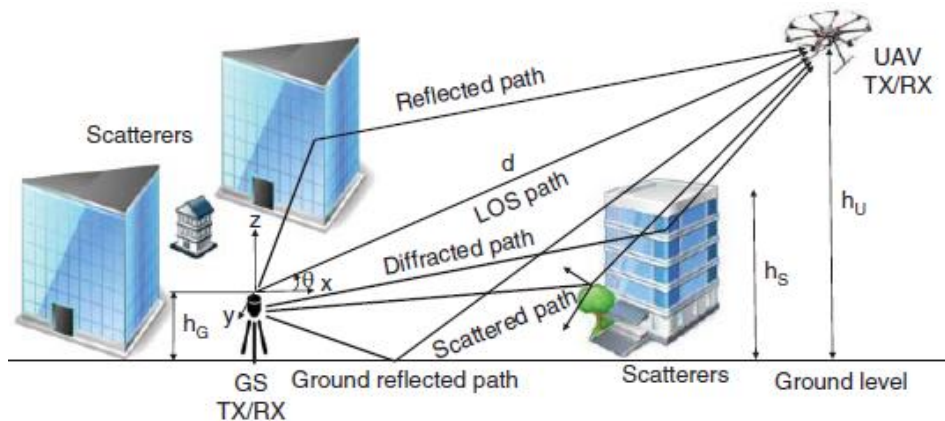


Figura 3 - Impacto das transmissões de UAVs para com os objetos terrestres, retirado de [3].

O surgimento de múltiplos percursos é provocado pela reflexão do sinal sobre a superfície terrestre, objetos que estejam na orientação da transmissão ou devido à própria estrutura do UAV, sendo que a caracterização destes múltiplos percursos irá depender das características que constituem os objetos. A modelação do canal terá de ter em conta as características do meio de propagação, como por exemplo meio montanhoso, zonas de vegetação, densidade urbana, meio rural, presença de água ou propagação em espaço livre [3].

A existência do efeito de *Doppler*, provocado pela diferença entre a velocidade dos UAVs e outros dispositivos com os quais comunica, poderá provocar uma interferência entre portadoras, como pode ser observado em cenários que utilizem multiplexagem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). A mitigação deste efeito pode ser efetuada através do aumento do espaçamento entre portadoras ou através de algoritmos de acesso ao canal, como o *Multi-Carrier Code-Division Multiple Access* (MC-CDMA), o qual se tem mostrado eficiente, contra o efeito de *Doppler*, em transmissões sobre canais GBS-UAV [3].

O modelo de caracterização mais simples para canais com uma componente de LOS dominante é o *Free Space Path Loss*. Quando se pretende considerar a reflexão provocada pela superfície terrestre, podemos seguirmo-nos por um modelo simples de dois raios, representando o sinal emitido e o sinal refletido pela superfície [3]. Muitos estudos fazem uso do modelo *Log-Distance Path Loss*, enunciado anteriormente, sendo que várias investigações identificaram diferentes expoentes de perdas consoante o tipo de ambiente de propagação (urbanos, suburbanos, rurais, sobre a água), sendo que, geralmente, numa propagação em espaço livre é considerado um expoente de perdas com valor 2 [3].

A comunicação sobre os canais GBS-UAV e UAV-GT possuem características de propagação únicas, devido à altitude a que os UAV estarão sobre as BSs e UEs terrestres, sendo que a especificação dos parâmetros de desvanecimento de pequena escala (espalhamento de *Doppler* e espalhamento devido aos múltiplos percursos) e o desvanecimento de grande escala (perdas de percurso e *shadowing*), deverá ter em consideração as condições singulares de propagação destes canais [5]. Nos parâmetros para o desvanecimento de pequena escala, tendo em consideração a presença da componente de LOS, poderão ser aplicados os modelos de *Rician* ou de *Nakagami-m* para a sua modelação [5]. Por outro lado, os parâmetros de grande escala, terão em conta a elevada altitude do drone e a transmissão numa dimensão 3D, exigindo uma abordagem mais complexa na sua modelação [5]. A distância 3D do UAV a um recetor terrestre, d_{3D} , pode ser caracterizada como em [2]:

$$d_{3D} = \sqrt{(x_u - x_r)^2 + (y_u - y_r)^2 + (z_u - z_r)^2} \quad (2)$$

Onde (x_u, y_u, z_u) representam as coordenadas do UAV e (x_r, y_r, z_r) representam as coordenadas de um recetor terrestre.

Vários estudos procuraram testar distintas caracterizações de canal e verificar a sua dependência sobre parâmetros relativos à altitude, distância aos terminais terrestres e ângulos de elevação e azimute em relação a estes. Em [10], num sistema de retransmissão com UAVs, a modelação do canal foi efetuada a partir do modelo de propagação em espaço livre, onde se considerou uma compensação perfeita do efeito de *Doppler*, assim como a presença dominante da componente de LOS. Este modelo, o qual não considera reflexões, *shadowing* nem desvanecimento de pequena escala, tem por base a consideração da distância entre o transmissor e o recetor, e no qual se pode observar bons resultados para ambientes de propagação em meios rurais ou quando a altitude do UAV permite ter uma componente de LOS dominante, todavia sobre ambientes urbanos este modelo poderá mostrar-se demasiado simplificado e impreciso.

Em [11], considerou-se para o cálculo do expoente de perdas de percurso, uma equação monotonamente decrescente com o aumento da altitude do UAV. Retratando que, com o aumento da altitude do UAV existe uma menor suscetibilidade a obstáculos, sendo que, para uma altitude suficientemente elevada, atinge-se o valor do expoente das perdas de percurso de 2, referente a um meio de propagação em espaço livre. Todavia esta consideração não remete para uma caracterização de canal apropriada, uma vez que não irá corresponder à realidade quando se tem em consideração a mesma altitude de voo, mas o meio de propagação subjacente ao canal varia.

Em [12], tendo em conta as variações da altitude do UAV, assim como a sua distância para com os nós terrestres, a modelação do canal foi efetuada com base no ângulo de elevação do *drone*, demonstrando que com o aumento do ângulo de elevação, devido ao aumento da altitude ou da proximidade do UAV para com os nós terrestres, a componente de LOS torna-se dominante sobre o sistema de transmissão.

Devido às variações na existência de condições de LOS e NLOS sobre os canais de transmissão, levou ao surgimento de modelações com base na probabilidade da sua ocorrência sobre um determinado canal. Deste modo, em [8], o 3GPP especificou uma modelação de canal que inclui a probabilidade de LOS (P_{LOS}), as perdas de percurso, *shadowing* e o desvanecimento de pequena escala, e os quais variam consoante a altitude do UAV e o cenário de propagação considerado.

Nos relatórios técnicos [8] e [13], o 3GPP define os cálculos necessários para a caracterização dos canais de transmissão relativamente a cenários de propagação RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV, sendo estes cálculos dependentes da probabilidade de LOS subjacente a um canal, e os quais dependerão do meio de propagação, tendo em conta características como a altitude dos prédios, largura das estradas, altitude de instalação das BSs, densidade urbana e altitude de posicionamento do UAV. O 3GPP também especifica os respetivos valores *standard* associados ao desvio padrão do *shadowing* e o respetivo modelo de *fast fading*, tendo em conta os diferentes ambientes de propagação, sendo que a sua complexidade aumenta quando estamos sobre ambientes densamente urbanos.

2.3 Interferência de *uplink/downlink* com UAVs

Os UAVs caracterizam-se pela sua grande mobilidade e altitude, o que lhes proporciona um elevado número de canais em linha de vista, tanto sobre a BS que o serve como de outras ao seu redor. Deste modo, sobre os novos UEs aéreos, poderá ser verificado uma maior interferência quando comparados com os UEs tradicionais terrestres, provocada pela existência de interferência inter-portadora (ICI), a qual representará um grande obstáculo na obtenção da eficiência espectral que é exigida nos requisitos para as comunicações com UAVs [14].

Deste modo, ambos os canais de *downlink* e *uplink*, subjacentes à ligação GBS-UAV, poderão ser afetados, assim como comunicações terrestres ou relativas a outros UAVs que usem co-canais subjacentes à sua comunicação sofrerão interferência co-canal nas suas transmissões [14]. Na figura 4, é ilustrado as diferentes interferências que podem estar subjacentes à

implementação de diversos UAVs nas redes celulares, sendo o seu impacto sentido na performance da rede e na qualidade de serviço (QoS) oferecida a todos os clientes.

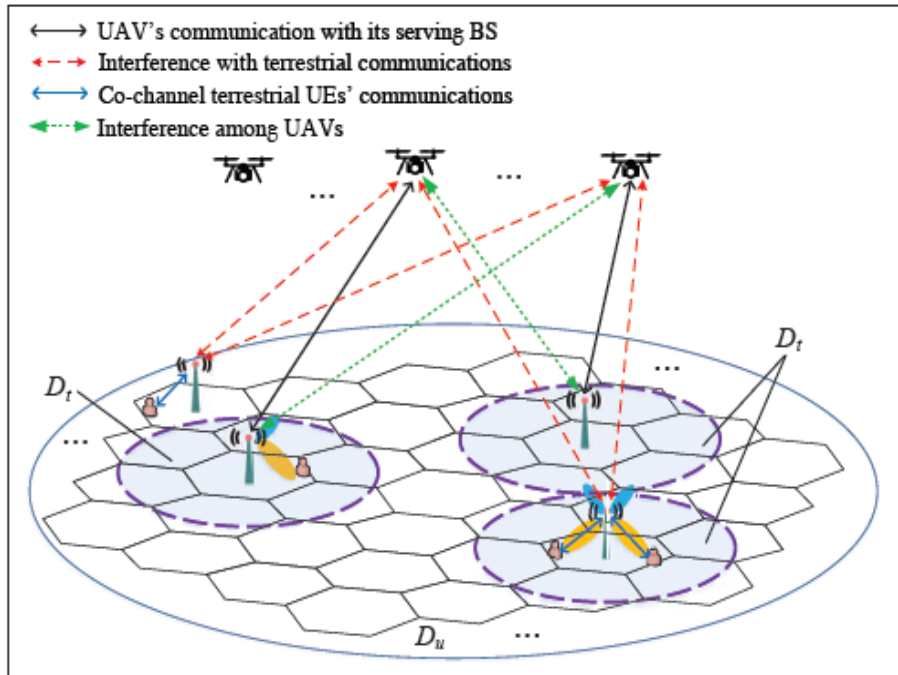


Figura 4 – Exemplos de interferência devido à incorporação de UAVs sobre a rede celular, retirado de [14].

A presença de condições de LOS sobre os canais de transmissão, poderá ser utilizada a favor da minimização da interferência, uma vez proporciona uma maior fiabilidade das comunicações entre um UAV e as BSs, permitindo manter e garantir os requisitos exigidos para o controlo dos veículos aéreos, especialmente quando estão sujeitos a ambientes de propagação com elevadas perdas de percurso, *shadowing* e desvanecimento devido à presença de múltiplos percursos [14]. Deste modo, a presença de LOS para com várias BSs poderá proporcionar que o UAV se conecte com outras BSs, dependendo das condições de canal que cada uma oferece ou poderá ser servido pela estação com menor sobrecarga de canal, ou até mesmo por várias estações em simultâneo de forma a garantir uma maior fiabilidade, eficiência espectral e elevado *throughput* requerido pelos UAVs, especialmente em comunicações CNCP.

Quando a inclinação das antenas da BS que serve um UAV é elevada, e caso o veículo se encontre suficiente alto, este apenas será servido pelos lóbulos secundários das antenas, uma vez que o lóbulo principal estará mais focado para os terminais terrestres da sua área de cobertura. Além disso, nos lóbulos secundários poderá existir a presença de lóbulos nulos, sendo que, deste modo, o UAV poderá vir a comunicar com uma BS que lhe proporcione um melhor nível de sinal, em vez de estabelecer comunicação com a estação que lhe está mais próxima, e

assim o canal de comunicação poderá ser mais suscetível às perdas de percurso, quando comparado com o canal que poderia ter sido estabelecido no site mais próximo [8].

A minimização do impacto da interferência, provocada pela introdução de novos UEs aéreos que reutilizam as infraestruturas de telecomunicações móveis nas suas comunicações, é fundamental, uma vez que influenciará os sistemas de comunicação atuais e afetará o QoS que a rede oferece [15].

2.4 Técnicas para aumento da performance

2.4.1 Introdução de MIMO em sistemas com UAVs

A utilização de MIMO em sistemas celulares, devido à sua diversidade, é muito benéfica para a eficiência na redução da interferência causada pelos múltiplos percursos gerados durante a transmissão, sem exigir necessidade de se alocar maiores larguras de banda nem aumentar as potências de transmissão, fornecendo uma boa solução para o aumento do ritmo de dados sobre um sistema comunicacional com UAVs [16].

Em [16], foi estudado a integração de um sistema de comunicações com UAVs com a utilização de MIMO em conjunto com uma modulação OFDM, considerando-se o sistema representado na figura 5, com N_t sendo o número de antenas de transmissão e N_r o número de antenas de recepção. MIMO foi selecionado para dar resposta à interferência causada pelos múltiplos percursos e a escolha do OFDM teve em conta a sua grande eficiência espectral e a sua resistência ao desvanecimento seletivo de frequência. Os resultados mostraram que a combinação de ambas as tecnologias provocam um aumento da capacidade do sistema, assim como a redução do erro de bit, elevando a eficiência comunicacional do sistema.

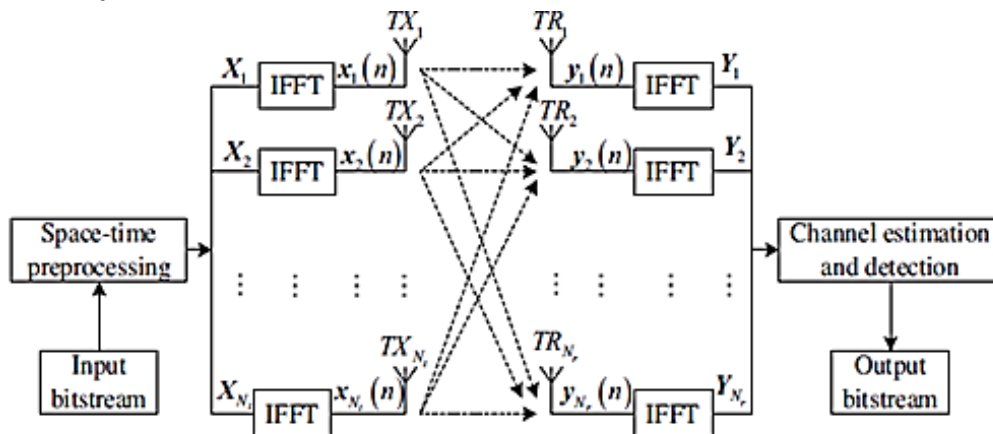


Figura 5 - Modelo de transmissão MIMO com modulação OFDM, retirado de [16].

Num sistema de comunicação com MIMO, os coeficientes que representam os elementos de transmissão e recepção são representados sobre uma matriz, podendo ser definidos dinamicamente para fazer variar o seu padrão de radiação, direcionando os sinais sobre direções distintas [5].

Em [8], de forma a dar suporte aos sistemas de comunicação com UAVs e utilizando MIMO, o 3GPP sugeriu a implementação de matrizes retangulares uniformes (URA), com os elementos colocados sobre a direção vertical e horizontal. Com a utilização destas matrizes ativas numa dimensão 2D, poderão ser emitidos sinais em ambos os ângulos de elevação e de azimute, levando ao *Full-Dimensional* MIMO (FD-MIMO), sendo esta uma técnica que consegue contornar a interferência sentida no canal UAV-GT [5]. As BSs convencionais baseiam-se num modo de funcionamento *Single-User*, isto é, cada BS está equipada com um plano vertical de antena, o qual permite efetuar a cobertura de um dos setores da célula e oferecendo apenas a possibilidade de servir um só UE em cada *Physical Resource Block* (PRB), todavia, com a utilização de *massive* MIMO (mMIMO), será possível servir-se vários UEs num só PRB através de pré-codificação digital, como representado na figura 6 [17].

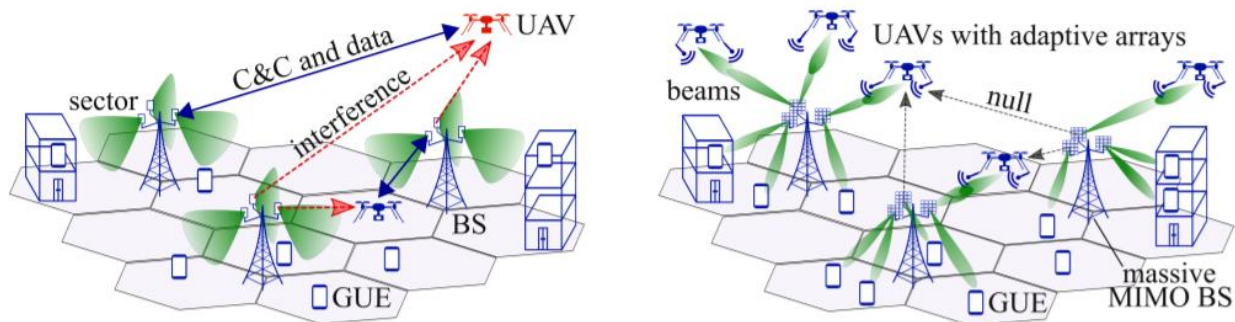


Figura 6 - Comparação entre o método de transmissão das BSs convencionais e transmissão com o uso de mMIMO, retirado de [17].

Em [17], verificou-se que o uso de mMIMO em sistemas de comunicação com UAVs tem a capacidade de melhorar a eficiência do sistema, uma vez que o uso de pré-codificação digital leva à concretização de um *beamforming* focado na localização aérea do UAV, o que permite melhorar a potência do sinal recebido. A técnica de multiplexagem espacial permite um elevado ganho no sistema de comunicação, dado que consegue servir um grande número de UEs efetuando a reutilização paralela dos recursos, para além disso a multiplexagem espacial com foco nos UEs terrestres possibilita uma menor probabilidade da ocorrência de interferência para com os UAVs.

2.4.2 Multi-TRP

O surgimento da rede 5G NR trouxe consigo um conjunto de inovações que proporcionam uma melhoria diversificada dos atuais sistemas de comunicação móveis, permitindo um aumento de capacidade, fiabilidade e eficiência espectral, assim como uma diminuição dos tempos de latência sentidos [18]. O aparecimento da denominação TRP, Ponto de Transmissão/Receção, faz parte das terminologias que compõem uma rede de acesso rádio virtualizada, *cloud*-RAN (C-RAN). A utilização de múltiplos pontos de transmissão/receção (multi-TRP), ou também denominado por Multi-Ponto Coordenado (CoMP), apresenta-se como uma técnica de *clustering*, na qual um terminal passa a ser servido por várias BSs adjacentes entre si, figura 7.

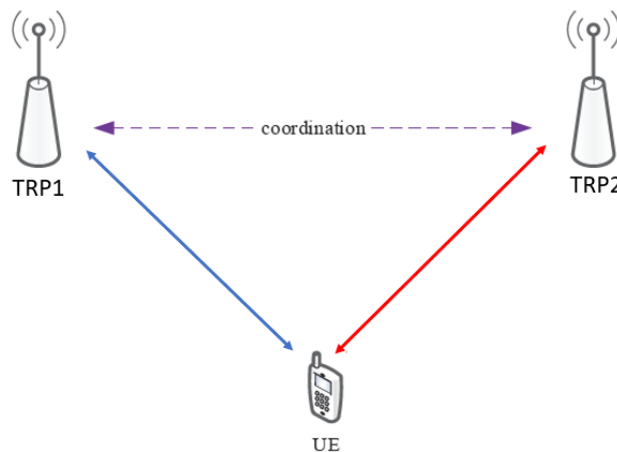


Figura 7 – UE servido simultaneamente por dois TRPs, retirado de [19].

Existem vários esquemas, suportados pelo 3GPP, que garantem a coordenação entre os TRPs de um *cluster* que serve um UE, de forma a garantir a eficiência destes, sendo verificado que a aplicação desta técnica pode resultar num aumento da eficiência espectral, fiabilidade, ritmos de *downlink*, assim como uma maior capacidade de cobertura da rede [19].

Neste tipo de esquemas, é necessário que seja garantida a eficácia na colaboração e coordenação dos TRPs que servem um determinado UE, contrariamente ao que ocorre convencionalmente, onde um UE é apenas servido simultaneamente por um TRP que concretiza uma alocação de recursos, *scheduling* e pré-codificação de forma independente dos restantes TRPs. Deste modo, na literatura surgem quatro esquemas para o controlo e coordenação das transmissões em *clustering* [18].

Os esquemas Ponto de Seleção Dinâmico (DPS), onde se pretende que um UE seja servido de forma coordenada por cada TRP, através de um *scheduling* dinâmico, a cada TTI deverá ser selecionado o TRP que oferece o melhor canal de transmissão ou qual dos TRPs possui o canal com menos sobrecarga, garantindo um balanceamento de carga. Noutra perspetiva, o esquema Ponto de Obstrução Dinâmico (DPB), em que um TRP, pertencente a um *cluster*, poderá recusar servir um UE, de forma a impedir um aumento de interferência para com outros

terminais que já são servidos pelo *cluster*. Estes esquemas, permitem a transmissão/receção de dados de vários TRPs, todavia não de modo simultâneo, sendo efetuado um *scheduling* de recursos rigoroso entre os TRPs do *cluster* [18]. Para uma comunicação simultânea, surgiram dois esquemas, o modo de transmissão não-coerente, em que cada TRP fica encarregue de transmitir uma camada de transmissão distinta dos restantes, ou, o modo de transmissão coerente, em que cada TRP transmite as mesmas camadas para um dado terminal, garantido uma maior fiabilidade, contudo possui elevadas exigências de sincronização e de *Channel State Indicator* (CSI), de forma que seja definida a pré-codificação adequada [18].

Capítulo 3 Simulador de Nível de Sistema

3.1 Descrição base do simulador

O simulador de nível de sistema de uma rede 5G NR com UAVs, foi desenvolvido a partir da atualização de um simulador já existente, implementado em Java, dedicado apenas para terminais terrestres *outdoor* e *indoor*, o qual foi atualizado para suportar comunicações com UAVs sobre os cenários *Rural Macrocell with Aerial Vehicle* (RMa-AV), *Urban Macrocell with Aerial Vehicle* (UMa-AV) e *Urban Microcell with Aerial Vehicle* (UMi-AV), tendo como objetivo a análise e avaliação da performance do sistema de comunicações móveis, quando este passa a servir, para além dos UEs terrestres, UEs aéreos.

Para o sistema mencionado, foi selecionada uma das frequências de gama baixa do 5G NR, conhecida como a gama FR1, com frequências abaixo dos 6 GHz, tendo sido eleita uma frequência de portadora de 3.5 GHz, uma largura de banda de 20 MHz e um espaçamento entre sub-portadoras de 30 kHz com uma transmissão de 14 símbolos OFDM em cada TTI de 0.5 ms.

O simulador permite o uso de técnicas de comunicação mMIMO, sendo este um dos principais investimentos sobre as redes móveis futuras. Deste modo, na tabela 2, adaptado de [20], são ilustrados diferentes esquemas mMIMO que foram aplicados na concretização das diversas simulações.

TBS [bits]	Modulação	Antenas de transmissão/ N_u	SNR [dB]	SE [bcpu]
44800 x 1	64-QAM	8	14.2	12.5
20608 x 1	4-QAM	5	10.4	5.75
23296 x 1	4-QAM	8	5.5	6.5

Tabela 2 - Esquemas de modulação mMIMO para 5G NR, adaptado de [20].

Onde TBS refere-se ao tamanho do bloco de transmissão em bits, Antenas de transmissão/ N_u corresponde ao número de antenas de transmissão por UE, SNR diz respeito à relação sinal-ruído, em dB, sentida durante a simulação do sistema e SE corresponde à eficiência espectral em bits por canal.

O simulador acompanha um modelo de simulação 3D de canal, de acordo com o especificado pelo 3GPP, podendo ser aplicado tanto a simulações relativas ao nível de ligação como ao nível de sistema, oferecendo uma interatividade entre ambas as simulações, figura 8. Isto é, a partir dos resultados da simulação do nível de ligação, efetua-se a parametrização do nível de sistema, em concreto com a obtenção dos valores da relação sinal-ruído, SNR, na qual

uma ligação entre uma BS e um determinado UE deverá conseguir atingir de modo que seja possível a transmissão de um bloco de bits com uma determinada percentagem de erros de bloco, BLER, sendo este valor obtido por base de simulações efetuadas ao nível de sistema [21].

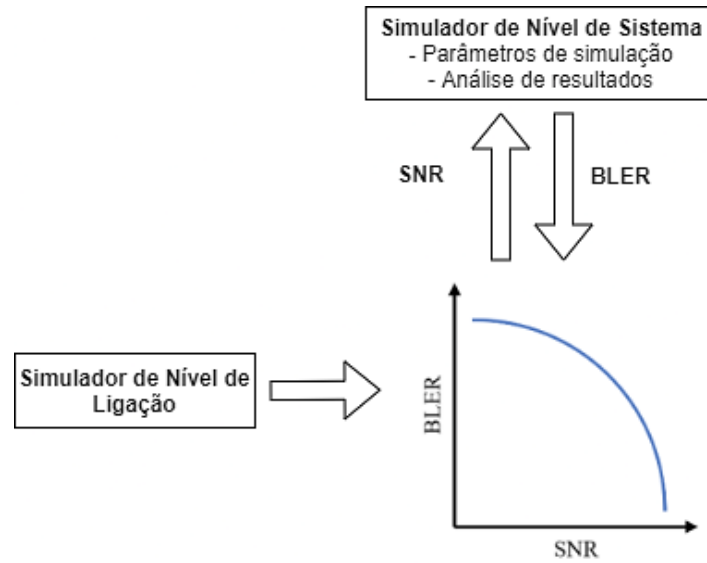


Figura 8 - Relação entre os simuladores de nível de sistema e de ligação, adaptado de [22].

Deste modo, e como na versão anterior do simulador presente em [22], na análise da performance do sistema efetua-se o cálculo da relação sinal-ruído, SNR, calculada, em dB, pela equação 3.

$$SNR = \frac{E_s}{N_0} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_s}{B} \right) \quad (3)$$

Na qual, E_s/N_0 , corresponde à relação entre a energia de símbolo e a densidade espectral do ruído, em dB, sendo obtida a partir dos gráficos de BLER resultantes da simulação do nível de ligação, B corresponde à largura de banda considerada para o sistema de transmissão, neste caso $B = 20$ MHz e R_s corresponde ao ritmo total de símbolo, relativo a cada antena e sobre cada UE, podendo ser calculado, em símbolos por segundo, pela equação:

$$R_s = \frac{R_b}{10 \cdot \log_{10}(\log_2 M)} \quad (4)$$

Sendo R_b o ritmo binário, em bits/segundo, garantido no sistema e M corresponde ao índice de modulação aplicado. O valor de R_b , por sua vez, pode ser obtido através de:

$$R_b = \frac{TBS}{TTI} \quad (5)$$

Sendo TBS o tamanho do bloco de bits antes da codificação e TTI corresponde ao tempo total necessário para se transmitir este bloco, no qual é considerado um valor de 0.5 ms.

Por sua vez, TBS pode ser calculado através da multiplicação do número de sub-portadoras, N_{sc} , isto é, 256 sub-portadoras, pela eficiência espectral, SE, calculada em bits por canal, bpcu, assim como pelo número de símbolos OFDM emitidos em cada período de TTI:

$$TBS = N_{sc} \times SE \times N_{\text{símbolos OFDM}} \quad (6)$$

As atualizações efetuadas no simulador, seguidas de acordo com os relatórios técnicos do 3GPP, especificados em [8] e [13], levaram à incorporação de UAVs sobre uma rede de acesso rádio virtualizada, *cloud-RAN* (C-RAN), através da caracterização dos diversos canais de propagação e da parametrização das várias componentes de rede, nos três cenários de implementação, tendo em conta os novos terminais aéreos.

A figura 9, representa a interface gráfica do simulador de sistema, na qual é ilustrada a localização das diferentes BSs e dos terminais móveis, *outdoor* e *indoor*, servidos pela sua BS correspondente. Cada BS, possui 3 setores e caracteriza-se por um formato hexagonal, em que a decisão relativa à escolha da BS, que servirá um determinado UE, é definida diretamente pela rede. Na interface, as BSs estão representadas a preto, os UEs terrestres com velocidade de 3 Km/h a vermelho, os UEs terrestres com velocidade de 30 Km/h a verde e por fim, os veículos aéreos, UAVs, encontram-se representados a azul.

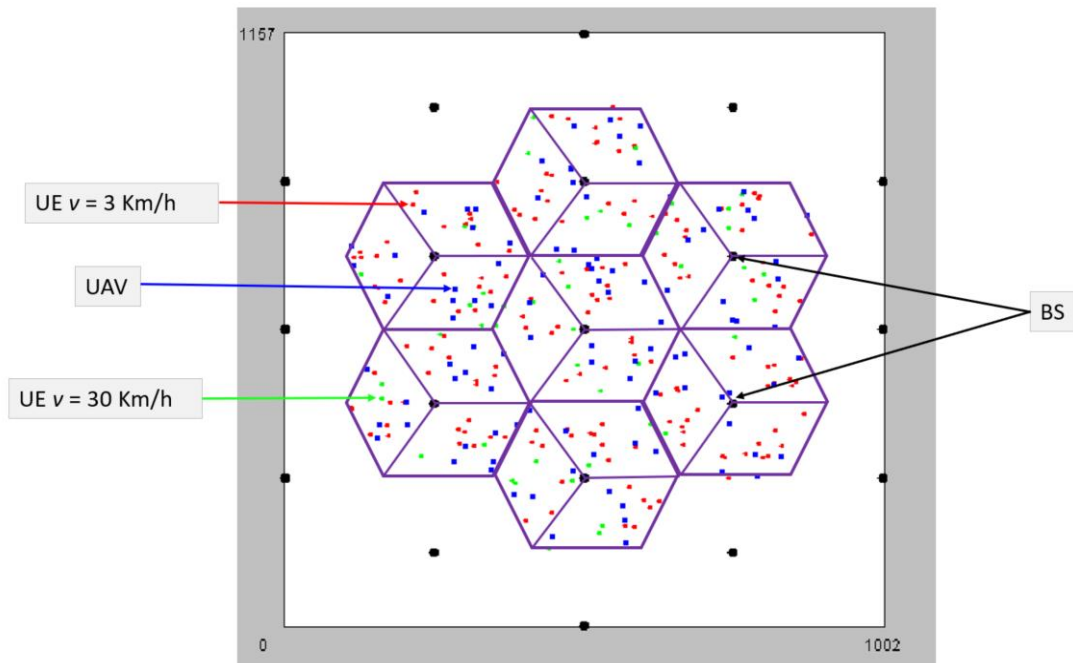


Figura 9 - Interface gráfica do simulador de nível de sistema implementado.

Para que se alcance a análise de resultados pretendida, precedem-se duas fases que são a base do funcionamento do simulador, semelhante ao que ocorria em [22], nomeadamente a

fase de configuração e a fase de simulação, como representado na figura 10, onde as etapas podem ser descritas por:

Fase de Configuração – corresponde à parametrização do sistema que se pretende analisar, através da determinação da localização e configuração das BSs, planeamento dos diversos cenários de simulação e a definição de outros parâmetros cruciais ao funcionamento do sistema.

Fase de Simulação – Concretiza-se a caracterização dos canais de propagação associados a cada terminal, através de modelos de propagação estipulados na literatura. Os modelos de propagação definem-se através de quatro classes, a classe “Hata3GPP”, a qual definirá a probabilidade de LOS e as perdas de percurso associadas a um determinado canal de transmissão, entre um terminal e uma BS. A classe “Fast_AOA_ZOA”, na qual são calculadas as variações relativas ao ângulo de chegada em azimuth, AOA, relativas ao eixo XY, ou sobre o eixo XZ correspondendo ao ângulo de chegada de *Zenith*, ZOA, e concretizando-se a distribuição da probabilidade destas variáveis. A classe “Fast_Fading” é responsável pelas variações de pequena escala do sistema, seguindo o modelo de desvanecimento de *Rayleigh*, sendo que a classe “Shadowing” é responsável pelas variações de grande escala do sistema através de um modelo de desvanecimento *Log-normal*. Nesta fase, também ocorre a geração dos diversos UEs que irão ser servidos pelo sistema, sendo definido a sua localização inicial e o seu modelo de mobilidade através da classe “RandomWaypointAroundBS”, caso seja um UE terrestre, ou pela classe “LinearMovement”, caso seja um UAV.

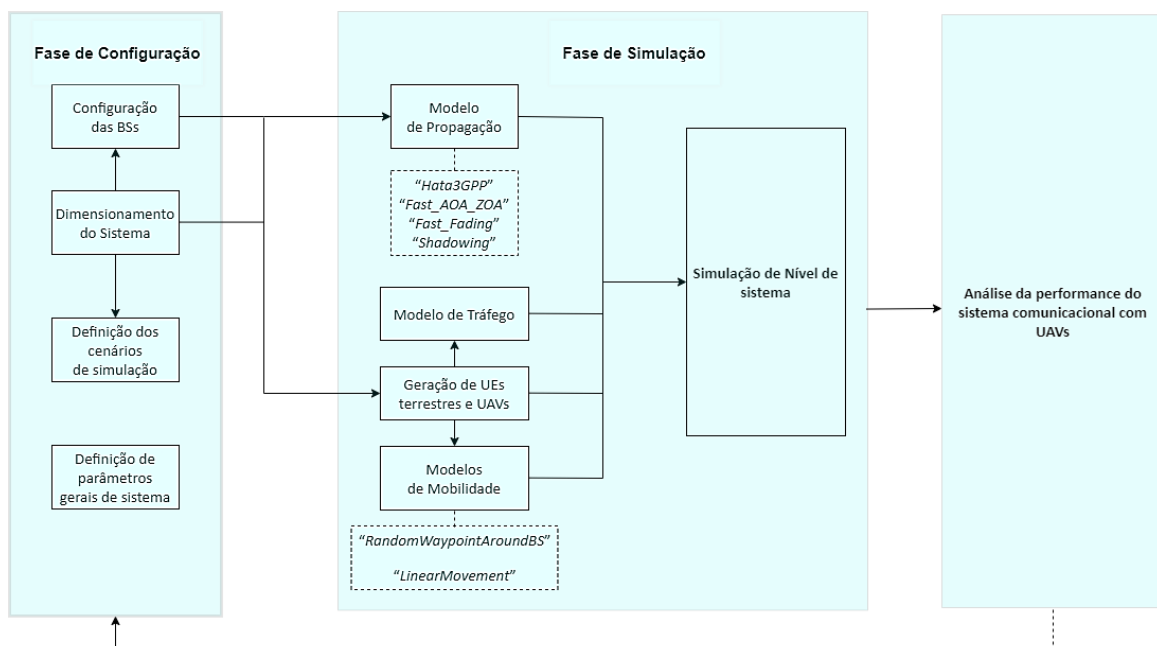


Figura 10 - Processos de configuração e execução do simulador implementado, adaptado de [22].

Após a execução das fases anteriormente mencionadas, procede-se a análise dos resultados obtidos através do sistema configurado permitindo, deste modo, tirar-se conclusões sobre o comportamento do sistema quando são incorporadas as diversas características associadas a cada cenário de implementação, sendo essencial fazer-se uma análise imersiva relativamente aos resultados de *throughput* e de cobertura obtidos.

3.2 Cenários de implementação

O desenvolvimento de três cenários de propagação distintos, RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV, possibilitaram uma análise concreta sobre a utilização de UAVs em redes móveis convencionais, tanto em ambientes rurais como urbanos, através da análise e comparação, não só da incorporação de UAVs em cenários distintos, como também a sua suscetibilidade a diferentes características de implementação, em especial com a variação dos esquemas de modulação e do número de antenas de transmissão/receção por UE. Em cada um dos cenários, são recalculados os parâmetros de um determinado canal a cada período de 5 ms, aplicando-se modificações sobre os canais de transmissão.

O cenário RMa-AV, corresponde a um cenário de meio rural com baixa densidade de edifícios e de terminais, sendo caracterizado por um raio celular de 578 m e uma distância *inter-site* (ISD) de 1732 m. A altura média dos prédios existentes, neste ambiente, é de 10 m, a largura das estradas é de 40 m e as BSs, instaladas essencialmente em torres, possuem uma altitude de 35 m. A distribuição dos UEs é efetuada de forma uniforme e considerando-se que 50% dos UEs terrestres encontram-se num ambiente *indoor* com velocidade de 3 km/h, sendo que os restantes são UEs em ambiente *outdoor* com velocidade de 30 km/h, ambos sobre uma altitude de 1.5 m.

O cenário UMa-AV, caracteriza-se por células com um raio de 167 m sobre um meio urbano e com uma distância ISD de 500 m. As antenas das BSs encontram-se instaladas a uma altitude de 25 m, considerando-se que a sua instalação se verifica acima do nível médio dos edifícios, essencialmente sobre os telhados que compõem a área urbana simulada. A caracterização dos canais de transmissão possui uma maior complexidade de cálculo, quando comparado com o cenário RMa-AV, uma vez que o ambiente de propagação é mais propício a efeitos de desvanecimento, refração, reflexão e *shadowing*.

Por fim, o cenário UMi-AV, caracteriza-se pela utilização de micro células urbanas sobre zonas de alta densidade de UEs e com uma elevada quantidade de tráfego, sobre um raio de 67

m. Neste cenário, os sites micro considerados encontram-se instalados a uma atitude inferior à dos prédios que compõem o cenário, tendo sido considerada uma altitude de instalação de 10 m e uma distância ISD de 200 m. Este cenário, caracteriza-se por ser mais suscetível à presença de interferência que os restantes cenários, uma vez que possui uma área de cobertura mais reduzida, levando a uma maior proximidade entre terminais.

Nestes dois cenários, UMa-AV e UMi-AV, para os terminais terrestres considerou-se que 80% dos UEs eram *indoor* com velocidade 3 km/h e com altura variável entre 13.5 e 22.5 m, e os restantes terminais terrestres correspondem a veículos com velocidade 30 km/h sobre uma altitude de 1.5 m, ambos com uma mobilidade horizontal.

A tabela 3, resume as parametrizações e as condições de canal consideradas sobre os cenários referidos anteriormente, sendo que cada célula é caracterizada um padrão hexagonal, no qual são considerados 3 setores por célula e a presença de 19 macro sites. No que diz respeito à BS, é considerado o esquema de transmissão FD-MIMO, e usufruindo de um modo de transmissão constante, *full-buffer*, tendo sempre tráfego para ser transmitido. Em todos os cenários encontram-se 7 BSs em funcionamento, distinguindo-se através das respetivas potências de transmissão máxima, particularmente nos cenários RMa-AV e UMa-AV aplica-se uma potência de transmissão de 80 W subdividida pelo número total elementos de transmissão, N_{tx} , e no cenário UMi-AV aplica-se uma potência de 25 W.

Parâmetros		RMa-AV	UMa-AV	UMi-AV
Cenário de Propagação		LOS e NLOS		
Tipo de cenário		Outdoor e Indoor		
Layout	Layout da célula	Padrão Hexagonal, 19 macro sites (3 setores por site)		
	ISD [m]	1732	500	200
BS	Altura da antena da BS – h_{BS} [m]	35	25	10
	Freq. de portadora [GHz]	3.5		
	Largura de banda [MHz]	20		
	Esquema de transmissão	FD-MIMO		
	Modo de transmissão	Full-Buffer		
	BSs Ativas	7		
	Potência máxima de transmissão [W/ $N_{tx, total}$]	80	80	25
Terminais Terrestres	Altura UE <i>outdoor</i> - h_{UT} [m]	1.5		
	Velocidade UE <i>outdoor</i> [km/h]	30		
	Altura UE <i>indoor</i> - h_{UT} [m]	1.5	13.5 a 22.5	13.5 a 22.5
	Velocidade UE <i>indoor</i> [km/h]	3		

	Mobilidade		Horizontal	
	Antena de transmissão/receção		Omnidirecional	
	Altura dos UAVs – h_{UT} [m]		35 a 50	
	Velocidade [km/h]		100	
	Mobilidade		Horizontal	
Terminais	Antena de transmissão/receção		Omnidirecional	
	Mobilidade		Horizontal	
Aéreos	Antena de transmissão/receção		Omnidirecional	
	Mobilidade		Horizontal	

Tabela 3 - Parametrização do sistema de simulação implementado, adaptado de [8].

A tabela 4, caracteriza todos os cenários apresentados tendo em conta a percentagem de UEs terrestres e aéreos, a sua respetiva distância mínima às BSs e o modelo de distribuição considerado.

	RMa-AV	UMa-AV	UMi-AV
Razão de UEs <i>indoor</i> [%]	50	80	80
Razão de UEs <i>outdoor</i> [%]	50	20	20
Número de UEs aéreos por setor	0/5	0/2/5/10	0/5
Número de UEs terrestres por setor	15/10	15/10/10/20	15/10
Distância 2D mínima entre a BS-UE terrestre [m]	35	35	10
Distância 3D mínima entre a BS-UAV [m]		10	
Distribuição horizontal dos UEs	Uniforme		

Tabela 4 - Rácio e distribuição dos terminais, adaptado de [8].

De modo geral, foram considerados 0 e 5 UAVs por setor, mantendo-se um total de 15 UEs por setor como recomendado pelo 3GPP em [8], com exceção ao cenário UMa-AV, onde foram concretizadas simulações adicionais de forma a salientar o impacto dos UAVs, tendo sido considerados 0, 2, 5 e 10 UAVs por setor. Estes, movimentam-se sobre um eixo horizontal a uma velocidade de 100 km/h, mantendo uma altitude constante, e a qual é definida no início da simulação, de forma aleatória, podendo estar compreendida entre 35 e 50 m.

3.3 Implementação e atualização do simulador

A introdução de UAVs no simulador de sistema sobre uma rede 5G NR, foi seguido passo a passo como ilustrado na figura 11, modelo já utilizado pela versão anterior do simulador, todavia foram incorporadas modificações quanto aos cenários de implementação, as condições para a atribuição de LOS e NLOS, a atualização dos cálculos das perdas de percurso, a modificação dos valores de grande escala associados ao sistema e a introdução dos ângulos de ZOA, para além dos AOA implementados na versão anterior, tendo-se em conta a introdução dos novos UEs aéreos. As implementações baseiam-se nos relatórios técnicos do 3GPP presentes em [8] e [13].

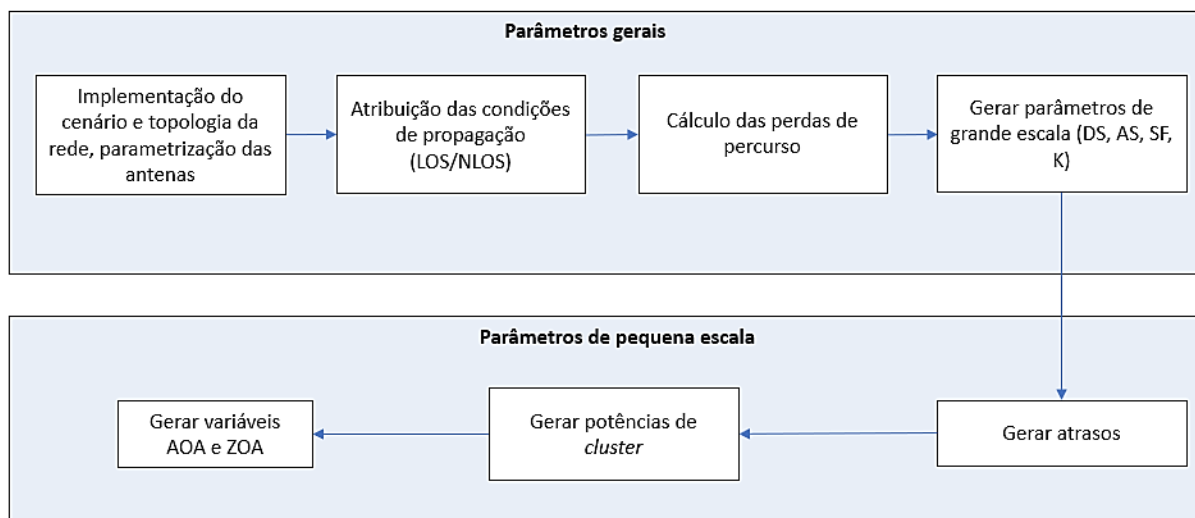


Figura 11 - Sequência de execução do simulador de nível de sistema, adaptado de [13] e de [22].

O simulador inicia-se pela definição do cenário que se pretende simular, a caracterização da sua topologia e respetiva parametrização, no qual foram implementadas as características dos cenários anteriormente mencionados, assim como a definição da distribuição dos UEs, a localização das BSs e a parametrização aplicada às antenas.

No que respeita à mobilidade dos terminais terrestres, estes deslocam-se de forma aleatória ao longo do tempo sobre a topologia da rede, sendo implementada pela classe *"RandomWaypointAroundBS"*. No que respeita aos terminais aéreos, UAVs, foi desenvolvido uma mobilidade aleatória linear sobre um só eixo, x ou y, figura 12, através da implementação da classe *"LinearMovement"*, na qual é mantida a velocidade e altitude do terminal ao longo da simulação. A seleção inicial, relativa ao eixo no qual se irá movimentar o UAV, é efetuada de forma aleatória, e além disso, a cada período, o UAV seleciona aleatoriamente o sentido do seu movimento, implementando-se assim um modelo de mobilidade semelhante ao indicado em [8], todavia oferecendo um maior grau de aleatoriedade no movimento do veículo.

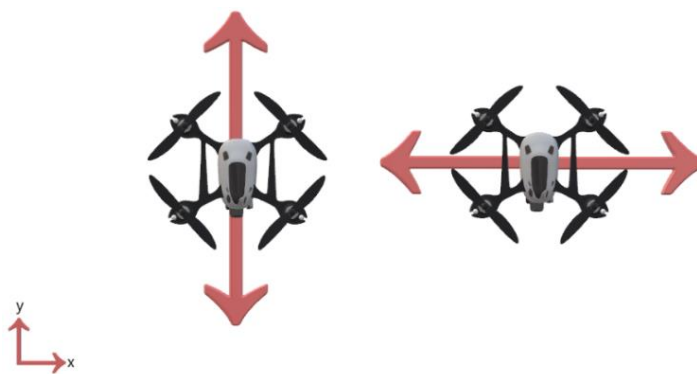


Figura 12 - Mobilidade do UAV, eixo vertical ou eixo horizontal.

Em seguida, procedeu-se com a redefinição dos cálculos relativos às perdas de percurso, tendo sido introduzidos novos métodos de cálculo destas perdas, através da caracterização de canal recomendada pelo 3GPP em [8] e [13], sendo que, para uma melhor atribuição destas perdas, implementaram-se novos cálculos para a atribuição das condições de LOS e NLOS que caracterizam um determinado canal, tendo sido definidos na classe “*Hata3GPP*” e os quais precedem o cálculo das perdas de percurso.

A figura 13, representa o cálculo da distância entre uma BS e UEs terrestres ou aéreos, caracterizando-se pela presença de uma distância 3D e uma distância horizontal 2D, entre ambos. Na qual, h_{BS} corresponde à altitude da BS e h_{UT} representa a altitude a que se encontra um dado UE, sendo que na existência de UEs aéreos, verifica-se que estes podem ter altitudes inferiores, iguais ou superiores à das BSs, o que sobre os UEs terrestres tradicionais não se verifica uma vez que, maioritariamente, encontram-se localizados a altitudes inferiores ao nível de instalação das BSs.

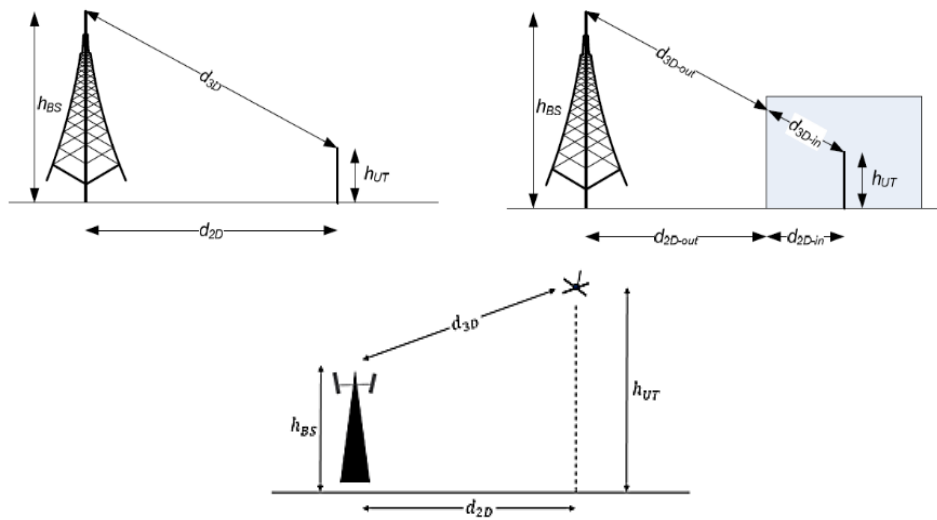


Figura 13 - Definição das distâncias 2D e 3D sobre UEs terrestres e aéreos, retirado de [8] e [13].

As implementações para cálculo da probabilidade de LOS, assim como as equações para as perdas de percurso de um determinado canal, podem ser consultadas no apêndice I.

No que respeita à atribuição do índice relativo ao desvanecimento de sombra, são apresentados no apêndice II, os vários valores considerados tendo em conta os diferentes cenários e as condições associadas a um canal de transmissão. Estes valores são limitados e dependentes através da altitude do UE, h_{UT} . A aplicação destes índices é efetuada através da implementação da classe “*Shadowing*”, na qual são atribuídos diferentes índices de desvanecimento de sombra, tendo em conta as condições de LOS e NLOS de um determinado canal.

Subsequentemente, considerando-se a ligação de *downlink*, procedeu-se com a definição dos parâmetros de grande escala, correspondente à introdução do modelo de *fast fading* aplicado no simulador, para que fossem ao encontro dos cenários considerados. Neste sentido, foram modificadas as variáveis do fator de *K-Ricean* (K), *Delay Spread* (DS), o fator de espalhamento AOA (ASA), correspondente ao ângulo de chegada sobre o eixo horizontal, gerado um novo fator de espalhamento relativo ao ZOA (ZSA), ângulo de chegada relativo ao eixo de *Zenith*, ajustado o parâmetro de escala relativo ao atraso (r_t), o valor *standard* de *shadowing* por cluster (ζ) e o número de *clusters* (N), encontrando-se especificados no apêndice III.

Continuamente, com base em [13], procedeu-se com a geração dos atrasos relativos aos *clusters*, τ'_n , atribuídos de modo aleatório a partir dos valores de escala relativos ao atraso, r_t , identificados no apêndice III, e aplicando-se uma distribuição exponencial dos atrasos. Os valores de τ'_n , são distribuídos uniformemente e depois normalizados através da subtração do valor mínimo do atraso presente no *cluster* e ordenados por ordem crescente, de acordo com os passos enumerados no relatório técnico. Sobre condições de propagação LOS, aplica-se uma escala de atrasos adicional, de modo que seja compensado o efeito de pico relativo ao espalhamento do atraso, DS, sendo necessário o cálculo da constante de escalonamento, C_t , com base no valor de K.

Após a geração de atrasos, procede-se com a geração das potências correspondentes a um determinado *cluster*, P_n , estas dependem dos atrasos gerados, e são determinadas através de uma distribuição de atrasos exponencial, sendo que, após o seu respetivo cálculo, os valores são normalizados de modo que a soma total das potências equivalha a 1. Sobre condições LOS, é necessário uma componente especular adicional, acrescentada sobre o primeiro *cluster*, não se efetuando a normalização da potência e eliminando-se os *clusters* com -25 dB, quando comparados com o *cluster* de maior potência [13].

Por fim, procede-se com o cálculo das variáveis aleatórias de AOA, ângulo de chegada em azimute, e de ZOA, ângulo de chegada em elevação, estipulados pelo 3GPP em [13].

O cálculo de AOA é composto pela implementação de uma função gaussiana inversa, equação 7, através do valor de potência associada ao *cluster* e ao ângulo de espalhamento ASA, com uso dos parâmetros indicados no apêndice III.

$$\phi'_{n,AOA} = \frac{2 \cdot \left(\frac{ASA}{1.4}\right) \cdot \sqrt{-\ln\left(\frac{P_n}{\max(P_n)}\right)}}{C_\phi} \quad (7)$$

Na qual C_ϕ , obtido pela equação 8, é calculado através do fator de *Ricean-K* e por uma variável de escalonamento, C_ϕ^{NLOS} , a qual varia entre cenários de acordo com o número de *clusters* considerado, encontrando-se no apêndice III a sua especificação. Sendo que, sobre condições LOS, aplica-se um escalonamento adicional de forma que seja compensado o efeito de pico, causado pela ligação LOS, em adição ao ângulo de espalhamento.

$$C_\phi = \begin{cases} C_\phi^{NLOS} \cdot (1.1035 - 0.028K - 0.002K^2 + 0.0001K^3) & \text{para LOS} \\ C_\phi^{NLOS} & \text{para NLOS} \end{cases} \quad (8)$$

De forma que fossem atribuídos ângulos positivos ou negativos ao ângulo AOA, obtido anteriormente, este é multiplicado por uma função discreta aleatória sobre o conjunto $X_n = \{-1, 1\}$ e é adicionada a componente Y_n , $Y_n \sim 0, (ASA/7)^2$, provocando uma variação aleatória, sendo aplicada a equação 9 para condições NLOS e a equação 10 para condições LOS, de modo a impulsionar o *cluster* sobre a direção LOS.

$$\phi_{n,AOA} = X_n \cdot \phi'_{n,AOA} + Y_n + \phi_{LOS,AOA} \quad (9)$$

$$\phi_{n,AOA} = (X_n \cdot \phi'_{n,AOA} + Y_n) - (X_1 \cdot \phi'_{1,AOA} + Y_1 - \phi_{LOS,AOA}) \quad (10)$$

No que respeita à geração das variáveis aleatórias ZOA, estas são determinadas através de uma função inversa de *Laplace*, com os uso dos indicadores relativos à potência do *cluster* e ao ângulo de espalhamento de *Zenith*, ZSA, indicados no apêndice III, sendo calculadas por:

$$\theta'_{n,ZOA} = -\frac{ZSA \cdot \ln\left(\frac{P_n}{\max(P_n)}\right)}{C_\theta} \quad (11)$$

Onde C_θ , é obtido pela equação 12 e aplicando-se o raciocínio explicado para o cálculo dos ângulos AOA.

$$C_\theta = \begin{cases} C_\theta^{NLOS} \cdot (1.3086 + 0.0339K - 0.0077K^2 + 0.0002K^3) & \text{para LOS} \\ C_\theta^{NLOS} & \text{para NLOS} \end{cases} \quad (12)$$

Pelo mesmo raciocínio anterior, são atribuídos ângulos positivos ou negativos ao ângulo ZOA, através da sua multiplicação por uma função discreta aleatória sobre o conjunto $X_n = \{-1, 1\}$ e adicionada a componente Y_n , $Y_n \sim (0, (ZSA/7)^2)$, provocando uma variação aleatória, sendo aplicada a equação 13 para condições NLOS e equação 14 para condições LOS.

$$\theta_{n,ZOA} = X_n \cdot \theta'_{n,ZOA} + Y_n + \bar{\theta}_{ZOA} \quad (13)$$

$$\theta_{n,ZOA} = (X_n \cdot \theta'_{n,ZOA} + Y_n) - (X_1 \cdot \theta'_{1,ZOA} + Y_1 - \theta_{LOS,ZOA}) \quad (14)$$

O ângulo de AOA encontra-se limitado a um conjunto de valores entre $[0^\circ, 360^\circ]$, e o ângulo de ZOA está limitado ao intervalo $[-90^\circ, 90^\circ]$, sendo ambos calculados de 5 ms em 5 ms, isto é, período no qual ocorre mudanças relativas ao canal de propagação. Por sua vez, a adição destes ângulos junto do ângulo de azimuth existente entre a BS e o UE, irá influenciar o valor de ganho sentido pela antena de transmissão.

No sistema desenvolvido é implementado uma antena *Uniform Linear Array* (ULA), incorporada em sistemas 5G NR, que permite a formação do feixe de transmissão através da sua estrutura composta pela agregação de 256 antenas, sendo representada por uma matriz de painel retangular uniforme com 32 antenas na horizontal, as quais efetuam a formação de feixe em azimuth, e 8 antenas verticais em cada coluna, efetuando-se assim a formação de feixe sobre o eixo vertical. Na figura 14, é observado a estrutura da antena ULA implementada e caracterizada por uma polarização simples, $P=1$, sendo representada a partir direção para onde está direcionada a antena.

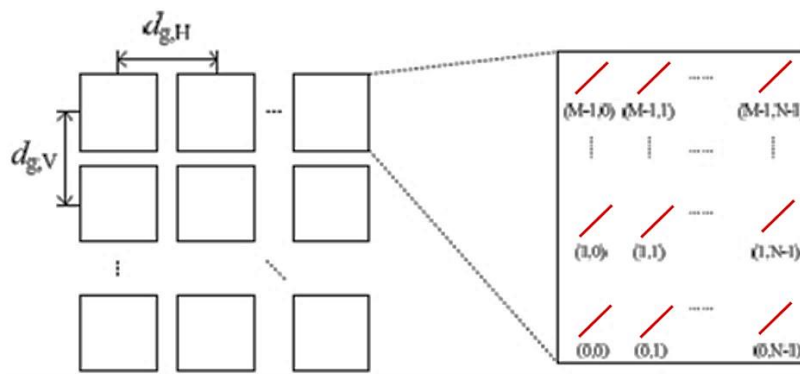


Figura 14 – Estrutura de antena de painel retangular uniforme com polarização 1, adaptado de [13].

A estrutura pode ser caracterizada como em [13], pelas terminologias M_g , N_g , M , N e P , nas quais M_g corresponde ao número de painéis numa coluna e N_g o número de painéis numa linha, por sua vez, estes painéis, encontram-se espaçados uniformemente entre si por uma distância horizontal $d_{g,H}$ e por uma distância vertical $d_{g,V}$. Dentro de um painel, os elementos são incorporados sobre a direção horizontal e vertical, respetivamente, com um espaçamento uniforme de d_H e d_V , e no qual N corresponde número de colunas com elementos e M o número de elementos com a mesma polarização, P , sobre a mesma coluna.

As representações dos padrões de radiação são obtidas com base nas equações apresentadas na tabela 5, enunciadas pelo 3GPP no relatório técnico expresso em [13]. Em termos de simulação, considerou-se importante a implementação relativa ao corte horizontal e ao valor de ganho máximo associado a cada elemento da antena.

Parâmetro	Valor
Corte vertical do padrão de radiação [dB]	$A''_{dB}(\theta'', \Phi'' = 0^\circ) = -\min\left\{12 \cdot \left(\frac{\theta'' - 90^\circ}{\theta_{3dB}}\right)^2, SLA_v\right\}$ $\theta_{3dB} = 65^\circ, SLA_v = 30 \text{ dB e } \theta'' \in [0^\circ, 180^\circ]$
Corte horizontal do padrão de radiação [dB]	$A''_{dB}(\theta'' = 90^\circ, \Phi'') = -\min\left\{12 \cdot \left(\frac{\Phi''}{\Phi_{3dB}}\right)^2, A_{max}\right\}$ $\theta_{3dB} = 65^\circ, A_{max} = 30 \text{ dB e } \theta'' \in [-180^\circ, 180^\circ]$
Padrão 3D da potência radiação [dB]	$A''_{dB}(\theta'', \Phi'') = -\min\{- (A''_{dB}(\theta'', \Phi'' = 0^\circ) + A''_{dB}(\theta'' = 90^\circ, \Phi'')), A_{max}\}$
Ganho direcional máximo por elemento GE_{max} [dBi]	8

Tabela 5 - Padrão da potência de radiação e ganho de um elemento da antena, retirado de [13].

Capítulo 4 Análise de resultados

Neste capítulo, procede-se com a amostragem e análise dos resultados obtidos a partir do simulador de nível de sistema desenvolvido no âmbito desta dissertação. A discussão dos resultados será baseada na análise do sistema em termos de *throughput* e de cobertura, derivada da introdução de UAVs sobre a rede móvel de nova geração, 5G NR, em diferentes cenários, nomeadamente RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV.

Concretizaram-se diversas simulações sem e com a presença de UAVs, para que se pudesse compreender o impacto da sua presença, da variação da modulação subjacente às comunicações e da alteração do número de antenas de transmissão (N_{tx}) por UE, aplicando-se os modelos mMIMO apresentados na secção 3.1, os quais correspondem a três esquemas distintos associados a duas modulações M-QAM, mais propriamente 4-QAM e 64-QAM.

Nos esquemas com modulação 4-QAM, a variação do parâmetro de SE provoca alterações significativas sobre os valores de TBS e SNR, e a consideração de um distinto número de antenas de transmissão por UE, 5 e 8 antenas, deverá apresentar um impacto significativo sobre os resultados. Com a modulação 64-QAM e considerando-se 8 antenas de transmissão por UE, poderemos avaliar o comportamento do sistema com o uso de um esquema de modulação mais elevado, representando a utilização de um valor de TBS superior, e em consequência a presença de uma maior eficiência espectral, resultando num valor de SNR mais elevado, permitindo que se tire conclusões relativas à aplicação de modulações superiores no simulador de nível de sistema implementado.

Para além das considerações anteriores, é aplicado no sistema uma técnica de agrupamento de TRPs, denominada *clustering*, na qual a rede de acesso rádio é dividida em três conjuntos adjacentes de TRPs, sobre os quais cada UE é servido por, pelo menos, um TRP. Nestas condições, e sobre os resultados apresentados nas secções seguintes, quando o tamanho do *cluster* corresponde a “1C”, dá-se a indicação da não existência de *clustering*, sendo que os UEs são apenas servidos por um TRP. Por outro lado, para um tamanho de *cluster* “3C”, um terminal passa a ser servido por um conjunto de três TRPs adjacentes.

4.1 Resultados de *throughput*

Nesta secção, são mostrados os resultados de *throughput* obtidos, através da apresentação de um conjunto de gráficos que demonstram a variação do *throughput* em função do número de UEs e do número de antenas TRP ativas, em cada um dos três cenários.

Nos resultados que se sucedem, é considerado um número total de antenas por setor de 256 ($N_{tx,total}$), sendo que o número de antenas por UE varia entre 5 ou 8 antenas (N_{tx}), dependendo da modulação M-QAM considerada, deste modo, faz-se variar o número de UEs que podem ser servidos simultaneamente pelo sistema, respetivamente 51 ou 32.

Sobre o cenário RMa-AV, foram obtidos os seguintes gráficos de *throughput* em função do número de UEs, figura 15, respetivamente, apresentando os resultados para 0 e 5 drones por setor, e aplicando-se os diferentes esquemas de modulação.

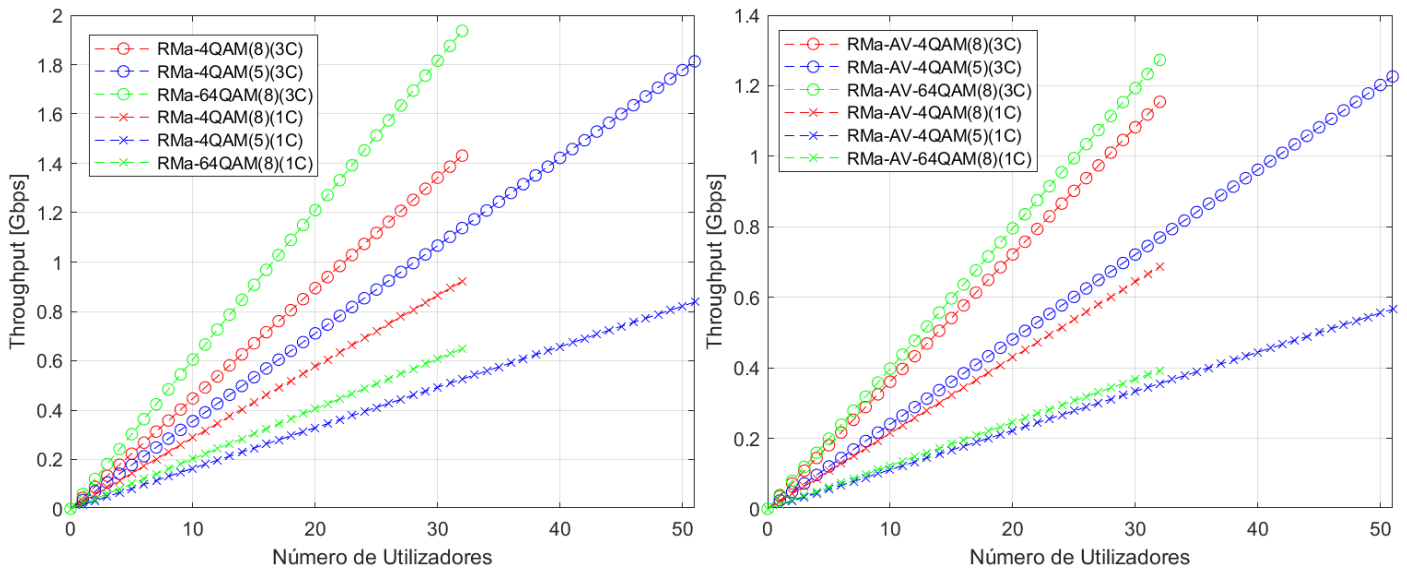


Figura 15 - *Throughput* VS N_u , cenário RMa-AV, respetivamente, 15 UEs + 0 UAVs e 10 UEs + 5 UAVs por setor, modulações 4-QAM (5), 4-QAM (8) e 64-QAM (8), *cluster* 1C e 3C.

Na análise dos gráficos anteriores verifica-se que, com a presença de UAVs, ocorre um decaimento significativo da performance do sistema, sobre qualquer um dos casos considerados. Nem mesmo com a aplicação da técnica de *clustering*, foi possível manter-se os níveis médios de *throughput* obtidos quando não existia a presença de UAVs no sistema. Todavia, a utilização de um *cluster* de tamanho 3, permitiu que o sistema mantivesse níveis de *throughput* mais elevados, em ambas as simulações, sendo verificada uma interferência superior no sistema sem o uso desta técnica.

Ao nível do índice de modulação e considerando-se 8 antenas por UE, para um *cluster* 3C, verifica-se que a modulação 64-QAM (8) obtém os melhores resultados de *throughput*, com um valor máximo de 1.94 Gbps, sem a presença de drones e, com a presença de drones, 1.27 Gbps, denotando-se a redução do desempenho médio do sistema devido à presença de UAVs.

Quanto à modulação 4-QAM (8), verifica-se uma performance inferior, com valores máximos de 1.43 Gbps e 1.15 Gbps, respetivamente. Quanto à modulação 4-QAM (5), na qual se aplica um número menor de antenas por UE, permitindo um maior número de terminais servidos simultaneamente pelo sistema, é possível atingir-se valores de *throughput* máximos de 1.81 Gbps e de 1.23 Gbps, respetivamente.

Por outro lado, quando não se considera a técnica de *clustering*, conclui-se que a modulação 4-QAM (8) possui um maior desempenho, sem ou com a presença de UAVs, respetivamente, atingindo valores de *throughput* de 0.92 Gbps e de 0.69 Gbps, sendo que a modulação 64-QAM (8) apenas obtém valores de 0.65 Gbps e de 0.39 Gbps, respetivamente. Quanto à modulação 4-QAM (5), verificam-se valores de *throughput* de 0.84 Gbps e de 0.57 Gbps, sem e com a presença de UAVs.

De seguida, procede-se com a análise dos resultados obtidos no cenário de UMa-AV, figura 16, nos quais se averigua a influência dos UAVs sobre as comunicações em ambientes densamente urbanos e considerando-se, respetivamente, 0 e 5 drones por setor. Sendo aplicada a mesma potência de transmissão do cenário anterior, todavia sobre um ISD 3.5 vezes menor.

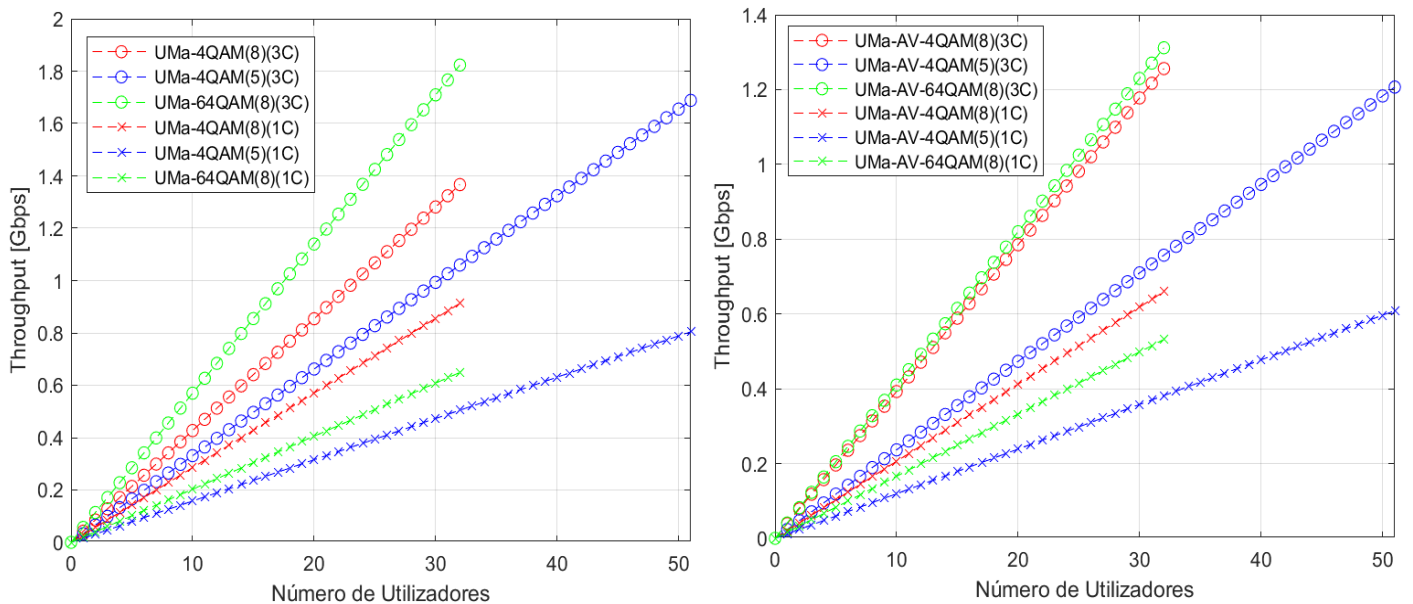


Figura 16 - Throughput VS Nu, cenário UMa-AV, respetivamente, 15 UEs + 0 UAVs e 10 UEs + 5 UAVs por setor, modulações 4-QAM (5), 4-QAM (8) e 64-QAM (8), cluster 1C e 3C.

Observa-se novamente a eficiência da técnica de *clustering* com níveis de *throughput* superiores, permitindo uma maior fiabilidade sobre este ambiente convencionalmente caracterizado pela interferência, e verificando-se o decréscimo da eficiência deste com a presença de UAVs. Estes, introduzem uma interferência adicional àquela provocada pelo meio envolvente onde ocorrem reflexões, refrações, efeitos de sombra e sobre qual também existe

um maior rácio de UEs *indoor* quando comparado com o cenário RMa-AV, provocando assim um decréscimo no valor de *throughput* médio do sistema.

No que respeita aos índices de modulação, denotam-se desempenhos semelhantes ao cenário anterior, onde a modulação 64-QAM (8), com *clustering*, apresenta valores de *throughput* mais satisfatórios em ambas as situações, respetivamente 1.82 Gbps e 1.31 Gbps, obtendo-se valores inferiores na modulação 4-QAM (8), com os respetivos valores de 1.37 Gbps e 1.26 Gbps, verificando-se uma aproximação na performance destas duas modulações na presença de UAVs. Na perspetiva da modulação 4-QAM (5), sobre um menor número de antenas por UE, são atingidos os respetivos valores máximos de *throughput* de 1.69 Gbps e 1.21 Gbps.

Por outro lado, sem a utilização de *clustering*, volta-se a averiguar que a modulação 4-QAM (8) garante uma maior performance, sem e com a presença de UAVs, atingindo, respetivamente, valores de *throughput* de 0.91 Gbps e 0.66 Gbps, sendo que a modulação 64-QAM (8), atinge os respetivos valores de 0.65 Gbps e 0.53 Gbps. Com a utilização da modulação 4-QAM (5) alcança-se, respetivamente, valores de *throughput* máximo de 0.80 Gbps e de 0.61 Gbps.

Adicionalmente os gráficos que se seguem, figuras 17, 18 e 19, apresentam uma comparação da performance do sistema, respetivamente sobre as modulações 4-QAM (8), 4-QAM (5) e 64-QAM (8), através da variação do número de UAVs sobre o cenário UMa-AV simulado.

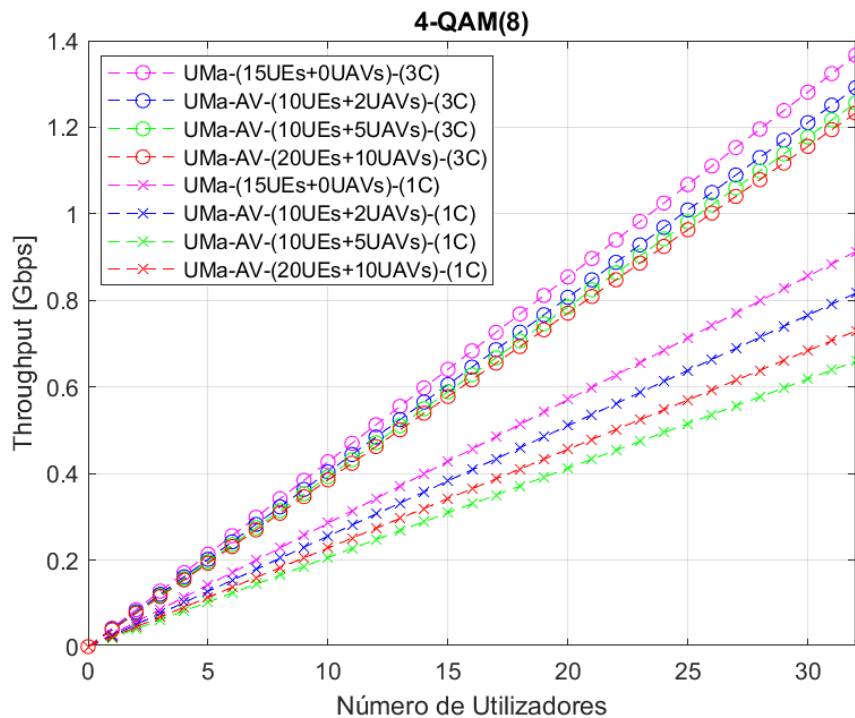


Figura 17 - *Throughput* VS Nu, cenário UMa-AV, modulação 4-QAM (8), com 0, 2, 5 e 10 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

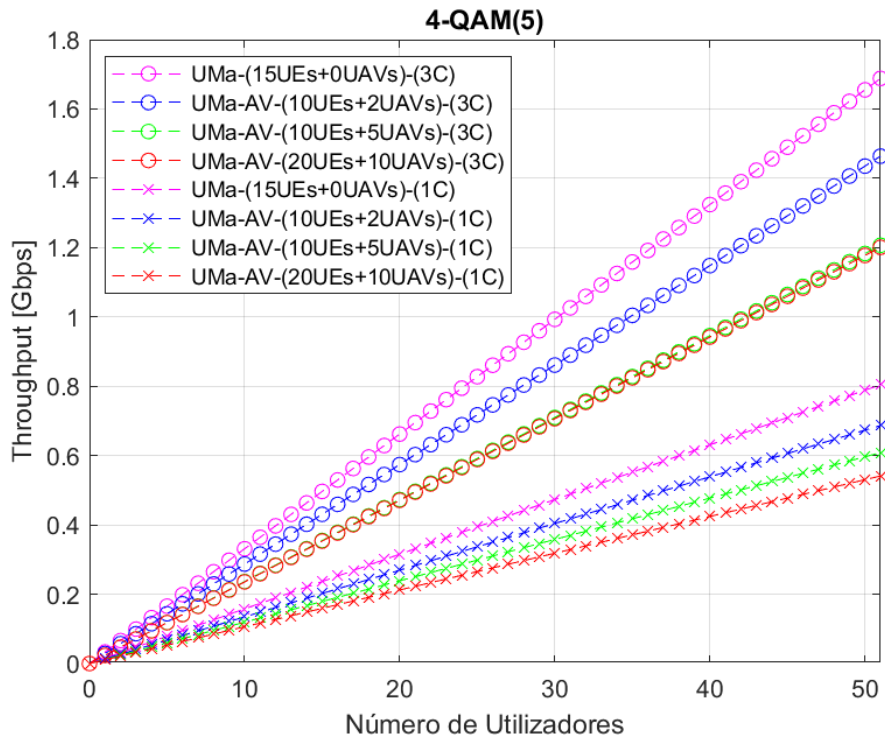


Figura 18 - *Throughput VS Nu*, cenário UMa-AV, modulação 4-QAM (5), com 0, 2, 5 e 10 UAVs por setor, *cluster 1C e 3C*.

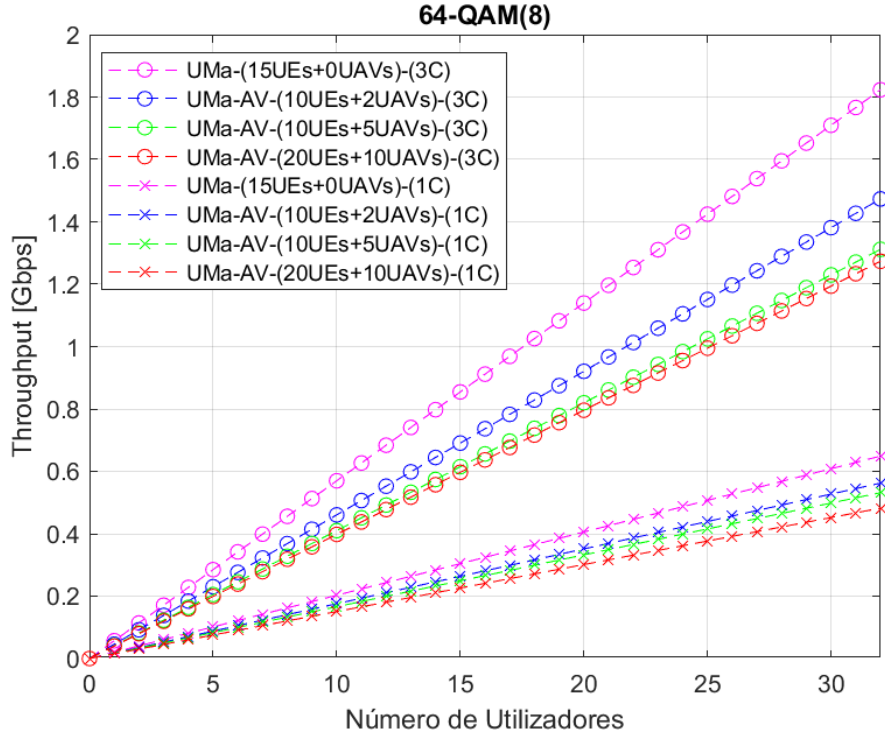


Figura 19 - *Throughput VS Nu*, cenário UMa-AV, modulação 64-QAM (8), com 0, 2, 5 e 10 UAVs por setor, *cluster 1C e 3C*.

Nos gráficos anteriores, verifica-se o detrimento da performance do *throughput* devido ao aumento da presença de UAVs. Com a utilização da modulação 4-QAM(8), e considerando-se um *cluster* 3C, verifica-se um decréscimo de apenas 0.1 Gbps na queda do valor do *throughput* máximo alcançado, por outro lado, para um *cluster* 1C, verifica-se um decréscimo de aproximadamente 0.25 Gbps quando estão presentes 5 UAVs, todavia quando se aumenta o número de terminais para 20 UEs + 10 UAVs, verifica-se um aumento do *throughput* em 0.07 Gbps, uma vez que o aumento do número de UEs terrestres permitiu elevar o valor médio do *throughput* do sistema. Na modulação 4-QAM (5), com a utilização de *clustering*, o decréscimo observado é de 0.5 Gbps, justificando-se esta descida mais acentuada devido à utilização de um menor número de antenas por UE, conduzindo à redução da fiabilidade da rede, especialmente sobre os novos UEs aéreos, por outro lado, para um *cluster* 1C, verifica-se um decréscimo de 0.2 Gbps. Quanto à modulação 64-QAM (8), verifica-se a diminuição do *throughput* em 0.6 Gbps com o aumento dos UAVs e sobre a utilização de *clustering*, denotando-se um maior impacto dos UAVs no sistema com a utilização deste índice de modulação mais elevado, quando comparado com a modulação 4-QAM (8). Todavia, sem a aplicação de *clustering*, ambas as modulações verificam uma variação idêntica de 0.25 Gbps.

Em todas as modulações, com 5 e 10 UAVs, e sobre um *cluster* 3C, a performance do sistema é bastante semelhante em ambas as simulações, uma vez que com a presença de apenas 5 UAVs por setor, verifica-se que a performance do *throughput* nestes terminais já se encontra bastante prejudicada, sendo que o aumento do número de UAVs para 10 em conjunto com o aumento de UEs terrestres, não gera uma grande variação do *throughput* médio, uma vez que a percentagem de UAVs no sistema é mantida.

Por fim, analisa-se o cenário UMi-AV, em termos de *throughput* alcançado em função do número de UEs, figura 20, respetivamente considerando 0 e 5 drones por setor. Este cenário caracteriza-se por um raio de célula inferior aos cenários anteriores, assim como por uma menor potência de transmissão, todavia continua a ser aplicado o mesmo número de terminais por setor.

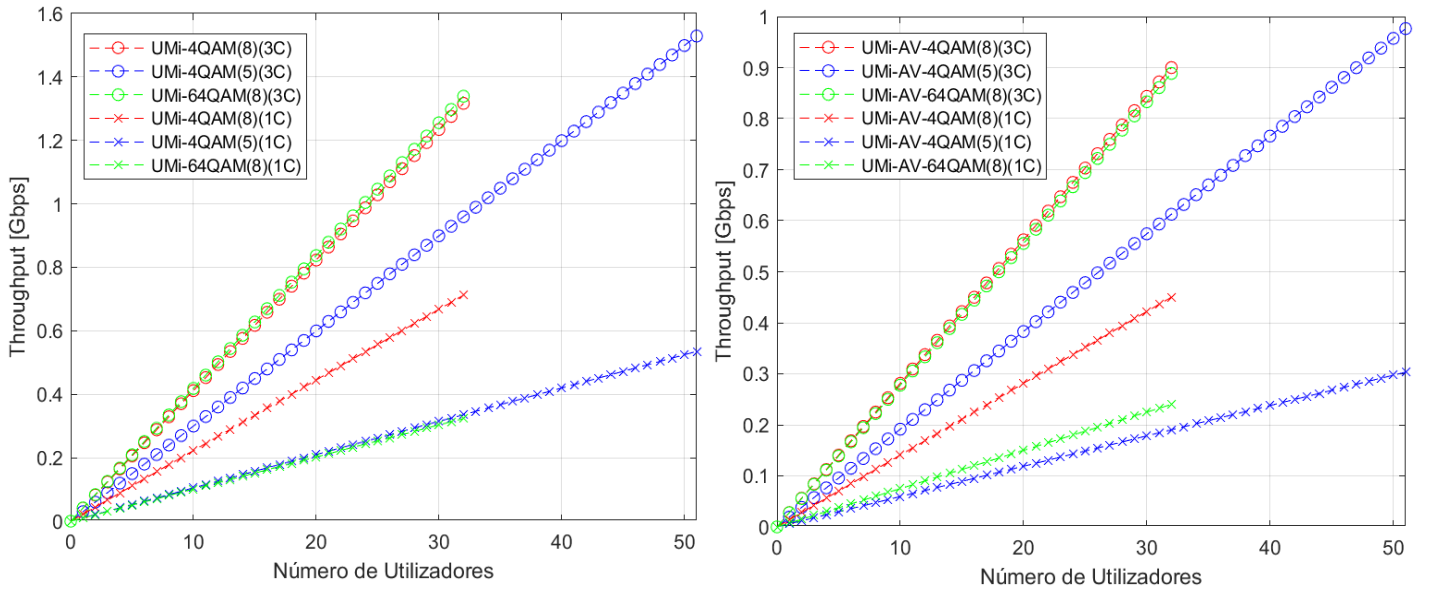


Figura 20 - *Throughput VS Nu*, cenário UMi-AV, respetivamente, 15 UEs + 0 UAVs e 10 UEs + 5 UAVs por setor, modulações 4-QAM (5), 4-QAM (8) e 64-QAM (8), *cluster* 1C e 3C.

Nos resultados obtidos com a técnica de *clustering*, as modulações 64-QAM (8) e 4-QAM (8) geram um desempenho bastante similar entre si, sem ou com UAVs, obtendo-se valores de *throughput* semelhantes. Contudo, sem a presença de UAVs, verifica-se que a modulação 64-QAM (8) é ligeiramente mais eficaz que 4-QAM (8), respetivamente com valores de *throughput* de 1.34 Gbps e 1.32 Gbps, todavia, nestas modulações, com a presença de UAVs, a performance ao nível do *throughput* é idêntica, atingindo um valor máximo de 0.9 Gbps. Na modulação 4-QAM (5), são alcançados valores máximos de *throughput* de 1.53 Gbps e 0.98 Gbps, respetivamente, sem e com a presença de UAVs, verificando-se novamente um maior *throughput* médio de sistema com o aumento de UEs e com a redução do número de antenas por UE.

Por outro lado, sem *clustering*, a modulação 4-QAM (8) volta a dominar a performance em termos de *throughput*, conseguindo atingir um valor máximo de 0.71 Gbps sem drones e de 0.45 Gbps com a sua presença, sendo que a modulação 64-QAM (8) apenas consegue valores máximos de 0.32 Gbps e de 0.24 Gbps, respetivamente. Quanto à modulação 4-QAM (5), verificam-se valores de *throughput*, respetivamente, de 0.54 Gbps e 0.30 Gbps.

Os gráficos seguintes, figuras 21, 22 e 23, respetivas aos cenários RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV, pretendem ilustrar a evolução dos valores de *throughput* em função do número de antenas TRP ativas, permitindo efetuar-se uma comparação direta entre as três modulações, sendo considerado um máximo de 256 antenas por setor. Nos resultados apresentados, aplica-se a presença de UAVs e a utilização da técnica de *clustering*, uma vez que esta apresentou uma performance superior.

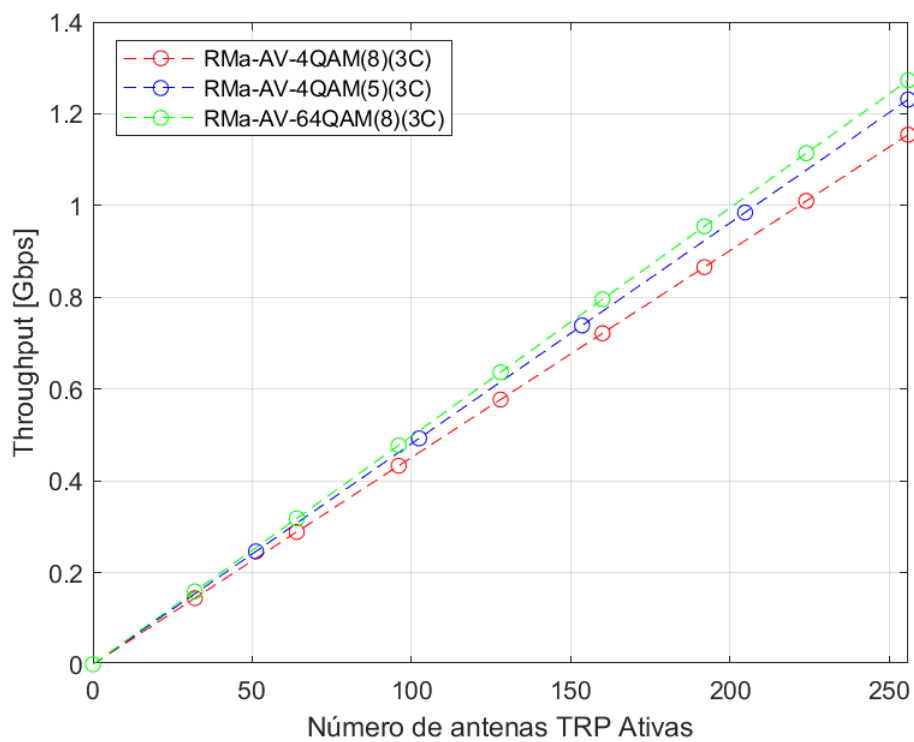


Figura 21 - *Throughput* vs Antenas TRPs ativas, cenário RMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, *cluster* 3C.

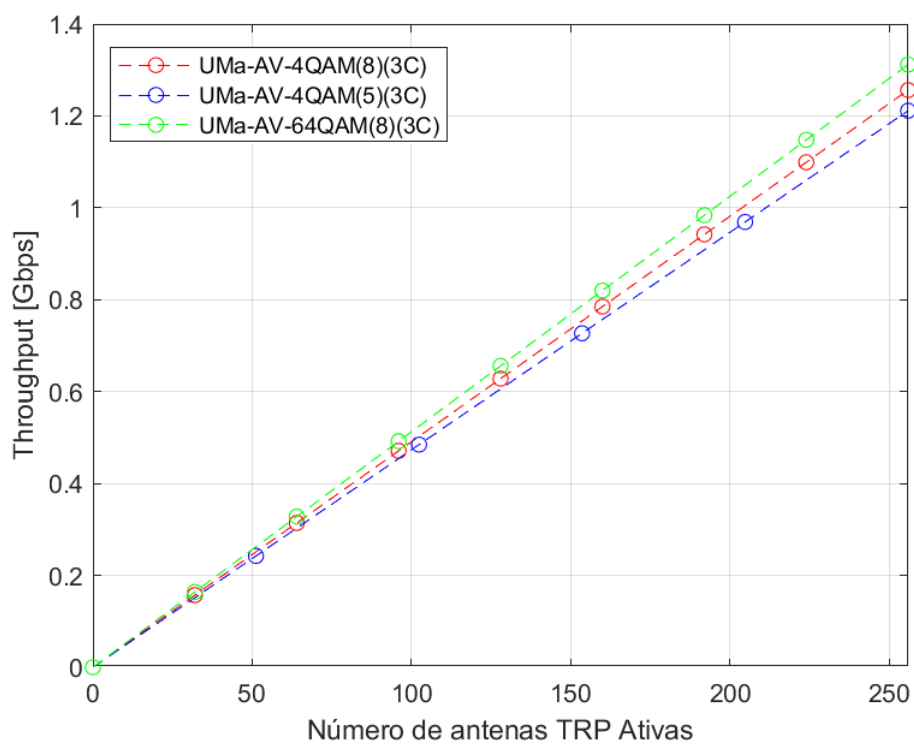


Figura 22 - *Throughput* vs Antenas TRPs ativas, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, *cluster* 3C.

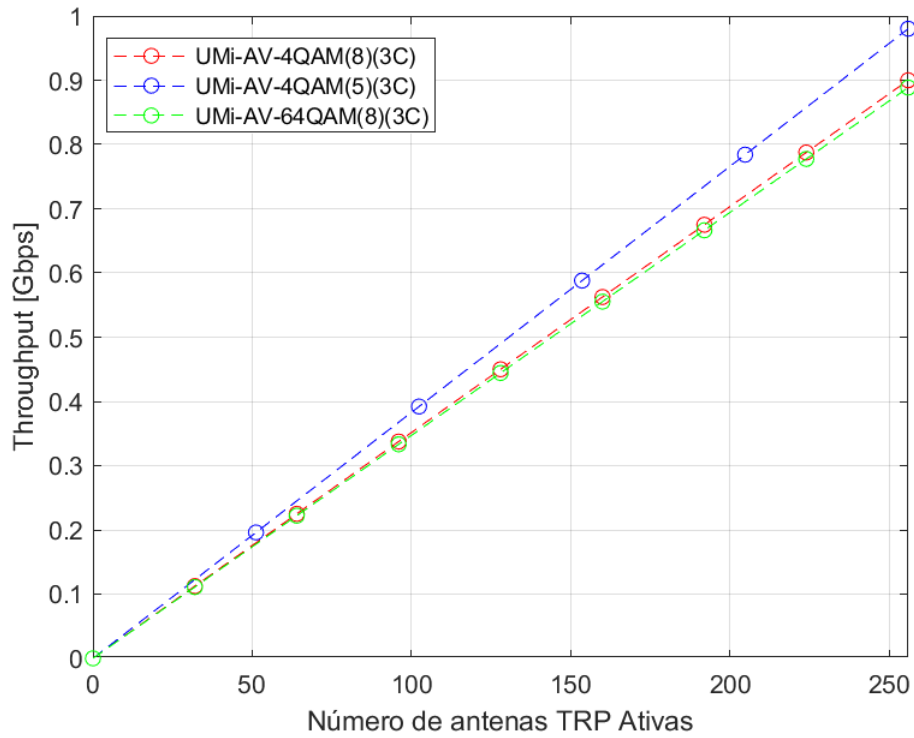


Figura 23 - *Throughput* vs Antenas TRPs ativas, cenário UMi-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, *cluster* 3C.

Pela análise dos resultados anteriores, em relação aos cenários RMa-AV e UMa-AV, verificam-se valores de *throughput* mais satisfatórios através da utilização da modulação 64-QAM (8), na qual se considera 8 antenas de transmissão por UE ($N_{tx}/N_u = 8$), conseguindo alcançar-se valores de *throughput* de 1.27 Gbps e 1.31 Gbps, respetivamente sobre os cenários. Nas restantes modulações, 4-QAM (8) e 4-QAM (5), verifica-se que sobre o cenário RMa-AV a modulação 4-QAM (5) apresenta um *throughput* mais elevado de 1.23 Gbps, quando comparado com a modulação 4-QAM (8), a qual apenas atingiu um valor de 1.15 Gbps. Por outro lado, em UMa-AV, a modulação 4-QAM (8) apresentou um melhor desempenho do que 4-QAM (5), nas quais foram obtidos os respetivos valores de *throughput* de 1.26 Gbps e 1.21 Gbps.

Por fim, sobre o cenário UMi-AV, são retiradas conclusões distintas das anteriores, onde a modulação que se destacou com a melhor performance foi 4-QAM (5), atingindo um valor de *throughput* de 0.98 Gbps, quando se tem o máximo de TRPs ativos. Nas modulações 4-QAM (8) e 64-QAM (8), verificou-se uma performance semelhante entre estas, e as quais atingiram um valor de *throughput* máximo aproximado de 0.9 Gbps.

Além dos gráficos apresentados anteriormente, é relevante mostrar-se a distribuição cumulativa (CDF) do *throughput* pelos UEs, através da sua medição a cada metro. Sendo que, na figura 24, são apresentados os resultados para o cenário UMa-AV com o uso da modulação 4-QAM (8), com e sem a utilização da técnica de *clustering*. Os restantes cenários não são apresentados, uma vez que o seu comportamento foi bastante semelhante ao exposto e, além disso, no cenário UMi-AV, devido ao reduzido raio de célula, poderiam não existir amostras suficientes para a construção dos gráficos, devido à resolução de 1 metro na obtenção das amostras. Deste modo, a construção dos gráficos baseou-se em medições efetuados sobre um ISD de 500 m, considerando-se um máximo de antenas por setor de 256 e com capacidade para serem servidos 32 UEs simultaneamente.

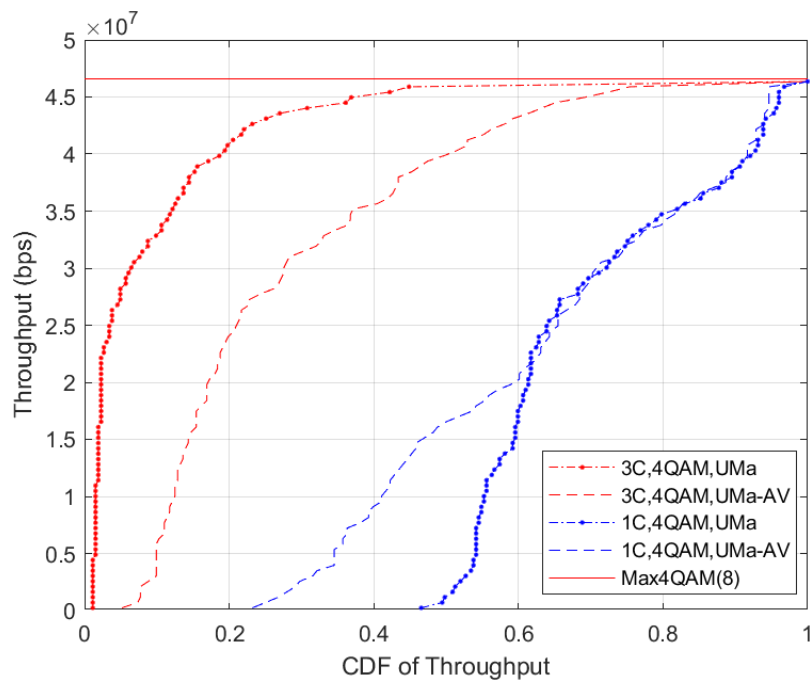


Figura 24 - *Throughput* em função CDF do *Throughput*, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, cluster 1C e 3C.

No gráfico anterior, verifica-se que a percentagem de UEs que consegue alcançar o valor máximo de *throughput* é bastante reduzido quando se considera a presença de UAVs no sistema, sendo que apenas 30% dos UEs atingem o valor máximo, face aos 60% de terminais que atingiam o valor máximo quando não existia a presença de UAVs e se aplicava um tamanho de *cluster* de 3, verificando-se um decaimento de 50% do número de terminais que alcançam o valor de *throughput* máximo. A técnica de *clustering* permite, não só aos UEs próximos das TRPs, como também aos mais distantes das BSs, melhores resultados de *throughput*. De encontro com o que ocorre quando não é aplicada a técnica de *clustering*, onde apenas os UEs próximos das TRPs conseguem atingir o valor máximo de *throughput*. Assim, os resultados do CDF de *throughput* apresentados, mostram que apenas 10% dos UEs conseguiram atingir o valor máximo de

throughput, independentemente da presença ou não de UAVs no sistema, quando não existia o uso da técnica de *clustering*.

A figura 25, apresenta o CDF correspondente a um TRP, que serve 15 terminais, analisando-se que o uso da técnica de *clustering*, é benéfica para a obtenção de valores de *throughput* mais elevados. A utilização de *clustering*, sem a presença de UAVs, permite que o *throughput* máximo atingido pelo sistema seja 2.5 vezes superior do que quando não se aplica esta técnica. Sobre a presença de UAVs, também se verifica a eficácia do *clustering* permitindo obter-se aproximadamente 3.8 vezes mais *throughput*, face aos resultados obtidos para um tamanho de *cluster* de 1.

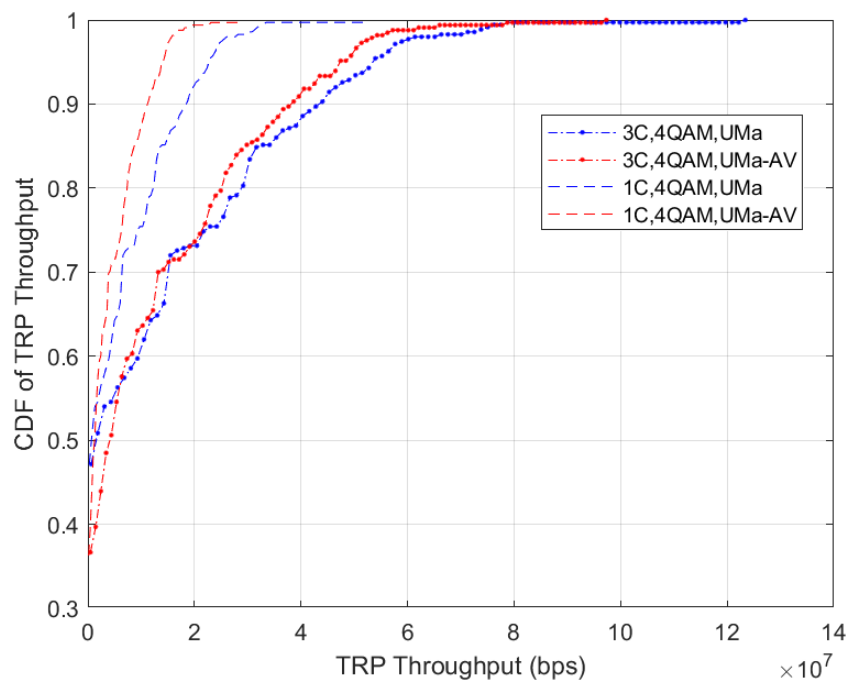


Figura 25 - CDF do *Throughput* em função do *Throughput* por TRP, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

4.2 Resultados de cobertura

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos em relação à percentagem da cobertura alcançada em função da fração da potência transmitida. Nestes resultados, são analisados os três cenários de implementação, RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV, com a aplicação das três modulações consideradas, permitindo analisar-se a influência dos UAVs e o impacto do *clustering* sobre a capacidade de cobertura do sistema.

As figuras 26 e 27, apresentam, respectivamente, os resultados de cobertura em função da porcentagem de potência transmitida, para o cenário RMa-AV, sem e com a presença de UAVs.

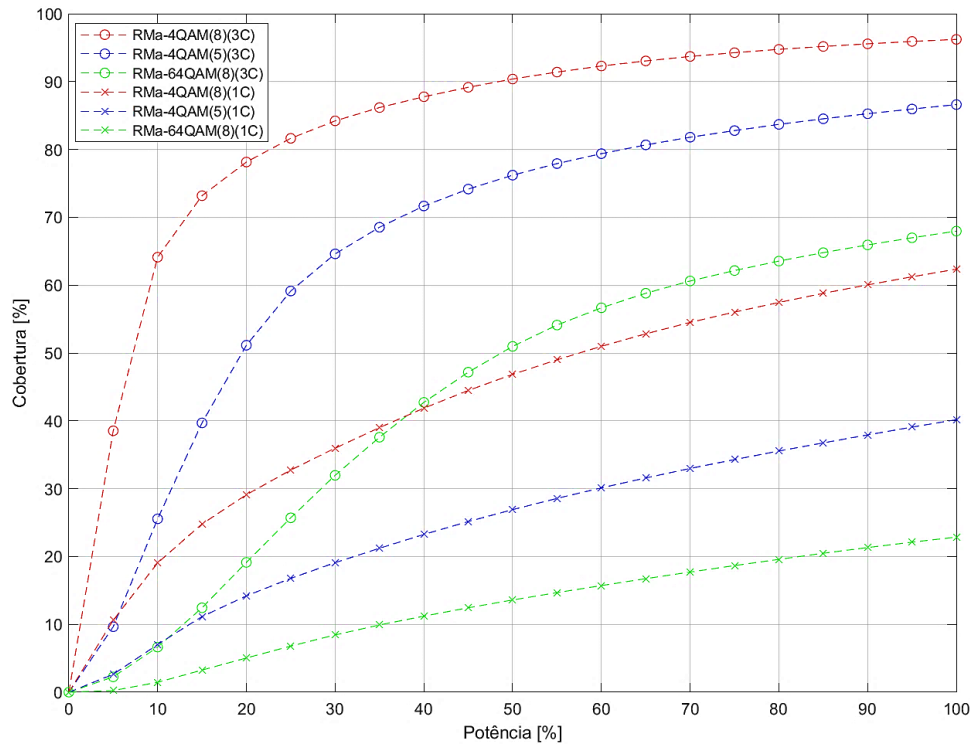


Figura 26 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário RMa, 15 UEs + 0 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

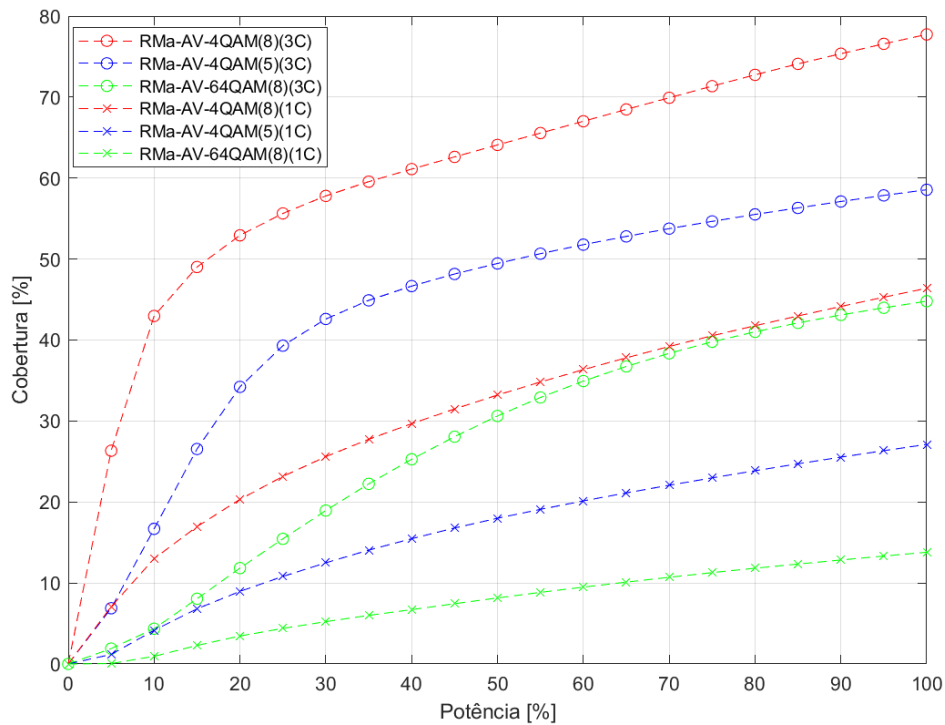


Figura 27 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário RMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

Para este cenário, tipicamente caracterizado por uma baixa densidade urbana e elevado raio de célula, os resultados mostram que a utilização de *clustering* permite a obtenção de um valor de cobertura superior em ambos os casos. Deste modo, verificou-se que a modulação 4-QAM (8) permitiu obter percentagens de cobertura de 96.22% e de 77.74%, respetivamente, sem e com a presença de UAVs. As restantes modulações 4-QAM (5) e 64-QAM (8) atingem, respetivamente, percentagens de cobertura de 86.61% e 67.96% sem a presença de UAVs, e de 58.55% e 44.80% com a sua presença. Por outro lado, para um tamanho de *cluster* 1, a modulação 4-QAM (8) volta a fornecer os valores de cobertura mais satisfatórios, obtendo percentagens máximas de 62.36% e de 46.39%, respetivamente sem e com a presença de UAVs. No que respeita às restantes modulações, em 4-QAM (5) obteve-se as respetivas percentagens de cobertura de 40.17% e de 27.11%, ficando a modulação 64-QAM (8) com o pior desempenho em termos de cobertura, com apenas 22.86% e 13.80%, respetivamente.

Seguidamente, procede-se com a análise das percentagens de cobertura obtidas para o cenário UMa-AV, figuras 28 e 29, onde se verifica a influência dos UAVs sobre ambientes urbanos, assim como o impacto da utilização da técnica de *clustering*.

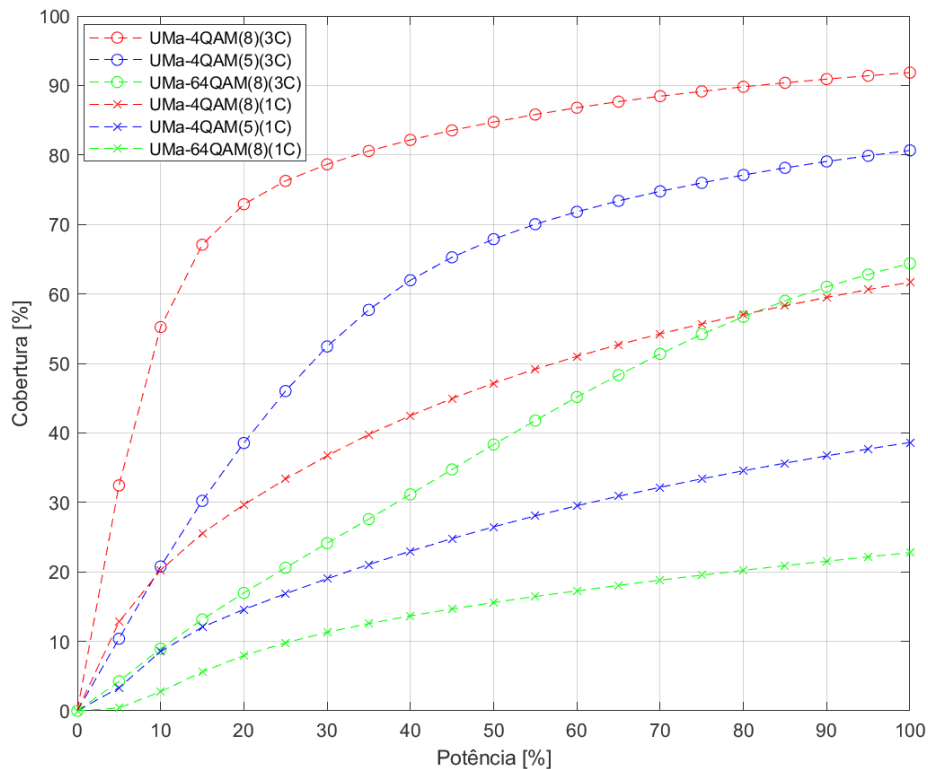


Figura 28 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMa, 15 UEs + 0 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

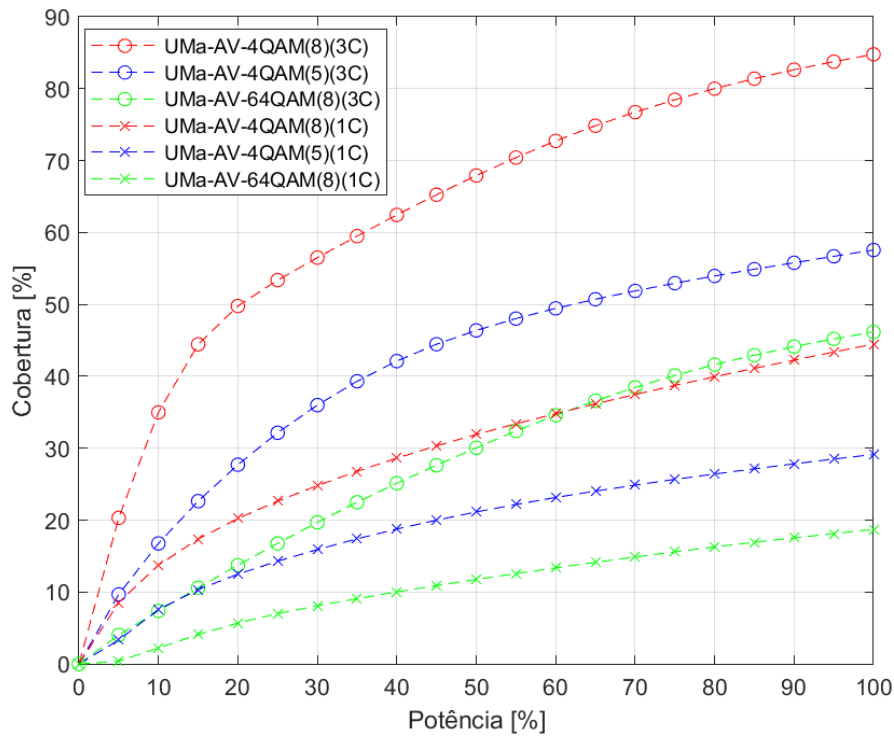


Figura 29 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMa-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

Sem uso da técnica de *clustering*, a modulação 4-QAM (8), foi aquela que se destacou com melhores resultados, obtendo 61.68%, sem a presença de UAVs, e 44.47% com a sua presença. As restantes modulações mostraram-se incapazes de cobrir pelo menos 50% da cobertura total, mesmo transmitindo com a potência máxima, onde na modulação 64-QAM (8) se verificou percentagens de 22.77% e 18.72% e para a modulação 4-QAM (5), uma vez que permite servir um maior número de UEs, obteve-se 38.62% e 29.13%, respetivamente.

Por outro lado, com um tamanho de *cluster* 3, a modulação 4-QAM (8) garantiu novamente dominância sobre a cobertura obtendo, respetivamente, sem e com a presença de drones, percentagens de 91.85% e 84.76%, quando ocorria transmissão máxima de potência. Nas restantes modulações, verifica-se que a modulação 4-QAM (5) obteve as respetivas percentagens de 80.66% e 57.55%, mostrando-se novamente mais eficaz para o alcance de uma maior fração de cobertura, quando comparado com a utilização da modulação 64-QAM (8), onde apenas se obteve percentagens de 64.41% e de 46.17%, respetivamente.

Como no cenário anterior, verificou-se um comportamento semelhante no desempenho da cobertura obtida sobre as modulações 64-QAM (8) com tamanho de *cluster* 3 e na modulação 4-QAM (8), sem uso de *clustering*, em que, sem a presença de UAVs, os seus valores de cobertura já atingem valores bastante próximos, sendo que a introdução de UAVs aproximou ainda mais as percentagens de cobertura alcançadas em ambos os esquemas.

Por último, analisa-se os gráficos de cobertura no cenário UMi-AV, o qual é caracterizado pelo seu reduzido raio celular e pela sua baixa potência de transmissão, sendo que as figuras 30 e 31, ilustram o desempenho em termos de cobertura, respetivamente, sem e com a presença de UAVs.

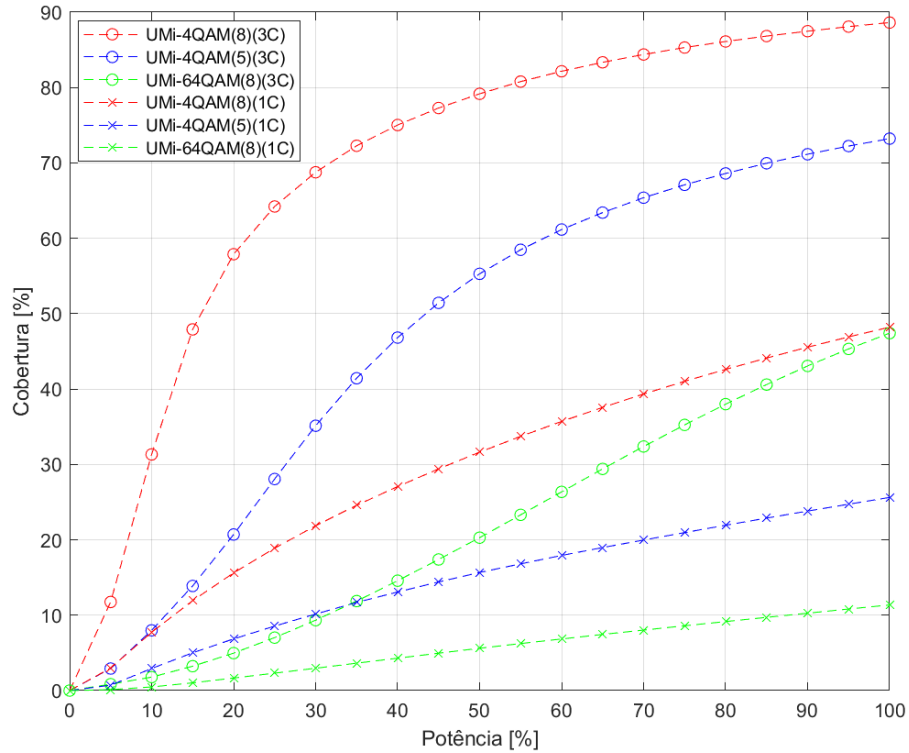


Figura 30 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMi, 15 UEs + 0 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

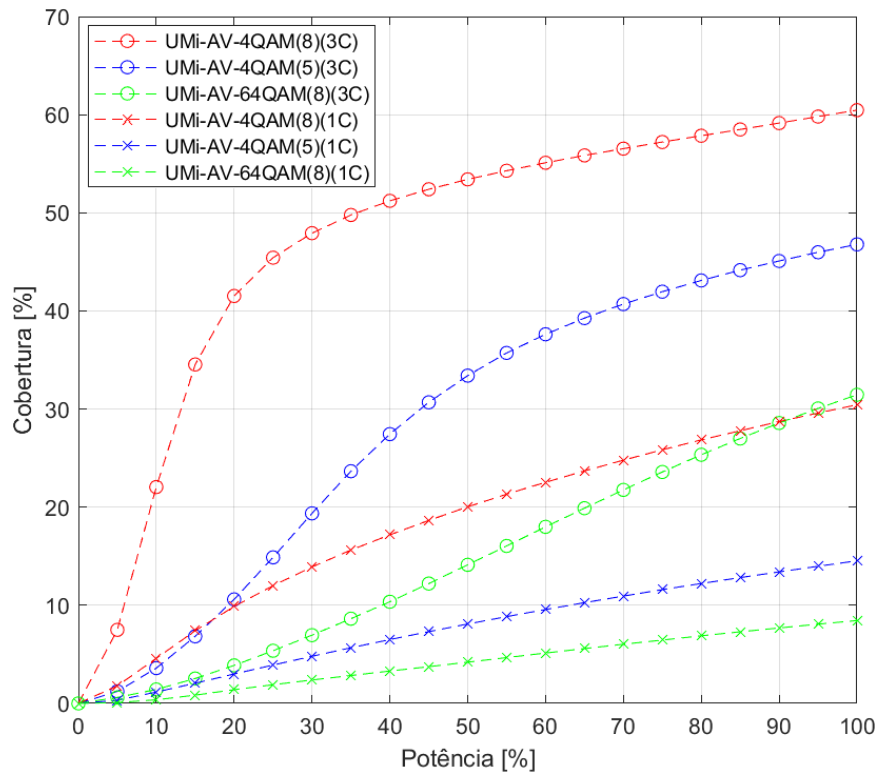


Figura 31 - Percentagem de cobertura em função da potência de transmissão, cenário UMi-AV, 10 UEs + 5 UAVs por setor, *cluster* 1C e 3C.

Pelos gráficos obtidos, é notado um comportamento semelhante aos cenários analisados anteriormente, nos quais a modulação 4-QAM (8) conseguiu dominar a performance em termos de cobertura, obtendo percentagens de 88.62% e de 60.46%, respetivamente sem e com a presença de UAVs, quando se utiliza 100% da potência de transmissão e se considera um tamanho de *cluster* 3. Tendo sido apenas obtido as respetivas percentagens de cobertura de 47.41% e 31.46% para a modulação 64-QAM (8) e, por sua vez, a modulação 4-QAM (5), permitiu alcançar percentagens de cobertura de 73.22% e de 46.77%, respetivamente.

Sem a consideração de *clustering*, volta a não ser possível servir 50% da área de cobertura, sendo que, a modulação 4-QAM (8), apesar de conseguir ter o melhor desempenho, apenas conseguiu obter percentagens de 48.21% e 30.43%, respetivamente sem e com a presença de UAVs. Nas restantes modulações, as percentagens degradam-se para valores inferiores a 30% da cobertura, de modo que, sem a presença de UAVs, as modulações 4-QAM (5) e 64-QAM (8), apenas conseguem alcançar, respetivamente, percentagens de apenas 25.62% e 11.36%, sendo que a incorporação dos UAVs provoca o decréscimo destas percentagens respetivamente para 14.53% e 8.45%.

Capítulo 5 Conclusões e propostas futuras

5.1 Conclusões

O desenvolvimento desta dissertação focou-se no estudo e avaliação da implementação de UAVs sobre uma rede móvel convencional, tendo em conta cenários de implementação rurais e urbanos, nomeadamente RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV, sendo implementados sobre uma rede de acesso 5G NR virtualizada, e considerando-se a presença de UEs *indoor* e *outdoor*. Para a transmissão/receção, foi selecionada uma frequência de portadora de 3.5 GHz, pertencente à numerologia 1 do 5G, FR1.

A partir do desenvolvimento e atualização do simulador, foram executadas várias simulações, nas quais se estudou o modo como a presença dos UAVs degradava o sistema em cada um dos cenários. Nesta avaliação, procedeu-se com a implementação de três esquemas de modulação distintos, nomeadamente 4-QAM (5), com 5 antenas de transmissão por UE, 4-QAM (8) e 64-QAM (8) considerando-se 8 antenas de transmissão por UE, analisando-se, deste modo, o impacto da variação do índice de modulação e do número de antenas por UE na performance do sistema. Estes esquemas permitem a aplicação de mMIMO com a utilização de 256 antenas por setor.

A análise da performance do sistema foi baseada em resultados de *throughput* e de cobertura obtidos, nos quais se apresentou os valores de *throughput* em função do número de UEs servidos em simultâneo, o *throughput* em função do número de TRPs ativas, a distribuição cumulativa (CDF) do *throughput* e a percentagem de cobertura em função da percentagem de potência de transmissão.

Como forma de otimização, foi incorporada a utilização de uma técnica de *clustering*, a qual permite que um terminal possa ser servido simultaneamente por vários TRPs na sua vizinhança, efetuando-se, deste modo, uma comparação entre a não utilização de *clustering* e a utilização de um *cluster* composto por 3 TRPs. Na qual se verificou, um impacto positivo na performance do sistema com a utilização desta técnica, tanto em termos de *throughput* como de cobertura, permitindo a presença de maiores valores de *throughput* e uma maior capacidade de alcance em todos os cenários considerados. Todavia, com a presença de um elevado número de UEs, terrestres e aéreos, verifica-se que o ganho obtido com a utilização desta técnica diminui.

Assim, com a utilização da técnica de *clustering*, a nível de *throughput*, verificou-se que, sobre os cenários RMa-AV e UMa-AV, a modulação 64-QAM (8) apresenta uma performance

superior a 4-QAM (8), todavia, no cenário UMi-AV, a utilização destas duas modulações, conduzem a um desempenho idêntico. Para um tamanho de *cluster* 1C, foi observado que o desempenho da modulação 4-QAM (8) é superior a 64-QAM (8), sobre qualquer um dos cenários, contudo os resultados obtidos nos cenários RMa-AV e UMa-AV foram semelhantes. Quanto à modulação 4-QAM (5), verifica-se um desempenho superior sobre o cenário RMa-AV quando comparado com os restantes ambientes de propagação, observando-se a deterioração da performance do sistema com o aumento da densidade de UEs e com a introdução de UAVs, todavia verificou-se um aumento do *throughput* com a aplicação do *clustering* de 0.9 Gbps, sem a presença de UAVs, e de 0.65 Gbps com a presença de UAVs.

Deste modo, para um *cluster* 3C e com o aumento do número de UAVs, para o índice de modulação superior foi observado um maior decréscimo do *throughput* do sistema, uma vez que sobre índices de ordem superior, apenas os terminais próximos das BSs e com melhores condições de canal, conseguem manter um bom nível de *throughput*. Por outro lado, na utilização de um *cluster* 1C, o decaimento do *throughput* mostrou-se semelhante entre as três modulações.

Os gráficos de *throughput* em função do número de TRPs ativas, permitiram uma comparação direta entre as três modulações, concluindo-se que modulação 64-QAM (8) permite manter uma performance elevada sobre os cenários RMa-AV e UMa-AV, observando-se uma maior degradação do sistema quando se aplica a modulação 4-QAM (8). Por outro lado, sobre o cenário UMi-AV, a modulação 4-QAM (5) suportou uma performance de sistema superior, uma vez que a utilização de um menor número de antenas por UE, levou a uma menor interferência entre terminais. Neste, o pior desempenho verifica-se com a utilização da modulação 64-QAM (8), todavia próximo dos resultados obtidos para 4-QAM (8).

Relativamente aos resultados de CDF observados, verificou-se que, com a presença de UAVs, a utilização de *clustering* permitiu a obtenção de 3.8 vezes mais *throughput*, quando comparado com a ausência desta.

Em termos de cobertura, nos três cenários verificou-se que a modulação 4-QAM (8) permitiu a obtenção de um maior alcance, com ou sem a aplicação da técnica de *clustering*. Por outro lado, o pior desempenho em termos de cobertura ocorreu na modulação 64-QAM (8), concluindo-se que a aplicação de índices de modulação mais baixos e com um maior número de antenas por UE permite um maior alcance no sistema, visto que, para índices de modulação superiores, os terminais mais distantes e/ou sobre péssimas condições de canal deixam de ser servidos pelo sistema. Além disso, foi observado que para 100% da potência de transmissão, o

alcance de cobertura máximo que a modulação 4-QAM (8) permite obter, sem uso de *clustering*, é bastante semelhante à percentagem observada na modulação 64-QAM (8) com um tamanho de *cluster* 3C, podendo ser benéfico a aplicação da técnica de *clustering* quando se requer a utilização de índices de modulação superiores, uma vez que permitirá a redução da interferência do sistema, gerando uma diminuição da diferença entre a eficiência espectral real e máxima das modulações.

A análise dos resultados obtidos, mostraram que sem a presença de UAVs o *throughput* médio do sistema é superior, verificando-se um decréscimo deste com o aumento da presença dos terminais aéreos, não implicando que o desempenho dos UEs terrestres seja afetado, nos UAVs é que se verifica uma menor performance comunicacional, causada pela elevada altitude de posicionamento dos veículos e sobre a qual ocorrem as comunicações, provocando assim a redução da performance média do sistema, devida a um aumento da interferência entre células.

5.2 Propostas de trabalho futuro

O simulador de nível de sistema implementado, poderá ser aplicado por empresas, como por exemplo operadoras de telecomunicações, que pretendam incorporar UAVs em projetos que impliquem a reutilização das infraestruturas da rede móvel convencional nas suas comunicações, permitindo a análise do impacto da incorporação destes novos UEs aéreos sobre o sistema comunicacional.

No futuro desenvolvimento comercial dos UAVs sobre uma rede celular, poderá ser importante o estudo da possibilidade de se aplicarem comunicações *Device-to-Device* (D2D), as quais poderão permitir a comunicação direta entre dispositivos, de modo que seja possível reduzir-se a degradação de sistema que se verifica quando existe a presença de UAVs. Além disso, a integração de UAVs sobre os sistemas de nova geração *Vehicle-to-Everything* (V2X), poderá ser uma solução eficaz para o desenvolvimento de projetos futuros com UAVs, tendo em conta as elevadas exigências comunicacionais requeridas.

Num futuro desenvolvimento do simulador, deverá ser concretizada uma melhoria na eficiência de processamento dos algoritmos aplicados no simulador, de modo que se verifique uma maior fluidez na execução das diversas simulações.

Referências Bibliográficas

- [1] Y. Zeng, R. Zhan e T. J. Lim, “Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges”, *IEEE Communications Magazine (Volume 54, Issue 5)*, pp. 36-42, 18 de Maio 2016.
- [2] J. Viana, F. Cercas, A. Correia, R. Dinis e P. Sebastião, “MIMO Relaying UAVs Operating in Public Safety Scenarios”, *Drones (Volume 5)*, Abril 2021.
- [3] Y. Zeng, I. Guvenc, R. Zhang, G. Geraci e D. W. Matolak, “UAV Communications for 5G and Beyond”, Wiley, 1ª Edição, 2021.
- [4] K. Peffers, T. Tuunanen e M. Rossi, “The design science research process: A model for producing and presenting information systems research”, *1st International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology*, pp. 83-106, Fevereiro 2006.
- [5] Y. Zeng, Q. Wu e R. Zhang, “Accessing From The Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond”, *IEEE (Volume 107, Issue 12)*, pp. 2327-2375, Dezembro 2019.
- [6] H. Zhang, L. Song, Z. Han, “Unmanned Aerial Vehicle Applications over Cellular Networks for 5G and Beyond”, Springer, 2020.
- [7] Jornal Oficial da União Europeia, “REGULAMENTO DE EXECUÇÃO (UE) 2019/947 DA COMISSÃO de 24 de maio de 2019 relativo às regras e aos procedimentos para a operação de aeronaves não tripuladas”, 11 de Junho 2019.
- [8] 3GPP TR 36.77 V.15.0.0, “Study on Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles (Release 15)”, Dezembro 2017.
- [9] T. Liu, Z. Zhang, H. Jiang, Y. Qian, K. Liu, J. Dang e L. Wu, “Measurement-Based Characterization and Modeling for Low-Altitude UAV Air-to-Air Channels”, *Artificial Intelligence for Physical-Layer Wireless Communications, IEEE (Volume 7)*, pp. 98832-98840, 19 de Julho 2019.
- [10] Y. Zeng, R. Zhang, T. J. Lim, “Throughput Maximization for UAV-Enabled Mobile Relaying Systems”, *IEEE Transactions on Communications (Volume 64)*, pp. 4983-4996, 12 de Dezembro 2016.
- [11] R. Amorim, H. Nguyen, P. Mogensen, I. Z. Kovács, J. Wigard e T. B. Sørensen, “Radio Channel Modeling for UAV Communication Over Cellular Networks”, *IEEE Wireless Communications Letters (Volume 6, Issue 4)*, pp. 514-517, Agosto 2017.
- [12] M. M. Azari, F. Rosas, K. C. Chen e S. Pollin, “Ultra Reliable UAV Communication Using Altitude and Cooperation Diversity”, *IEEE Transactions on Communications (Volume 66, Issue 1)*, pp.330-344, Janeiro 2018.
- [13] 3GPP TR 38.901 V.14.0.0, “5G - Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz”, Maio 2017.
- [14] W. Mei and R. Zhang, “Aerial-Ground Interference Mitigation for Cellular-Connected UAV”, *IEEE Wireless Communications (Volume 18, Issue 1)*, pp. 167-173, Fevereiro 2021.

- [15] V. Yajnanarayana, Y.-P. Eric Wang, S. Gao, S. Muruganathan and X. Lin, "*Interference Mitigation Methods for Unmanned Aerial Vehicles Served by Cellular Networks*", *Ericson, 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*, pp. 118-122, 2018.
- [16] X. Tan, S. Su, X. Guo, X. Sun, "*Application of MIMO-OFDM Technology in UAV Communication Network*", *2020 the 2nd World Symposium on Artificial Intelligence (WSAI)*, Junho 2020.
- [17] A. Garcia-Rodriguez, G. Geraci, D. López-Pérez, L. G. Giordano, M. Ding e E. Börjesson, "*The Essential Guide to Realizing 5G-Connected UAVs with Massive MIMO*", *IEEE Communications Magazine (Volume 57, Issue 12)*, pp. 84-90, 15 de Outubro 2019.
- [18] S. Muruganathan, S. Faxer, S. Jarmyr, S. Gao and M. Frenne, "*On the System-Level Performance of Coordinated Multi-Point Transmission Schemes in 5G NR Deployment Scenarios*", *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, pp. 1-5, 2019.
- [19] M. Khoshnevisan, K. Jayasinghe, R. Chen, A. Davydov and L. Guo, "*Enhanced Reliability and Capacity with Multi-TRP Transmission*", *IEEE Communications Standards Magazine (Volume 6, Issue 1)*, pp. 13-19, Março 2022.
- [20] V. R. J. Velez, J. P. C. B. B. Pavia, N. M. B. Souto, P. J. A. Sebastião and A. M. C. Correia, "*A Generalized Space-Frequency Index Modulation Scheme for Downlink MIMO Transmissions With Improved Diversity*", *IEEE Access (Volume 9)*, pp. 118996-119009, 2021.
- [21] A. Correia, M. M. Silva, "*Link and system level simulation for MIMO*" in M. M. Silva, F. A. Monteiro, "*MIMO Processing for 4G and Beyond: Fundamentals and Evolution*", CRC Press, FL, USA, 2014.
- [22] C. L. Gonçalves, "*Simulação a Nível de Sistemas 5G através da Utilização de Ondas Milimétricas*", Dissertação de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática, Iscte, Novembro 2021. Repositório Iscte. <https://repositorio.iscte-iul.pt/handle/10071/23654>

Apêndices

Os seguintes apêndices enumeram as diversas variáveis e parametrizações consideradas na implementação do simulador de nível de sistema desenvolvido, e os quais se baseiam nos relatórios técnicos do 3GPP estipulados em [8] e [13].

Apêndice I - Caracterização dos canais de transmissão

O cenário RMa-AV, está limitado a uma altitude do UE, h_{UT} , mínima de 1.5 m e uma altitude máxima de 300 m. Quando o UE está próximo do solo, entre 1.5 m e 10 m, a sua probabilidade de LOS (P_{LOS}) dependerá essencialmente da distância 2D (d_{2D}) para a BS, caso esta seja inferior a 10 m, considera-se que a probabilidade LOS é total, para d_{2D} superior a 10 m, a probabilidade passa a depender de uma função exponencial. Para altitudes compreendidas entre 10 m e 40 m, a P_{LOS} , passa a depender das variáveis d_1 , p_1 e d_{2D} , sendo que enquanto d_{2D} é inferior a d_1 existirá uma percentagem de LOS de 100%, quando d_{2D} aumenta e se torna superior à variável d_1 , a probabilidade passa a depender da função indicada na tabela 6 para o cenário RMa-AV. A partir de 40 m, e até aos 300 m, considera-se que a altitude do UE é suficientemente elevada para permitir predominância de LOS sobre o canal de transmissão/receção para com a BS.

Para o cenário UMa-AV, devido à presença de um meio urbano densificado, entre as altitudes de 1.5 m e 22.5 m, considera-se que o canal se encontra totalmente dominado pela componente de LOS, quando a d_{2D} é inferior a 18 m. Quando d_{2D} aumenta e torna-se superior a 18 m, aplica-se a equação expressa na tabela 6 para o cenário UMa-AV. Para as altitudes entre 22.5 m e 100 m, considera-se que a probabilidade de LOS é de 100% enquanto o valor de d_{2D} for inferior à variável d_1 , com o aumento desta distância verifica-se uma diminuição da probabilidade de LOS, sendo que para d_{2D} superior a d_1 o cálculo da probabilidade passa a depender da equação apresentada. A partir dos 100 m, a componente de LOS volta a dominar o canal de transmissão.

No último cenário, UMi-AV, considera-se que até uma altitude do UE de 22.5 m, se o UE se mantiver a uma d_{2D} inferior a 18 m, o canal conseguirá obter dominância total de LOS, a partir dos 18 m, a P_{LOS} passa a ser definida de acordo com a equação presente na tabela 6 para o cenário UMi-AV. A partir dos 22.5 m, caso o valor de d_{2D} seja inferior à variável d_1 , existirá 100% de LOS, com o aumento de d_{2D} , a probabilidade passa a depender do valor de d_{2D} e de d_1 .

A tabela 6, resume a caracterização e a definição dos diversos parâmetros que permitem definir um canal de transmissão segundo a sua probabilidade de LOS.

Cenário	Probabilidade LOS	Aplicação
RMa-AV	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 10m \\ \exp\left(-\frac{d_{2D} - 10}{1000}\right) & d_{2D} > 10m \end{cases}$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 10m$
	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{p_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > d_1 \end{cases}$	$10m < h_{UT} \leq 40m$
	$P_{LOS} = 1$	$40m < h_{UT} \leq 300m$
	$p_1 = \max(15021 \cdot \log_{10}(h_{UT}) - 16053, 1000)$ $d_1 = \max(1350.8 \cdot \log_{10}(h_{UT}) - 1602, 18)$	
UMa-AV	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18m \\ \left[\frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{63}\right) \cdot \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right)\right] \left(1 + C'(h_{UT}) \cdot \frac{5}{4} \cdot \left(\frac{d_{2D}}{100}\right)^3 \cdot \exp\left(-\frac{d_{2D}}{150}\right)\right) & d_{2D} > 18m \end{cases}$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.55m$
	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{p_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > d_1 \end{cases}$	$22.5m < h_{UT} \leq 100m$
	$P_{LOS} = 1$	$100m < h_{UT} \leq 300m$
	$C'(h_{UT}) = \begin{cases} 0 & h_{UT} \leq 13m \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} & 13m < h_{UT} \leq 23m \end{cases}$ $p_1 = 4300 \cdot \log_{10}(h_{UT}) - 3800$ $d_1 = \max(460 \cdot \log_{10}(h_{UT}) - 700, 18)$	
UMi-AV	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18m \\ \frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{36}\right) \cdot \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > 18m \end{cases}$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$
	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{p_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > d_1 \end{cases}$	$22.5m < h_{UT} \leq 300m$
	$p_1 = 233.98 \cdot \log_{10}(h_{UT}) - 0.95$ $d_1 = \max(294.05 \cdot \log_{10}(h_{UT}) - 432.94, 18)$	

Tabela 6 - Probabilidade de LOS nos cenários RMa-AV, UMa-AV e UMi-AV, adaptado de [8] e [13].

Após a caracterização dos canais pela sua componente LOS e, consequentemente, NLOS, procede-se com o cálculo das perdas de trajeto, assim como a atribuição de um índice de *Shadow Fading* (SF), o qual caracterizará o desvanecimento de sombra que afeta a transmissão/receção de um canal. O cálculo das perdas trajeto, consideradas sobre cada cenário, encontram-se na tabela 7, as quais estão limitadas pela altitude a que se encontra o UE,

assim como pelo valor de d_{2D} que separa o UE da BS, no cálculo torna-se fundamental a ponderação tanto da distância 2D como 3D.

Sobre o cenário RMa-AV, este caracteriza-se por possuir uma altitude média dos prédios, h , de 10 m, e uma largura de estradas, W , de 40 m, sendo que os cálculos das perdas de percurso neste cenário dependem destas variáveis, assim como da distância 3D, d_{3D} , da frequência da portadora, f_c , da altitude da BS, h_{BS} e da altitude do UE, h_{UT} . Para além de se encontrar limitado por h_{UT} e por d_{2D} , encontra-se também limitado pela distância de *breakpoint*, d_{BP} , podendo ser obtida, em metros, a partir equação 15.

$$d_{BP} = 2\pi \cdot h_{BS} \cdot h_{UT} \cdot \frac{f_c}{c} \quad (15)$$

Onde, h_{BS} e h_{UT} representam respetivamente, em metros, a altitude da BS e a altitude do UE, f_c é a frequência central da portadora, em GHz, e c a velocidade de propagação em espaço livre em metros por segundo, $c = 3 \times 10^8$ m/s.

Relativamente aos cenários UMa-AV e UMi-AV, a distância de *breakpoint* é calculada a partir da altitude efetiva de um determinado cenário, obtendo-se pela seguinte equação:

$$d'_{BP} = 4 \cdot h'_{BS} \cdot h'_{UT} \cdot \frac{f_c}{c} \quad (16)$$

Na qual h'_{BS} corresponde à altitude efetiva da antena da BS, obtida através da diferença entre a altitude da BS e a altitude efetiva do terreno, equação 17. A componente h'_{UT} , corresponde a altitude efetiva do UE, obtida através da diferença entre a altitude do UE e a altitude efetiva do terreno, equação 18.

$$h'_{BS} = h_{BS} - h_E \quad (17)$$

$$h'_{UT} = h_{UT} - h_E \quad (18)$$

Para os cenários UMa-AV e UMi-AV, a altitude efetiva considerada é de $h_E = 1$ m.

Perdas de Percurso (PL)			
RMa-AV			
[$h_{BS} = 35$ m, 5 m $\leq W \leq 50$ m, 5 m $\leq h \leq 50$ m]			
LOS	$PL_{LOS} = 20 \cdot \log\left(\frac{40\pi \cdot d_{3D} \cdot f_c}{3}\right) + \min(0.03 \cdot h^{1.72}, 10) \cdot \log(d_{3D}) - \min(0.044 \cdot h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \cdot \log(h) \cdot d_{3D}$	$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{BP}$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 10 \text{ m}$
	$PL_{LOS} = PL_{LOS}(d_{BP}) + 40 \cdot \log\left(\frac{d_{3D}}{d_{BP}}\right)$	$d_{BP} < d_{2D} \leq 10 \text{ km}$	
	$PL_{LOS} = \max(23.9 - 1.8 \cdot \log(h_{UT}), 20) \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log\left(\frac{40\pi \cdot f_c}{3}\right)$	$d_{2D} \leq 10 \text{ km}$	$10 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$

NLOS	$PL_{NLOS} = \max(PL_{LOS}, PL'_{NLOS})$		
	$PL'_{NLOS} = 161.04 - 7.1 \cdot \log(W) + 7.5 \cdot \log(h) - \left(24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2\right) \cdot \log(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \cdot \log(h_{BS})) \cdot (\log(d_{3D} - 3) + 20 \cdot \log(f_c) - (3.2 \cdot (\log(11.75 \cdot h_{UT}))^2 - 4.97))$	$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 10 \text{ m}$
	$PL_{NLOS} = \max\left(PL_{LOS}, -12 + (35 - 5.3 \cdot \log(h_{UT})) \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log\left(\frac{40\pi \cdot f_c}{3}\right)\right)$	$d_{2D} \leq 10 \text{ km}$	$10 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
UMa-AV [$h_{BS} = 25 \text{ m}$]			
LOS	$PL_{LOS} = 28 + 22 \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c)$	$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP}$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$PL_{LOS} = 28 + 40 \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c) - 9 \cdot \log((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$d'_{BP} < d_{2D} \leq 5 \text{ km}$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
	$PL_{LOS} = 28 + 22 \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c)$	$d_{2D} \leq 4 \text{ km}$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
NLOS	$PL_{NLOS} = \max(PL_{LOS}, PL'_{NLOS})$	$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$PL'_{NLOS} = 13.54 + 39.08 \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$		
	$PL_{NLOS} = -17.5 + (46 - 7 \cdot \log(h_{UT})) \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log\left(\frac{40\pi \cdot f_c}{3}\right)$	$d_{2D} \leq 4 \text{ km}$	$10 \text{ m} < h_{UT} \leq 100 \text{ m}$
UMi-AV [$h_{BS} = 10 \text{ m}$]			
LOS	$PL_{LOS} = 32.4 + 21 \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c)$	$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP}$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$PL_{LOS} = 32.4 + 40 \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c) - 9.5 \cdot \log((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$d'_{BP} < d_{2D} \leq 5 \text{ km}$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
	$PL_{LOS} = \max(PL', 30.9 + (22.5 - 0.5 \cdot \log(h_{UT})) \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c))$	$d_{2D} \leq 4 \text{ km}$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
	$PL' - \text{free space pathloss}$		
NLOS	$PL_{NLOS} = \max(PL_{LOS}, PL'_{NLOS})$	$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$PL'_{NLOS} = 35.3 \cdot \log(d_{3D}) + 22.4 + 21.3 \cdot \log(f_c) - 0.3 \cdot (h_{UT} - 1.5)$		
	$PL_{NLOS} = \max(PL_{LOS}, 32.4 + (43.2 - 7.6 \cdot \log(h_{UT})) \cdot \log(d_{3D}) + 20 \cdot \log(f_c))$	$d_{2D} \leq 4 \text{ km}$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$

Tabela 7 - Perdas de percurso sobre os cenários RMa-AV, UMa-AV, UMi-AV, adaptado de [8] e [13].

Para além das perdas de trajeto associadas a um percurso *outdoor*, para os cenários UMa-AV e UMi-AV, também é importante a consideração das perdas de penetração de edifícios que afetam os canais dos UEs que se encontram sobre ambientes *indoor*. Deste modo, como já era implementado no simulador, é considerado o cálculo das perdas de penetração *Outdoor-to-Indoor* (O2I). No simulador, é aplicado um modelo de perdas de propagação elevadas, denominado *High-loss model*, no qual as perdas de percurso relativas à penetração da parede exterior, considerando-se uma composição em vidro revestido com metal, são obtidas, em dB, pela seguinte equação:

$$PL_{tw} = 5 - 10 \cdot \log\left(0.7 \cdot 10^{\frac{-L_{IRR,glass}}{10}} + 0.3 \cdot 10^{\frac{-L_{concrete}}{10}}\right) \quad (19)$$

Onde, $L_{IRR,glass}$, em dB, corresponde às perdas de penetração do vidro revestido e, $L_{concrete}$, em dB, corresponde às perdas de penetração do cimento, em dB. Sendo que, estes valores variam consoante a frequência utilizada, podendo ser obtidos, respetivamente, pelas equações 20 e 21.

$$L_{IRR,glass} = 23 + 0.3 \cdot f \quad (20)$$

$$L_{\text{concrete}} = 5 + 4 \cdot f \quad (21)$$

Para além das perdas de penetração, devem ser consideradas as perdas relativas ao percurso *indoor*, obtido em dB, pela equação 22.

$$PL_{\text{in}} = 0.5 \cdot d_{2D-\text{in}} \quad (22)$$

Na obtenção do valor total das perdas de percurso, PL_{Total} , aplica-se ambas as probabilidades de LOS e NLOS, assim como as perdas totais de relativas ao trajeto de transmissão, sendo aplicada a seguinte equação:

$$PL_{\text{Total}} = P_{\text{LOS}} \times PL_{\text{LOS}} + (1 - P_{\text{LOS}}) \times PL_{\text{NLOS}} \quad (23)$$

Apêndice II – Parâmetros de *shadowing*

Na tabela 8, são apresentados os diversos valores relativos ao índice de desvanecimento sombra considerado sobre os vários cenários e aplicações, assim como as condições de LOS ou NLOS nos quais se aplicam, estipulados pelo 3GPP em [8] e [13]. A implementação destes índices é efetuada através da classe “*Shadowing*”, na qual são atribuídos diferentes índices de desvanecimento de sombra.

Cenário	Desvanecimento de sombra [dB]	Aplicação
RMa-AV LOS	$\sigma_{SF}=6$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 10 \text{ m}$
	$\sigma_{SF} = 4.2 \cdot \exp(-0.0046 \cdot h_{UT})$	$10 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
RMa-AV NLOS	$\sigma_{SF} = 8$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 10 \text{ m}$
	$\sigma_{SF} = 6$	$10 \text{ m} < h_{UT} \leq 40 \text{ m}$
UMa-AV LOS	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$\sigma_{SF} = 4.64 \cdot \exp(-0.0066 \cdot h_{UT})$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
UMa-AV NLOS	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$\sigma_{SF} = 6$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 100 \text{ m}$
UMi-AV LOS	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$\sigma_{SF} = \max(5 \cdot \exp(-0.01 \cdot h_{UT}), 2)$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$
UMi-AV NLOS	$\sigma_{SF} = 7.82$	$1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
	$\sigma_{SF} = 8$	$22.5 \text{ m} < h_{UT} \leq 300 \text{ m}$

Tabela 8 - Parametrização do desvanecimento de sombra, adaptado de [8] e [13].

Apêndice III – Parâmetros de grande escala

A tabela 9, com base em [13], resume os parâmetros considerados no sistema para o cálculo dos ângulos de espalhamento associados a um canal de transmissão de *downlink*, assim como a determinação dos atrasos relativos aos *clusters* e a geração da sua respetiva potência.

Parâmetro	LOS	NLOS
RMA-AV		
K [dB]	15	15
DS	-7.49	-7.43
ASA	1.52	1.52
ZSA	0.60	0.88
r_t	3.8	1.7
$C_{\phi}^{NLOS, AOA}$	1.123	1.090
$C_{\phi}^{NLOS, ZOA}$	1.104	1.178
<i>cluster shadowing</i> ζ [dB]	3	3
N	11	10
UMa-AV		
K [dB]	15	15
DS	$-6.955 - 0.0963 \cdot \log(f_c)$	$-6.28 - 0.204 \cdot \log(f_c)$
ASA	1.81	$2.08 - 0.27 \cdot \log(f_c)$
ZSA	0.95	$-0.3236 \cdot \log(f_c) + 1.512;$
r_t	2.5	2.3
$C_{\phi}^{NLOS, AOA}$	1.146	1.289
$C_{\phi}^{NLOS, ZOA}$	1.104	1.178
<i>cluster shadowing</i> ζ [dB]	3	3
N	12	20
UMi-AV		
K [dB]	15	15
DS	$-0.24 \cdot \log(1+f_c) - 7.14$	$-0.24 \cdot \log(1+f_c) - 6.83$
ASA	$-0.08 \cdot \log(1+f_c) + 1.73$	$-0.08 \cdot \log(1+f_c) + 1.81$
ZSA	$-0.1 \cdot \log(1+f_c) + 0.73$	$-0.04 \cdot \log(1+f_c) + 0.92$
r_t	3	2.1
$C_{\phi}^{NLOS, AOA}$	1.146	1.273
$C_{\phi}^{NLOS, ZOA}$	1.104	1.184
<i>cluster shadowing</i> ζ [dB]	3	3
N	12	19

Tabela 9 - Parâmetros de grande escala, adaptado de [13].

O espalhamento dos ângulos de chegada e de partida relativos ao azimute, encontram-se limitados a um valor máximo de 104°. Quanto aos ângulos de espalhamento relativos ao eixo

de *Zenith*, estes limitam-se a um máximo de 52° [13]. Na figura 32, encontra-se ilustrado o sistema de coordenadas considerado, no qual θ representa o ângulo de *Zenith* e ϕ indica o ângulo relativo ao azimute. As variáveis θ e ϕ , são definidas com base na direção de propagação do vetor $\hat{n}$.

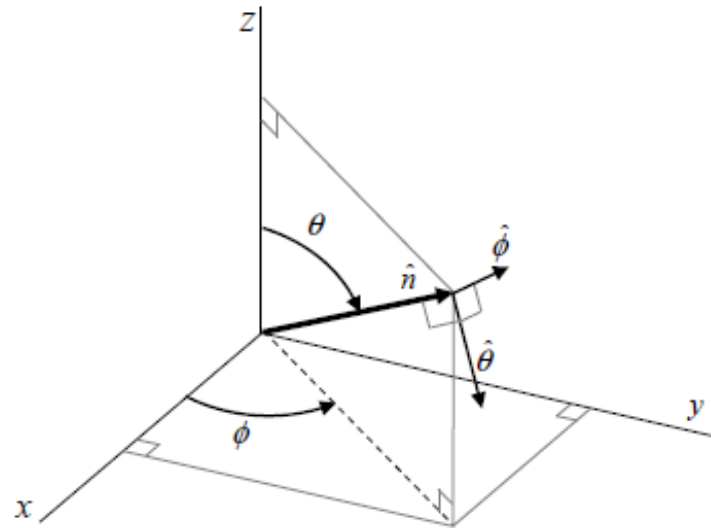


Figura 32 - Definição global do sistema cartesiano de coordenadas com ângulo de *Zenith* θ e ângulo de azimute Φ , sobre um vetor $\hat{n}$, retirado de [13].