

**Análise dos limites de capacidade e cobertura em redes
ad-hoc de UAVs**

Anna Olegivna Agamyryansc

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Luís Manuel de Jesus Sousa Correia

Capitão Tiago Miguel Monteiro Oliveira

Júri

Presidente: Prof. José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. Luís Manuel de Jesus Sousa Correia

Vogal: Prof. António Manuel Restani Graça Alves Moreira

Major Elói Teixeira Pereira

Novembro de 2018

“One way to get the most out of life is to look upon it as an adventure.”

William Feather

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Ao Instituto Superior Técnico e à Academia da Força Aérea Portuguesa, por tudo aquilo que me concederam ao longo dos últimos anos, tanto a nível académico como pessoal.

Ao orientador desta dissertação de Mestrado, o Professor Luís Correia, não só por toda a orientação, rigor e clareza das opiniões e críticas, paciência e tempo despendido ao longo destes últimos meses, mas também por ter contribuído para o meu enriquecimento como pessoa e profissional, através de todos os conselhos e experiências pessoais transmitidas, e pela oportunidade e privilégio de integrar o GROW.

Ao meu coorientador, Capitão Tiago Oliveira, pois o seu rumo inicial e acompanhamento ao longo de todo o decorrer desta dissertação foram determinantes. Agradeço, também, pela disponibilidade, pelo auxílio e total colaboração no solucionar das dúvidas e problemas que foram surgindo durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos, por permanecerem sempre ao meu lado, mesmo estando longe. Pela compreensão, encorajamento, boa disposição e carinho.

À minha segunda família, os Barões, deixo o meu profundo e sincero agradecimento, por todos os momentos bons e menos bons que passamos juntos, por todo o apoio, suporte e amizade.

Por último, deixo um especial agradecimento à minha família, em particular à minha mãe e ao meu irmão, pela paciência e apoio incondicional, por todo o amor e valores transmitidos, que me guiam e inspiram.

Resumo

O objetivo desta dissertação é desenvolver um modelo que permita analisar a extensão de cobertura e limites de capacidade nas redes *ad-hoc* de UAVs com uma distribuição espacial que se adeque às missões consideradas: voo de formação para detecção de ameaças externas a colunas de navios (onde se considera uma distribuição circular em torno da coluna) e busca colaborativa e seguimento de alvos em ambiente marítimo (onde se considera que os UAVs se distribuem linearmente). O modelo implementado permite obter o alcance máximo da rede nas respectivas condições, analisando os parâmetros de entrada como a altura dos terminais, taxa de transmissão, dados referentes ao modelo de propagação e características do Sistema de Comunicações (SC). Para além do alcance imposto pelo SC, parâmetros como a autonomia dos UAVs e a distância máxima em linha de vista também são tidos em conta. O serviço considerado foi transmissão de vídeo, por um ou mais UAVs da rede. Os resultados demonstram que no cenário linear/circular, o alcance da rede aumenta/diminui com o número de UAVs e é tanto maior quanto menor a taxa de transmissão de vídeo e o número de fontes de informação gráfica. Para uma rede de 4 UAVs ANTEX-X02 *Extended*, com apenas uma fonte de vídeo de 2 Mbps, obteve-se um alcance de 208,88 km e de 69,78 km para o cenário linear e circular, respetivamente; e no caso em que todos os UAVs transmitem vídeo, o resultado obtido foi 170,08 km e 40,02 km para o caso linear e circular, respetivamente.

Palavras-chave

Redes *ad-hoc* de UAVs; Cobertura; Capacidade; Transmissão de vídeo; Propagação sobre o mar.

Abstract

The main objective of this Dissertation was to develop a model for the analysis of coverage extension and capacity limits for UAVs operating in *ad-hoc* networks with a spatial distribution that fits the missions considered: targets collaborative search and tracking in maritime environment (where a linear distribution is considered) and formation flight for detection of external threats to ship columns (where a circular distribution is considered). The implemented model provides the maximum range for the network, while analysing the input parameters such as the height of the terminals, transmission rate, propagation model data and communication system (SC) features. In addition to the range imposed by the SC, features such as the UAVs' autonomy and the maximum distance in line of sight are also analysed. Video transmission, by one or more UAVs of the network, is the service considered in this work. Results show that in the linear/circular scenario, the range of the network increases/decreases with the total number of UAVs used. Also, the lower is the video transmission rate and the number of graphic information sources, the larger is the maximum distance allowed. For a network of ANTEX-X02 *Extended* 4 UAVs, with a video source of 2 Mbps, a range of 208.88 km and 69.78 km was obtained for the linear and circular scenarios, respectively, and for a case in which all UAVs transmit video, the result obtained was 170.08 km and 40.02 km for the linear and circular cases, respectively.

Keywords

UAV *ad-hoc* networks; Coverage; Capacity; Video transmission; Propagation over sea.

Índice

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract.....	x
Índice	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Siglas e Acrónimos	xvii
Lista de Símbolos.....	xxi
Lista de <i>Software</i>	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. Motivação e Objetivos	4
1.3. Estrutura da Dissertação	5
2. Conceitos Fundamentais	7
2.1. UAS: Conceito e Classificação	8
2.2. Redes <i>Ad-hoc</i> de UAVs	9
2.2.1. MANET, VANET e FANET	9
2.2.2. Arquitetura da Rede.....	10
2.3. Comunicações nos Sistemas de UAVs	12
2.3.1. Sistema de Comunicações de um UAS.....	12
2.3.2. Tipos de Ligação.....	13
2.3.3. Cobertura e Capacidade.....	15
2.4. Serviços e Cenários de Operação	18
2.5. Estado da Arte	20
3. Desenvolvimento e Implementação do Modelo.....	23
3.1. Características do sistema UAV	24
3.2. Definição de Cenários	29
3.2.1. Cenário L – Formação em Linha	29

3.2.2. Cenário C – Formação Circular	30
3.3. Visão Geral do Modelo	32
3.4. Formulação do Modelo	33
3.4.1. Análise da Cobertura	34
3.4.2. Análise da Capacidade	37
3.5. Implementação do Modelo.....	42
3.6. Testes experimentais aos rádios pDDL2450	44
3.7. Aferição do Modelo	46
4. Análise de Resultados	51
4.1. Análise Geral	52
4.2. Definição de Cenários Reais	55
4.3. Resultados para Cenário em Linha	62
4.3.1. Uma Fonte de Vídeo	63
4.3.2. NFontes de Vídeo	65
4.4. Resultados para Cenário Circular	70
4.4.1. Uma Fonte de Vídeo.....	70
4.4.2. NFontes de Vídeo	71
5. Conclusões	73
Anexo A. ANTEX-X02 <i>Extended</i>	79
A.1 Estrutura física.....	80
A.2 Sistema de propulsão	81
A.3 Sistemas primário e secundário de voo	82
A.4 Sistema de energia e <i>payload</i>	83
Anexo B. <i>Microhard</i> pDDL2450.....	85
Anexo C. Antenas usadas na GCS e nos UAVs.....	89
C.1 Antena TL-ANT2405CL	90
C.2 Antena TL-ANT2424B	91
C.3 Antena OD12-2400.....	92
Anexo D. Testes experimentais aos rádios.....	93
D.1. Teste com <i>iPerf</i>	94
D.2. Teste com <i>TamoSoft</i>	95
Referências.....	99

Lista de Figuras

Figura 1.1 – UAV Tekever AR3 NET RAY (extraído de [Teke18]).....	3
Figura 1.2 – Exemplo de uma rede <i>ad-hoc</i> de UAVs.....	4
Figura 2.1 – Arquitetura de uma FANET (baseado de [IHAC16] e [LiZL13]).....	11
Figura 2.2 – SC típico de um UAS (adaptado de [CuDu16]).	12
Figura 2.3 – Representação genérica das ligações de uma FANET (adaptado de [ZeZL16]).	13
Figura 2.4 – Rede de 3 UAVs dispostos em linha (baseado em [GrRB15] e [MSBD16]).	16
Figura 2.5 – Distância de rádio-horizonte entre dois terminais.....	17
Figura 2.6 – Exemplo de aplicação: missão SAR (extraído de [AHSY14]).....	18
Figura 3.1 – Visão geral do sistema UAS (extraído de [Crit17]).	24
Figura 3.2 – Diagrama de blocos funcional do UAS (extraído de [Crit17]).	24
Figura 3.3 – UAV ANTEX-X02 <i>Extended</i> (extraído de [Oliv18]).	25
Figura 3.4 – SC entre o UAV e a GCS (extraído de [Crit17]).....	26
Figura 3.5 – SC do UAS atual e o que se pretende obter.....	27
Figura 3.6 – Formação em linha de N UAVs.....	29
Figura 3.7 – Esquemática da formação circular de N UAVs.....	31
Figura 3.8 – Visão geral do modelo.	33
Figura 3.9 – Taxa da transmissão em função do esquema de modulação dos rádios pDDL2450. 40	
Figura 3.10 – Sensibilidade do recetor em função da modulação dos rádios pDDL2450.	40
Figura 3.11 – Sensibilidade do recetor em função da taxa de transmissão dos rádios pDDL2450. 41	
Figura 3.12 – Fluxograma do modelo de dimensionamento da rede <i>ad-hoc</i> de UAVs.	43
Figura 3.13 – Configuração dos testes experimentais realizados aos rádios pDDL2450.	45
Figura 4.1 – Alcance máximo da rede em função de N (Cenário L).....	53
Figura 4.2 – Alcance máximo da rede em função de M (Cenário L).	54
Figura 4.3 – Alcance máximo da rede em função de M (Cenário C).....	55
Figura 4.4 – Zonas marítimas sob soberania/jurisdição nacional (extraído de [DGRM18]).	56
Figura 4.5 – Localização dos acidentes registados em 2014 (extraído de [GAMA18]).....	57
Figura 4.6 – Densidade de tráfego na costa portuguesa em 2017 (extraído de [Mari18]).	58
Figura 4.7 – Exemplo de cenário de um ataque assimétrico a um navio (extraído de [BaDa16])... 58	
Figura 4.8 – GCS considerada no cenário real (extraído de [Oliv18]).	59
Figura 4.9 – Localização da GCS: Aeródromo Municipal de Torres Vedras, Portugal.....	60
Figura 4.10– Coluna de navios e a respetiva localização da GCS (adaptado de [Chin18]).	61
Figura 4.11 – Alcance máximo para $M = 1$, R_b , $video = 2$ Mbps (Cenário L).....	64
Figura 4.12 – Alcance máximo para $M = 1$, R_b , $video = 4$ Mbps (Cenário L).....	65
Figura 4.13 – Alcance máximo para $M = N$, R_b , $video = 2$ Mbps (Cenário L).....	66
Figura 4.14 – Ilustração dos cenários em que $M = N$ e R_b , $video = 2$ e 4 Mbps.....	67
Figura 4.15 – Alcance máximo para $M = N$, R_b , $video = 2$ e 4 Mbps (Cenário L).....	68
Figura 4.16 – Alcance máximo para $N = 4$, R_b , $video = 2$ Mbps com $M = 1$ e N (Cenário L).	69
Figura 4.17 – Alcance imposto pelo SC para $M = N$, R_b , $video = 2$ e 4 Mbps (Cenário C).	72
Figura A.1 – Desenho técnico e dimensões relevantes do UAV (extraído de [Crit17]).	80
Figura A.2 – Piloto automático <i>Piccolo II</i> (extraído de [Crit17]).	82

Figura B.1 – Potência de transmissão máxima em função da taxa de transmissão.	87
Figura B.2 – Sensibilidade do recetor em função da taxa de transmissão.	88
Figura C.1 – Diagrama de radiação da antena usada nos UAVs (extraído de [TP-L18a]).....	90
Figura C.2 – Diagrama de radiação da antena usada na GCS (extraído de [TP-L18b])......	91
Figura C.3 – Antena OD12-2400 omnidirecional (extraído de [RSCo18]).	92
Figura D.1 – Resultados dos testes realizados com o <i>iPerf</i>	95
Figura D.2 – Resultados dos testes realizados com o <i>TamoSoft</i>	98

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação NATO dos UAVs (adaptado de [Blye06] e [MKKU13]).	8
Tabela 2.2 – Características das redes MANET, VANET e FANET (adaptado de [GuJV15]).	10
Tabela 2.3 – Bandas de frequências mais usadas nos UASs (adaptado de [CuDu16]).	12
Tabela 2.4 – Taxas de transmissão das comunicações (adaptado de [JMAA17]).	13
Tabela 2.5 – Características dos cenários de operação dos UAVs (extraído de [KGMF18]).	19
Tabela 2.6 – Características dos diferentes formatos de vídeo (extraído de [Moto07]).	20
Tabela 2.7 – Requisitos para missões SAR e de vigilância (extraído de [Rodr12]).	21
Tabela 3.1 – Taxa de transmissão do fluxo de dados dos cenários de aplicação analisados.	30
Tabela 3.2 – Requisitos de capacidade dos Cenários L e C.	38
Tabela 3.3 – Pressupostos tomados na implementação do modelo.	44
Tabela 3.4 – Teste aos rádios usando o <i>iPerf</i> .	45
Tabela 3.5 – Passos seguidos na 1ª fase da aferição do modelo implementado.	47
Tabela 3.6 – Parâmetros de entrada usados na 1ª fase da aferição do modelo implementado.	48
Tabela 3.7 – Resultados da aferição do modelo considerando a Hipótese HL.1.	49
Tabela 3.8 – Resultados da aferição do modelo considerando a Hipótese HL.N.	49
Tabela 3.9 – Resultados da aferição do modelo considerando as Hipóteses HC.1 e HC.N.	50
Tabela 4.1 – Parâmetros usados no cálculo do alcance da rede em função de N (Cenário L).	52
Tabela 4.2 – Parâmetros usados no cálculo do alcance da rede em função de M (Cenário L).	53
Tabela 4.3 – Parâmetros usados no cálculo do alcance da rede em função de M (Cenário C).	54
Tabela 4.4 – Acidentes marítimos registados na UE e em Portugal (extraído de [GAMA18]).	57
Tabela 4.5 – Parâmetros referentes à autonomia dos UAVs (Cenário L).	60
Tabela 4.6 – Parâmetros referentes ao SC (Cenário L).	60
Tabela 4.7 – Número máximo de UAVs para R_b , $video=2$ e 4 Mbps, e $M=1$ e N (Cenário L).	61
Tabela 4.8 – Parâmetros referentes à autonomia dos UAVs (Cenário C).	62
Tabela 4.9 – Parâmetros referentes ao SC (Cenário C).	62
Tabela 4.10 – Número máximo de UAVs para R_b , $video=2$ e 4 Mbps, e $M=1$ e N (Cenário C).	62
Tabela 4.11 – Resultados para $M=1$, R_b , $video=2$ Mbps (Cenário L).	63
Tabela 4.12 – Resultados para $M=1$, R_b , $video=4$ Mbps (Cenário L).	64
Tabela 4.13 – Resultados para $M=N$, R_b , $video=2$ Mbps (Cenário L).	66
Tabela 4.14 – Resultados para $M=N$, R_b , $video=2$ e 4 Mbps (Cenário L).	68
Tabela 4.15 – Resultados para $M=1$, R_b , $video=2$ ou 4 Mbps (Cenário C).	70
Tabela 4.16 – Resultados para $M=N$, R_b , $video=2$ ou 4 Mbps (Cenário C).	71
Tabela A.1 – Especificações técnicas do Motor 3 W 28i e do GPU (extraído de [Crit17]).	81
Tabela A.2 – Consumo energético dos sistemas dos UAVs (adaptado de [Crit17]).	84
Tabela B.1 – Especificações de desempenho do sistema pDDL2450 (adaptado de [Micro18]).	86
Tabela B.2 – Desvios das funções aproximadas da potência de transmissão e da sensibilidade.	88
Tabela C.1 – Especificações da antena instalada nos UAVs (extraído de [TP-L18a]).	90
Tabela C.2 – Especificações da antena instalada na GCS do Cenário L (extraído de [TP-L18b]).	91
Tabela C.3 – Especificações da antena instalada na GCS do Cenário C (extraído de [RSCo18]).	92
Tabela D.1 – Caracterização dos testes realizados com o <i>software TamoSoft</i> .	96

Lista de Siglas e Acrónimos

2D	2 Dimensões
3D	3 Dimensões
A2A	<i>Air-to-Air</i>
A2G	<i>Air-to-Ground</i>
ACK Ratio	<i>Acknowledgment Ratio</i>
AFA	Academia da Força Aérea
AGL	<i>Above Ground Level</i>
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
BLOS	<i>Beyond Line-of-Sight</i>
C2	Comando e controlo
CIAFA	Centro de Investigação da AFA
CNPC	<i>Control and Non-Payload Communications Link</i>
CNUDM	Convenção das Nações Unidas Direito do Mar
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DL	<i>Downlink</i>
EB	Estação Base
EM	Eletromagnético(a)
EMSA	<i>European Maritime Safety Agency</i>
ETC2	Estação Terrestre de C2
ETP	Estação Terrestre de <i>Payload</i>
EUA	Estados Unidos da América
FANET	<i>Flying Ad-Hoc Networks</i>
FA	Força Aérea Portuguesa
FCC	<i>Feedback Communications Control</i>
Frontex	Agência de Controlo de Fronteiras Exteriores
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i>
G2A	<i>Ground-to-Air</i>
GAMA	Gabinete de Investigação de Acidentes Marítimos e da Autoridade para a Meteorologia Aeronáutica
GCS	<i>Ground Control Station</i>

GPS	<i>Global Positioning System</i>
HALE	<i>High Altitude Long Endurance</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
LB	Largura de Banda
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
MALE	<i>Medium Altitude Long Endurance</i>
MANET	<i>Mobile Ad-hoc Network</i>
MAV	<i>Micro Air Vehicle</i>
MPC	<i>Multi-Path Component</i>
MSL	<i>Mean Sea Level</i>
NATO	<i>North Atlantic Treaty Organization</i>
NECSAVE	<i>Network Enabled Cooperation System of Autonomous Vehicles</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
P2P	<i>Point-to-Point</i>
P2MP	<i>Point-to-MultiPoint</i>
pDDL	<i>Pico Digital Data Link</i>
PERSEUS	<i>Protection of EuRopean borders and Seas through the intelligent Use of Surveillance</i>
PITVANT	Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não-Tripulados
PSR	<i>Primary Surveillance Radar</i>
QNAF	Quadro Nacional de Atribuição de Frequências
QoS	<i>Quality of Service</i>
RH	Rádio-Horizonte
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
SAA	<i>Sense-And-Avoid</i>
SAR	<i>Search and Rescue</i>
SATCOM	<i>Satellite Communications</i>
SC	Sistema de Comunicações
SEAGULL	Sistemas Inteligentes de Suporte ao Conhecimento Situacional Marítimo Baseados em Veículos Aéreos não Tripulados
SEC2	Sistema Embarcado de C2
SEP	Sistema Embarcado de <i>Payload</i>
SRR	<i>Search and Rescue Region</i>
SSR	<i>Secondary Surveillance Radar</i>

sUAV	<i>Small Unmanned Aerial Vehicle</i>
TM	Terminal Móvel
UAS	<i>Unmanned Aerial System</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UE	União Europeia
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UL	<i>Uplink</i>
VANET	<i>Vehicular Ad-hoc Network</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
ZEE	Zona Económica Exclusiva

Lista de Símbolos

α	Coefficiente de decaimento médio de potência
Δf	Largura de banda
θ_B	Largura do feixe a -3 dB da antena
C	Consumo médio do combustível do UAV
d	Distância entre o transmissor e o recetor
d_C	Alcance máximo da rede de UAVs dispostos em círculo
d_i	Alcance da i -ésima ligação
d_L	Alcance máximo da rede de UAVs dispostos em linha
$d_{máx,AU}$	Alcance máximo da rede imposto pela autonomia da aeronave
$d_{máx,DC}$	Alcance máximo entre dois nós imposto pelo desempenho e capacidade do SC
$d_{máx,i}$	Alcance máximo da i -ésima ligação
$d_{máx,RH}$	Alcance de rádio-horizonte
$d_{máx,SC}$	Alcance máximo entre dois nós imposto pelo SC (considerando o desempenho e capacidade, e a distância em LOS)
f	Frequência
G_r	Ganho da antena do recetor
G_t	Ganho da antena do transmissor
h	Altitude
h_t	Altura da antena do transmissor
h_{GCS}	Altitude da GCS, em relação ao MSL.
h_r	Altura da antena do recetor
h_i	Altitude em relação ao MSL do i -ésimo UAV
L_p	Atenuação do percurso
$L_{p,máx}$	Atenuação máxima do sinal entre dois nós
$L_{p,máx,i}$	Atenuação máxima do sinal durante o percurso da i -ésima ligação
M	Número de fontes de vídeo a visualizar selecionadas pela GCS
M_S	Margem de segurança no cálculo das perdas de percurso
N	Número total de UAVs que constituem a rede
P_r	Potência recebida
$P_{r,min}$	Sensibilidade do recetor

P_t	Potência transmitida
$P_{t,máx}$	Potência de transmissão máxima
$r_{c,máx}$	Distância terrestre entre a GCS e o UAV mais afastado
$r_{c,máx,C}$	Cobertura do Cenário C imposta pelo SC
$r_{c,máx,L}$	Cobertura do Cenário L imposta pelo SC
r_i	Distância terrestre da i -ésima ligação
R_b	Taxa de transmissão
$R_{b,cap}$	Capacidade da rede
$R_{b,C2}$	Taxa de transmissão associada aos dados de C2
$R_{b,CNPC}$	Taxa de transmissão dos dados CNPC
$R_{b,DL}$	Taxa de transmissão da ligação descendente (UAV-GCS)
$R_{b,P}$	Taxa de transmissão referente à posição e referência de cada um dos UAVs
$R_{b,T}$	Taxa de transmissão associada aos dados de telemetria
$R_{b,UL}$	Taxa de transmissão da ligação ascendente (GCS-UAV)
$R_{b,vídeo}$	Taxa de transmissão correspondente ao vídeo
t_{alvo}	Tempo que o UAV demora a percorrer a distância entre a GCS e o alvo
$t_{alvo,máx}$	Tempo máximo disponível para o percurso entre a GCS e o alvo
t_{aut}	Tempo de autonomia
t_{exec}	Tempo de execução da missão
t_m	Tempo de margem de segurança
v	Velocidade
V	Volume do depósito de combustível
w	Peso

Lista de *Software*

Map Developers

iPerf

Lucidchart

Matlab R2017a

Microsoft Excel 2016

Microsoft Word 2016

TamoSoft Throughput Test

Software de edição de mapas

Software de medição da qualidade da ligação entre dois terminais

Software de criação de fluxogramas e diagramas *on-line*

Software de computação numérica

Software de computação numérica e edição de gráficos

Software de processamento de texto

Software de desempenho e qualidade de uma rede *wireless*

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentada a contextualização do tema da dissertação, nomeadamente uma breve descrição da evolução histórica dos UAVs, bem como os motivos que levaram à realização da mesma, os respetivos objetivos e a sua estrutura.

1.1. Enquadramento

Para garantir a soberania e independência de um Estado, é crucial salvaguardar os seus interesses, bem como providenciar a segurança do mesmo. No caso do Estado português, com uma área de Busca e Salvamento (*Search and Rescue – SAR*) de 5 792 740 km², que corresponde a 63 vezes o território nacional, assegurar a defesa do espaço marítimo, que compreende águas interiores, mar territorial e a Zona Económica Exclusiva (ZEE), torna-se um dos objetivos primários [EMFA12].

O fenómeno de globalização, cujo crescimento tem sido cada vez mais notório e a atividade se realiza maioritariamente por via marítima, apesar de ser vantajoso em determinados aspetos, impulsiona o aumento de diversas ameaças, tais como o tráfico de estupefacientes ou outras substâncias psicotrópicas, o contrabando, a pirataria, o terrorismo internacional, imigração ilegal, a poluição do mar e a depredação de recursos vivos e não vivos. Deste modo, torna-se imperativo providenciar meios e recursos que garantam a diminuição dos efeitos causados por fatores que põem em causa a estabilidade e a segurança do país, e do respetivo espaço marítimo [Caja09].

Os recursos humanos são o elemento principal de uma operação, tanto no âmbito militar como civil. Na indústria da aviação, cada vez mais, tem-se procurado substituir as tripulações que operam a bordo das aeronaves, e correm riscos acrescidos, por controlo remoto de aeronaves não tripuladas, a partir de uma estação terrestre. É neste sentido que surge o conceito de Veículo Aéreo Não-Tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle – UAV*), sendo um dos objetivos realizar missões de curta e/ou longa duração sem pôr em risco a vida humana. Adicionalmente, os UAVs permitem redesenhar a aeronave sem a necessidade de criar um cockpit para o piloto, o que apresenta vantagens a nível tanto de custos como de conceção e capacidade de *payload* [Pere16].

Os UAVs, que acompanharam os grandes avanços tecnológicos a que se tem assistido nas últimas décadas, têm ganho um grande destaque. A definição moderna dos dispositivos por controlo remoto surgiu no período da 1ª Guerra Mundial, com a criação de torpedos e 'bombas inteligentes', pelas Marinha e Exército dos Estados Unidos da América (EUA). No entanto, devido a problemas técnicos que surgiram nas primeiras experiências, apenas no final da 2ª Guerra Mundial se utilizou o primeiro UAV nas missões de reconhecimento, o MQM-57 "*Falconer*". Nos anos 1960, foram desenvolvidos UAVs com maior autonomia, e que permitiam a sua recuperação através de paraquedas, como o Tu-121 "*Yastreb*" e o CL-89 "*Midge*". Mais tarde, a partir de 1990, surgiram UAVs mais sofisticados, como o RQ-4 "*Global Hawk*" e o MQ-9 "*Reaper*", que vieram revolucionar esta indústria [VaVa15]. Atualmente, para além dos UAVs usados na vertente militar, são fabricados *drones* de pequenas dimensões, com capacidade de captação de imagens e vídeos de alta qualidade, processamento de imagens por *softwares* específicos, ou com capacidade de voo em condições climatéricas adversas, para serem usadas em aplicações como agricultura ou inspeção de áreas difíceis de alcançar ou de elevado risco para a vida humana [SkyD18]. Um exemplo a referir é o Tekever AR3 NET RAY, ilustrado na Figura 1.1, que tem uma autonomia de, aproximadamente, 10 horas com comunicações em linha de vista (*Line-of-Sight – LOS*) até 80 km [TEKE18]. O Tekever foi testado pela Marinha Portuguesa no âmbito das missões da Agência de Controlo de Fronteiras Exteriores (Frontex), com vista a ser usado

nas operações marítimas, como é o caso de SAR, vigilância e patrulhamento marítimo, detecção de poluição e pesca ilegal, acreditando-se que a sua integração nas referidas missões poderá melhorar a eficiência e aumentar o sucesso das mesmas [Neve15]. Outro exemplo a nível da tecnologia nacional é o UAV Ogassa da empresa UAVision, operado pela Força Aérea Portuguesa (FA) para prestação de serviços à Frontex e financiado pela Agência Europeia de Segurança Marítima (EMSA) [Pena17].



Figura 1.1 – UAV Tekever AR3 NET RAY (extraído de [Teke18]).

O uso de um único UAV tem vindo a ser substituído pela utilização de vários UAVs, i.e., sistemas multi-UAV que podem ou não ser *ad-hoc*, possibilitando assim um enriquecimento no conhecimento da situação marítima, nomeadamente detecção, caracterização e seguimento de alvos, reconhecimento de embarcações e monitorização de parâmetros indicadores do estado ambiental. Considera-se uma rede *ad-hoc* de UAVs aquela em que os UAVs e/ou a GCS podem ser usados como nós retransmissores [BeST13].

Nas missões militares de vigilância e reconhecimento marítimo, SAR e detecção e seguimento de alvos os UAVs são utilizados, tipicamente, para recolha de informações de um determinado alvo e transmiti-las para a estação base de controlo (*Ground Control Station – GCS*). Num sistema com apenas um UAV, a área de cobertura é limitada devido a restrições inerentes ao alcance das comunicações, sendo o uso de sistemas com vários UAVs uma solução possível para este problema, pelo que as redes multi-UAV têm ganho um enfoque cada vez maior. Uma rede *ad-hoc* de UAVs permite aumentar a escalabilidade do sistema, ao contrário do uso de um único UAV, que tem um limite de cobertura associado, tal como representado na Figura 1.2. Tal possibilita, em determinadas aplicações, recolher dados terrestres em áreas inalcançáveis ou de grande risco humano, como é o caso dos cenários de detecção de incêndios florestais ou patrulhamento de zonas marítimas.

A FA tem vindo a participar no desenvolvimento e investigação de sistemas UAVs, com o intuito de os utilizar em ambiente operacional marítimo. É disso exemplo a participação da FA nos projetos “Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não-Tripulados” (PITVANT), “*Protection of EuRoPean borders and Seas through the intelligent Use of Surveillance*” (PERSEUS), “*Network Enabled Cooperation System of Autonomous Vehicles*” (NECSAVE) e Sistemas Inteligentes de Suporte

ao Conhecimento Situacional Marítimo Baseados em Veículos Aéreos não Tripulados (SEAGULL). Um dos grandes objetivos correntes é desenvolver e avaliar novas formas de interação cooperativa entre vários UAVs, por forma a atingir níveis de desempenho impossíveis de alcançar recorrendo ao uso isolado de cada veículo [AFA18].

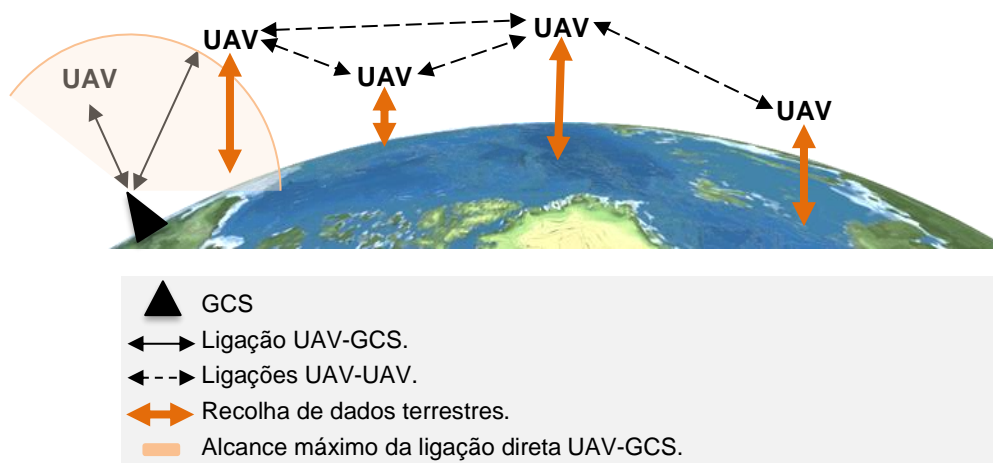


Figura 1.2 – Exemplo de uma rede *ad-hoc* de UAVs.

Quanto às comunicações nos sistemas de UAVs, é importante ter em conta o cenário em que estes operam, visto que em cada ambiente de operação a propagação do sinal é caracterizada por diferentes modelos. Tipicamente, os cenários de operação dos UAVs são zonas urbanas, rurais ou sobre o mar, sendo que a respetiva cobertura difere de cenário para cenário devido aos diferentes tipos de atenuação que o sinal sofre ao longo do percurso [KGMF18]. Tal como acontece nas comunicações associadas às aeronaves tripuladas, os UAVs também estão limitados às condições meteorológicas que, em situação desfavorável, são um fator limitativo nas comunicações com a GCS, na capacidade sensorial e nas características aerodinâmicas da plataforma aérea [Pere16].

1.2. Motivação e Objetivos

O SC atualmente utilizado nos sistemas de UAVs do Centro de Investigação da Academia da Força Aérea (CIAFA) não permite a partilha de dados de forma direta entre UAVs. Por forma a possibilitar utilização de redes *ad-hoc* de UAVs com retransmissão em missões de interesse para a FA, está atualmente a decorrer o processo de aquisição e instalação de rádios com conectividade IP, tanto nos UAVs como na GCS. Esta migração irá permitir a extensão de cobertura do ponto de vista de comunicações. No entanto, a capacidade da rede deve ser analisada por forma a garantir que toda a informação seja devidamente transmitida. Adicionalmente, o desempenho da rede irá depender da taxa de transmissão do serviço utilizado (imagens ou vídeo, por exemplo).

Assim, o objetivo da dissertação foi o de desenvolver um modelo que permita analisar a extensão de

cobertura e limites de capacidade em redes *ad-hoc* de UAVs, permitindo um dimensionamento adequado da rede. Pretende-se que o modelo permita dimensionar uma rede *ad-hoc* de UAVs correspondente a dois cenários de operação, missões de seguimento de alvo e de deteção e proteção de forças em ambiente marítimo.

O estudo realizado revela-se não só pertinente para o projeto que está atualmente a decorrer no CIAFA, mas também representa uma novidade quanto à abordagem da relação entre os conceitos como cobertura e capacidade e as redes *ad-hoc* de UAVs. É de referir, ainda, que o modelo desenvolvido é aplicável a casos em que seja utilizada uma tecnologia de comunicação diferente da que está a ser implementada no sistema de UAVs da FA, ou até um UAS com características diferentes.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se repartida em 5 capítulos e está estruturada de seguinte forma:

O Capítulo 1 destina-se, inicialmente, ao enquadramento do tema, seguido da motivação e objetivos, e descrição da estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma descrição e classificação do conceito UAS. De seguida são abordadas as redes *ad-hoc* de UAVs, nomeadamente a sua comparação com redes *ad-hoc* móveis e de veículos, e a respetiva arquitetura. A terceira secção deste capítulo é destinada à descrição de comunicações nos sistemas de UAVs e os tipos de ligação existentes, abordando conceitos analisados nesta dissertação – cobertura e capacidade. Por fim, são descritos os serviços e cenários de operação associados às redes *ad-hoc* de UAVs, e apresentado o estado da arte.

O Capítulo 3 refere-se ao desenvolvimento e implementação do modelo. Na primeira secção é caracterizado o UAS tido em consideração no desenvolvimento do mesmo. De seguida são descritos os cenários de operação analisados: formação de UAVs em linha e circular. Posteriormente, é apresentada uma visão geral do modelo e descreve-se a formulação do mesmo. Finalmente, é apresentado o método de implementação do modelo e a validação do mesmo.

No Capítulo 4 são definidos dois cenários reais de operação, cuja configuração corresponde aos dois cenários analisados nesta dissertação: linear, em que a GCS se encontra localizada no aeródromo de Torres Vedras e os UAVs patrulham a zona marítima; e circular, em que a GCS se encontra no centro de uma coluna de navios que navega em alto mar. São determinados e analisados os alcances máximos para redes com diferentes números de UAVs, de fontes de informação gráfica, a transmitir vídeo com taxa de transmissão de 2 ou 4 Mbps.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido e algumas propostas de trabalhos futuros que poderão ser realizados no seguimento desta dissertação.

Capítulo 2

Conceitos Fundamentais

Este capítulo destina-se, inicialmente, à descrição e classificação do conceito UAS. De seguida, são descritas as redes *ad-hoc* de UAVs, é feita a sua comparação com as redes *ad-hoc* mais conhecidas – móveis e de veículos, e é apresentada a sua arquitetura. Na terceira secção é descrito o SC usado nos UAVs, o tipo de ligações que existem nas respetivas redes e, no final, são abordados os parâmetros estudados nesta dissertação – a cobertura e a capacidade. Seguidamente, são descritos os serviços e cenários de operação associados às redes *ad-hoc* de UAVs. A última secção deste capítulo é referente ao estado da arte.

2.1. UAS: Conceito e Classificação

Um UAV, definido em [Vice13] como aeronave reutilizável, sem tripulação a bordo e que opera de forma remota, automática ou autónoma, é um dos componentes de um sistema aéreo não-tripulado (*Unmanned Aerial System – UAS*), do qual fazem parte também:

- *Payload*, que corresponde aos sensores, armamento e/ou carga adicional;
- Elemento humano, que engloba o piloto (operador), analista de informações, comandante de missão e/ou equipa de manutenção;
- GCS, responsável pelo comando e controlo (C2), planeamento de missão e comunicações;
- SC, que corresponde a todos os meios de comunicação entre UAVs, GCS e/ou o utilizador;
- Elemento de apoio, que corresponde a todo o apoio logístico necessário para transportar, manter, lançar e recuperar o UAV.

As missões associadas aos UAVs e o seu desempenho são parâmetros determinados através das suas características, tais como: o peso; o alcance, que pode ser em modo LOS ou “para além do horizonte” (*Beyond Line-of-Sight – BLOS*); a altitude de operação, que pode ter como referência o nível médio das águas do mar (*Mean Sea Level – MSL*) ou o nível do solo (*Above Ground Level – AGL*); e autonomia. Conforme as suas especificações, os UAVs podem pertencer a diferentes categorias definidas pela *North Atlantic Treaty Organization (NATO)*, apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação NATO dos UAVs (adaptado de [Blye06] e [MKKU13]).

Classe & Peso, w [kg]	Categoria	Raio de alcance [km]	Altitude, h [m] (± 1)	Autonomia, t_{aut} [horas]
Classe I $w < 150$	MICRO ($w < 2$)	5 (LOS)	$h \leq 60$ AGL	1
	MINI ($2 \leq w \leq 20$)	25 (LOS)	$h \leq 915$ AGL	< 2
	Small ($20 < w \leq 150$)	50 (LOS)	$h \leq 1\,525$ AGL	3 – 6
Classe II $150 \leq w \leq 600$	TÁTICO	200 (LOS)	$h \leq 3\,048$ AGL	6 – 10
Classe III $w > 600$	Ataque/Combate	Ilimitado (BLOS)	$h \leq 19\,812$ MSL	–
	<i>Medium Altitude Long Endurance (MALE)</i>	> 500 (BLOS)	$h \leq 13\,715$ MSL	24 – 48
	<i>High Altitude Long Endurance (HALE)</i>	> 2000 (BLOS)	$h \leq 19\,812$ MSL	24 – 48

Existem diversas designações para os UAVs, tais como, *Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)* – terminologia implementada pela *International Civil Aviation Organization (ICAO)*, DRONE, *Micro Air*

Vehicle (MAV) – que se refere a UAVs com um peso inferior a 1g, *small UAV* (sUAV) que designa UAVS com peso inferior a 25kg [Alti17] ou Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) – designação utilizada nos países de Língua Portuguesa. Ao longo desta dissertação ir-se-á usar a terminologia UAV.

2.2. Redes *Ad-hoc* de UAVs

Esta secção destina-se a descrever as redes *ad-hoc* de UAVs, designadas por *Flying Ad-Hoc Networks* (FANET). Inicialmente é feita uma comparação com as redes móveis *ad-hoc* (*Mobile Ad-hoc Network* – MANET) e de veículos (*Vehicular Ad-hoc Network* – VANET), seguida da descrição das possíveis arquiteturas que as redes multi-UAV podem formar e dos aspetos associados às comunicações UAV-UAV e UAV-GCS.

2.2.1. MANET, VANET e FANET

Em [BeBB15], as redes *ad-hoc* são definidas como um conjunto de nós capazes de comunicar entre si, sem necessidade de recorrer a um ponto de acesso previamente configurado. Não havendo ligações físicas entre nós, estes podem reorganizar-se de forma automática e espontânea. Neste tipo de redes, os nós podem ser pontos terminais, estabelecendo uma ligação ponto-a-ponto (P2P), ou desempenhar o papel de nós intermédios, por forma a permitir a transmissão de dados entre terminais que não se encontram em condições de LOS.

Uma rede de UAVs apenas é considerada *ad-hoc* caso haja ligações UAV-UAV sem dependência da ligação à GCS nas comunicações entre os respetivos terminais móveis (TMs). Desta forma, as redes *ad-hoc* de UAVs são um subconjunto das redes *ad-hoc* de veículos que, por sua vez, fazem parte das MANET [BeST13]. Algumas características em comum que as redes *ad-hoc* móveis, VANET e FANET apresentam levam alguns investigadores a explorar a aplicabilidade de estudos já realizados no âmbito das redes MANET e VANET, nas redes *ad-hoc* de UAVs. No entanto, é necessário ter em conta as particularidades associadas às redes FANET. A Tabela 2.2 resume as características associadas às redes MANET, VANET e FANET [GuJV15].

O facto dos UAVs se movimentarem não em 2 Dimensões (2D), como é o caso das MANET, mas em 3 Dimensões (3D), não permite o uso dos modelos de mobilidade associados às redes MANET para descrever o comportamento dos nós de uma rede FANET [GuJV15]. Segundo [BuPR18], devido ao seu acrescido grau de liberdade, relativamente às MANET, as redes *ad-hoc* de UAVs requerem algoritmos de encaminhamento eficientes que garantam a neutralização dos efeitos causados pela mobilidade dos nós da rede.

Relativamente à propagação do sinal rádio, seria de esperar que este apresentasse um melhor desempenho nas FANET que nas MANET, visto que os UAVs se encontram maioritariamente em LOS. No entanto, estudos anteriores concluem que, devido principalmente à dinâmica de rede associada às FANET que causa interrupções nas ligações UAV-UAV, tal não se verifica [BuPR18].

Tabela 2.2 – Características das redes MANET, VANET e FANET (adaptado de [GuJV15]).

	MANET	VANET	FANET
Descrição	TM ligados entre si via <i>wireless</i> , formando uma rede <i>ad-hoc</i>	Rede <i>ad-hoc</i> em que os TM são veículos, que comunicam entre si e com as estações base (EB) localizadas nas laterais da estrada	Redes <i>ad-hoc</i> de UAVs, que comunicam entre si (sem a necessidade de recorrer à GCS) e com a GCS
Mobilidade	Lenta, a uma velocidade típica de $v_{[m/s]} = 2$; densidade variável	Elevada, tipicamente a $v_{[m/s]} = 25 \pm 5$ em autoestrada e $v_{[m/s]} = 8 \pm 2$ em áreas urbanas; previsível, limitada pelo <i>layout</i> da estrada, tráfego e regras de trânsito	Variável, podendo a $v_{[m/s]}$ variar entre 0 e 100; pode movimentar-se em 2D ou 3D (conforme a missão)
Topologia	Aleatória	Estrela com a EB da estrada; malha ou estrela entre veículos	Estrela com a GCS; malha ou estrela entre UAVs
Alterações de topologia	Dinâmicas – reconfiguração imprevisível	Mais dinâmicas que na MANET	Podem ser dinâmicas, lentas ou rápidas
Energia	Tipicamente os nós são alimentados através de baterias	Os dispositivos podem ser alimentados, para além das próprias baterias, através da bateria do carro	Alimentados através de baterias ou gerador interno; a autonomia é afetada pela capacidade da bateria ou pela quantidade de combustível
Exemplos de aplicação	Distribuição de informação (emergências, publicidade, compras, eventos); Pontos de acesso à Internet	Informações de tráfego e meteorológicas, avisos de emergência, serviços baseados em localização	Operações de SAR; reconhecimento e vigilância.

É de salientar que quanto menores forem as dimensões do UAV, maiores são as restrições em termos de energia e, conseqüentemente, menor é a energia do sinal a transmitir, o que deve ser tido em conta na escolha dos protocolos de encaminhamento. Estes devem ser escolhidos com vista a otimizar o uso de combustível, prolongando a estabilidade da rede de UAVs [GuJV15].

2.2.2. Arquitetura da Rede

De acordo com [IHAC16], a arquitetura de uma rede *ad-hoc* de UAVs pode ser hierárquica ou distribuída.

No caso da arquitetura hierárquica existe uma cadeia de comando na rede: a GCS, os UAVs que não estabelecem ligação P2P com a GCS, também designados como UAVs-membro, os UAVs que comunicam diretamente com a GCS, denominados por *backbone* UAV em [LiZL13], funcionando como

elo de ligação entre a GCS e os restantes UAVs. Nesta configuração o UAV *backbone*, juntamente com os restantes UAVs aos quais está ligado, é responsável por monitorizar uma área pré-definida e transmitir os dados para a GCS. A Figura 2.1 a) representa este tipo de arquitetura, em que o nó A é um dos UAVs *backbone*, o C é o UAV-membro e o B desempenha o papel tanto do UAV *backbone* como o de UAV-membro [IHAC16].

A Figura 2.1 b) exemplifica uma configuração cuja arquitetura é a distribuída, que consiste na distribuição aleatória de vários UAVs em toda a área de interesse. Depois dos UAVs se distribuírem, cada um monitoriza a sua área de cobertura e estabelece uma ligação com os UAVs vizinhos, que se encontram ao seu alcance [IHAC16].

Em [LiZL13] são ainda identificadas as redes *ad-hoc* de UAVs multi-grupo e multi-camada, cujo exemplo se representa nas Figuras 2.1 c) e 2.1 d), respetivamente. A primeira configuração consiste na formação de vários subgrupos de UAVs, havendo um UAV *backbone* em cada um dos conjuntos, representado a azul, responsável por estabelecer a ligação com a GCS. As comunicações inter-grupos são efetuadas via GCS. No caso das redes *ad-hoc* de UAVs multi-camada, estas são também vários subgrupos de UAVs, com um UAV *backbone* cada. As ligações estabelecidas entre os UAVs de cada conjunto formam a camada de comunicações inferior. Ao contrário da arquitetura multi-grupo, neste caso os UAVs *backbone* estabelecem ligações entre si, formando a camada de comunicações superior, havendo apenas um deles responsável por comunicar com a GCS.

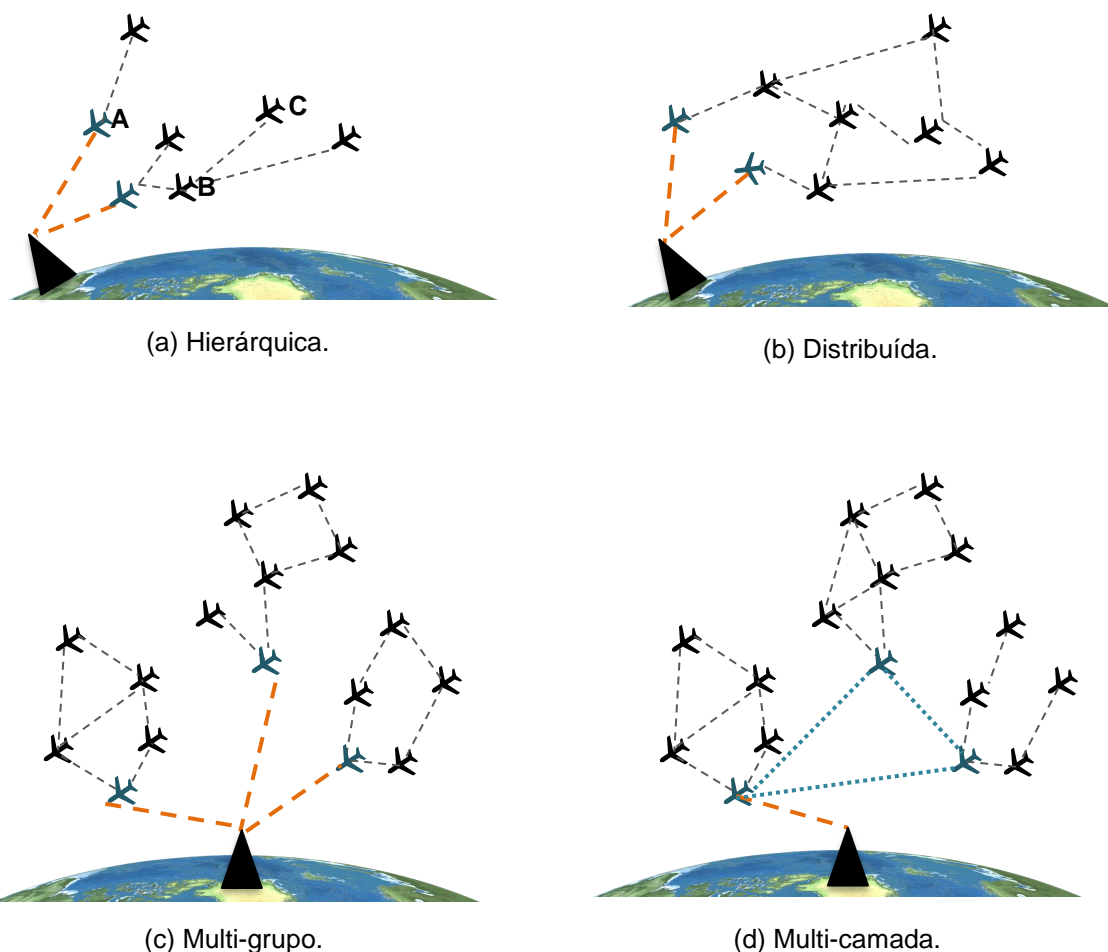


Figura 2.1 – Arquitetura de uma FANET (baseado de [IHAC16] e [LiZL13]).

2.3. Comunicações nos Sistemas de UAVs

Esta secção destina-se, inicialmente, à descrição do sistema típico de comunicações utilizado nos UASs, seguida da caracterização dos diferentes tipos de ligações que podem ser identificadas nestes e, por fim, à apresentação de considerações relevantes à análise dos parâmetros de cobertura e capacidade nas redes de UAVs.

2.3.1. Sistema de Comunicações de um UAS

De acordo com [CuDu16], num SC de um UAS, exemplificado na Figura 2.2, são identificadas duas ligações ascendentes (*Uplink* – UL, também denominada por *Ground-to-Air* – G2A), que operam em frequências associadas a bandas *ultra high frequency* (UHF) e L, S, C ou Ku, e uma ligação descendente (*Downlink* – DL, também denominada por *Air-to-Ground* – A2G), que usa as bandas L, S, C ou Ku. Desta forma, caso haja uma falha, o UAV continua a poder ser controlado a partir da GCS, pois tem duas ligações UL que operam em bandas de frequência diferentes e que transmitem simultaneamente. A Tabela 2.3 apresenta a frequência, f , correspondente às bandas mais usadas nos sistemas de comunicações de UAVs.

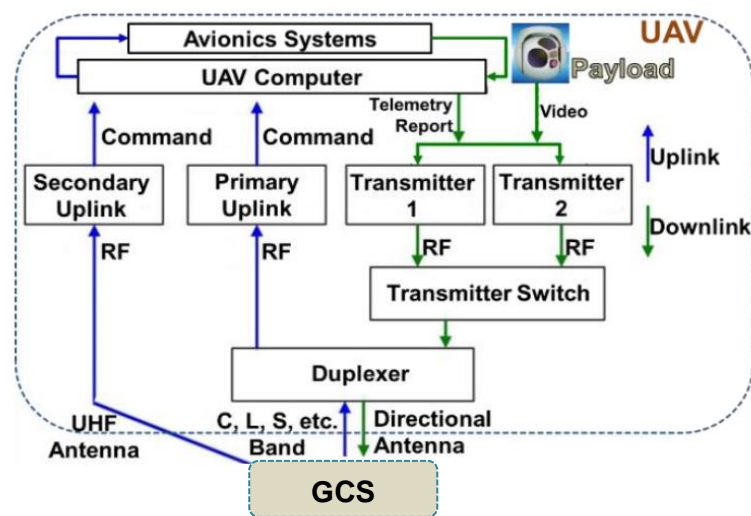


Figura 2.2 – SC típico de um UAS (adaptado de [CuDu16]).

Note-se que a presença de um *duplexer* no SC do UAS permite ao UAV transmitir e receber em simultâneo [CuDu16].

Tabela 2.3 – Bandas de frequências mais usadas nos UASs (adaptado de [CuDu16]).

Banda	UHF	L	S	C	Ku
Frequência [GHz]	[0,3 – 3]	[1 – 2]	[2 – 4]	[4 – 8]	[12 – 18]

Atualmente, em Portugal, o Quadro Nacional de Atribuição de Frequências (QNAF) não designa qualquer faixa específica de frequências para a operação dos UAVs, pelo que se entende que os respetivos operadores devem utilizar a faixa de frequências 2,4 GHz ou 5,8 GHz [Mati16].

2.3.2. Tipos de Ligação

De acordo com [ZeZL16] existem dois tipos básicos de ligações numa rede de UAVs, cuja representação genérica se encontra na Figura 2.3: *Control and Non-Payload Communications Link* (CNPC), que pode ser primária ou secundária, e *Datalink*.

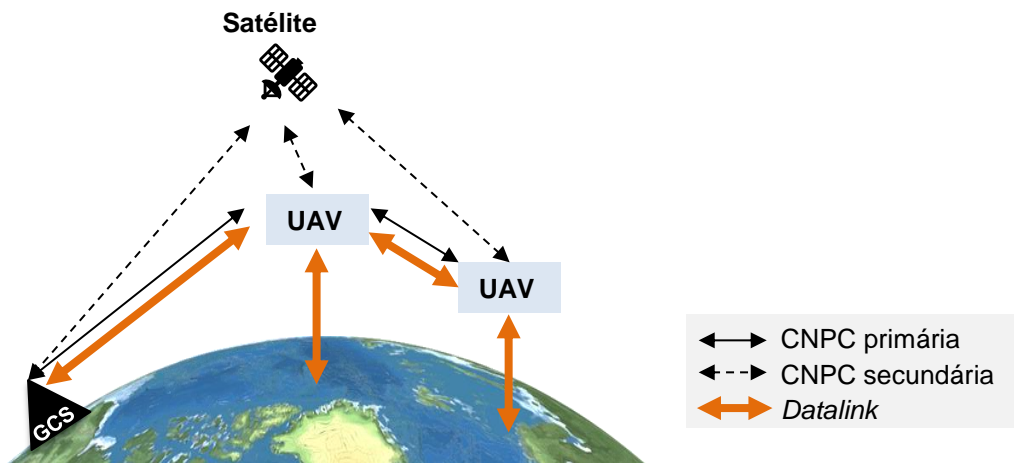


Figura 2.3 – Representação genérica das ligações de uma FANET (adaptado de [ZeZL16]).

A ligação CNPC primária corresponde à ligação direta entre os UAVs e GCS. Já no caso da CNPC secundária, a comunicação entre a GCS e os UAVs é estabelecida via Satélite. Esta última apresenta um atraso maior, pelo que normalmente é usada como ligação de *backup*. A ligação CNPC tem como objetivo principal garantir uma operação segura de todos os UAVs. Estas ligações devem ser fidedignas, de baixa latência e seguras nos dois sentidos, DL e UL. Valores típicos das taxas de transmissão, R_b , associadas às ligações CNPC encontram-se apresentados na Tabela 2.4. O tipo de dados na ligação UL são mensagens de C2.

Tabela 2.4 – Taxas de transmissão das comunicações (adaptado de [JMAA17]).

Tamanho do UAV	$R_{b,UL}$ [kbps]	Tipo de dados na ligação DL	$R_{b,DL}$ [kbps]
Pequeno ($\leq 55\text{kg}$)	2,424	Básicos (estado do UAV)	4,008
Médio/Grande ($\geq 55\text{kg}$)	6,925	Básicos	13,573
		Básicos e radar meteorológico	34,133
		Básicos, radar meteorológico e vídeo	234,134

O fluxo de informação correspondente às ligações CNPC pode ser categorizado em três tipos: i) C2 da GCS para UAVs; ii) envio de dados sobre o estado do UAV para a GCS; e iii) troca de informações *sense-and-avoid* (SAA – sistema cujo objetivo é evitar colisões dos UAVs com outras aeronaves e/ou UAVs vizinhos, garantindo uma operação segura no espaço aéreo [LPZY16]) entre os UAVs (ligações denominadas por *Air-to-Air* – A2A).

As ligações de dados, representados a laranja na Figura 2.3, correspondem aos dados dos sensores instalados nos UAVs (por exemplo, vídeo ou imagens). Ao contrário das CNPC, estas apresentam uma maior tolerância aos requisitos de latência nas comunicações. A capacidade associada a este tipo de ligações depende dos cenários de operação, descritos na secção seguinte, podendo variar entre dezenas de kbps e dezenas de Gbps [ZeZL16].

Tipicamente, o fluxo de dados em DL é superior ao correspondente às ligações UL. Para demonstrar esta assimetria, os autores de [ChFG12] apresentam um teste de voo de um UAV em que se registam débitos binários de 21 bytes por segundo e 349 bytes por segundo, para UL e DL, respetivamente.

Em [JMAA17] constata-se que, para além das ligações UL e DL anteriormente descritas, devem ser asseguradas as comunicações entre UAVs, ou seja, ligações A2A. Visto que cada UAV constitui um nó de uma rede móvel, tipicamente a descrição das comunicações entre os nós segue o modelo *Open System Interconnection* (OSI) que inclui as camadas física, de dados, de rede, de transporte e de aplicação.

Relativamente à camada de rede, que é responsável pelo encaminhamento de pacotes de dados, os protocolos a serem usados podem ser agrupados em seis categorias diferentes, caracterizadas em [JMAA17]: estáticos, proativos, reativos, híbridos, hierárquicos e os baseados em posição geográfica. O protocolo de encaminhamento a ser usado deve ser escolhido de acordo com a arquitetura da rede, a sua configuração, tamanho e a missão para a qual esta é destinada. O estudo dos protocolos de encaminhamento e a escolha do mais adequado está fora do âmbito desta dissertação.

Na camada física de dados, tipicamente, é usado o protocolo IEEE 802.11 e as suas extensões, como, por exemplo, a norma IEEE 802.11g que opera a 2,4 GHz, tem uma largura de banda (LB – tipicamente representada pelo símbolo Δf) de 20 MHz e uma taxa de transmissão de pico de 54 Mbps, ou IEEE 802.11n, que opera a 2,4 GHz ou 5 GHz, com uma LB correspondente de 20 MHz ou 40 MHz, respetivamente, podendo atingir uma taxa de transmissão máxima de 600 Mbps [JMAA17] e [NetC18].

Para além da escolha dos protocolos utilizados, é importante que as condições da camada física, que dependem do ambiente em que os UAVs operam, sejam bem definidas. De acordo com [BeST13], na escolha do modelo de propagação, é necessário ter em conta os fatores como: variação da distância entre o transmissor e o recetor; direção das antenas do transmissor e do recetor; efeitos de reflexão do solo; efeitos de sombra causados pela estrutura do UAV e do equipamento eletrónico a bordo; efeito da atitude na qualidade da ligação; condições ambientais; interferência proveniente de fontes externas e a velocidade/mobilidade do UAV.

Na definição dos canais de propagação nas redes de UAVs, nomeadamente A2A, A2G e G2A, devem ser analisadas as componentes multipercurso (*Multi-Path Components* – MPCs) que ocorrem devido

às reflexões causadas pela superfície terrestre, edifícios, vegetação ou até a própria estrutura do UAV, o desvanecimento e a absorção pela superfície terrestre e/ou obstáculos. Dado que as características do canal dependem do meio em que ocorrem as comunicações, o desempenho da propagação do sinal associado aos canais anteriormente referidos é diferente [AhKJ16]. A componente MPC que mais impacto tem no desempenho do sinal é a que é refletida pela superfície terrestre, ocorrendo principalmente no cenário marítimo e em LOS, dando origem ao modelo dos dois raios, em que se consideram apenas os raios direto e refletido.

Relativamente ao canal de propagação A2A, a caracterização deste depende da altitude dos UAVs em relação ao solo e a velocidade relativa dos UAVs, sendo que para grandes altitudes e em LOS considera-se a aproximação ao modelo de propagação em espaço livre [KGMF18].

O enfoque da presente dissertação de mestrado recai sobre a análise da cobertura, ou seja, da propagação do sinal na camada física, o que determina o alcance máximo da transmissão, e da capacidade, que passa por analisar o número máximo de canais de dados associado a uma determinada missão.

2.3.3. Cobertura e Capacidade

Nesta dissertação, considera-se cobertura a distância entre a GCS e o alvo, $r_{c,máx}$, sobre a superfície terrestre. Considerando que todos os UAVs dispostos em linha operam à mesma altitude, e apresentam as mesmas características, o valor da cobertura é dado por:

$$r_{c,máx} [\text{km}] = r_1 [\text{km}] + \sum_{i=2}^N r_i [\text{km}] \quad (2.1)$$

onde:

- N : número total de UAVs que constituem a rede;
- r_1 : distância terrestre entre o UAV backbone e a GCS;
- r_i : distância terrestre entre UAV _{$i-1$} e UAV _{i} .

Para efeitos de dimensionamento da rede irá considerar-se a aproximação representada por (2.2) pelo que a cobertura será dada por (2.3).

$$r_i [\text{km}] \cong d_i [\text{km}] \quad (2.2)$$

$$r_{c,máx} [\text{km}] \cong r_1 [\text{km}] + \sum_{i=2}^N d_i [\text{km}] \quad (2.3)$$

onde:

- d_i : alcance da i -ésima ligação.

A Figura 2.4. representa um exemplo com distâncias associadas ao cálculo da cobertura de uma rede *ad-hoc* hierárquica constituída por 3 UAVs, em que h é a altitude dos UAVs em relação MSL e θ_B é a largura do feixe a -3 dB da antena do UAV *backbone*.

A distância entre o transmissor e o recetor, d , dada por (2.4), corresponde a uma combinação entre a expressão do balanceamento de potência com a expressão do modelo adequado às perdas de percurso [Corr18].

$$d_{[\text{km}]} = 10^{\frac{P_t [\text{dBm}] + G_t [\text{dBi}] - P_r [\text{dBm}] + G_r [\text{dBi}] - L_{p,ref} [\text{dB}]}{10 \cdot \alpha}} \quad (2.4)$$

onde:

- P_t : potência transmitida;
- G_t : ganho da antena do transmissor;
- P_r : potência recebida;
- G_r : ganho da antena do recetor;
- α : decaimento médio de potência;
- $L_{p,ref}$: atenuação do percurso de referência.

No caso da propagação em espaço livre o decaimento médio de potência é $\alpha = 2$.

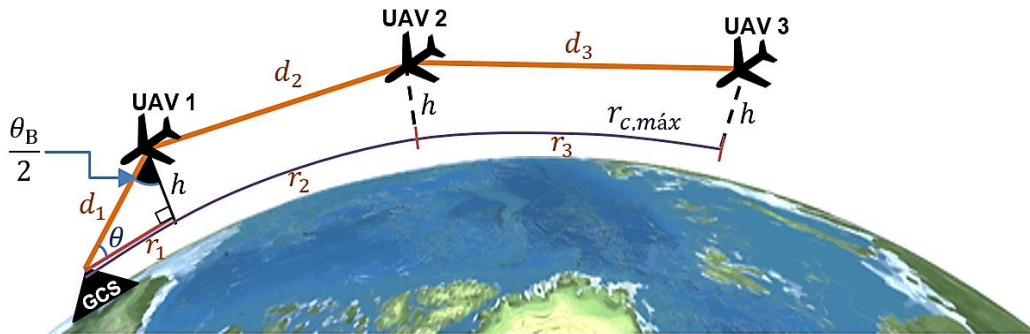


Figura 2.4 – Rede de 3 UAVs dispostos em linha (baseado em [GrRB15] e [MSBD16]).

Nos cenários em estudo na presente dissertação considera-se que, em todas as ligações, as antenas do transmissor e do recetor se encontram em LOS. Diz-se que dois terminais, em ambiente marítimo e sem obstáculos entre eles, tal como exemplificado na Figura 2.5, se encontram em LOS se a distância entre os mesmos não ultrapassar a distância de rádio-horizonte (RH), $d_{máx,RH}$, dada por (2.5) [Serr17].

$$d_{máx,RH} [\text{km}] \cong 4,12 \times (\sqrt{h_e [\text{m}]} + \sqrt{h_r [\text{m}]}) \quad (2.5)$$

onde:

- h_e : altura da antena do transmissor;
- h_r : altura da antena do recetor.

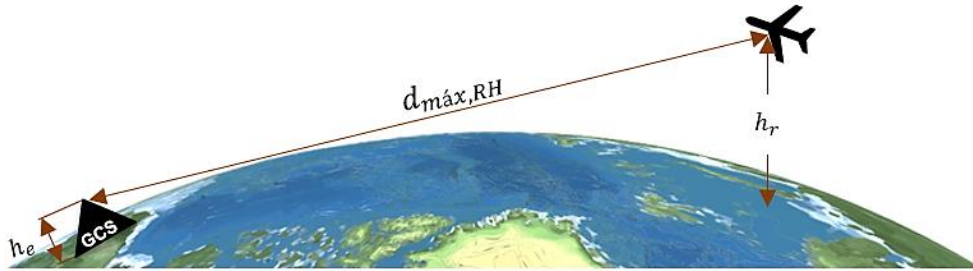


Figura 2.5 – Distância de rádio-horizonte entre dois terminais.

Relativamente à capacidade da rede, $R_{b,cap}$, esta corresponde à taxa de transmissão máxima suportada na rede. No caso da disposição dos UAVs em linha e assumindo que não há trocas de dados SAA entre os diferentes nós devido à sua taxa de transmissão relativamente reduzida, considera-se que a capacidade corresponde à taxa de transmissão máxima suportada pela ligação entre a GCS e o UAV *backbone*. Desta forma, o número de UAVs que constituem a rede e o número de UAVs a transmitir informação gráfica, devem ser tais que o valor total do fluxo de informação correspondente seja menor ou igual à capacidade da rede, i.e., que (2.6) seja satisfeita.

$$R_{b,cap} [\text{bps}] \geq N \times R_{b,CNPC} [\text{bps}] + M \times R_{b,vídeo} [\text{bps}] \quad (2.6)$$

onde:

- $R_{b,CNPC}$: taxa de transmissão dos dados CNPC;
- $R_{b,vídeo}$: taxa de transmissão correspondente ao vídeo;
- M : número de fontes de vídeo seleccionadas pela GCS.

É de referir que a capacidade e a cobertura são dois parâmetros dependentes. Ao tipo de modulação utilizado corresponde um determinado valor máximo de taxa de transmissão suportado pela ligação ao qual, por sua vez, está associado valor de sensibilidade do recetor e a potência máxima de transmissão que, juntamente com os ganhos das antenas de transmissão e receção e perdas de percurso, determinam o alcance máximo da ligação. Tipicamente, maiores valores de taxa de transmissão traduzem-se em distâncias máximas de ligação menores, pois requerem uma maior LB, o que leva ao aumento de ruído no canal e, conseqüentemente, para a mesma potência de transmissão, diminuição da relação sinal-ruído (SNR). Desta forma, no dimensionamento de uma rede, é importante analisar as duas métricas de desempenho referidas. Para além disso, quanto maior a LB disponível, maior é a capacidade da rede e, conseqüentemente, maior é a cobertura associada.

2.4. Serviços e Cenários de Operação

No projeto de uma rede *ad-hoc* de UAVs é crucial ter em conta o cenário em que os UAVs irão operar, que pode apresentar diferentes propósitos seguidamente descritos [BuPR17]:

- Vigilância/Monitorização: as aplicações incluídas neste grupo usam os UAVs equipados com dispositivos de captura de imagens, vídeos ou áudio em tempo real, por forma a recolher os dados necessários. Exemplos de aplicações deste tipo são busca e seguimento, monitorização de tráfego urbano, reconhecimento aéreo e/ou marítimo nas missões militares, ou gestão agrícola no âmbito civil [BuPR17]. Um exemplo de aplicação de busca e seguimento encontra-se representado na Figura 2.6, em que vários UAVs realizam o varrimento de uma determinada área, recolhendo imagens, até encontrarem um alvo específico. Quando o alvo é encontrado, é estabelecida uma ligação entre o alvo e a GCS [AHSY14].

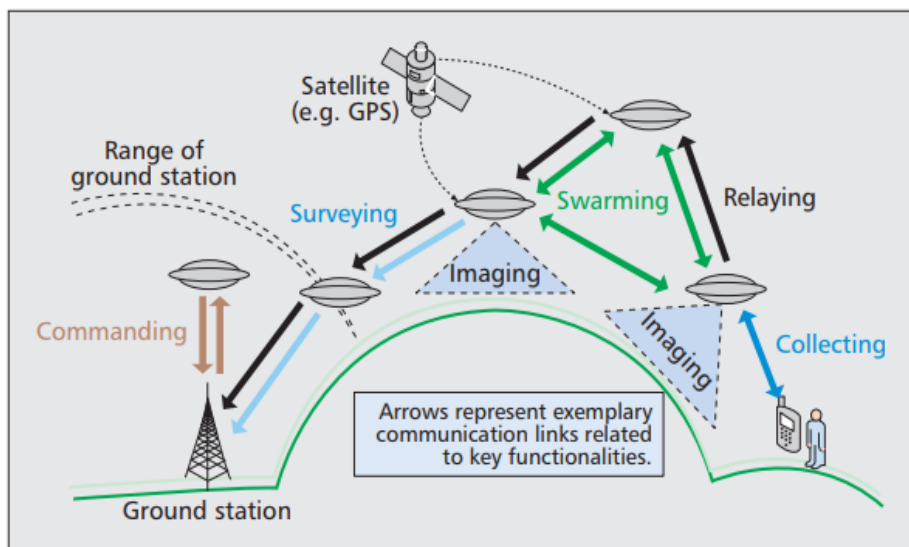


Figura 2.6 – Exemplo de aplicação: missão SAR (extraído de [AHSY14]).

- Detecção ambiental: as aplicações incluídas neste grupo usam os UAVs como sensores, por forma a detetar fenómenos ambientais, como por exemplo incêndios, numa determinada área. Neste tipo de aplicações, pode ser necessária uma variada quantidade de dados para avaliar diversos fenómenos ambientais, tais como, temperatura, humidade, pressão, intensidade da luz e/ou nível de poluição [BuPR17].
- Redes de retransmissão: neste tipo de aplicações os UAVs são utilizados como relés de comunicação, permitindo, por exemplo, transmitir, de forma eficiente e segura, informações recolhidas por sensores terrestres, para centros de controlo e tratamento de dados terrestres distantes. Outro tipo de aplicação deste tipo é a extensão das redes Wi-Fi [BuPR17].

De acordo com o meio ambiente em que as redes de UAVs desempenham a sua função, os cenários de operação podem ser agrupados em 5 grupos cujas características se encontram descritas na Tabela 2.5 [KGMF18]. Na presente dissertação são avaliados cenários de operação que envolvem deteção e seguimento de alvo em ambiente marítimo.

No caso dos cenários de propagação sobre o mar, a altura das ondas pode originar MPCs adicionais e, no caso de operações a muito baixas altitudes poderão ocorrer difrações do feixe eletromagnético (EM). Para além disso, em casos de variações anómalas das condições atmosféricas (como por exemplo, “inversão de temperatura”), podem ocorrer ductos – fenómenos que originam propagação guiada na atmosfera em contraste com a propagação em espaço livre, causando um aumento dos níveis de interferência [KGMF18]. Neste estudo não serão consideradas as condições atmosféricas adversas.

Tabela 2.5 – Características dos cenários de operação dos UAVs (extraído de [KGMF18]).

Cenário	Características	Fatores importantes
Urbano/ Suburbano	Relação das áreas abertas e com construções; distribuição de tamanhos e alturas dos edifícios, de terminais terrestres (veículos e/ou pedestres), das características da vegetação e/ou corpos de água.	Material dos edifícios e telhados
Rural/ Campo aberto	Tipo e densidade da vegetação, distribuição e tamanho dos edifícios dispersos	Rugosidade da superfície, tipo do solo, nível de humidade
Acidentado/ Montanhoso	Alturas e declives do terreno, distribuição e tipo de vegetação e distribuição e tamanho dos possíveis edifícios	Rugosidade e declive do terreno
Arborizado	Distribuição, densidade e altura da vegetação	Distribuição e densidade das folhas e ramos
Sobre a água	Tipo das águas (mar, rio ou lago), distribuição e tamanho de objetos sobre a superfície da água (ex.: plataformas, navios, etc.), distribuição de objetos no litoral (ex.: edifícios, tanques de água, etc.) e variação da superfície da água (ex.: estado do mar)	Coefficiente de reflexão modificado, efeito dos ductos no caso de cenários em ambiente marítimo

Algumas missões realizadas pelas redes de UAVs, como é o caso da deteção e seguimento de alvo, vigilância e/ou monitorização, ou SAR, exigem transmissão de vídeo para a GCS, o que se traduz na necessidade de sistemas de comunicação com maior capacidade, face aos utilizados nas missões que dispensam o envio de informação gráfica. Alguns exemplos das taxas de transmissão associadas aos diferentes formatos de vídeo/imagem são as que se representam na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Características dos diferentes formatos de vídeo (extraído de [Moto07]).

Aplicação	Resolução [pixel]	Nº de Tramas por Segundo [fps]	Taxa de Transmissão Típica [kbps]
Monitorização	176x120	30	150
		10	50
Resposta de Emergência	352x240	30	600
		5	100
Investigação, Reconhecimento	640x480	30	11 200
		10	350

2.5. Estado da Arte

De acordo com [Rodr12], nas operações de deteção e seguimento de alvo, que incluem SAR na costa, é essencial garantir a disponibilidade permanente de *vídeo broadcast*, uma boa qualidade de imagem e uma taxa de transmissão de dados elevada. A Tabela 2.7 traduz os requisitos de comunicações, apresentados pelo autor, para as missões SAR e vigilância.

Em [Rodr12], foi simulado o efeito das MPCs numa ligação A2G, para frequências de 2,4 GHz e 5 GHz, a uma altitude de 100 m e 600 m, analisando a potência na receção. Foram, também, efetuadas simulações do alcance dos sistemas de transmissão recorrendo a modelos de propagação adequados, com base na potência de receção e na sensibilidade dos equipamentos, para altitudes de operação de 150 m e 250 m. Para além das simulações, [Rodr12] apresenta resultados dos testes de voo realizados sobre o mar a 600 m de altitude, em que se testa o SC do *link* do piloto automático *Piccolo* (2,4 GHz), registando os parâmetros RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), que corresponde à potência do sinal recebido, e ACK Ratio (*Acknowledgment Ratio*), que se refere à percentagem de pacotes recebidos em relação aos enviados. Nos testes de voo sobre o mar, [Rodr12] observa dois efeitos principais em termos de propagação: o multipercurso, que origina a variação constante de sinal (RSSI) que se verifica para toda a duração do voo; e o desvanecimento lento, que se pode verificar na diferença da potência que se observa no início e no final do voo.

Tabela 2.7 – Requisitos para missões SAR e de vigilância (extraído de [Rodr12]).

Ligação Tx – Rx	Tipo de Dados	Requisitos				
		Alcance (LOS) [km]		Taxa de Transmissão [Mbps]		Disponibilidade [%]
		SAR	Vigilância	SAR	Vigilância	
UAV – GCS	Telemetria <i>Piccolo</i>	12 a 20	20	0,175		> 95
	Vídeo			4	2 a 4	
GCS – UAV	C2 <i>Piccolo</i>			0,175		> 99
UAV – Alvo	Vídeo			2		> 90

Em [Rodr12], observa-se ainda que ao considerar o modelo de propagação em espaço livre (*Free Space Path Loss* – FSPL) no cálculo do alcance do SC, a atenuação na propagação em situação real é sempre maior que a do modelo em questão e, como tal, o alcance das ligações deve ser sempre inferior ao que se verifica para o espaço livre.

Em [TeBe14], é apresentada uma análise da escalabilidade das redes FANET através das simulações de voo 3D sobre dois tipos de terreno: liso e rugoso, em que os UAVs mantêm uma altitude constante sobre o solo. Desta forma, a altitude dos UAVs irá sofrer maiores variações no caso do terreno rugoso, pelo que se esperam maiores perdas de sinal neste tipo de terreno. Os autores consideram o modelo de propagação em espaço livre e uso de antenas cujo feixe pode ser direccionado, concentrando a maior quantidade de energia numa determinada região. No entanto, pequena parte de energia é dissipada noutras direções. Os autores analisam a interferência causada pelos UAVs vizinhos, chegando à conclusão que quanto menor a abertura do feixe a -3 dB, menor é o impacto causado pelos nós vizinhos e, conseqüentemente, maior o número de ligações A2A simultâneas admitidas.

[GrRB15] avalia o impacto do tamanho das FANET na taxa de transmissão, consumo de energia e alcance das ligações. Os autores concluem que à medida que o número de UAVs na rede aumenta: o valor da taxa de transmissão útil por unidade de energia diminui exponencialmente, o que se deve ao facto da LB disponível na rede diminuir com o aumento do número de nós; o alcance máximo das ligações (cobertura da rede) aumenta linearmente; e o atraso na propagação, *jitter*, apresenta um aumento exponencial, o que se deve principalmente ao facto da adição de cada nó na rede causar o aumento da possibilidade de falha no SC.

Em [BAAS17], é apresentado o módulo *Feedback Communications Control* (FCC) para UAVs que tem a capacidade de avaliar a Qualidade de Serviço (QoS) associada às ligações destes sistemas, considerando as restrições impostas pelas comunicações em ambientes marítimos e os requisitos inerentes às missões de SAR. Neste estudo é analisado o problema de manter uma ligação, com uma determinada QoS definida pelo utilizador, entre uma GCS e um UAV, que tem a função de retransmitir

o sinal do UAV, que executa a missão, para a GCS, durante as operações marítimas. Os autores propõem uma estratégia de *feedback*, que consiste em comandar e otimizar a mobilidade do UAV retransmissor e adaptar o algoritmo à QoS desejada. O desempenho da estratégia proposta por [BAAS17] é ilustrada através das simulações computacionais e resultados experimentais. Neste estudo, a QoS está associada ao balanço entre a taxa de transmissão e o consumo de energia. O consumo de energia é estimado tendo em conta o impulso do UAV, desprezando o equipamento eletrónico a bordo. Assim, o controlo deste parâmetro é feito atuando sobre a velocidade do UAV. Relativamente à estimativa da taxa de transmissão, esta é uma tarefa complexa do ponto de vista computacional, visto que depende de vários fatores externos como por exemplo, as antenas utilizadas e a sua orientação ou as condições meteorológicas. Para obter uma aproximação da taxa de transmissão, os autores usam os valores da potência de transmissão, da sensibilidade do recetor, dos ganhos do transmissor e do recetor e da modulação utilizada presentes nas especificações da tecnologia utilizada, neste caso TP-LINK WN-722 2,4 GHz IEEE802.11b/g/n. Por forma a testar o módulo do algoritmo destinado a estimar a taxa de transmissão, foi realizado um teste de campo em que se usaram dois dispositivos TL-WN722N IEEE802.11b/g/n, um na GCS e outro num UAV a sobrevoar a uma altitude de 40 m sobre o solo. O principal objetivo do teste era observar a diferença entre a taxa de transmissão real registada e os valores estimados através dos cálculos efetuados usando os parâmetros da folha de especificações e considerando o modelo de propagação em espaço livre. Os resultados dos testes realizados revelam, também, que a taxa de transmissão é tanto maior quanto menor a distância entre o transmissor e o recetor.

Em [BJAS17], os autores apresentam um estudo semelhante ao apresentado em [BAAS17], sendo que a diferença consiste na adição de UAVs retransmissores entre a GCS e o nó final. Neste caso, a QoS é medida através do balanço entre a LB, o consumo de energia e o número de veículos utilizados simultaneamente.

Em [BBAS17], é abordado o problema de recolha eficiente de dados, armazenados em boias sensoriais implantadas em zonas desconhecidas do mar para a análise oceanográfica, biologia marinha e potenciais mudanças climáticas, por um grupo de UAVs. Neste estudo, o UAV que corresponde ao nó final tem como função recolher dados das boias, que serão transmitidos para a GCS através dos UAVs correspondentes aos nós intermédios. Os autores propõem uma arquitetura de 3 camadas, que permite realizar a busca das boias, estabelecer uma ligação com as mesmas e formar uma rede *ad-hoc* de UAVs, transmitindo os dados oceanográficos para a GCS. Foram realizadas várias simulações que revelam que o algoritmo proposto em [BBAS17] é uma ferramenta que permite fazer um planeamento da rota que otimiza a área de cobertura na fase da busca e a QoS na transmissão de dados entre as boias e a GCS.

Capítulo 3

Desenvolvimento e Implementação do Modelo

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma caracterização do UAS considerado neste estudo, a definição dos dois cenários de operação analisados e uma visão geral do modelo desenvolvido. De seguida é descrito o processo de formulação do modelo, nomeadamente o dimensionamento da rede tendo em conta os parâmetros de cobertura e capacidade. Por fim, é apresentado o método de implementação do modelo e a aferição do mesmo.

3.1. Características do sistema UAV

Nesta dissertação considera-se como referência o mesmo sistema UAV utilizado no âmbito do projeto Seagull, esquematizado na Figura 3.1. Em conformidade com o mencionado na Secção 2.1, é composto pela plataforma aérea – o UAV ANTEX X02 *Extended*, por duas estações, que em conjunto constituem a GCS, uma de C2 (ETC2), cuja tarefa é controlar e monitorizar os subsistemas de bordo do UAV, e outra de *payload* (ETP), através da qual os dados relativos à missão são monitorizados.

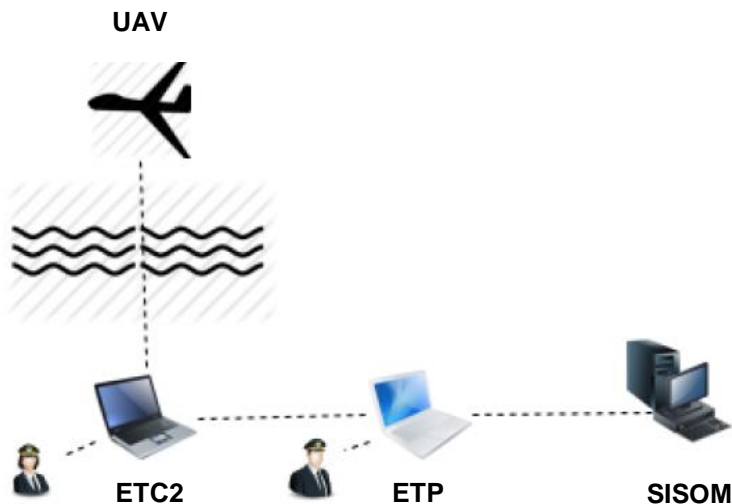


Figura 3.1 – Visão geral do sistema UAS (extraído de [Crit17]).

A Figura 3.2 representa as ligações, interfaces e protocolos, num diagrama de blocos funcional, correspondentes ao sistema representado na Figura 3.1.

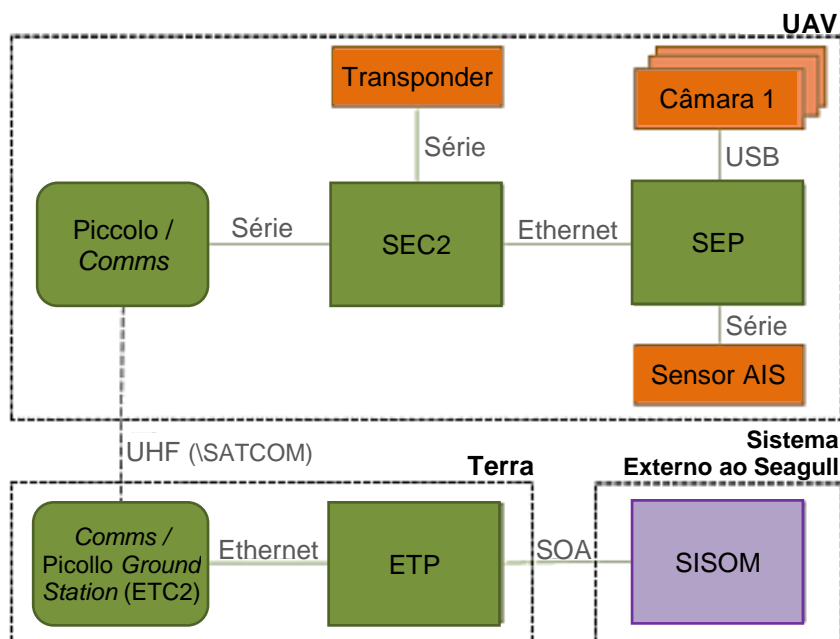


Figura 3.2 – Diagrama de blocos funcional do UAS (extraído de [Crit17]).

Relativamente à plataforma, o ANTEX-X02 *Extended*, representado na Figura 3.3, é composto por vários sistemas, que funcionam de forma integrada, tais como, estrutural, de propulsão, de comunicações, de energia, de *payload* e sistemas secundário e primário de voo, cuja descrição mais detalhada se encontra no Anexo A.

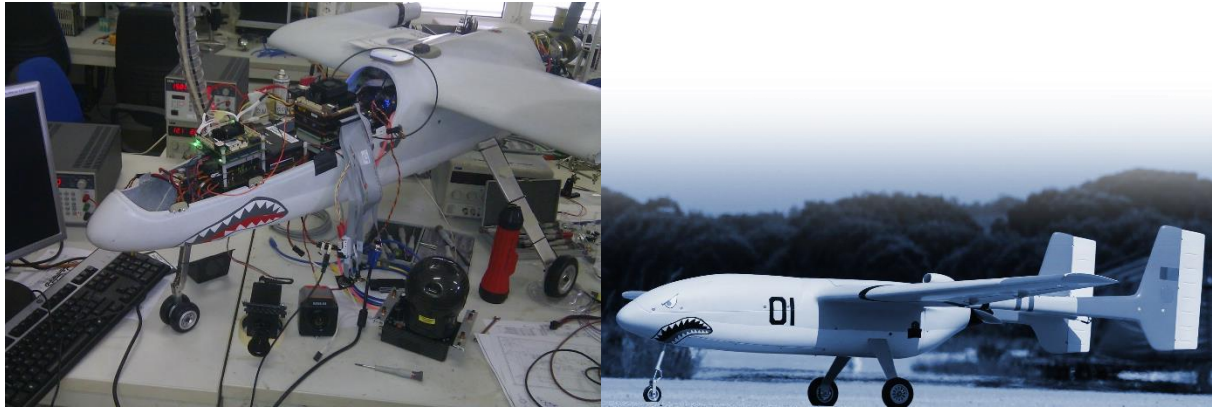


Figura 3.3 – UAV ANTEX-X02 *Extended* (extraído de [Oliv18]).

O sistema que controla a deflexão das superfícies de voo do UAV em função das referências de navegação é o piloto automático *Piccolo*, que comunica com os sensores e restantes subsistemas a bordo através do sistema embarcado de C2 (SEC2), ao qual está ligado por uma porta de comunicação série. O controlo da trajetória do UAV é realizado através do SEC2, que fornece ao *Piccolo* as referências de navegação, tendo por base a posição do UAV e a informação processada pelos sensores a bordo, disponibilizada pelo sistema embarcado de *payload* (SEP) [Crit17].

A ligação entre o UAV e o segmento terrestre é, tipicamente, estabelecida através de um *link* de comunicações em LOS na banda UHF e (dependendo da missão) uma ligação via satélite (SATCOM). Na Figura 3.4 encontra-se representado o diagrama do SC entre o segmento terrestre e o piloto automático do UAV.

A comunicação UHF é feita entre as frequências 2,4000 GHz e 2,4835 GHz, utilizando um *modem* da *MicroHard Systems*, modelo MHX-2400, com uma potência de transmissão entre os 10 mW e 1 W. A bordo do ANTEX-X02 *Extended* está instalada uma antena omnidirecional no plano horizontal, garantindo assim a comunicação com a GCS independentemente da orientação do UAV, e na GCS utiliza-se uma antena parabólica com um ganho de 24 dBi e uma largura de feixe horizontal e vertical de 10° e 14°, respetivamente. Com a configuração acima descrita, e em LOS, é possível obter ligações com alcance até 40 km [Crit17].

A transmissão de vídeo é realizada através de uma ligação dedicada e unidirecional. O transmissor, instalado no UAV, tem a função de adquirir, digitalizar, gravar, modular e transmitir o sinal para o recetor, que se encontra instalado na GCS. O equipamento a bordo permite variar a potência de transmissão entre dois níveis, 60 ou 250 mW, uma LB de 8,7 MHz e, em caso de necessidade, a acoplação de um amplificador que possibilita aumentar a potência transmitida para 1 W.

O SC atualmente presente não permite a operação dos UAVs em redes *ad-hoc*. O equipamento para troca de mensagens de C2 e telemetria, apesar de admitir configurações válidas para redes *ad-hoc*,

pelo facto de se encontrar integrado no piloto automático *Piccolo*, implica limitações na sua configuração. A solução fechada, fornecida pelo fabricante, não permite a troca de mensagens entre UAVs. A impossibilidade de os UAVs comunicarem em redes *ad-hoc* limita a sua operação em missões mais complexas.

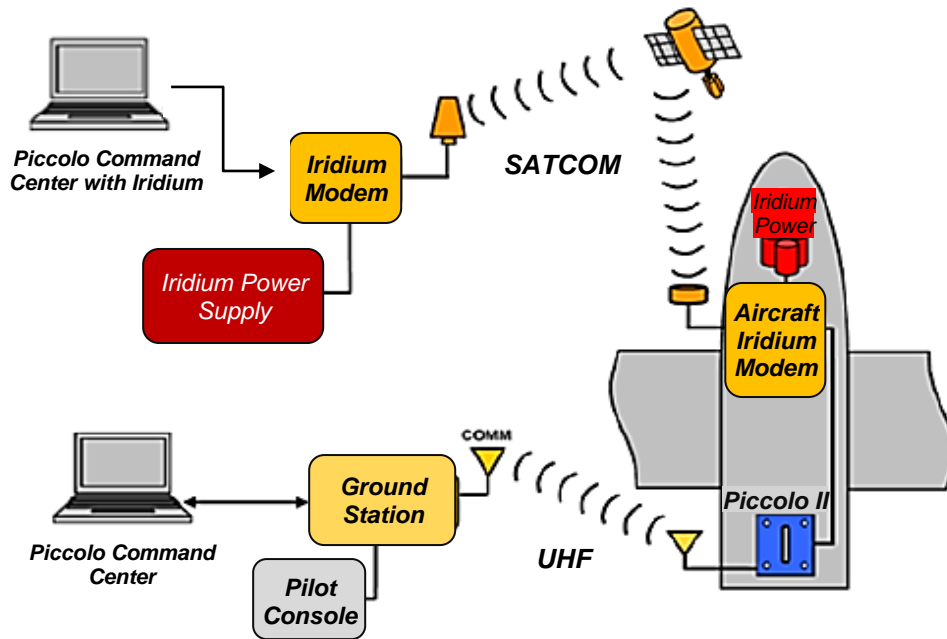


Figura 3.4 – SC entre o UAV e a GCS (extraído de [Crit17]).

Por forma a ultrapassar o problema acima identificado, pretende-se adquirir rádios *Pico Digital Data Link 2450* (pDDL2450) da *Microhard*, cujas especificações se encontram no Anexo B. Estes rádios permitem taxas de transmissão superiores a 20 Mbps, e vêm acompanhados de um *software* de configuração, que permite seleccionar diferentes valores de potência de transmissão e a modulação utilizada. Tendo em conta as características do rádio pDDL2450, este é adequado para aplicações mais complexas, como é o caso do fluxo de informação gráfica numa rede *ad-hoc* de UAVs. Com a sua integração no UAS da FA espera-se obter, por um lado uma ligação redundante para envio de mensagens de telemetria e C2, e por outro uma ligação multi-saltos que suporta fluxo de informação gráfica, entre a GCS e um UAV.

Na Figura 3.5 encontra-se uma esquematização simplificada do SC do UAS, representada através de um diagrama de blocos. Tal como se observa no diagrama de blocos, o SC atualmente existente encontra-se destacado a verde, sendo constituído por um *link* dedicado ao envio de informação gráfica, da plataforma aérea para a GCS, e o rádio MHX-2400, integrado no piloto automático *Piccolo*, destinado à troca de dados CNPC entre a estação terrestre e o UAV, sendo as mensagens de telemetria representadas com uma seta unidirecional de cor preta (ligação A2G) e as de C2 com uma seta unidirecional encarnada (ligação G2A). Por sua vez, o transmissor de vídeo dedicado encontra-se

sublinhado a magenta. Dadas as limitações do transmissor de vídeo dedicado face às características dos rádios pDDL2450, prevê-se a sua substituição por este último, em futuras missões UAV do CIAFA. O SC que se pretende implementar (para o qual esta dissertação contribui) encontra-se destacado a azul.

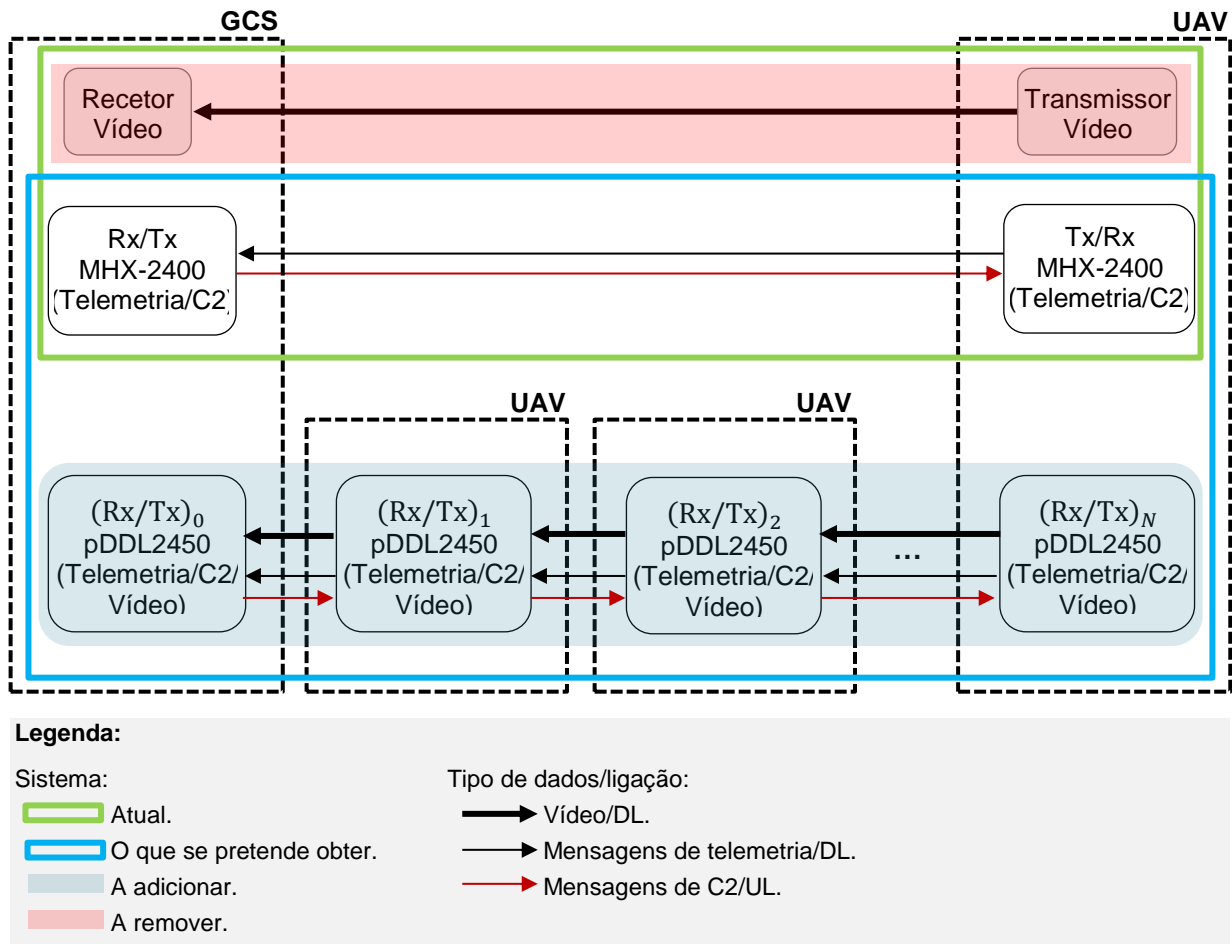


Figura 3.5 – SC do UAS atual e o que se pretende obter.

Relativamente às antenas, são utilizadas as TL-ANT2405CL nas plataformas aéreas e as TL-ANT2424B e OD12-2400 na GCS do cenário em linha e circular, respetivamente. A antena instalada nos UAVs é omnidirecional e tem um ganho de 5 dBi. A que se utiliza na GCS do cenário em que os UAVs se dispõem em linha é direcional e permite um ganho de 24 dBi e a que é utilizada na GCS do cenário circular é omnidirecional e tem um ganho de 12 dBi. As especificações mais detalhadas das antenas TL-ANT2405CL, TL-ANT2424B e OD12-2400 encontram-se nos Anexos C.1, C.2, e C.3, respetivamente.

Para além do alcance máximo imposto pelo SC, é necessário ter em conta o limite imposto pela autonomia do UAV. Note-se que considerando um qualquer cenário de missão realista usando um UAV é necessário garantir que a soma dos tempos de ida e volta até ao alvo e de execução da missão não ultrapassem o tempo de autonomia do UAV, independentemente do alcance do seu SC (3.1). Neste contexto, deve também ser considerada uma margem de segurança no cálculo do tempo referente à autonomia do UAV.

$$t_{aut} [h] = 2 \times t_{alvo,m\acute{a}x} [h] + t_{exec} [h] + t_m [h] \quad (3.1)$$

onde:

- t_{alvo} : tempo que o UAV demora a percorrer a distância entre a GCS e o alvo;
- t_{aut} : autonomia do UAV;
- t_{exec} : tempo de execução da missão;
- t_m : tempo de margem de segurança.

De acordo com os registos oficiais das configurações dos UAVs ANTEX-X02 *Extended* [CIAF18] estima-se, para cada um dos UAVs, uma autonomia entre 6 h a 12 h – tempo que varia de acordo com a configuração do *payload* correspondente à missão. Por exemplo, um dos UAVs testado para as missões em estudo – seguimento de alvos e deteção de ameaças, tem um volume do depósito de combustível estimado de 6,5 l e um consumo médio aferido de 1,1 l/h, que se traduz numa autonomia de, aproximadamente, 6 horas. Por sua vez, um UAV semelhante, cujo alcance/consumo foi afinado especificamente para uma missão de voo do Porto Santo às ilhas Selvagens, tem um volume do depósito de combustível estimado de 11,5 l e um consumo médio aferido de 0,75 l/h, o que resulta numa autonomia de, aproximadamente, 15 horas.

Conhecendo a velocidade de cruzeiro característica do UAV e o tempo máximo disponível para o percurso entre a GCS e o alvo, que é obtido através da manipulação de (3.1) e dado por (3.2), obtém-se o alcance máximo da rede imposto pela autonomia do UAV, $d_{m\acute{a}x,AU}$, dado por (3.3).

$$t_{alvo,m\acute{a}x} [h] = \frac{1}{2} (t_{aut} [h] - t_{exec} [h] - t_m [h]) \quad (3.2)$$

$$d_{m\acute{a}x,AU} [km] = v_{[km/h]} \times t_{alvo,m\acute{a}x} [h] \quad (3.3)$$

onde:

- v : velocidade de cruzeiro do UAV;
- $t_{alvo,m\acute{a}x}$: tempo máximo disponível para o percurso entre o alvo mais afastado e a GCS.

Com base na capacidade do depósito de combustível e o consumo médio aferido, obtém-se o tempo de autonomia estimado para uma determinada missão, dado por (3.4).

$$t_{aut} [h] = \frac{V_{[l]}}{C_{[l/h]}} \quad (3.4)$$

onde:

- V : volume do depósito de combustível do UAV;
- C : consumo médio do combustível do UAV, aferido para uma determinada missão.

O UAV está equipado com um gerador e o seu sistema de energia permite-lhe fornecer até 100 W de forma contínua aos sistemas de bordo, permitindo desta forma assegurar os 2,4 W necessários para o funcionamento do SC (ver Anexos A.2 e A.4). O consumo médio de 1,1 l/h acima referido já tem em consideração o consumo elétrico dos sistemas a bordo.

O valor da distância máxima entre a GCS e o alvo, dada por (3.3), é tido em conta no modelo desenvolvido nesta dissertação.

3.2. Definição de Cenários

Na presente Dissertação de mestrado são avaliados dois cenários de operação, seguidamente descritos, correspondendo ambos ao ambiente marítimo, com ligações em LOS.

3.2.1. Cenário L – Formação em Linha

O primeiro cenário considerado corresponde ao seguimento de um determinado alvo em ambiente marítimo, como é o caso de um naufrago, ou patrulhamento marítimo, apresentando uma estrutura hierárquica que se descreve de seguida.

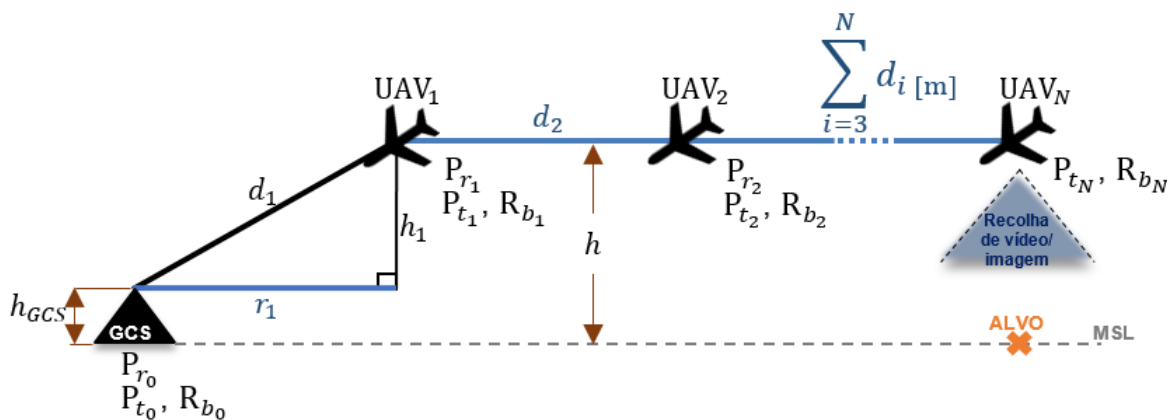


Figura 3.6 – Formação em linha de N UAVs.

Neste caso, os UAVs encontram-se posicionados ao longo da linha que liga o alvo à GCS, por forma a retransmitir informação enviada pelo UAV que tem a função de recolher informações sobre o naufrago, até a GCS que se encontra localizada num aeródromo, junto à costa. Considera-se que o UAV mais distante da GCS depois de alcançar o ponto de interesse, encontra-se em modo de seguimento autónomo do alvo, enviando para a GCS informação gráfica do mesmo. Os restantes nós retransmitem informação proveniente do UAV mais afastado até à GCS. Os UAVs voam a uma altitude que pode variar entre os 50 m e 500 m, trocando mensagens de telemetria e C2 com a GCS. Tanto os dados de telemetria, como os de C2 ocupam 300 bytes, e são enviados com uma taxa de atualização de 10 Hz,

o que se traduz numa taxa de transmissão de 0,024 Mbps. A Figura 3.6 é um exemplo do cenário descrito, em que um conjunto de N UAVs se encontra posicionado ao longo da linha que liga o alvo à GCS, à mesma altitude, h , em relação ao MSL.

A função do nó mais afastado da GCS, UAV_N , é recolher informações (imagens/vídeo) sobre o alvo e transmiti-las ao UAV que lhe é mais próximo, UAV_{N-1} , correspondendo este último ao nó retransmissor. Este, depois de receber os dados do UAV_N , transmite-os ao UAV_{N-2} . O processo repete-se até ao UAV mais próximo da GCS, UAV_1 , que tem a função de transmitir os dados para a GCS. Note-se que neste exemplo apenas o UAV extremo, UAV_N , transmite informação gráfica do alvo de interesse. Todos os restantes UAVs simplesmente retransmitem essa informação. No entanto, para além do exemplo acima representado, podem surgir situações em que, ao longo da linha que liga o UAV_N à GCS, existem mais que um alvo, havendo assim mais do que um UAV a transmitir vídeo/imagens, sendo que no limite existem N fontes de informação gráfica.

Para a transmissão da informação gráfica existem duas possibilidades:

- Transmissão *raw*, trama a trama, de uma imagem PAL (720x576) x 3 canais x 8 bits/pixel, com uma taxa de atualização de 1 trama a cada 5 segundos, o que corresponde a uma taxa de transmissão de, aproximadamente, 2 Mbps;
- Transmissão contínua de um *stream* de vídeo, com uma taxa de transmissão até 4 Mbps.

A Tabela 3.1 representa as taxas de transmissão associadas ao fluxo de dados referente ao Cenário L.

Tabela 3.1 – Taxa de transmissão do fluxo de dados dos cenários de aplicação analisados.

Tipo de dados	UL	DL		
	C2	Telemetria	Vídeo	
			Trama a trama	Stream
R_b [Mbps]	0,024	0,024	2	4

Neste cenário de operação pretende-se determinar o alcance máximo da missão, que corresponde à distância entre o UAV mais afastado e a GCS. Note-se que esta medida determina também a área da busca (ao largo da costa, a partir da GCS) que é possível alocar numa determinada missão, dado o número de UAVs disponíveis. Por outro lado, dada a LB limitada para a transmissão de informação, será analisada a capacidade do sistema de transmissão utilizado por forma a determinar o alcance máximo absoluto e o respetivo número máximo de UAVs para a realização desta missão.

3.2.2. Cenário C – Formação Circular

O segundo cenário considerado nesta dissertação apresenta uma arquitetura distribuída, tal como apresentado na Figura 3.7. Neste cenário um grupo de N UAVs move-se de forma coordenada em

torno de uma coluna de navios, em alto mar, seguindo um caminho circular de referência, cujo centro coincide com o centro geométrico do conjunto de embarcações, que se desloca solidário com a coluna. Pretende-se que o raio do caminho circular de referência seja o maior possível, de modo a antecipar ao máximo uma potencial ameaça. A altitude, h , dos UAVs pode variar entre os 50 m e 500 m. Considera-se, também, que os UAVs têm características homogêneas e que (3.5) é satisfeita, i.e., que todos os nós se encontram à mesma altitude em relação ao MSL.

$$h \cong h_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.5)$$

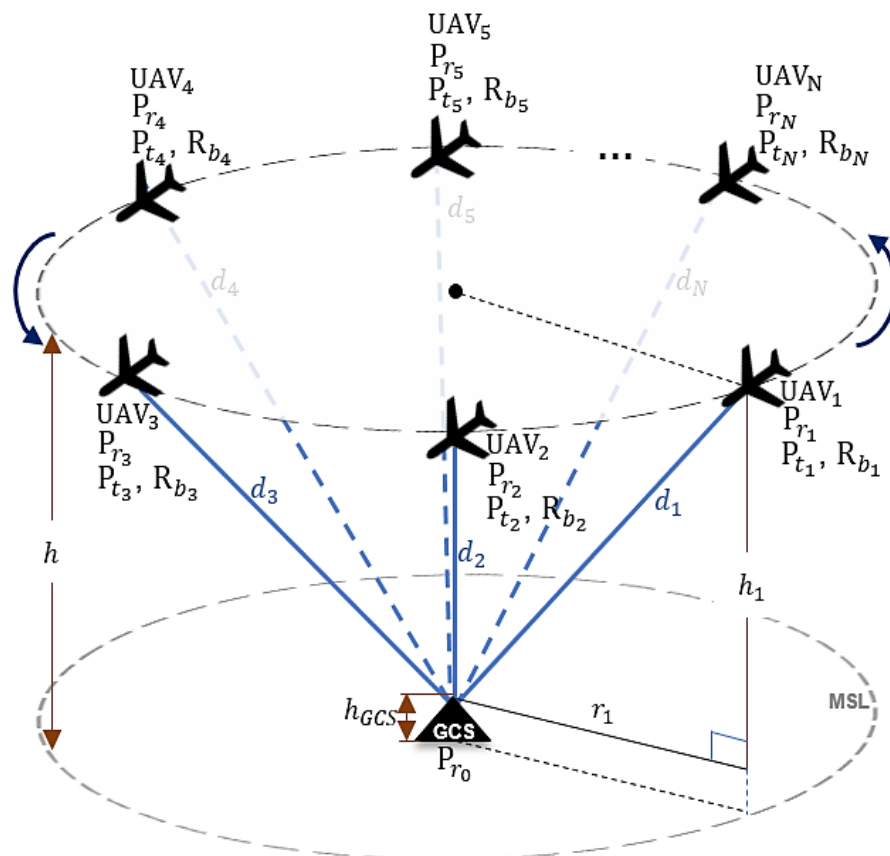


Figura 3.7 – Esquemática da formação circular de N UAVs.

É na GCS, que se encontra a bordo de um dos navios, que se estabelecem e enviam as referências de posição para cada UAV, de modo a assegurar uma distribuição adequada dos UAVs em redor da coluna de navios. Relativamente aos dados CNPC, cada UAV possui uma matriz que a cada instante é atualizada com a informação, enviada pela GCS, de posição atual de cada um dos UAVs e a respetiva referência. A troca destes dados pode ser realizada diretamente entre o UAV e a GCS, ou por saltos, usando outros UAVs como retransmissores. Considera-se que a GCS deve ser capaz de estabelecer uma ligação bidirecional com todos os UAVs em simultâneo, por forma a enviar dados de C2 e receber respetiva telemetria ao longo do caminho circular. Os dados referentes à telemetria e às mensagens de C2 ocupam 300 bytes cada, e são enviados com uma taxa de atualização de 10 Hz, o que se traduz

numa taxa de transmissão de 0,024 Mbps. Adicionalmente, assume-se que cada UAV tem capacidade de estabelecer uma comunicação unidirecional com a GCS para envio de vídeo. Considera-se que a GCS pode, a cada instante, selecionar quais as fontes de vídeo que pretende visualizar, sendo visualizadas as N fontes no caso extremo. Existem duas possibilidades para a transmissão de vídeo:

- Transmissão *raw, frame a frame*, de uma imagem PAL (720x576) x 3 canais x 8 bits/pixel, com uma taxa de atualização de 1 trama a cada 5 segundos, o que corresponde a uma taxa de transmissão de, aproximadamente, 2 Mbps;
- Transmissão contínua de um *stream* de vídeo, com uma taxa de transmissão de até 4 Mbps.

As taxas de transmissão associadas ao fluxo de dados referente ao Cenário C apresentam valores iguais aos do Cenário L, representados na Tabela 3.1.

Note-se que no exemplo considerado assume-se que o navio em que se localiza a GCS coincide com o centro geográfico da circunferência de referência, encontrando-se assim à mesma distância de todos os UAVs que constituem a rede.

Pretende-se, neste cenário, calcular o raio máximo do círculo de referência em torno da coluna de navios, tendo em conta o número de UAVs utilizados, a modulação utilizada e as características do SC.

3.3. Visão Geral do Modelo

Nesta secção é dada uma visão geral do modelo que permite dimensionar uma rede *ad-hoc* de UAVs cujas características se adequam às condições de aplicação descritas na Secção 3.2.

A Figura 3.8 representa o respetivo diagrama de blocos, nomeadamente os parâmetros de entrada, como é o caso da taxa de transmissão, altura dos terminais em relação ao MSL, dados referentes ao modelo de propagação, ao SC, ao cálculo da autonomia dos UAVs e à configuração da rede, como é o caso do número de UAVs usados e das fontes de vídeo selecionadas, e o tipo de cenário a analisar; os blocos referentes ao modelo; e o parâmetro de saída que este permite obter, ou seja, alcance máximo da rede.

Relativamente aos blocos referentes ao modelo, é calculado o alcance imposto pelo RH e pela propagação do sinal, para ser definida a distância máxima da rede imposta pelo SC. Adicionalmente, é determinado o alcance máximo da rede imposto pela autonomia da aeronave. Para tal são usados os parâmetros de entrada referentes ao cálculo da autonomia: volume do depósito de combustível, consumo médio do UAV durante a missão (desde descolagem até à aterragem), velocidade aferida à missão considerada, tempo máximo disponível para o voo, tempo de execução da missão e tempo de ida/volta até ao alvo.

A implementação do modelo é feita no *software* de programação *Matlab* R2017a, instalado num computador portátil com um processador *Intel Core i7-4700MQ* CPU @ 2,4 GHz e memória RAM de 4,00 GB. Os parâmetros de entrada são introduzidos pelo utilizador e o tempo de simulação é de, aproximadamente, 1 a 2 s. Nas Secções 3.4 e 3.5, encontra-se uma descrição mais detalhada de todos

os passos referentes aos blocos do modelo representado no diagrama da Figura 3.8, e a implementação do mesmo, respetivamente. Na Secção 3.7, o modelo é aferido, garantindo que os valores dados pelo simulador desenvolvido são credíveis.

Numa situação em que já são conhecidas as distâncias entre os diferentes nós, deve-se garantir que as mesmas não ultrapassem os valores dados pelo simulador, pois estes últimos correspondem ao alcance máximo.

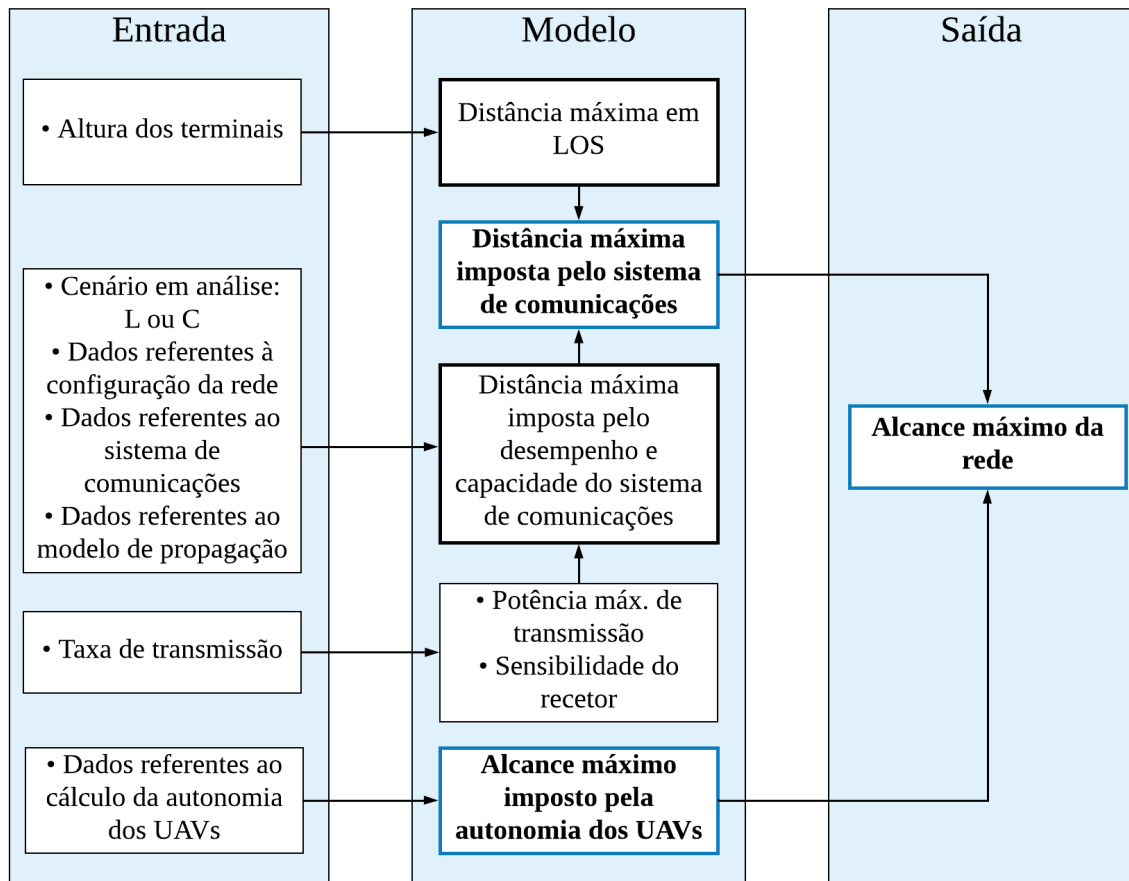


Figura 3.8 – Visão geral do modelo.

3.4. Formulação do Modelo

Esta secção destina-se à explicação detalhada do modelo cujo objetivo é dimensionar redes *ad-hoc* de UAVs com condições de aplicação idênticas às dos dois cenários descritos na Secção 3.2, considerando limitações impostas pelo SC e pelos fatores inerentes ao ambiente analisado – neste caso a autonomia dos UAVs e a distância máxima de LOS.

3.4.1. Análise da Cobertura

Nesta secção é apresentada uma análise de cobertura, assumindo que não existem problemas de capacidade na rede e que a propagação do sinal ocorre em condições normais da atmosfera, i.e., não se consideram fenómenos de propagação guiada, como é o caso dos ductos.

Para além das limitações impostas pelo SC, é importante avaliar todo o cenário. Assim, por forma a dimensionar corretamente a rede são analisados os seguintes fatores, que podem limitar o seu alcance, para cada um dos cenários considerados:

- i) Visto que o SC impõe a necessidade de existência de LOS entre dois terminais, é tida em conta a distância de RH que, tal como referido na Secção 2.3.3, corresponde à distância máxima até à qual dois terminais se encontram em LOS, $d_{máx,RH}$, obtida através de (2.5).
- ii) Alcance máximo da rede imposto pelo desempenho e capacidade do SC, $d_{máx,DC}$, que se traduz na distância a que o valor da potência no recetor corresponde à sua sensibilidade, dada por (3.9).
- iii) A autonomia, que depende da capacidade do depósito de combustível e do consumo médio aferido. O procedimento a seguir para determinar a distância máxima imposta pela autonomia, $d_{máx,AU}$, dada por (3.3).

Do ponto de vista do desempenho e capacidade do SC, para determinar a cobertura da rede, é necessário conhecer os ganhos das antenas de transmissão e de receção, a potência transmitida e a sensibilidade do recetor, e o ambiente em que se processam as comunicações, de modo a escolher o modelo de propagação mais adequado para o cálculo das perdas de propagação. A Equação (3.6) traduz o valor máximo das perdas de percurso entre dois nós, do ponto de vista do balanceamento de potência.

$$L_{p,máx} [\text{dB}] = P_{t,máx} [\text{dBm}] + G_t [\text{dBi}] - P_{r,min} [\text{dBm}] + G_r [\text{dBi}] \quad (3.6)$$

Visto que na presente dissertação de mestrado se consideram os cenários de operação em ambiente marítimo e em LOS, é usado o modelo FSPL. Tal como referido na Secção 2.5, em situações reais as perdas de percurso são superiores aos valores estimados pelo modelo, pelo que se acrescentou uma margem de segurança, M_S , com $M_S > 0$. Assim, o valor da atenuação do sinal devido à propagação é dado por:

$$L_p [\text{dB}] = 32,44 + 20 \log(d_{[\text{km}]}) + 20 \log(f_{[\text{MHz}]}) + M_S [\text{dB}] \quad (3.7)$$

A distância máxima entre dois nós da rede deve ser tal que (3.8) seja satisfeita, ou seja, a potência de receção seja maior ou igual à sensibilidade do recetor.

$$P_r [\text{dBm}] \geq P_{r,\text{min}} [\text{dBm}] \cdot \quad (3.8)$$

A distância máxima imposta pelo desempenho e capacidade do SC é dada para o caso extremo de (3.8), ou seja, quando a potência no recetor é igual à sua sensibilidade. Assim, a partir de (3.7) deduz-se a expressão para o alcance máximo imposto pelo desempenho do SC, de uma determinada ligação direta entre dois nós, em ambientes de propagação em espaço livre:

$$d_{\text{máx},DC} [\text{km}] = 10^{\frac{L_{p,\text{máx}} [\text{dB}] - 32,44 - 20 \log(f_{[\text{MHz}]}) - M_S [\text{dB}]}{20}} \quad (3.9)$$

Nos dois cenários de operação descritos na Secção 3.2, a análise da cobertura, segue processos distintos, seguidamente descritos.

Formação em linha:

- **Passo L1:** conhecendo a potência de transmissão e o ganho do transmissor, a sensibilidade e o ganho do recetor, e a margem de segurança considerada, calcula-se o valor máximo das perdas de percurso, $L_{p,\text{máx},1}$, associadas à primeira ligação, d_1 , através de (3.6).
- **Passo L2:** é determinado o alcance máximo imposto pelo desempenho do SC da respetiva ligação, $d_{\text{máx},DC,1}$, através de (3.9).
- **Passo L3:** conhecendo a altura dos UAVs, $h \equiv h_e$, e a altura da GCS, $h_{GCS} \equiv h_r$, em relação ao MSL, calcula-se a distância máxima a que o transmissor e o recetor se encontram em LOS, $d_{\text{máx},RH,1}$, através de (2.5).
- **Passo L4:** determina-se o alcance máximo imposto pelo SC da ligação direta entre os terminais, $d_{\text{máx},SC,1}$ escolhendo o menor valor dos que foram calculados nos Passos L2 e L3:

$$d_{\text{max},SC,1} [\text{km}] = \min\{d_{\text{máx},DC,1} [\text{km}], d_{\text{máx},RH,1} [\text{km}]\} \quad (3.10)$$

- **Passo L5:** obtém-se a cobertura associada à ligação entre a GCS e o UAV *backbone*, r_1 :

$$r_1 [\text{m}] \cong \begin{cases} d_{\text{máx},SC,1} [\text{m}] & , d_{\text{máx},SC,1} \geq 100h \\ \sqrt{d_{\text{máx},SC,1}^2 [\text{m}]^2 - h_{[\text{m}]}^2} & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.11)$$

- Passo L6: conhecendo a potência de transmissão, a sensibilidade e o ganho do SC instalado nos UAVs, e a margem de segurança considerada, calcula-se o valor máximo das perdas de percurso associadas às ligações A2A, $L_{p,máx,i}$ com $i = 2, \dots, N$, através de (3.6).
- Passo L7: calcula-se o alcance máximo para as restantes $(N - 1)$ ligações A2A da rede, $d_{máx,SC,i}$, seguindo os Passos de L1 a L4.
- Passo L8: assumindo que para $i = 2, \dots, N$ se tem $r_i \approx d_i$, somando as distâncias obtidas nos Passos L3 e L7, obtém-se a cobertura associada ao Cenário L, $r_{c,máx,L}$:

$$r_{c,máx,L} [\text{km}] \cong r_1 [\text{km}] + \sum_{i=2}^N d_{máx,SC,i} [\text{km}] \quad (3.12)$$

- Passo L9: considerando que todos os UAVs apresentam as mesmas características, obtém-se, através de (3.3), o alcance máximo da rede imposto pela autonomia dos UAVs, $d_{máx,AU,L}$.
- Passo L10: determina-se o alcance máximo da rede, d_L , escolhendo o menor valor dos que foram calculados nos Passos L8 e L9:

$$d_L [\text{km}] = \min\{r_{c,máx,L} [\text{km}], d_{máx,AU,L} [\text{km}]\} \quad (3.13)$$

Formação circular: assumindo que todos os UAVs utilizam o mesmo SC e apresentam as mesmas características estruturais e dos restantes sistemas utilizados a bordo, a cobertura da rede do Cenário C obtém-se realizando os passos que seguidamente se descrevem.

- Passo C1: tomando como referência o UAV₁, e conhecendo a potência e o ganho da antena de transmissão, a sensibilidade e o ganho do recetor, e a margem de segurança considerada, calculam-se as perdas de percurso, $L_{p,1}$, associadas à primeira ligação, d_1 , através de (3.6).
- Passo C2: é determinado o alcance máximo imposto pelo desempenho do SC da respetiva ligação, $d_{máx,DC,1}$, através de (3.9).
- Passo C3: conhecendo a altura dos UAVs, $h \equiv h_e$, e a altura da GCS, $h_{GCS} \equiv h_r$, em relação ao MSL, calcula-se a distância máxima a que o UAV₁ e a GCS ainda se encontram em LOS, $d_{máx,RH,1}$, através de (2.5).
- Passo C4: através de (3.10), determina-se o alcance máximo da ligação direta entre a GCS e o UAV₁, $d_{máx,SC,1}$, escolhendo o menor valor dos que foram calculados nos Passos C2 e C3.
- Passo C5: obtém-se a cobertura associada ao Cenário C, $r_{c,máx,C}$:

$$r_{c,máx,C} [m] \cong \begin{cases} d_{máx,SC,1} [m] & , d_{máx,SC,1} \geq 100h \\ \sqrt{d_{máx,SC,1}^2 [m]^2 - h_{[m]}^2} & , \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.14)$$

- **Passo C6:** considerando que todos os UAVs apresentam as mesmas características, obtém-se, através de (3.3), o alcance máximo da rede imposto pela autonomia dos UAVs, $d_{máx,AU,C}$.
- **Passo C7:** determina-se o alcance máximo da rede, d_C , escolhendo o menor valor dos que foram calculados nos Passos C5 e C6:

$$d_C [km] = \min\{r_{c,máx,C} [km], d_{máx,AU,C} [km]\} \quad (3.15)$$

3.4.2. Análise da Capacidade

Na presente secção é feita, inicialmente, uma análise da capacidade da rede assumindo que não existem problemas de cobertura. De seguida, é explicada a relação entre os dois parâmetros em estudo.

Tendo em conta as configurações dos dois cenários anteriormente descritos, as necessidades em termos de capacidade associadas a cada um dos ambientes de operação são as seguintes:

- Na **formação em linha**, relativamente à ligação UL, a GCS envia dados de C2 para todos os UAVs que constituem a rede e, no caso da ligação DL, recebe dados de telemetria referentes aos N UAVs e informação gráfica do alvo proveniente das M fontes selecionadas, com $M \in [0, N]$. Cada um dos UAVs da rede também envia e recebe dados de posição e referência, $R_{b,P}$, dos restantes UAVs. A taxa de transmissão destes dados é significativamente baixa em relação à taxa de transmissão correspondente à telemetria $R_{b,T}$, considerando-se neste estudo uma relação de 1 % entre os dois parâmetros.

$$R_{b,P} [kbps] = 0,01 \times R_{b,T} [kbps] \quad (3.16)$$

- Na **formação circular**, tal como na configuração em linha, todos os UAVs recebem mensagens de C2 da GCS – ligação ascendente, e enviam dados de telemetria – ligação descendente. Adicionalmente, cada UAV envia e recebe dados de posição e referência dos restantes UAVs, que podem ou não ser provenientes de uma retransmissão da GCS. Assim, considerando que

existem Q UAVs a usar a GCS como retransmissor, a GCS terá de receber e enviar $Q \times R_{b,P}$ dados referentes à posição e referência. Relativamente à informação gráfica, a GCS seleciona as M fontes de vídeo que pretende visualizar, podendo estas variar entre 0 e N .

Na Tabela 3.2 representam-se as expressões para os requisitos de capacidade das ligações UL e DL para os dois cenários de operação em estudo, onde:

- $R_{b,C2}$: taxa de transmissão dos dados de C2;
- Q : número de UAVs que usam a GCS como retransmissor para troca de dados de posição e referência, no Cenário C;
- M : número de fontes de vídeo selecionadas pela GCS;
- $R_{b,P}$: taxa de transmissão dos dados de posição e referência;
- $R_{b,T}$: taxa de transmissão dos dados de telemetria;
- $R_{b,vídeo}$: taxa de transmissão correspondente à informação gráfica.

Tabela 3.2 – Requisitos de capacidade dos Cenários L e C.

Tipo de ligação	Cenário	Taxa de transmissão necessária [Mbps]
UL	L	$N \times R_{b,C2}$
	C	$N \times R_{b,C2} + Q \times R_{b,P}$
DL	L	$N \times R_{b,T} + M \times R_{b,vídeo}$
	C	$N \times R_{b,T} + M \times R_{b,vídeo} + Q \times R_{b,P}$

Note-se que, tipicamente, a taxa de transmissão correspondente aos dados CNPC é muito inferior à taxa de transmissão referente à informação gráfica do alvo. Desta forma, caso se verifique (3.17), então na análise da capacidade pode considerar-se apenas o débito binário correspondente ao serviço. Caso (3.17) não seja satisfeita, para além da informação gráfica do alvo, são também considerados os dados de telemetria na ligação descendente. No modelo desenvolvido na presente dissertação serão considerados os dados CNPC e desprezados os dados de posição e referência.

$$R_{b,vídeo} \text{ [Mbps]} > 100 \times R_{b,CNPC} \text{ [Mbps]} \quad (3.17)$$

A Equação (3.18) representa a expressão usada para o cálculo da taxa de transmissão associada à ligação ascendente, $R_{b,UL}$, e (3.19) corresponde à taxa de transmissão da ligação descendente, $R_{b,DL}$.

$$R_{b,UL} [\text{Mbps}] \begin{cases} = N \times R_{b,C2} [\text{Mbps}] , & \text{Cenário L} \\ \cong N \times R_{b,C2} [\text{Mbps}] , & \text{Cenário C} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$R_{b,DL} [\text{Mbps}] \begin{cases} = N \times R_{b,T} [\text{Mbps}] + M \times R_{b,video} [\text{Mbps}] , & \text{Cenário L} \\ \cong N \times R_{b,T} [\text{Mbps}] + M \times R_{b,video} [\text{Mbps}] , & \text{Cenário C} \end{cases} \quad (3.19)$$

Tendo em conta que o débito binário associado à ligação descendente, $R_{b,DL}$, é o fator limitativo, pois é o que apresenta maior taxa de transmissão associada, e que o SC instalado nos UAVs e na GCS é idêntico, considera-se que não haverá problemas de capacidade do ponto de vista da ligação UL. Desta forma, na análise apresentada nas secções seguintes será considerada apenas a ligação DL. Assim, no estudo da capacidade (3.20) deve ser satisfeita.

$$R_{b,cap} [\text{Mbps}] \geq R_{b,DL} [\text{Mbps}] \quad (3.20)$$

No dimensionamento de uma rede de comunicações *ad-hoc* de UAVs é importante ter em conta que a cobertura e a capacidade são dois parâmetros relacionados entre si, pois a cada tipo de modulação utilizado e a LB disponível corresponde um determinado valor de taxa de transmissão de dados, potência máxima de transmissão e de sensibilidade do recetor. A Tabela B.1 do Anexo B traduz a relação entre os parâmetros aqui mencionados, referente ao rádio pDDL2450.

No caso da tecnologia de comunicações considerada no presente estudo – *Microhard* pDDL2450, o utilizador pode seleccionar a LB que pretende utilizar, podendo esta ser 2, 4 ou 8 MHz, e a respetiva modulação, que pode ser BPSK FEC^{1/2}, QPSK FEC^{1/2}, QPSK FEC^{3/4}, 16QAM FEC^{1/2}, 16QAM FEC^{3/4}, 64QAM FEC^{2/3}, 64QAM FEC^{3/4} ou 64QAM FEC^{5/6}. Tal como se pode verificar na Figura 3.9, modulações de níveis superiores permitem atingir maiores valores de taxas de transmissão máximas, que são tanto maiores quanto maior a LB selecionada pelo utilizador.

Relativamente à sensibilidade do recetor, os esquemas de modulação de nível superior correspondem a maiores valores de sensibilidade – relação representada na Figura 3.10. Para além disso, quanto maior a LB do canal, mais robusto é o sistema, pois permite detetar sinais que requerem menor potência.

Por forma a facilitar a implementação do modelo, foram deduzidas (ver Figuras B.1 e B.2 do Anexo B) as expressões aproximadas, para a potência máxima de transmissão e a sensibilidade, dadas por (3.21) e (3.22), respetivamente, em função da taxa de transmissão, que por sua vez depende da LB e do esquema de modulação selecionados.

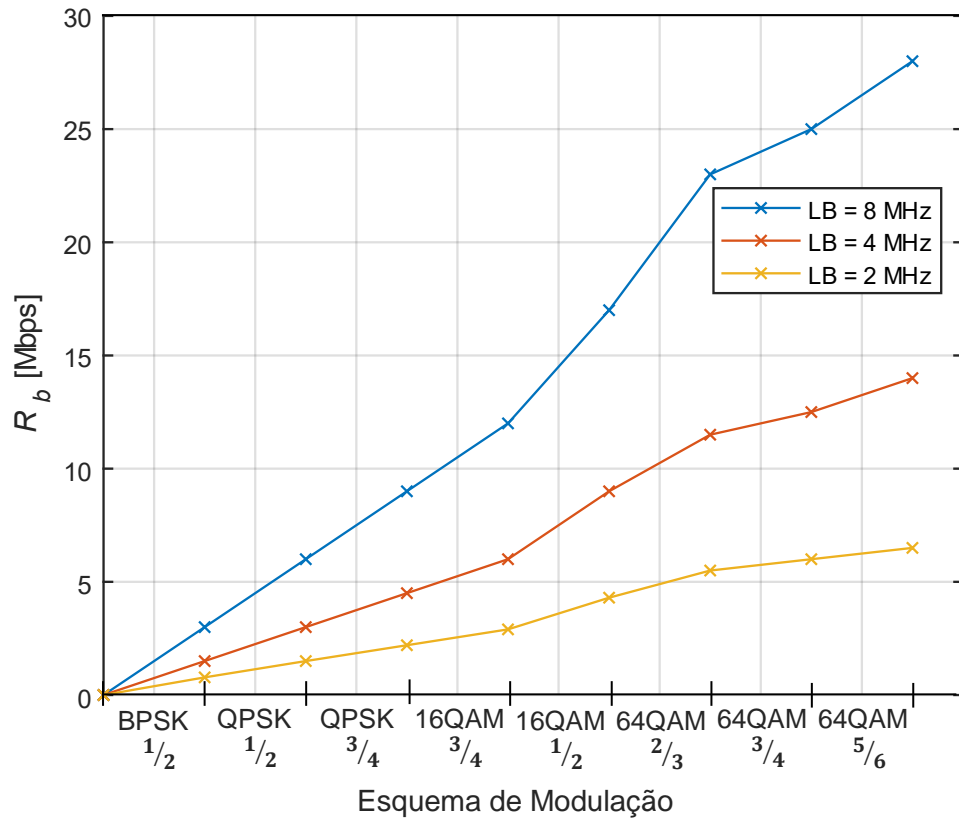


Figura 3.9 – Taxa da transmissão em função do esquema de modulação dos rádios pDDL2450.

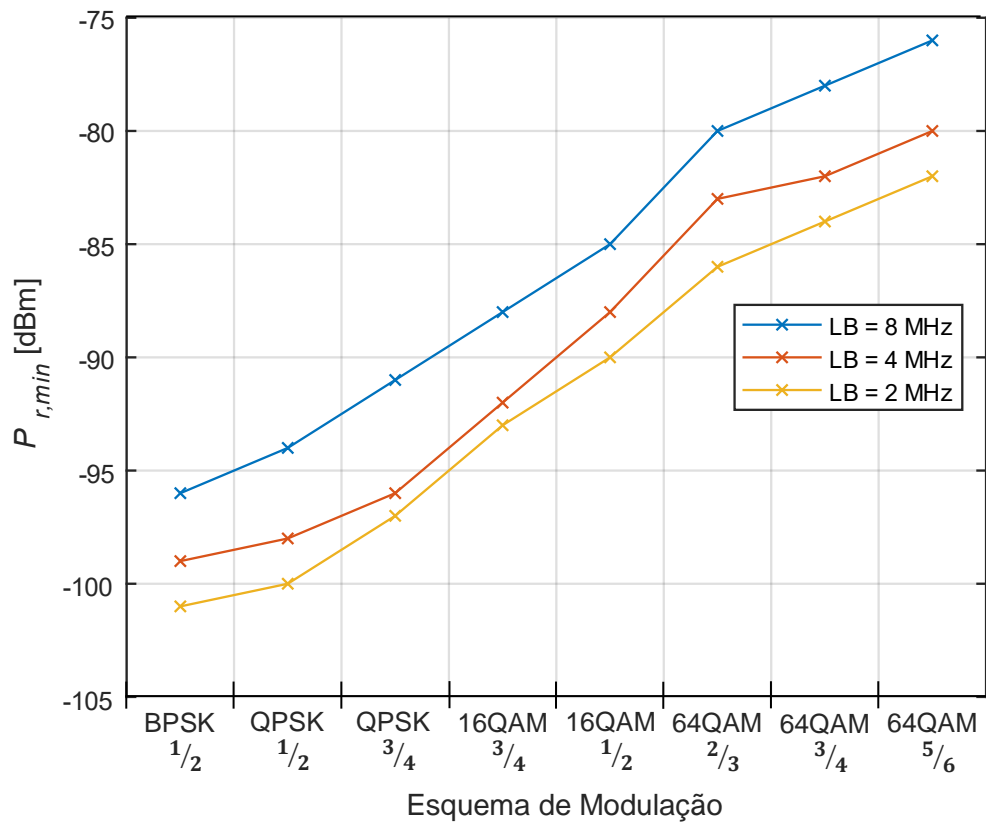


Figura 3.10 – Sensibilidade do recetor em função da modulação dos rádios pDDL2450.

$$P_{t,m\acute{a}x} [\text{dBm}](R_b [\text{Mbps}], \Delta f [\text{MHz}]) = \begin{cases} -0,618R_b + 30,9, & R_b \in [0,78; 6,5], & \Delta f = 2 \\ -0,287R_b + 30,8, & R_b \in [1,5; 14], & \Delta f = 4 \\ -0,145R_b + 30,9, & R_b \in [3; 28], & \Delta f = 8 \end{cases} \quad (3.21)$$

$$P_{r,min} [\text{dBm}](R_b [\text{Mbps}], \Delta f [\text{MHz}]) = \begin{cases} 3,35R_b - 104, & R_b \in [0,78; 6,5], & \Delta f = 2 \\ 1,62R_b - 102, & R_b \in [1,5; 14], & \Delta f = 4 \\ 0,805R_b - 98,4, & R_b \in [3; 28], & \Delta f = 8 \end{cases} \quad (3.22)$$

Na Figura 3.11, encontra-se uma representação gráfica da relação entre a taxa de transmissão e a sensibilidade do recetor para a LB de 2, 4 e 8 MHz. Antes da escolha da LB e da modulação a utilizar, deve-se analisar a relação entre os diferentes parâmetros. Por exemplo, para uma taxa de transmissão de 3 Mbps existem duas opoes: um canal com LB de 2 MHz usando uma modulação QPSK FEC^{1/2}, ou um canal com LB de 4 MHz com modulação BPSK FEC^{1/2}. Ambos os casos tem uma potencia máxima associada de 30 dBm (ver Tabela B.1), no entanto o canal de 2 MHz corresponde à menor sensibilidade e, conseqüentemente, um alcance maior, pelo que seria preferível a primeira opção. Já no caso de uma taxa de transmissão de 9 Mbps seria preferível a escolha de uma maior LB.

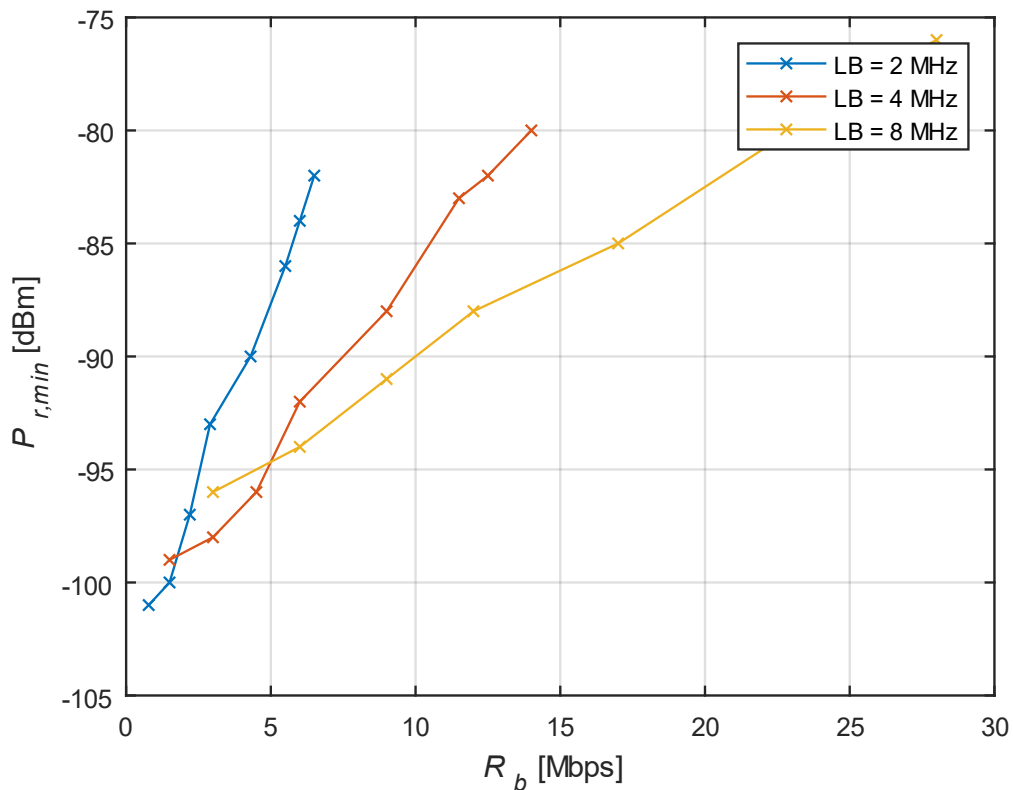


Figura 3.11 – Sensibilidade do recetor em função da taxa de transmissão dos rádios pDDL2450.

Observando a Figura 3.11, um canal de 2 MHz não seria suficiente para transmitir informação com taxa de transmissão de 9 Mbps, o de 4 MHz (com modulação mínima de 16QAM FEC^{1/2}) tem uma sensibilidade associada de -88 dBm e potência máxima de transmissão de 29 dBm, e o de 8 MHz (com modulação mínima de QPSK FEC^{3/4}) corresponde a uma sensibilidade de -91 dBm e potência máxima de transmissão de 30 dBm.

3.5. Implementação do Modelo

Por forma a implementar o modelo descrito nas Secções 3.3 e 3.4 foi desenvolvido um simulador no *software* de programação *Matlab* R2017a, que permite dimensionar redes *ad-hoc* de UAVs idênticas às redes caracterizadas nos Cenários L e C.

O simulador consiste em receber os parâmetros de entrada, seguidamente especificados, e determinar o alcance máximo da rede, seguindo os passos do processo representado no fluxograma, construído usando o *software Lucidchart*, da Figura 3.12. Na Tabela 3.3 representam-se os pressupostos tomados na implementação do modelo.

Inicialmente é calculada a distância máxima imposta pelo desempenho e capacidade do SC, $d_{máx,DC}$, para cada uma das ligações, usando os parâmetros de entrada seguintes: o ganho da antena de receção, G_r ; o ganho da antena instalada no nó transmissor, G_t ; margem de segurança considerada no cálculo das perdas de percurso, M_S ; frequência de operação, f ; o número de ligações, N ; o número de fontes de vídeo, M ; a LB disponível, Δf , e a taxa de transmissão associada a cada uma das ligações, R_b . Através da taxa de transmissão é determinada a potência de transmissão máxima, $P_{t,máx}$, e a sensibilidade do recetor, $P_{r,min}$.

De seguida, para as mesmas ligações, é calculada a distância máxima em LOS, $d_{máx,RH}$, sendo os parâmetros de entrada a altura do recetor, h_r , e a altura do transmissor, h_t . Para cada uma das ligações é escolhido o fator limitativo, ou seja, o menor valor entre $d_{máx,DC}$ e $d_{máx,RH}$, resultando em $d_{máx,SC}$. Seguidamente é calculado o valor de $r_{c,máx}$.

No cálculo da distância máxima imposta pela autonomia dos UAVs, $d_{máx,AU}$, os parâmetros de entrada são o volume do depósito de combustível, V ; o consumo médio do combustível, C ; a velocidade de cruzeiro aferida, v ; o tempo necessário à execução da missão, t_{exec} ; e o tempo de margem de segurança considerado, t_m .

O alcance máximo da rede, d_L no caso do Cenário L e d_C no caso do Cenário C, é determinado escolhendo o menor dos valores obtidos para o alcance máximo da rede analisando SC, $r_{c,máx}$, e o que se obteve tendo em conta a autonomia dos UAVs, $d_{máx,AU}$.

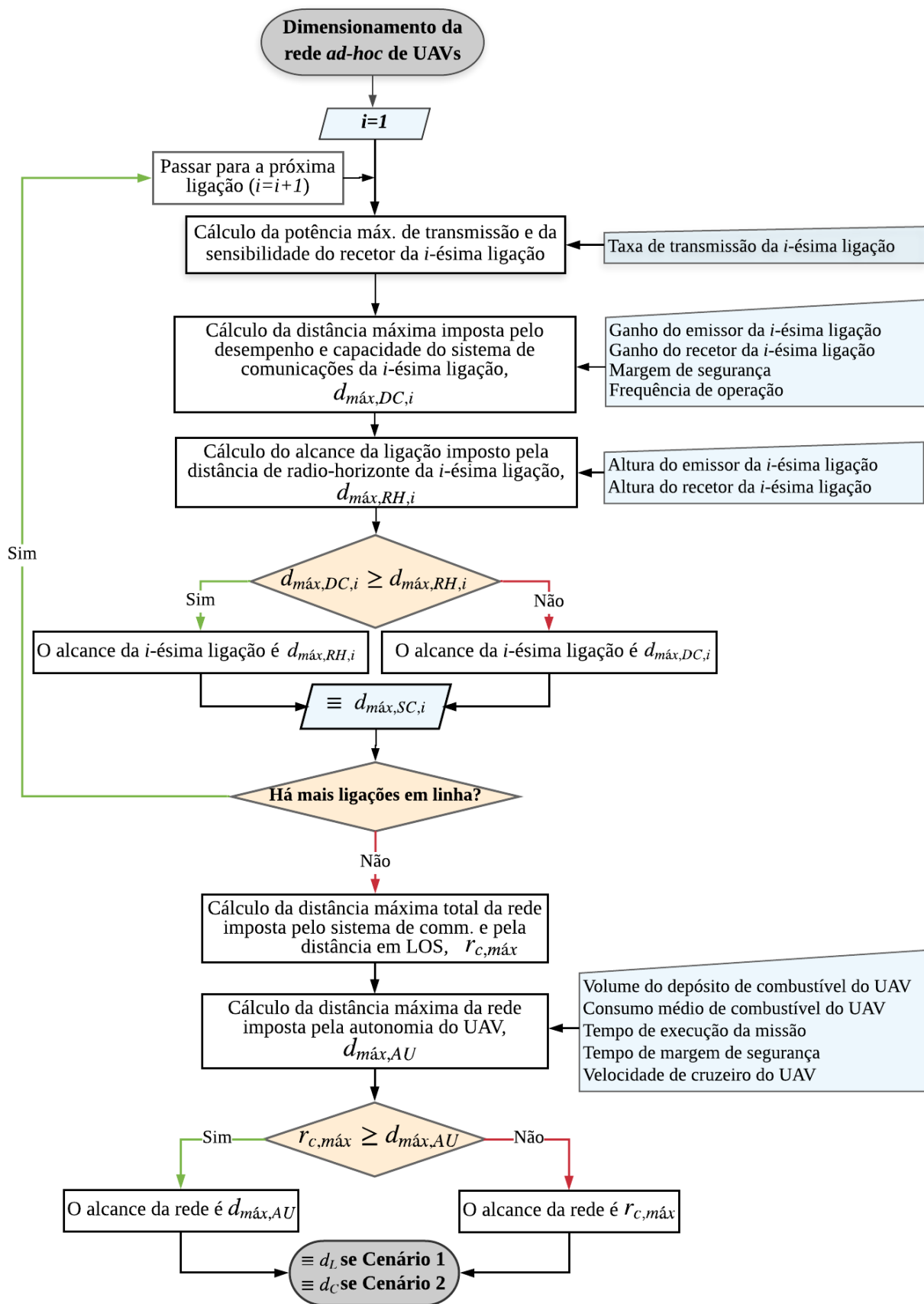


Figura 3.12 – Fluxograma do modelo de dimensionamento da rede *ad-hoc* de UAVs.

Note-se que, tal como referido no Anexo B, as expressões utilizadas para o cálculo da potência de transmissão máxima, $P_{t,máx}$, e a sensibilidade do recetor, $P_{r,min}$, a partir da taxa de transmissão, R_b , foram obtidas através de uma extrapolação de valores conhecidos presentes na folha de especificações do equipamento considerado neste estudo, sendo a estimativa de erro de, aproximadamente, ± 1 dB. Na Tabela B.2 encontram-se os erros estimados para cada uma das expressões em (3.21) e (3.22).

Tabela 3.3 – Pressupostos tomados na implementação do modelo.

Cenário L e C	1. Todos os UAVs operam à mesma altitude, h , em relação ao MSL.
	2. Todos os UAVs usam o mesmo SC e antenas iguais.
	3. A GCS usa o SC igual ao instalado nos UAVs, mas uma antena diferente.
	4. A LB disponível é idêntica para todas as ligações da rede.
	5. Deve-se acrescentar uma margem de segurança de, aproximadamente, entre 3 a 6 dB na estimativa das perdas de percurso entre dois nós.
	6. Todos os UAVs apresentam as mesmas características e configuração estrutural.
	7. O utilizador tem o conhecimento do tempo necessário à execução da missão.
	8. Acrescenta-se um tempo de margem de segurança no cálculo da autonomia dos UAVs.
Cenário L	9. O utilizador sabe a taxa de transmissão correspondente a cada uma das ligações.
Cenário C	10. O raio circular é imposto pela ligação mais carregada.

3.6. Testes experimentais aos rádios pDDL2450

Nesta secção são descritos os primeiros testes experimentais aos rádios, realizados em bancada, com o objetivo de testar a conexão entre os mesmos e observar o seu desempenho quando ligados em rede de modo a existirem nós retransmissores.

Tal como se pode observar na Figura 3.13 foram utilizados três rádios pDDL2450: R1, ligado ao computador portátil HP, desempenhando o papel da GCS; R2, com a função de transmitir ao R1 a informação que recebe do R3; e o R3, ligado a um computador portátil Toshiba, através do qual foram

injetados dados, por forma a permitir testar o desempenho da rede. Os três rádios são alimentados com $12\text{ V} \pm 0,15$, usando um gerador de tensão.

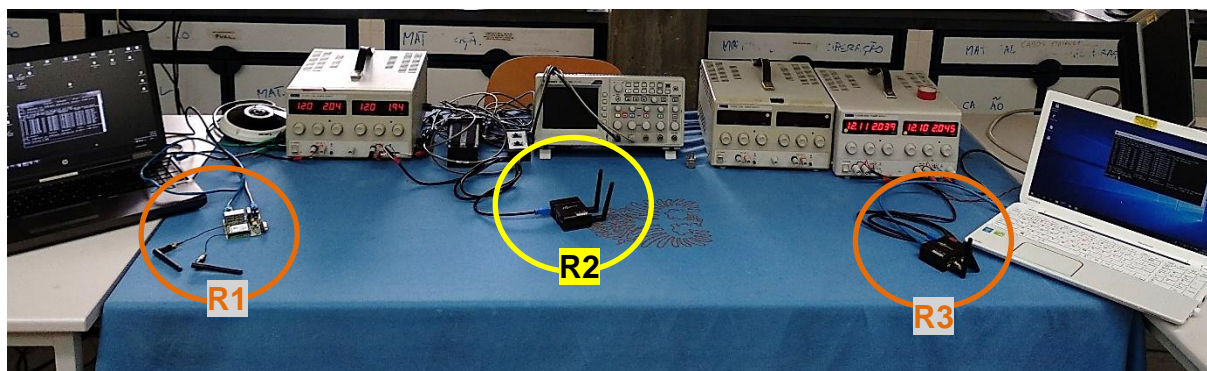


Figura 3.13 – Configuração dos testes experimentais realizados aos rádios pDDL2450.

Os dados obtidos com o teste realizado usando o *iPerf*, para um sistema com os parâmetros e resultados apresentados na Tabela 3.4, encontram-se no Anexo D.1.

Tabela 3.4 – Teste aos rádios usando o *iPerf*.

Teste	Ligação direta (R1← R3)	Ligação com nó retransmissor (R1←R2← R3)		
	iP1	iP2	iP3	iP4
LB do sistema [MHz]	8			
Esquema de modulação	QPSK-FEC 3/4			
Taxa de transmissão (@Modulação) [Mbps]	9			
LB média dos dados injetados [Mbps]	8		5,95	3,97
LB média dos dados recebidos [Mbps]	7,86	1,31	1,40	3,68

Segundo o manual de especificações, o utilizador pode seleccionar o modo de funcionamento dos rádios: *full-duplex* ou *half-duplex*. Numa primeira fase, usou-se o *software iPerf*, injetando dados no R3 com uma determinada LB e testar o desempenho da rede. Com este teste observou-se que numa ligação direta (i.e., ligando diretamente o R1 e o R3) os rádios permitem aproveitar toda a LB do sistema. No entanto, ao adicionar um nó retransmissor (R2), constatou-se que era forçado o

funcionamento *half-duplex*, diminuindo a LB do sistema para metade, o que tem impacto no dimensionamento da rede no caso do Cenário L.

Note-se que no teste efetuado à rede com o rádio retransmissor R2, o sistema permite uma transmissão eficiente apenas quando os dados injetados apresentam uma LB igual ou inferior a metade da do sistema, como é o caso do teste iP4. Ao injetar dados com uma LB superior (testes iP2 e iP3) o sistema satura, havendo uma elevada percentagem de perda de pacotes, o que se pode observar na Tabela 3.4: no teste iP2, em que se enviaram dados com 8 Mbps, no R1 apenas foram recebidos 1,31 Mbps; e no iP3, ao injetar dados com uma LB (média) de 5,95 Mbps no R3, observou-se uma receção de 1,40 Mbps de dados no R1. Estes resultados levam a concluir que ao usar os rádios pDDL2450 na configuração em linha, os valores da taxa de transmissão indicados na folha de especificações reduzem para metade (ver Tabela B.1). Por forma a confirmar tais resultados, o desempenho em termos da taxa de transmissão da rede foi testado usando o *software TamoSoft Throughput Test*. Os resultados relevantes obtidos encontram-se no Anexo D.2. Os testes realizados confirmam a redução da taxa de transmissão para metade com a adição do nó retransmissor. É de referir ainda que, tal como seria de esperar, a eficiência do sistema não é 100 %, ou seja, existe sempre perda de pacotes enviados, o que pode ser causado por fatores como, por exemplo, congestionamento ou sobrecarga do sistema.

Assim, da mesma forma que se obtiveram as expressões (3.21) e (3.22), considerando um funcionamento em modo *full-duplex*, obtêm as expressões (3.23) e (3.24) que caracterizam o sistema em modo de funcionamento *half-duplex* e que são usadas no dimensionamento da rede com configuração correspondente ao Cenário L.

$$P_{t,máx} [\text{dBm}](R_b [\text{Mbps}], \Delta f [\text{MHz}]) = \begin{cases} -1,24R_b + 30,9, & R_b \in [0,39; 3,25], & \Delta f = 2 \\ -0,574R_b + 30,8, & R_b \in [0,75; 7], & \Delta f = 4 \\ -0,145R_b + 30,9, & R_b \in [1,5; 14], & \Delta f = 8 \end{cases} \quad (3.23)$$

$$P_{r,min} [\text{dBm}](R_b [\text{Mbps}], \Delta f [\text{MHz}]) = \begin{cases} 6,7R_b - 104, & R_b \in [0,39; 3,25], & \Delta f = 2 \\ 3,23R_b - 102, & R_b \in [0,75; 7], & \Delta f = 4 \\ 0,805R_b - 98,4, & R_b \in [1,5; 14], & \Delta f = 8 \end{cases} \quad (3.24)$$

3.7. Aferição do Modelo

Por forma a aferir o modelo implementado, garantido que o dimensionamento da rede dado pelo simulador é fiável, foram simulados vários cenários, variando o valor de diversas variáveis e confirmaram-se os resultados obtidos. Optou-se por apresentar apenas alguns dos resultados obtidos

na fase de aferição. Assim, escolheram-se duas hipóteses de aplicação para cada um dos cenários: HL.1 e HL.N para a Formação em Linha, e HC.1 e HC.N para a Formação Circular. De seguida foram calculados todos os parâmetros necessários para determinar o alcance da rede, usando uma calculadora gráfica *TI-nspire CX CAS*, e comparados com os valores dados pelo simulador, tal como descrito na listagem apresentada na Tabela 3.5. Os parâmetros de entrada considerados encontram-se na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Passos seguidos na 1ª fase da aferição do modelo implementado.

#	Ação
1	Cálculo dos valores da potência de transmissão máxima e da sensibilidade do recetor associados aos valores da taxa de transmissão definidos para cada uma das ligações.
1.1	▪ Comparação dos valores obtidos com os do simulador.
2	Cálculo da distância máxima imposta pelo SC.
2.1	▪ Comparação do valor obtido com o do simulador.
3	Cálculo da distância máxima em LOS.
3.1	▪ Comparação do valor obtido com o do simulador.
4	Cálculo da cobertura com base na análise da distância máxima imposta pelo SC e pelo RH.
4.1	▪ Comparação do valor obtido com o do simulador.
5	Cálculo do alcance da rede imposto pela autonomia dos UAVs.
5.1	▪ Comparação do valor obtido com o do simulador.
6	Escolha do menor dos valores obtidos em 4 e 5, o que corresponde à cobertura da rede.
6.1	Comparação do valor obtido com o resultado do simulador.

Relativamente ao cenário em que os UAVs se distribuem em linha:

- Na **Hipótese L.1** considera-se que apenas o UAV extremo transmite informação gráfica sobre o alvo, funcionando os restantes como nós retransmissores ($M=1$).
- A **Hipótese L.N** corresponde a um cenário em que todos os N UAVs captam imagens/vídeo durante a sua operação e transmitem-nas à GCS ($M=N$).

No caso da formação circular:

- Na **Hipótese HC.1** não pode haver mais que um UAV a transmitir informação gráfica em simultâneo ($M=1$).

- A **Hipótese HC.N** corresponde à situação em que todos os N UAVs transmitem informação gráfica em simultâneo ($M=N$).

Tabela 3.6 – Parâmetros de entrada usados na 1ª fase da aferição do modelo implementado.

Cenário	L – Formação em Linha		C – Formação Circular		
	HL.1	HL.N	HC.1	HC.N.	
Parâmetros de Entrada	h_{UAV} [m]	50			
	h_{GCS} [m]	3			
	N	4			
	M	1	4	1	4
	$R_{b,T}$ [Mbps]	0,024			
	$R_{b,vídeo}$ [Mbps]	3			
	Δf [MHz]	8			
	$V_{[l]}$	6,5			
	$C_{[l/h]}$	1,1			
	t_{exec} [h]	0,5			
	t_m [h]	0,4			
	v [km/h]	40			
	G_{UAV} [dBi]	5			
	G_{GCS} [dBi]	24			
	M_S [dB]	3			
f [MHz]	2400				

Ao comparar os valores calculados com os que são obtidos pelo simulador, assume-se que o erro relativo, ε_r , não deve ser superior a 1 % ($\varepsilon_r \leq 1\%$), sendo calculado a partir de:

$$\varepsilon_r [\%] = \frac{|X_C - X_S|}{X_C} \times 100 \quad (3.22)$$

onde:

- X_C : valor calculado;
- X_S : valor dado pelo simulador.

As Tabelas 3.7 e 3.8 representam os resultados obtidos na aferição do modelo implementado para as Hipóteses HL.1 e HL.N, respetivamente; e a Tabela 3.9 para as Hipóteses HC.1 e HC.N.

Tabela 3.7 – Resultados da aferição do modelo considerando a Hipótese HL.1.

	Hipótese HL.1								
	GCS		UAV ₁		UAV ₂		UAV ₃		UAV ₄
	Ligação 1		Ligação 2		Ligação 3		Ligação 4		
$d_{máx,SC}$ [km]	294,22		33,19		33,36		33,54		
$d_{máx,RH}$ [km]	36,27		58,27		58,27		58,27		
$d_{máx}$ [km]	36,27		33,19		33,36		33,54		
$r_{c,máx,L}$ [km]	136,35								
$d_{máx,AU,L}$ [km]	100,18								
d_L [km]	100,18								

Tabela 3.8 – Resultados da aferição do modelo considerando a Hipótese HL.N.

	Hipótese HL.N								
	GCS		UAV ₁		UAV ₂		UAV ₃		UAV ₄
	Ligação 1		Ligação 2		Ligação 3		Ligação 4		
$d_{máx,SC}$ [km]	41,08		8,93		17,31		33,54		
$d_{máx,RH}$ [km]	36,27		58,27		58,27		58,27		
$d_{máx}$ [km]	36,27		8,93		17,31		33,54		
$r_{c,máx,L}$ [km]	96,04								
$d_{máx,AU,L}$ [km]	100,18								
d_L [km]	96,04								

Tabela 3.9 – Resultados da aferição do modelo considerando as Hipóteses HC.1 e HC.N.

	Hipótese HC.1	Hipótese HC.N
	Ligação i (GCS \leftarrow UAV $_i$, $i = 1, \dots, N$)	
$d_{m\acute{a}x,SC}$ [km]	249,03	108,14
$d_{m\acute{a}x,RH}$ [km]	36,27	36,27
$d_{m\acute{a}x}$ [km]	36,27	36,27
$r_{c,m\acute{a}x,C}$ [km]	36,27	36,27
$d_{m\acute{a}x,AU,C}$ [km]	100,18	100,18
d_C [km]	36,27	36,27

Após a realização dos cálculos de todas as distâncias estimadas pelo simulador desenvolvido, observou-se que os valores obtidos são idênticos aos dados pelo simulador, para uma aproximação de duas casas decimais, e o erro relativo associado é $\ll 1\%$, o que leva a concluir que o simulador implementado permite dimensionar corretamente a rede.

Após a aferição do modelo, e usando os resultados obtidos durante este processo, obtiveram-se os gráficos que relacionam o número total de nós com o alcance da rede, sendo espectável que o alcance da rede aumente com a adição de nós; e a relação entre o número de fontes de vídeo selecionadas e o alcance máximo da rede, sendo que neste caso espera-se uma diminuição do alcance com o aumento do número de fontes de informação gráfica. A análise destes resultados será apresentada na Secção 4.1.

Capítulo 4

Análise de Resultados

Neste capítulo, numa primeira fase é apresentada uma análise geral dos resultados associados aos cenários considerados na aferição do modelo. Seguidamente, são definidos os cenários reais de operação, cuja configuração corresponde aos dois cenários analisados nesta dissertação: linear, em que a GCS se encontra localizada no aeródromo de Torres Vedras e os UAVs operam sobre a zona marítima; e circular, em que a GCS se encontra no centro de uma coluna de navios que navega em alto mar. Seguidamente são representados e analisados os alcances máximos para redes com diferentes números de UAVs e de fontes de informação gráfica, a transmitir vídeo com taxa de transmissão de 2 ou 4 Mbps.

4.1. Análise Geral

Nesta secção é apresentada uma análise geral dos resultados referentes aos cenários definidos na aferição do modelo descrita na Secção 3.7.

Ao comparar as Hipóteses HL.1 e HL.N, observa-se que o alcance da rede em HL.N, imposto pelo SC e pela distância de RH, diminui em, aproximadamente, 40 km, o que se deve ao facto de na Hipótese HL.N todos os nós transmitirem informação gráfica, aumentando assim a taxa de transmissão o que, por sua vez, implica valores de potência de transmissão máxima menor e sensibilidade do recetor maior e, conseqüentemente, um menor alcance das ligações. Adicionalmente, no caso da hipótese HL.1, o fator que limita a distância máxima é a autonomia dos UAVs e não o SC, o que se deve à baixa taxa de transmissão associada aos dados que fluem na rede.

Note-se que, tipicamente, no Cenário L o alcance da primeira ligação (entre o UAV *backbone* e a GCS) é muito superior ao das restantes. Isto deve-se ao facto do ganho da antena usada na GCS ser muito superior ao das antenas instaladas nos UAVs. Já a distância de RH tende a ser menor que nas restantes ligações devido à altitude reduzida do recetor (i.e., a altitude da GCS).

É de referir, ainda, que os valores dados pelo simulador correspondem às distâncias máximas que o UAS permite atingir, pelo que no planeamento de um voo real deve-se garantir que as ligações entre os diferentes nós nunca ultrapassem as distâncias estimadas pela ferramenta desenvolvida.

Na da Figura 4.1 encontra-se representada a relação entre o número total de nós e o alcance da rede, em que apenas o nó final transmite informação gráfica, com uma taxa de transmissão de 2, 4 e 8 Mbps, e os restantes são UAVs retransmissores, considerando o cenário em que os UAVs se distribuem em linha. Na Tabela 4.1 encontram-se os parâmetros de entrada usados nesta simulação. Na análise seguidamente apresentada, assumiu-se que a autonomia dos UAVs não seria o fator limitativo. Adicionalmente, visto que o SC considerado neste estudo impõe a necessidade de existência de LOS entre os terminais, os valores de alcance aqui apresentados foram obtidos considerando os dois fatores: propagação do sinal e distância de RH.

Tabela 4.1 – Parâmetros usados no cálculo do alcance da rede em função de N (Cenário L).

Parâmetros de entrada											
h_{UAV} [m]	h_{GCS} [m]	M	$R_{b,T}$ [Mbps]	$R_{b,video}$ [Mbps]			Δf [MHz]	G_{UAV} [dBi]	G_{GCS} [dBi]	M_S [dB]	f [MHz]
50	3	1	0,024	2	3	4	8	5	24	3	2400

Note-se que, tal como era de esperar, quanto menor é o débito binário associado ao vídeo transmitido, maior é o alcance da rede. Para além disso, com a adição de nós retransmissores na rede, o alcance máximo aumenta.

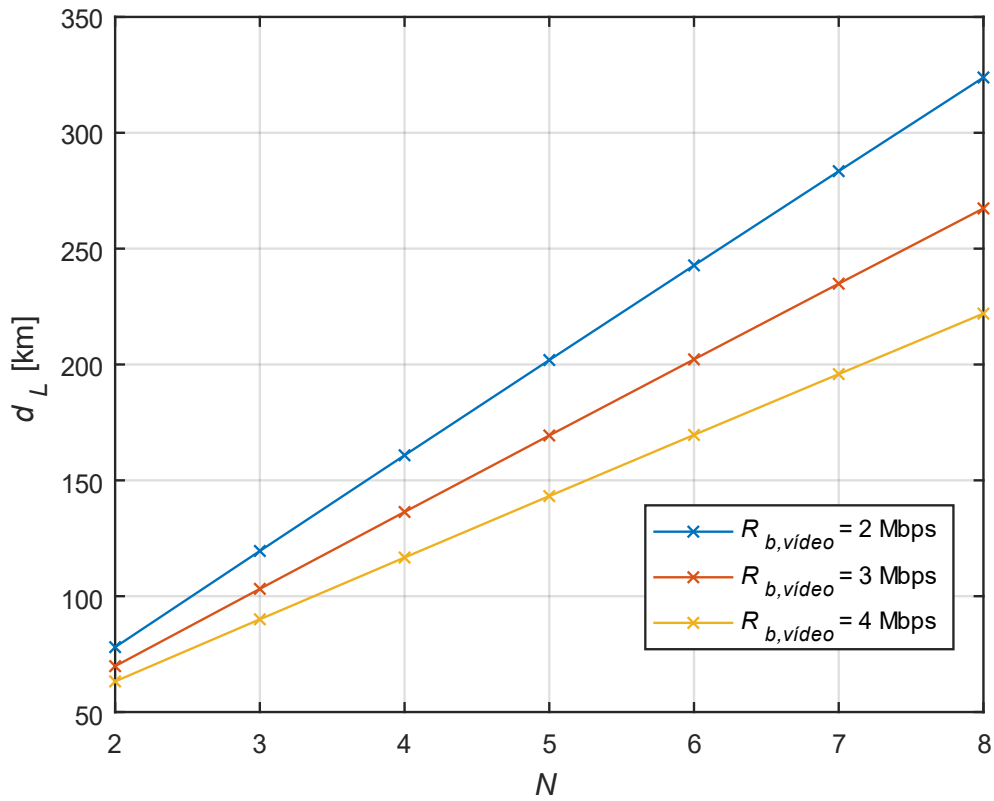


Figura 4.1 – Alcance máximo da rede em função de N (Cenário L).

Na Figura 4.2 representa-se o alcance máximo em função do número de fontes de vídeo selecionadas, numa rede com um total de 6 UAVs com configuração em linha. Na Tabela 4.2 encontram-se os parâmetros de entrada usados nesta simulação.

Tabela 4.2 – Parâmetros usados no cálculo do alcance da rede em função de M (Cenário L).

Parâmetros de entrada											
h_{UAV} [m]	h_{GCS} [m]	N	$R_{b,T}$ [Mbps]	$R_{b,video}$ [Mbps]			Δf [MHz]	G_{UAV} [dBi]	G_{GCS} [dBi]	M_S [dB]	f [MHz]
50	3	6	0,024	2	3	4	8	5	24	3	2400

Tal como esperado, ao selecionar um maior número de fontes de vídeo, o alcance da rede diminui, o que se deve ao aumento da taxa de transmissão. Adicionalmente, observa-se que quanto menor o débito binário associado à informação gráfica, maior é o alcance da rede. Note-se que para transmissão de vídeo cuja taxa de transmissão é 2 Mbps é possível que todos os UAVs sejam fontes

de informação gráfica; no caso de vídeo com 3 Mbps apenas é possível selecionar 4 fontes de informação gráfica; e no caso de uma taxa de transmissão de vídeo de 4 Mbps esse número diminui para 3.

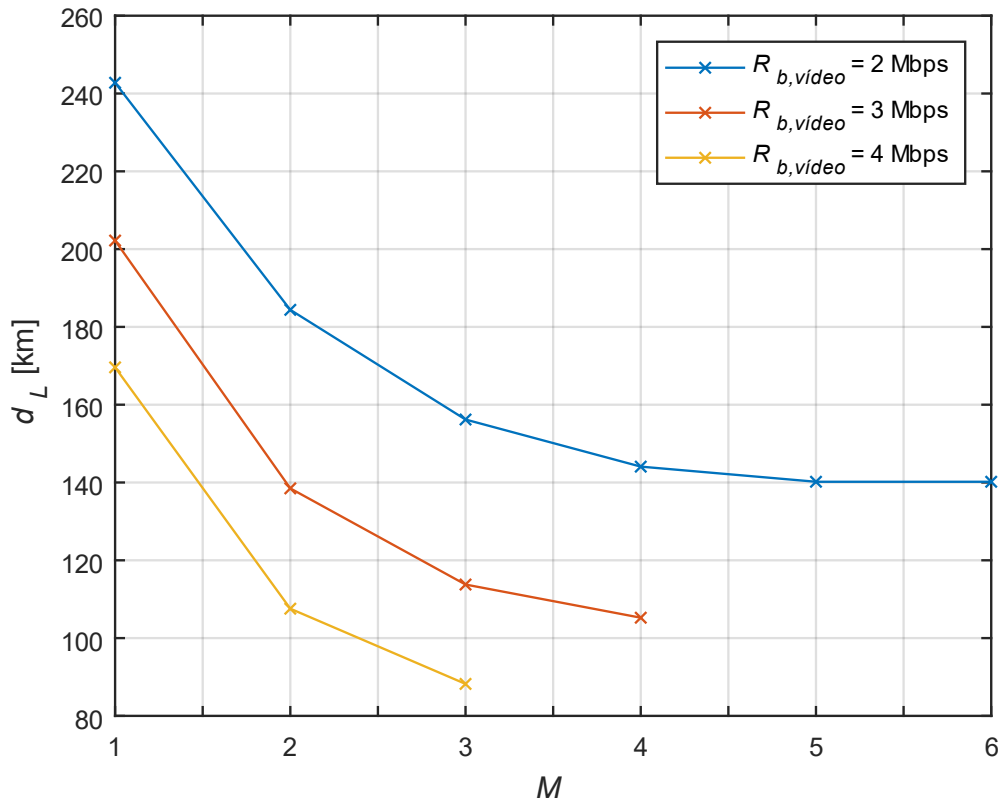


Figura 4.2 – Alcance máximo da rede em função de M (Cenário L).

Relativamente ao Cenário C, tal como se pode observar na Figura 4.3, que se obteve usando os parâmetros apresentados na Tabela 4.3, ao adicionar o número de fontes de vídeo, M , o alcance da rede diminui. Adicionalmente, quanto maior a taxa de transmissão associada à informação gráfica, menor é o alcance.

Tabela 4.3 – Parâmetros usados no cálculo do alcance da rede em função de M (Cenário C).

Parâmetros de entrada											
h_{UAV} [m]	h_{GCS} [m]	N	$R_{b,T}$ [Mbps]	$R_{b,video}$ [Mbps]			Δf [MHz]	G_{UAV} [dBi]	G_{GCS} [dBi]	M_s [dB]	f [MHz]
400	3	6	0,024	2	3	4	8	5	24	3	2400

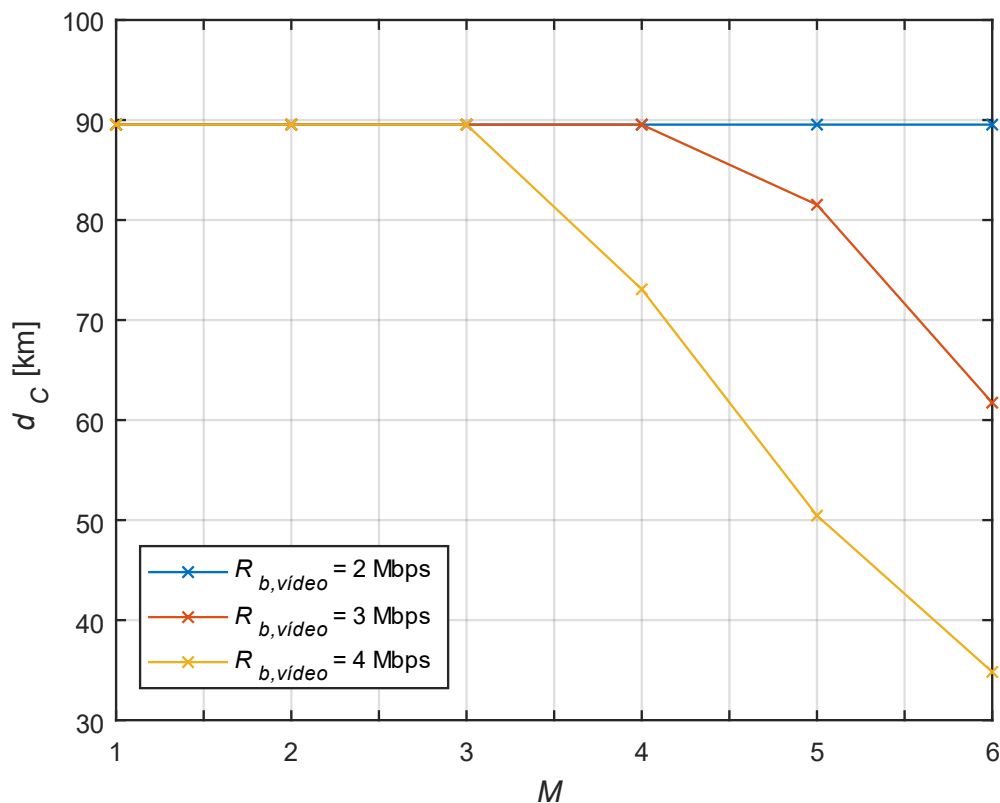


Figura 4.3 – Alcance máximo da rede em função de M (Cenário C).

Note-se que no caso de vídeo com taxa de transmissão de 2 Mbps, o fator limitativo é sempre a distância de RH; para transmissão de vídeo de 3 Mbps, a distância de RH deixa de limitar o alcance para $M \geq 5$; e para $R_{b,video} = 3 \text{ Mbps}$, observa-se um decréscimo acentuado do alcance a partir de $M = 3$, o que é causado pelo aumento da taxa de transmissão total que, por sua vez, implica um aumento de sensibilidade na GCS, diminuindo a distância máxima associada à propagação do sinal.

4.2. Definição de Cenários Reais

De acordo com o que está definido na Convenção das Nações Unidas Direito do Mar (CNUDM), e representado na Figura 4.4, as zonas marítimas sob soberania e/ou jurisdição nacional compreendem as águas interiores marítimas, que corresponde à zona compreendida ente a linha de base reta e a linha da costa, para a zona exterior das rias e rios; o mar territorial, onde “o Estado costeiro exerce soberania sobre o leito do mar, subsolo marinho e pleno controlo sobre a massa de água e espaço aéreo sobrejacente” e que se estende até as 12 milhas náuticas ($\cong 22 \text{ km}$); a zona contígua ao mar territorial, que são as águas compreendidas entre o limite exterior do mar territorial até as 24 milhas náuticas ($\cong 44,5 \text{ km}$); a ZEE, que também inclui a zona contígua ao mar territorial e não pode ultrapassar as 200 milhas náuticas ($\cong 370,4 \text{ km}$), corresponde à área em que o Estado costeiro

pode exercer o direito de exploração, conservação e gestão de todos os recursos naturais do solo e do subsolo; e a plataforma continental, em que “o Estado costeiro exerce direitos de soberania para efeitos de exploração e aproveitamento dos seus recursos naturais, sendo os mesmos exclusivos (...)” [DGRM18]. Relativamente à plataforma continental, decorre atualmente a defesa da extensão da região em questão, que corresponde a 200 milhas náuticas, para 350 (\cong 648 km) milhas náuticas. Como tal, caso a proposta, que está a ser analisada pela Comissão de Limites da Plataforma Continental (CLPC), seja aceite pelas Nações Unidas, 97 % do país passa a ser constituído por mar. Portugal passa, assim, a ter 3 877 408 km² de plataforma continental [Fran17], [Rife18]. Para além destas áreas marítimas, é também atribuída uma região de SAR (*Search and Rescue Region* – SRR) a Portugal, definida na Convenção Internacional de SAR.

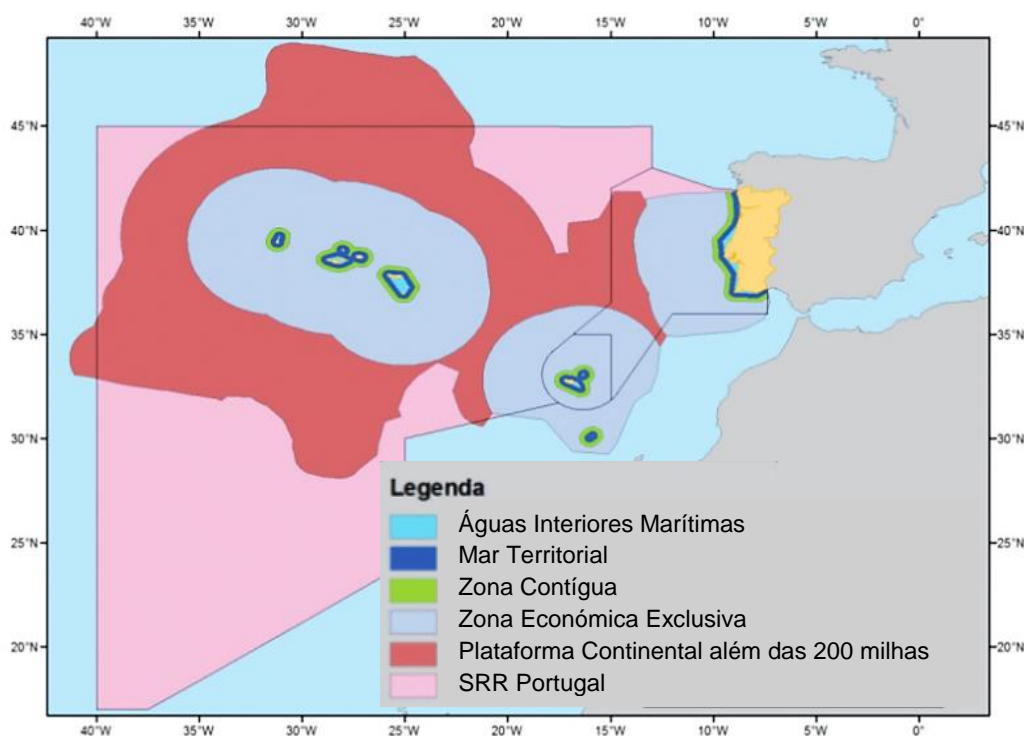


Figura 4.4 – Zonas marítimas sob soberania/jurisdição nacional (extraído de [DGRM18]).

De acordo com [GAMA18] na 33ª semana do ano 2018 registaram-se 39 acidentes/incidentes muito graves, 53 graves e 69 pouco graves, dando origem a 16 vítimas mortais e 76 feridos. Adicionalmente, registaram-se, no presente ano, 34 embarcações perdidas. No ano de 2017 registaram-se 30 acidentes/incidentes muito graves, 75 graves e 122 pouco graves, dos quais resultaram 20 vítimas mortais.

O Gabinete de Investigação de Acidentes Marítimos e da Autoridade para a Meteorologia Aeronáutica (GAMA), sendo um órgão de investigação de acidentes no setor do transporte marítimo, apresenta os dados estatísticos contidos na Tabela 4.4, relativos aos acidentes marítimos no ano 2013 e no primeiro quadrimestre de 2014, registados em Portugal e comparados com os que foram registados a nível da União Europeia (UE) [GAMA18].

Tabela 4.4 – Acidentes marítimos registados na UE e em Portugal (extraído de [GAMA18]).

	EU	Portugal (2013)	Portugal (Janeiro-Abril de 2014)
Total de Acidentes Marítimos	1950	33	11
Total de Acidentes Marítimos do Tipo "muito grave"	70	6	6
Total de vítimas mortais	75	6	15
Total de investigações concluídas	140	3	3

Relativamente à localização dos acidentes ocorridos em 2014, cuja representação se encontra na Figura 4.5 e dados são referentes a acidentes e incidentes ocorridos em território nacional e, fora desta área, os que ocorreram com navios e embarcações portuguesas, estes ocorreram maioritariamente junto à costa, cerca de 83 % localizam-se no mar territorial, dos quais 71 % no continente, 10 % nos Açores e 2 % na Madeira. Os restantes 17 % ocorreram em águas internacionais, mais precisamente no Atlântico Norte [GAMA18]. Pelos dados representados na Figura 4.5, observa-se que os acidentes mais afastados de Portugal Continental se localizam a cerca de 1900 km da costa.

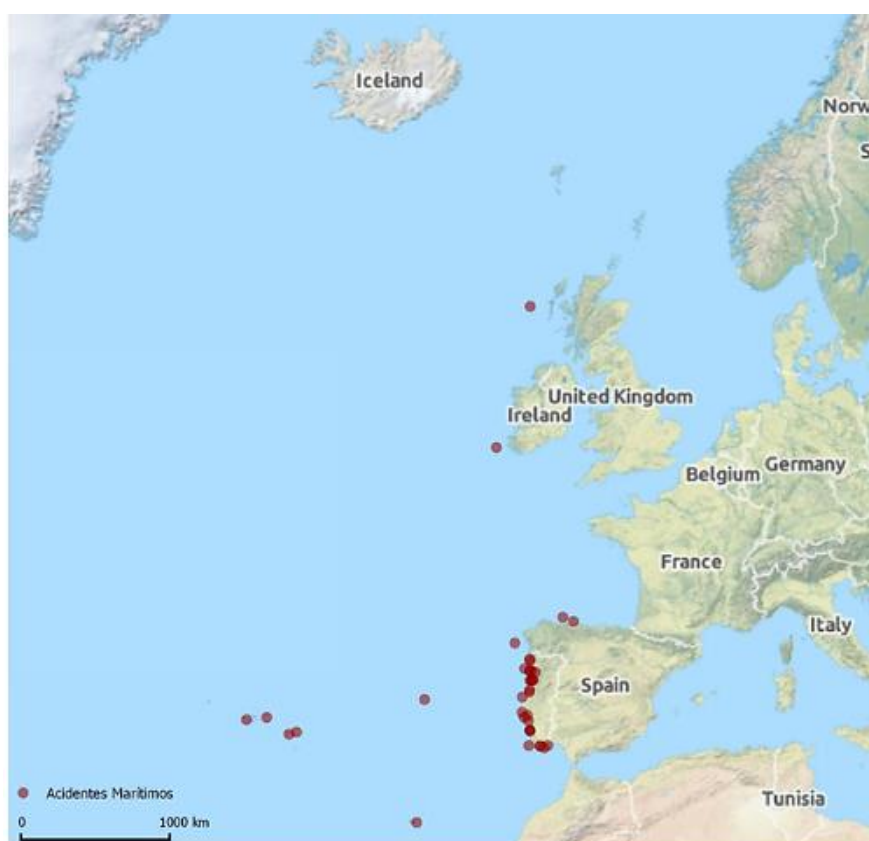


Figura 4.5 – Localização dos acidentes registados em 2014 (extraído de [GAMA18]).

É de referir ainda que se regista uma grande densidade de tráfego marítimo num corredor cuja largura se estima ser entre 50 a 150 km da costa portuguesa. Na Figura 4.6 ilustra-se o tráfego marítimo na costa portuguesa em 2017 [Mari18].

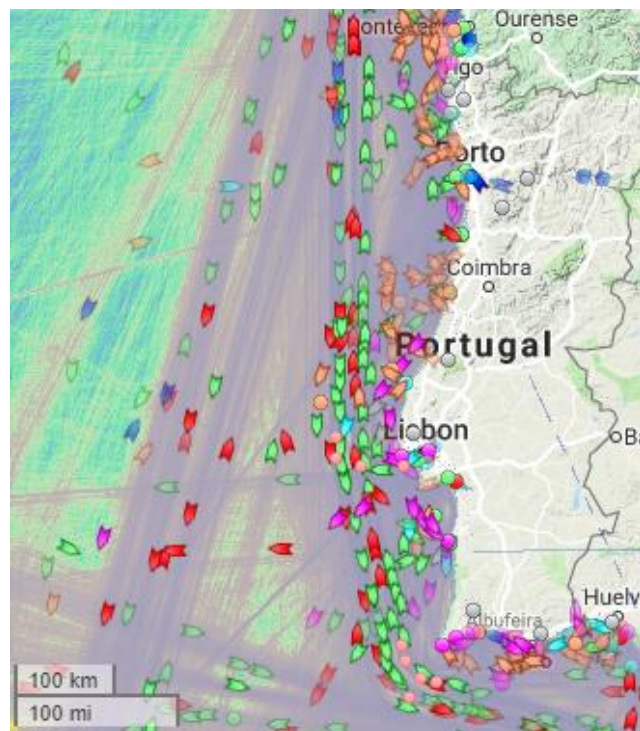


Figura 4.6 – Densidade de tráfego na costa portuguesa em 2017 (extraído de [Mari18]).

Relativamente aos ataques assimétricos a colunas de navios, que consistem em atingir uma força maior de forma eficiente, esta é uma realidade cada vez mais presente nos dias de hoje, procurando-se cada vez mais antecipar a potencial ameaça, usando diferentes tipos de sensores como câmeras ou radares, que podem ser instalados nos próprios navios ou nos UAVs comandados a partir de uma GCS instalada num dos navios. Tipicamente, estes ataques ocorrem na proximidade do alvo (não chegando a dezenas de km de distância). Na Figura 4.7 ilustra-se um exemplo de cenário possível de ataque assimétrico a um navio em alto mar [BaDa16].

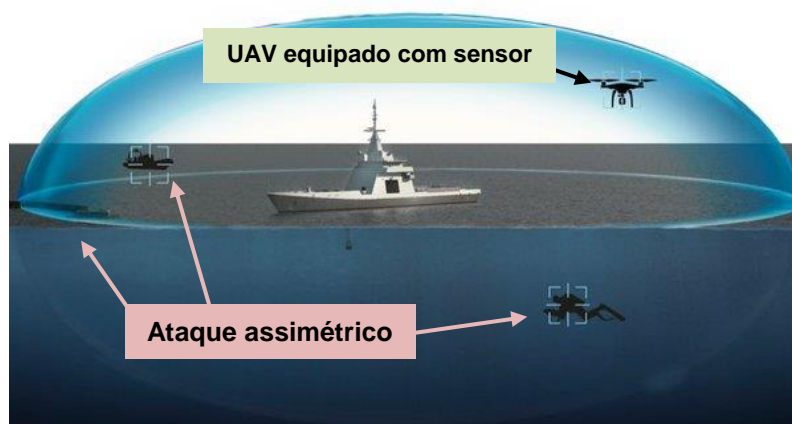


Figura 4.7 – Exemplo de cenário de um ataque assimétrico a um navio (extraído de [BaDa16]).

Tal como mencionado no Capítulo 1, um dos objetivos do estado é garantir a segurança do espaço marítimo português. Pretende-se, assim, determinar as regiões do mar português que podem ser patrulhadas pelos UAVs, aplicando-se para este efeito o Cenário L. Adicionalmente, é importante garantir a segurança e vigilância a colunas de navios que realizam missões em alto mar. Neste caso, considera-se o Cenário C.

Tanto o primeiro como o segundo cenários podem apresentar diferentes características. Neste sentido, nas secções seguintes são analisados os resultados referentes a várias variantes dos mesmos e apresentadas as regiões que correspondem ao respetivo alcance.

É de referir, ainda, que o desempenho em voo dos UAVs é afetado pelas condições do meio em que estes operam, podendo ser condicionado por chuva, rajadas e cortantes de ventos ou períodos de baixa visibilidade (nevoeiro ou voo noturno), pelo que o planeamento da missão deve ser feito considerando os limites impostos pelas características do UAV, com vista a garantir sempre uma operação segura. Note-se que as condições meteorológicas do meio de operação dos UAVs são fatores que não se podem prever a 100 %. Como tal, os resultados aqui analisados são dados estimados, podendo não corresponder exatamente aos valores registados durante um voo real.

Os resultados apresentados nas secções seguintes, bem como a respetiva análise, são obtidos considerando que o sistema *Microhard* pDDL2450 é instalado com sucesso nos UAVs.

Começando por definir o cenário realista hipotético em que os UAVs formam em linha, considerou-se uma GCS semelhante à que foi utilizada nos ensaios de voo já realizados pelo CIAFA, em que se usou uma antena parabólica TL-ANT2424B (Anexo C.2), apresentada na Figura 4.8.



Figura 4.8 – GCS considerada no cenário real (extraído de [Oliv18]).

Para a localização da GCS, escolheu-se o Aeródromo Municipal de Torres Vedras, tal como representado na Figura 4.9. A altitude da GCS, em relação ao MSL, determinada usando a ferramenta *Free Map Tools*, é de 37 m. Assumindo que a antena é colocada a 3 m do chão, considera-se uma altura de 40 m para a GCS.



Figura 4.9 – Localização da GCS: Aeródromo Municipal de Torres Vedras, Portugal.

Os parâmetros referentes à autonomia dos UAVs encontram-se na Tabela 4.5, e os que dizem respeito ao SC na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 – Parâmetros referentes à autonomia dos UAVs (Cenário L).

Parâmetros de entrada referentes à autonomia dos UAVs				
V [l]	C [l/h]	t_{exec} [h]	t_m [h]	v [km/h]
11	0,9	0,5	0,3	70

Tabela 4.6 – Parâmetros referentes ao SC (Cenário L).

Parâmetros de entrada referentes ao SC							
h_{UAV} [m]	h_{GCS} [m]	Δf [MHz]	f [MHz]	$R_{b,T}$ [Mbps]	G_{UAV} [dBi]	G_{GCS} [dBi]	M_S [dB]
200	40	8	2400	0,024	5	24	3

Nestas condições, e considerando o esquema de modulação mais alto (64QAM $5/6$), o número máximo de UAVs na rede, $N_{m\acute{a}x}$, é o que se apresenta na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Número máximo de UAVs para $R_{b,v\acute{i}deo} = 2$ e 4 Mbps, e $M = 1$ e N (Cenário L).

Taxa de Transmissão do Vídeo [Mbps]		$N_{m\acute{a}x}$	
		2	4
M	1	500	416
	N	6	3

É de referir que os valores obtidos para $M = 1$ apenas servem para demonstrar que, no caso em que apenas o UAV extremo transmite vídeo, a capacidade não se revela fator limitativo no dimensionamento da rede. Numa situação real, com os recursos que a FA dispõe atualmente, não seria viável operar com uma rede constituída por mais de 8 UAVs considerados nesta dissertação.

Relativamente ao cenário real em que os UAVs têm uma formação circular, considera-se uma coluna de navios semelhante à que se encontra ilustrada na Figura 4.10, a realizar uma missão que implica atravessar o Oceano Atlântico.

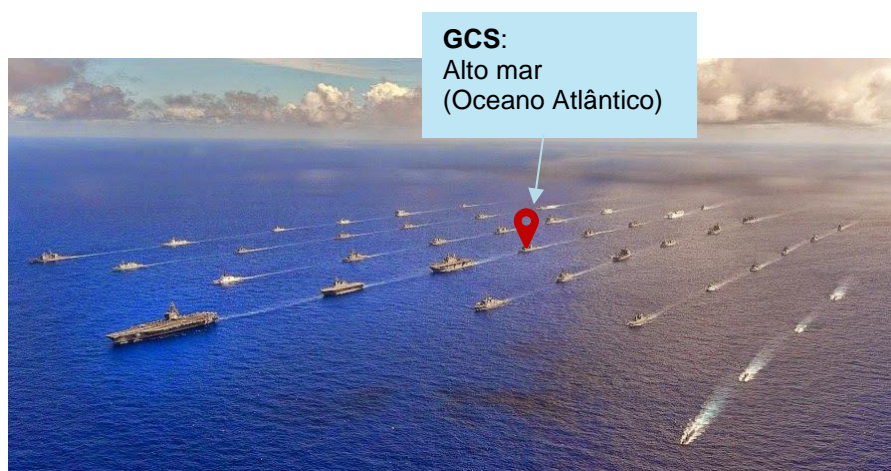


Figura 4.10– Coluna de navios e a respetiva localização da GCS (adaptado de [Chin18]).

Assume-se que a GCS se encontra no navio central e que os UAVs se movem de forma coordenada, seguindo um caminho circular de referência, cujo centro coincide com o centro geométrico do conjunto de embarcações. Assume-se o uso da antena OD12-2400 (Anexo C.3) na GCS.

Na análise deste cenário definiram-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.8 referentes à autonomia dos UAVs, e na Tabela 4.9 referentes ao SC.

Tabela 4.8 – Parâmetros referentes à autonomia dos UAVs (Cenário C).

Parâmetros de entrada referentes à autonomia dos UAVs				
V [l]	C [l/h]	t_{exec} [h]	t_m [h]	v [km/h]
7	1,1	1	0,3	70

Tabela 4.9 – Parâmetros referentes ao SC (Cenário C).

Parâmetros de entrada referentes ao SC							
h_{UAV} [m]	h_{GCS} [m]	Δf [MHz]	f [MHz]	$R_{b,T}$ [Mbps]	G_{UAV} [dBi]	G_{GCS} [dBi]	M_S [dB]
50	15	8	2400	0,024	5	12	3

Nestas condições, e considerando o esquema de modulação mais alto (64QAM $5/6$), o número máximo de UAVs na rede, $N_{m\acute{a}x}$, é o que se apresenta na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Número máximo de UAVs para $R_{b,video} = 2$ e 4 Mbps, e $M = 1$ e N (Cenário C).

Taxa de Transmissão do Vídeio [Mbps]		$N_{m\acute{a}x}$	
		2	4
M	1	1083	1000
	N	13	6

Tal como referido anteriormente (no caso do Cenário L), também neste cenário de operação os valores obtidos para $M = 1$ não são realistas do ponto de vista de operação em cenário real, pois a FA não dispõe, atualmente, recursos suficientes para operar com redes compostas por mais de 8 UAVs considerados neste estudo.

4.3. Resultados para Cenário em Linha

Nesta secção são definidos diferentes valores de N para o cenário real em que os UAVs formam em linha, e estimados os respetivos alcances, considerando transmissão de vídeo de 2 e/ou 4 Mbps. Esta análise é realizada para $M = 1$, configuração que mais se adequa às missões de seguimento do alvo. Também é analisado o caso extremo em que $M = N$, que se enquadra na fase de busca do alvo que antecede a fase de seguimento.

4.3.1. Uma Fonte de Video

Começando por analisar uma rede de UAVs com formação em linha, em que apenas o nó mais afastado da GCS é fonte de informação gráfica, definiu-se uma taxa de transmissão de vídeo, inicialmente, de 2 Mbps e, numa segunda análise, de 4 Mbps.

Para analisar a transmissão de vídeo de 2 Mbps assumiu-se o esquema de modulação QPSK $1/2$. Simulou-se o ambiente real para $N = 4, 5, 6$ e 7 , obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.11, cuja ilustração se encontra na Figura 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados para $M = 1$, $R_{b,video} = 2$ Mbps (Cenário L).

Número de UAVs na rede	4	5	6	7
Alcance máximo imposto pelo SC [km]	208,88	249,96	290,83	331,48
Alcance máximo imposto pela autonomia dos UAVs [km]	399,78			
Fator limitativo	SC			

Neste caso de estudo, o alcance da rede nunca é limitado pela autonomia dos UAVs (399,78 km). Observa-se um aumento de, aproximadamente, 40 km com adição de um UAV na rede. Este resultado deve-se ao facto de haver apenas uma fonte de transmissão de informação gráfica com 2 Mbps de taxa de transmissão associada. Ao adicionar nós na rede, que apenas retransmitem dados recolhidos pelo UAV N , o aumento da taxa de transmissão total não é significativo (0,024 Mbps por cada UAV adicional), o que contribui para o aumento significativo do alcance da rede.

Pela observação dos resultados obtidos, numa rede composta por 7 UAVs o alcance imposto pelo SC permite cobrir cerca de 90 % da ZEE. Para além disso, todas as configurações consideradas apresentam uma distância máxima superior à zona do mar territorial, onde ocorre a maior parte dos acidentes marítimos. Assim, no caso de necessidade de patrulhamento e/ou vigilância destas zonas, o UAS da FA poderia ser usado, podendo contribuir para a diminuição do número de acidentes marítimos e/ou atenuação dos danos causados pelos mesmos. Já no caso dos acidentes mais afastados (aproximadamente, a 1900 km da costa) os alcances obtidos são muito menores, o que leva a concluir que com o sistema UAV em análise e os recursos disponíveis não seriam suficientes para alcançar essas zonas.

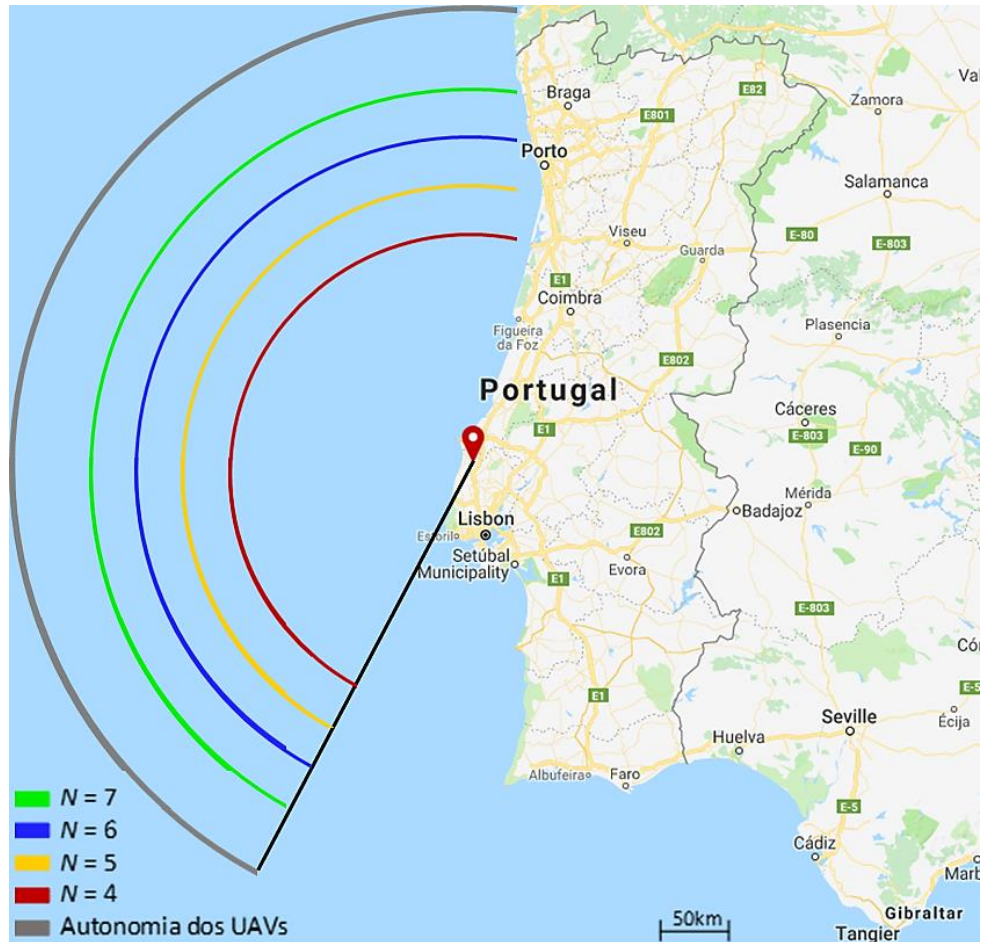


Figura 4.11 – Alcance máximo para $M = 1$, $R_{b,video} = 2$ Mbps (Cenário L).

Para transmissão de vídeo de 4 Mbps, definindo o esquema de modulação QPSK $3/4$, obtiveram-se os resultados contidos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados para $M = 1$, $R_{b,video} = 4$ Mbps (Cenário L).

Número de UAVs na rede	4	5	6	7
Alcance máximo imposto pelo SC [km]	164,74	191,27	217,65	243,90
Alcance máximo imposto pela autonomia dos UAVs [km]	399,78			
Fator limitativo	SC			

A Figura 4.12 ilustra as regiões possíveis de alcançar nas condições aqui analisadas.

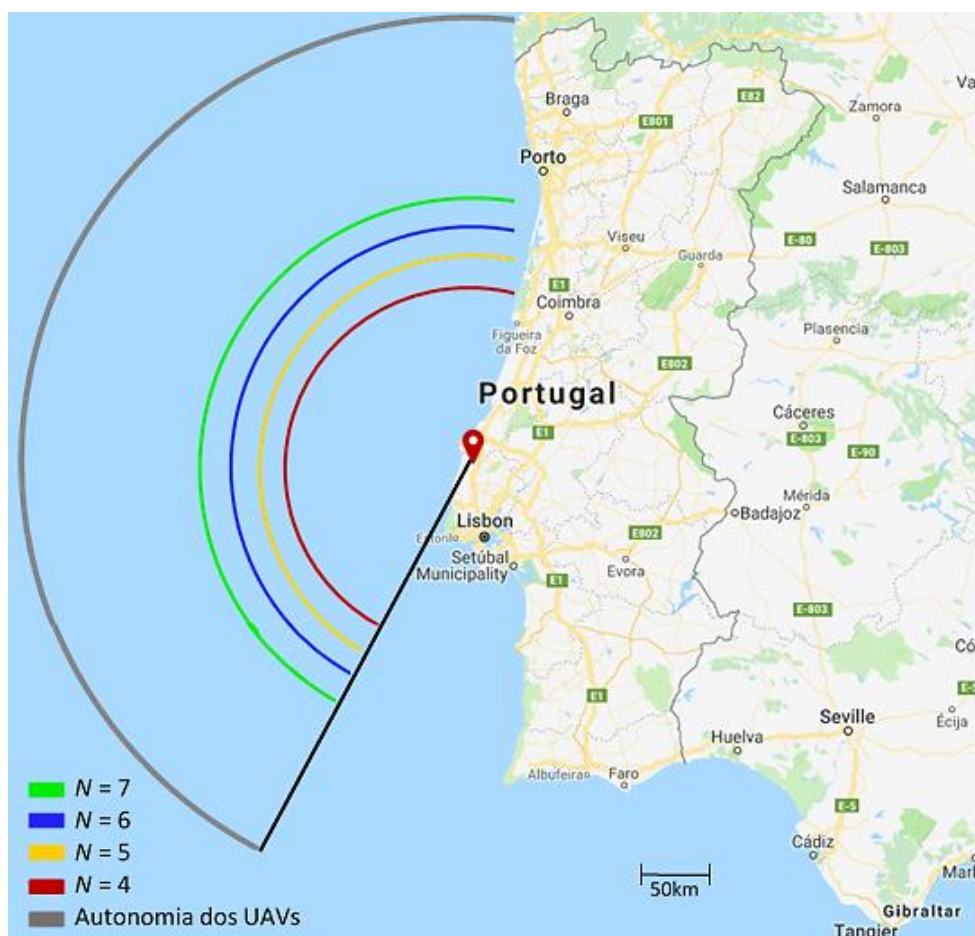


Figura 4.12 – Alcance máximo para $M = 1$, $R_{b,video} = 4$ Mbps (Cenário L).

Note-se que, ao aumentar a taxa de transmissão de vídeo para o dobro (4 Mbps), o alcance da rede diminui em cerca de 24 %. Neste caso, uma rede com 7 UAVs permite cobrir cerca de 66 % da ZEE (no caso anterior, em que $R_{b,video}$ é 2 Mbps, é possível cobrir cerca de 90 % da ZEE).

É de referir ainda que tanto para o caso em que a taxa de transmissão de vídeo é 2 Mbps como para 4 Mbps, as distâncias máximas obtidas são superiores a 150 km, o que permite concluir que, em caso de necessidade, os UASs da FA poderiam ser usados nas missões vigilância marítima ou recolha de informação gráfica nas zonas de maior densidade de tráfego (corredores entre 50 a 150 km da costa).

4.3.2. N Fontes de Vídeo

Nesta secção é analisado o cenário real com formação em linha para $N = 2, 3, 4$ ou 5 , considerando que todos os UAVs que constituem a rede são fontes de informação gráfica ($M = N$).

Começando por analisar o caso em que todos os nós transmitem vídeo de 2 Mbps, consideraram-se os esquemas de modulação QPSK $3/4$, 16QAM $3/4$, 16QAM $3/4$ e 64QAM $2/3$, para $N = 2, 3, 4$ e 5 , respetivamente. Os resultados obtidos são os que se apresentam na Tabela 4.13, e a respetiva ilustração na Figura 4.13.

Tabela 4.13 – Resultados para $M = N$, $R_{b,video} = 2$ Mbps (Cenário L).

Número de UAVs na rede	2	3	4	5
Alcance máximo imposto pelo SC [km]	126,06	152,86	170,08	160,11
Alcance máximo imposto pela autonomia dos UAVs [km]	399,78			
Fator limitativo	SC			

Relativamente à distância máxima imposta pela autonomia, tal como na análise anterior, esta não se revela o fator limitativo em nenhum dos casos considerados. Para além disso, ao contrário do observado na Secção 4.3.1, em que o alcance aumenta em, aproximadamente, 40 km com a adição de um nó na rede, neste caso apenas se verifica um aumento de, aproximadamente, 20 km. Este resultado deve-se ao facto de haver um significativo aumento de fluxo de dados total com adição de UAVs, o que requer um esquema de modulação superior, aumentando a sensibilidade do recetor e potência máxima de transmissão, resultando numa distância máxima menor.

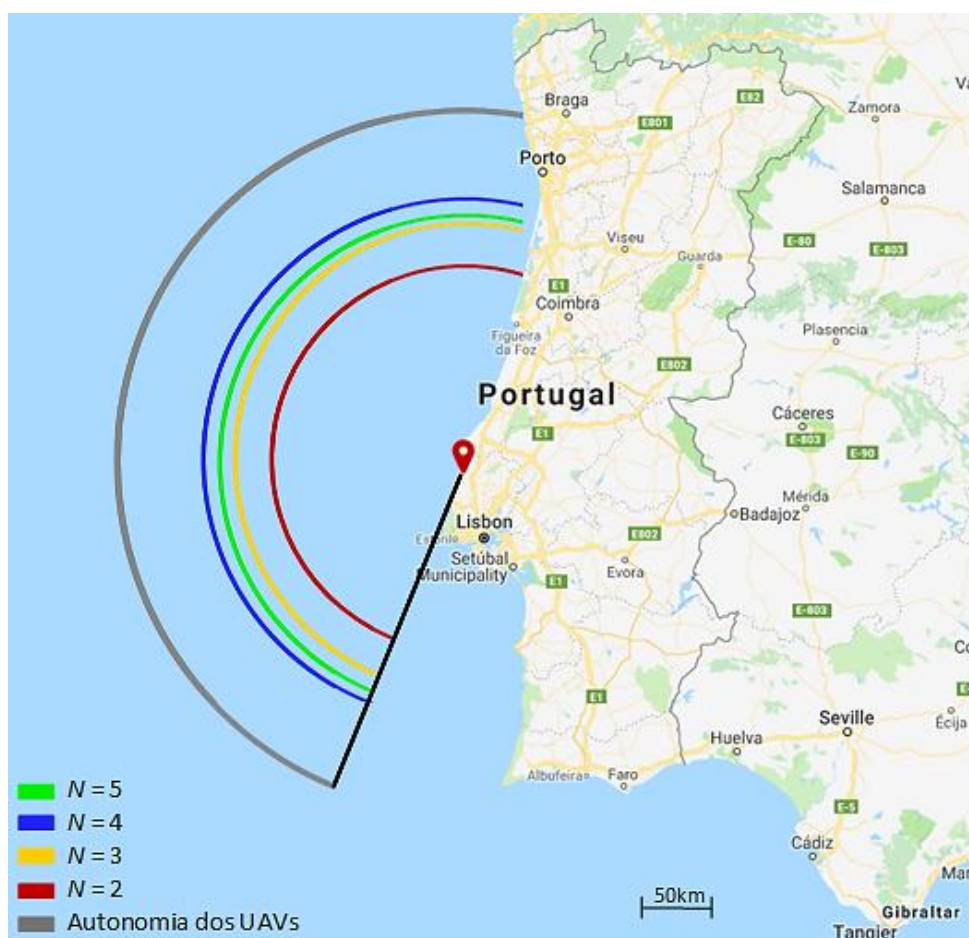
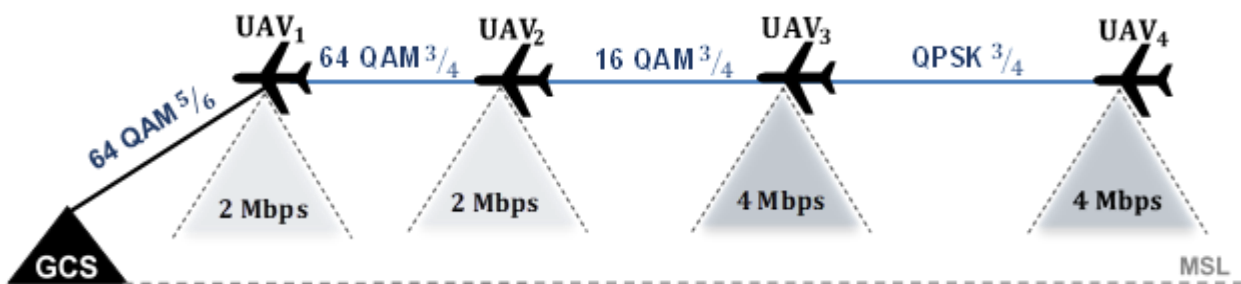


Figura 4.13 – Alcance máximo para $M = N$, $R_{b,video} = 2$ Mbps (Cenário L).

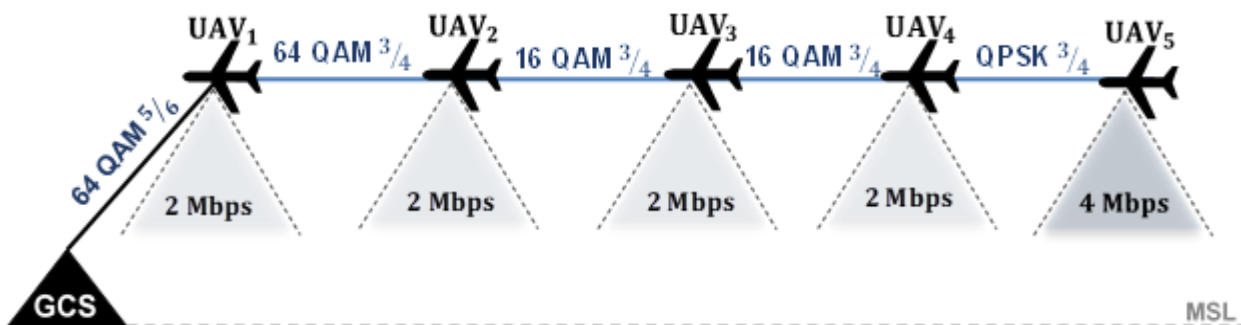
Relativamente ao alcance obtido para $N = 4$ (170,08 km) e $N = 5$ (160,11 km), não seria de esperar que com a adição de um UAV, a distância máxima imposta pelo SC diminuísse. A justificação para este resultado, e relembando que o alcance máximo imposto pelo SC é determinado tendo em conta tanto o desempenho dos rádios como a distância de RH, é que, nestas condições, até $N = 4$ o fator que limita a ligação entre a GCS e o UAV *backbone* é a distância de RH. Já para $N = 5$, todas as ligações, incluindo a 1ª, são limitadas pelo desempenho e capacidade do SC.

Observa-se, ainda, que os resultados aqui obtidos são os desejados pois se traduzem em alcances que se encontram dentro das zonas de interesse do ponto de vista das missões que se pretendem realizar com o UAS da FA.

Para vídeo com taxa de transmissão de 4 Mbps, tal como referido na Secção 4.2, o número máximo de fontes de informação gráfica, imposto pela capacidade do SC, é 3. Assim, e por forma a garantir que a condição (3.20) seja satisfeita, para cenários em que $N > 3$ consideraram-se fontes de vídeo com taxas de transmissão diferentes: para o caso em que $N = 4$ optou-se por analisar a hipótese em que os dois UAVs mais afastados transmitem vídeo de 4 Mbps e os restantes são fontes de vídeo de 2 Mbps; e para uma rede em que $N = 5$, considerou-se que apenas o UAV extremo capta e transmite vídeo de 4 Mbps, sendo os restantes quatro fontes de vídeo de 2 Mbps. As duas situações aqui referidas ($N = 4$ e $N = 5$, com $M = N$ e $R_{b,video} = 2$ e 4 Mbps) encontram-se ilustradas na Figura 4.14.



(a) $N = 4$.



(b) $N = 5$.

Figura 4.14 – Ilustração dos cenários em que $M = N$ e $R_{b,video} = 2$ e 4 Mbps.

Neste cenário, o alcance associado à rede de 2 UAVs é superior às outras configurações. Tal facto deve-se à menor taxa de transmissão do fluxo total da rede (entre a GCS e o UAV *backbone*) – 8 Mbps para $N = 2$ e 12 Mbps para $N = 3, 4$ e 5.

Na Tabela 4.14 encontram-se os resultados referentes às redes nas condições anteriormente referidas, e a respetiva ilustração na Figura 4.15.

Tabela 4.14 – Resultados para $M = N$, $R_{b,video} = 2$ e 4 Mbps (Cenário L).

Número de UAVs na rede	2	3	4	5
Alcance máximo imposto pelo SC [km]	111,27	79,42	86,38	103,38
Alcance máximo imposto pela autonomia dos UAVs [km]	399,78			
Fator limitativo	SC			

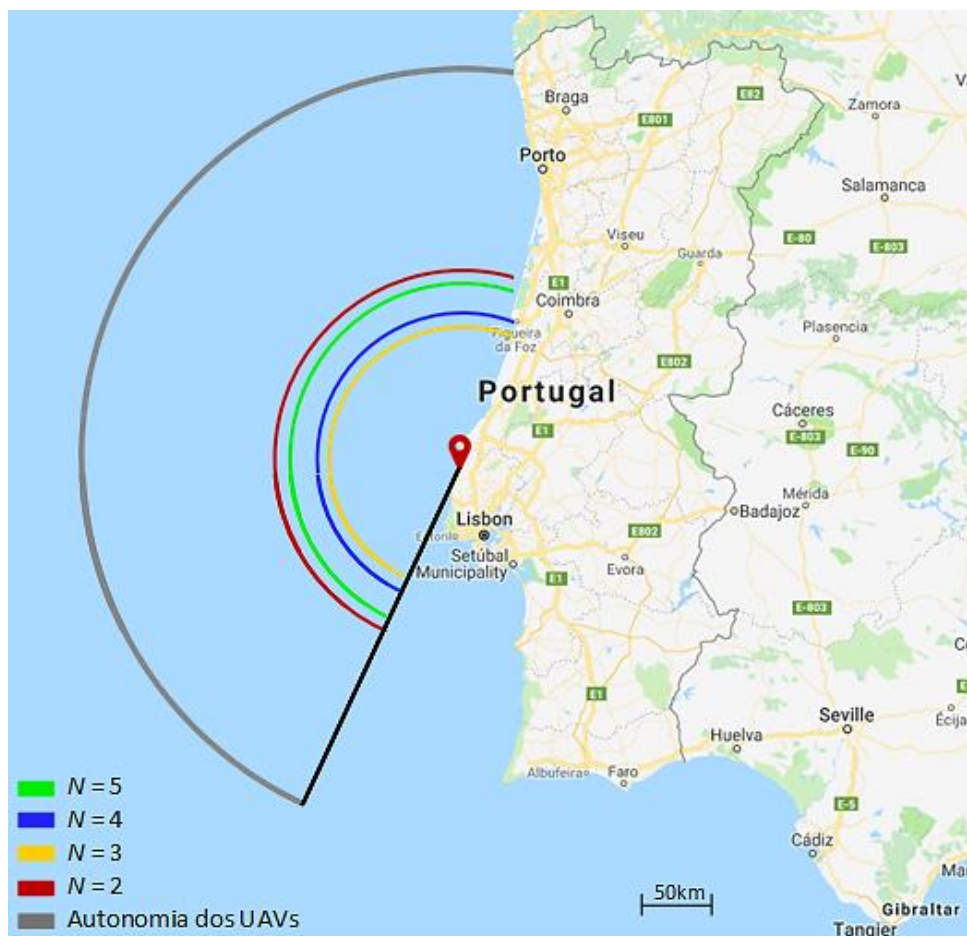


Figura 4.15 – Alcance máximo para $M = N$, $R_{b,video} = 2$ e 4 Mbps (Cenário L).

Pela análise dos resultados obtidos, observa-se que, mesmo nos casos em que existem N fontes de informação gráfica com taxas de transmissão elevadas, as distâncias máximas estimadas permitem alcançar zonas de interesse (regiões onde se verifica uma grande ocorrência de acidentes marítimos e de maior densidade de tráfego), havendo a possibilidade dos UAVs da FA realizarem missões de busca e/ou vigilância marítima.

A Figura 4.16 ilustra o alcance de uma rede com 4 UAVs, para o caso em que apenas um UAV transmite vídeo de 2 Mbps (destacado a vermelho) e para o caso em que todos os UAVs são fontes de informação gráfica (destacado a verde). Os resultados são 208,88 km para $M = 1$ e 170,08 km para $M = N$.



Figura 4.16 – Alcance máximo para $N = 4$, $R_{b,vídeo} = 2$ Mbps com $M = 1$ e N (Cenário L).

Note-se que, neste exemplo, para a mesma configuração, ao acrescentar 3 fontes de vídeo numa rede de 4 UAVs no total, o alcance diminui em, aproximadamente, 19 % (≈ 39 km).

Desta análise conclui-se que o aumento do alcance da rede não é proporcional ao número de nós. O número de fontes de vídeo selecionadas e a taxa de transmissão associada à informação gráfica influenciam significativamente a distância máxima possível de atingir.

Observa-se ainda que todas as distâncias estimadas para o Cenário L não são suficientes para cobrir a região de SAR nacional.

4.4. Resultados para Cenário Circular

Nesta secção são definidos diferentes valores de N para o cenário real em que os UAVs apresentam uma formação circular, e estimados os respetivos alcances, considerando transmissão de vídeo de 2 e/ou 4 Mbps. Esta análise é realizada tanto para $M = 1$ como $M = N$. Os parâmetros característicos do sistema UAS e da rede utilizados são os descritos na Secção 4.2, nomeadamente nas Tabelas 4.8 e 4.9.

4.4.1. Uma Fonte de Vídeo

Nesta secção é analisado o cenário real com formação circular para $N = 3, 4, 5$ ou 6 , considerando que apenas um dos UAVs da rede é fonte de informação gráfica ($M = 1$).

Começando por analisar transmissão de vídeo de 2 ou 4 Mbps, em que apenas é seleccionada uma fonte de informação gráfica de cada vez, para $N = 3, 4, 5$ e 6 , obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Resultados para $M = 1$, $R_{b,vídeo} = 2$ ou 4 Mbps (Cenário C).

Número de UAVs na rede		3	4	5	6
Alcance máximo imposto pelo SC [km]	$R_{b,vídeo} = 2$ Mbps	69,94	69,78	69,63	69,47
	$R_{b,vídeo} = 4$ Mbps	56,20	56,07	55,95	55,82
Alcance máximo imposto pela autonomia dos UAVs [km]		399,78			
Fator limitativo		SC			

Ao contrário do que acontece no Cenário L, analisado na Secção 4.3.1, e relembando que a distância máxima do raio circular é dada pela ligação mais carregada, neste caso não se verifica aumento do alcance (imposto pelo SC) com a adição de nós na rede. Tal acontece porque, ao usar mais UAVs, ocorre o aumento da taxa de transmissão total, aumentando a sensibilidade do recetor. Relativamente à autonomia, nestas condições, em nenhum dos casos considerados este se revela fator limitativo do alcance da rede.

Tendo em conta a missão em que se pretende aplicar este tipo de redes de UAVs (com formação circular), que corresponde a deteção e proteção de forças em ambiente marítimo, considera-se que os resultados obtidos são favoráveis pois, tal como referido na Secção 4.2, a maior parte dos ataques assimétricos ocorre na proximidade do alvo. Desta forma, as distâncias máximas estimadas permitem, com uma margem significativa, antecipar uma potencial ameaça a colunas de navios.

4.4.2. N Fontes de Vídeo

Nesta secção é analisado o cenário real com formação circular para $N = 3, 4, 5$ ou 6 , considerando que todos os UAVs que constituem a rede são fontes de informação gráfica ($M = N$).

Começando por analisar o caso em que todos os nós transmitem vídeo de 2 Mbps, assumiram-se os esquemas de modulação QPSK $3/4$, 16QAM $1/2$, 16QAM $1/2$ e 16QAM $3/4$, para $N = 3, 4, 5$ e 6 , respetivamente. Para vídeo com taxa de transmissão de 4 Mbps, consideraram-se os esquemas de modulação de 16QAM $3/4$, 64QAM $2/3$, 64QAM $2/3$ e 64QAM $3/4$, para $N = 3, 4, 5$ e 6 , respetivamente. Os resultados obtidos são os que se apresentam na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Resultados para $M = N$, $R_{b,vídeo} = 2$ ou 4 Mbps (Cenário C).

Número de UAVs na rede		3	4	5	6
Alcance máximo imposto pelo SC [km]	$R_{b,vídeo} = 2$ Mbps	48,27	40,02	33,17	27,50
	$R_{b,vídeo} = 4$ Mbps	26,77	18,44	12,70	8,45
Alcance máximo imposto pela autonomia dos UAVs [km]		399,78			
Fator limitativo		SC			

Note-se que, ao contrário do que se observava no Cenário L e à semelhança dos resultados obtidos na Secção 4.4.1, neste caso o alcance da rede diminui com a adição de nós. Relativamente à taxa de transmissão associada ao fluxo de dados na rede, tal como seria de esperar, quanto maior é o seu valor, menor é o alcance.

Comparando estes resultados com os obtidos na Secção 4.4.1 (em que apenas existe uma fonte de informação gráfica), observa-se que quanto maior o número de fontes de vídeo, menor é a distância máxima da rede imposta pelo SC. Por exemplo, no caso de uma rede com 6 UAVs no total, quando apenas um dos nós transmite vídeo de 4 Mbps o alcance estimado é de 55,82 km. Já para $M = N$, a distância máxima estimada diminui para 8,45 km, correspondendo a uma diminuição de, aproximadamente, 85 % ($\approx 47,4$ km).

É de referir que algumas das distâncias estimadas para este cenário, como é o caso das redes com $R_{b,vídeo} = 4$ Mbps, não são as mais adequadas para antecipar uma potencial ameaça a colunas compostas por muitos navios. No entanto, consideram-se aceitáveis para acompanhar, por exemplo, um navio em alto mar. Os resultados obtidos para $R_{b,vídeo} = 2$ Mbps consideram-se favoráveis para as

missões em análise. Relativamente às redes em que $M = N$, este cenário apresenta a vantagem de se poder observar uma maior região, pois permite visualizar vídeo captado por todos os UAVs em simultâneo.

Na Figura 4.17 ilustram-se os resultados obtidos nesta análise.

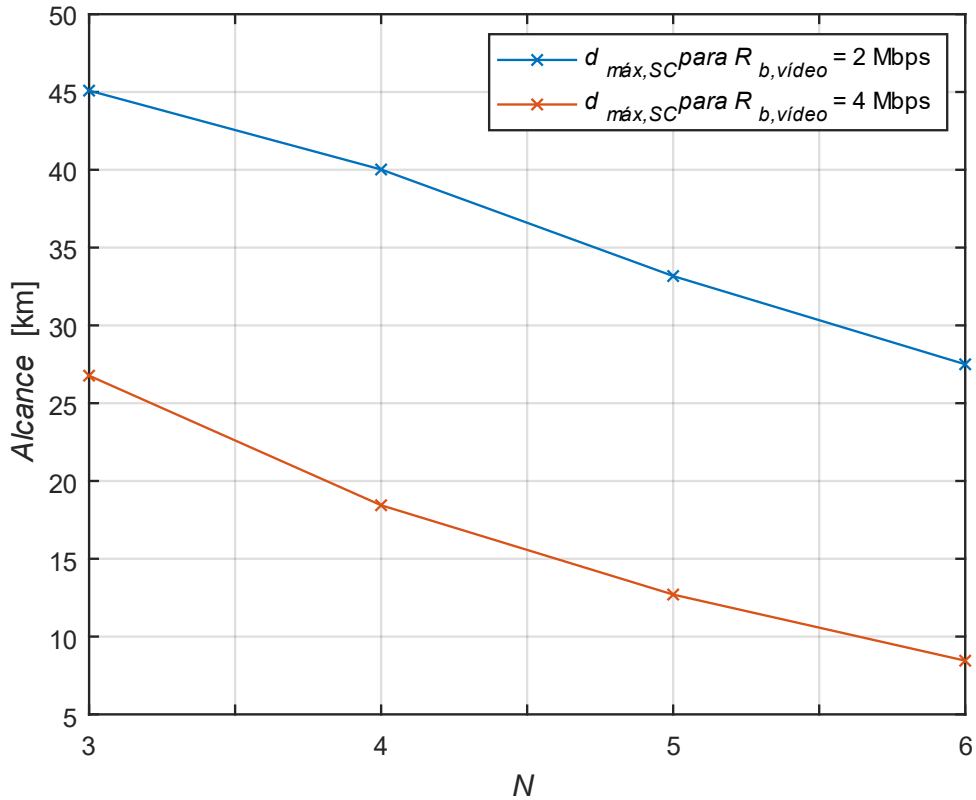


Figura 4.17 – Alcance imposto pelo SC para $M = N$, $R_{b,video} = 2$ e 4 Mbps (Cenário C).

Tendo em conta que todos os resultados analisados neste capítulo foram obtidos num ambiente de simulação que considera o FSPL para a propagação do sinal, e lembrando o observado em [Rodr12] que regista maiores perdas de propagação do sinal em ambiente real que as que se obtêm através das simulações, é de salientar para o facto de que todos os alcances aqui apresentados são apenas estimativas das distâncias máximas, podendo ser ligeiramente menores ou maiores em ambiente real.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido e algumas propostas de trabalhos futuros que poderão ser realizados no seguimento desta dissertação.

O objetivo desta dissertação foi desenvolver um modelo que permitisse dimensionar a cobertura máxima associada a uma rede *ad-hoc* de UAVs, analisando os limites de capacidade da mesma. Considerou-se o UAS do CIAFA, cujo SC se encontra em processo de alteração, por forma a permitir formação de redes *ad-hoc* de UAVs com retransmissão. Foram definidos dois cenários de operação: Cenário L, que corresponde à formação linear de UAVs, e Cenário C, em que os UAVs apresentam uma distribuição circular.

O Capítulo 1 inicia com um enquadramento do tema, nomeadamente uma breve contextualização histórica dos UAVs, a sua importância nos dias de hoje e referência a alguns dos projetos dedicados à investigação e desenvolvimento dos sistemas de UAVs. São também apresentados os motivos que levaram à abordagem deste tema e definidos os respetivos objetivos. Na última secção deste capítulo é descrita a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 são estudados os conceitos fundamentais e apresentado o estado da arte. Na primeira secção é descrito o conceito de UAS e apresentada a sua classificação segundo a NATO. De seguida são abordadas as redes *ad-hoc* de UAVs. Estas são comparadas às redes *ad-hoc* móveis e de veículos. É feita a descrição da respetiva arquitetura de rede. Seguidamente, são estudadas as comunicações nos UASs. É descrito o SC típico de um UAS, o tipo de ligações que existem e referidos os principais aspetos associados à cobertura e capacidade, considerados nesta dissertação. Por último, são apresentados os serviços e cenários de operação típicos associados às redes *ad-hoc* de UAVs, seguidos do estado da arte. No estado da arte é apresentado o levantamento de trabalhos já realizados no âmbito das redes de UAVs, cuja análise se revela pertinente para a presente dissertação.

No Capítulo 3, numa fase inicial, é caracterizado o UAS considerado neste estudo, são definidos os cenários de operação e é apresentada uma visão geral do modelo desenvolvido. De seguida é descrito o processo de formulação do modelo, é apresentado o respetivo método de implementação e a aferição do mesmo.

O sistema de UAVs considerado é o que se encontra em operação no CIAFA, e que tem como plataforma aérea o UAV ANTEX-X02 *Extended*. O SC atual utilizado nestes UASs não permite a sua operação em redes *ad-hoc* de UAVs, pois requer sempre uma transmissão direta entre o UAV e a GCS. A transmissão de vídeo é realizada através de uma ligação dedicada e unidirecional (UAV→GCS), e a troca de mensagens de C2 e Telemetria através de um rádio integrado no piloto automático *Piccolo* que, devido à solução fechada fornecida pelo fabricante, não permite comunicações diretas entre UAVs. Por forma a ultrapassar este problema, está atualmente a decorrer o processo de aquisição e instalação de rádios pDDL2450 (cujas especificações se encontram no Anexo B) com conectividade IP nos UAVs e na GCS, cujo principal objetivo é permitir a formação de redes *ad-hoc* de UAVs, estendendo os limites de operação do UAS atual. Os rádios considerados operam na banda de frequências entre os 2,402 GHz e os 2,478 GHz e permitem taxas de transmissão superiores a 20 Mbps. O SC considerado nesta dissertação impõe a existência de LOS entre os terminais, pelo que é tida em conta a distância de RH no dimensionamento da rede. Adicionalmente, a autonomia dos UAVs é considerada neste estudo.

O primeiro cenário de operação considerado (Cenário L) corresponde ao patrulhamento ou seguimento

de alvo, em ambiente marítimo, apresentando uma arquitetura hierárquica em que os UAVs se distribuem ao longo de uma linha que liga a zona de patrulhamento/alvo à GCS que, por sua vez, se localiza junto à costa. Neste cenário considera-se a possibilidade de vários UAVs terem que captar vídeo, podendo este ser transmitido trama a trama ou em *streaming*. Situações em que todos os UAVs recolhem informação gráfica correspondem a fase de busca, que antecede a fase de seguimento de alvo.

O segundo cenário considerado (Cenário C) corresponde às missões de deteção e proteção de forças em ambiente marítimo, em que os UAVs se movem de forma coordenada em torno de uma coluna de navios, seguindo um caminho circular de referência, cujo centro coincide com o centro geométrico do conjunto de embarcações, acompanhando a deslocação destas. Tal como no cenário linear, considera-se a possibilidade de vários UAVs terem que captar e transmitir vídeo. Nesta análise, assumiu-se que a GCS se encontra no barco que corresponde ao centro da coluna de navios.

Em ambos os cenários se considerou que os UAVs operam a mesma altitude (entre os 50 e 500 m em relação ao MSL), têm o mesmo SC e antenas idênticas. O modelo de propagação tido em conta é o FSPL, sendo adicionada uma margem de segurança no cálculo das perdas de sinal durante o percurso. Relativamente às antenas utilizadas na GCS, assumiu-se o uso de uma antena direcional de 24 dBi para o Cenário L e uma antena omnidirecional de 12 dBi para o Cenário C.

Com o intuito de dimensionar uma rede *ad-hoc* de UAVs com configuração idêntica à do Cenário L ou C, foi desenvolvido um modelo cujos parâmetros de entrada são: a altura dos terminais, taxa de transmissão, dados referentes ao modelo de propagação, ao SC, ao cálculo da autonomia dos UAVs e à configuração da rede, nomeadamente o número de UAVs usados e das fontes de vídeo seleccionadas. Com base nas expressões estimadas de potência máxima de transmissão e sensibilidade em função da taxa máxima de transmissão e capacidade do canal, é calculada a distância máxima imposta pelo desempenho do SC. Adicionalmente, é determinado o alcance imposto pela distância de RH e pela autonomia dos UAVs. Por fim, e com análise das três distâncias obtidas, é dado o alcance máximo da rede.

No caso do Cenário L, o alcance corresponde à distância entre o UAV mais afastado e a GCS. Esta medida corresponde também à área da busca, ao largo da costa a partir da GCS, que é possível alocar numa determinada missão, dado o número de UAVs disponíveis e as características do SC utilizado.

Relativamente ao Cenário C, o alcance corresponde ao raio máximo do círculo de referência em torno da coluna de navios, tendo em conta o número de UAVs utilizados, a modulação definida e as características do SC considerado. O raio circular é calculado com base na ligação mais carregada (por exemplo, se existir apenas um UAV a transmitir vídeo, o raio circular será a distância correspondente à ligação entre a GCS e a respetiva fonte de informação gráfica).

Os primeiros testes experimentais aos rádios pDDL2450 foram realizados em bancada, com o intuito de testar o funcionamento dos mesmos em ligação direta e com nó retransmissor. Foram usadas duas ferramentas: *iPerf* que permite injetar dados (em que o utilizador pode definir a LB associada aos dados a injetar) num dos terminais e avaliar a LB do sistema; e o *TamoSoft* que permite obter um diagnóstico

do desempenho da ligação em termos de taxa de transmissão.

Após a realização dos primeiros testes experimentais aos rádios, constatou-se que ao utilizá-los como retransmissores era forçado o modo de funcionamento *half-duplex*. Desta forma, na análise do Cenário L apenas seria possível considerar metade da capacidade do SC apresentada nas especificações fornecidas pelo fabricante. No caso do Cenário C, tendo em conta a localização considerada para a GCS, que é tal que a distância até à GCS é idêntica a partir de todos os nós da rede o que dispensa o uso de UAVs como retransmissores de vídeo, é considerado o modo de funcionamento de rádios em *full-duplex*. Relativamente às especificações de desempenho dos rádios, estes admitem a LB máxima de 8 MHz, sendo possível atingir, definindo um esquema de modulação 64 QAM^{5/6}, uma taxa de transmissão de 28 Mbps, à qual corresponde uma potência máxima de transmissão de 27 dBm e uma sensibilidade de -76 dBm, em modo de funcionamento *full-duplex*. Em *half-duplex* a capacidade dos rádios reduz para metade.

Na secção referente à análise da cobertura da rede são descritos os passos a seguir para determinar a mesma. Este parâmetro é analisado com base na potência de transmissão, sensibilidade do recetor, ganhos das antenas de transmissão e receção dos terminais, perdas de percurso calculadas usando o modelo FSPL e frequência de operação. É considerada também a arquitetura e configuração da rede, i.e., linear ou circular, e o respetivo número de UAVs.

Na secção referente à análise da capacidade, numa primeira fase são descritos os tipos de dados que fluem na rede, tanto em UL como em DL, como é o caso das mensagens de C2, telemetria e/ou posição de referência, e informação gráfica. Visto que a taxa de transmissão associada aos dados de UL é relativamente baixa, assume-se que não haverá problemas nessa ligação, considerando-se apenas a ligação DL no estudo da capacidade. Numa segunda fase, é caracterizado o SC dos rádios pDDL2450, relacionando a capacidade do mesmo com os parâmetros usados no cálculo da cobertura.

Os rádios pDDL2450 permitem definir uma LB de 2, 4 ou 8 MHz, sendo possível escolher um dos esquemas de modulação entre BPSK ^{1/2}, QPSK ^{1/2}, QPSK ^{3/4}, 16 QAM ^{1/2}, 16 QAM ^{3/4}, 64 QAM ^{2/3}, 64 QAM ^{3/4} ou 64 QAM ^{5/6}, para cada uma das larguras de banda. Conforme a LB e modulação selecionadas, existe uma taxa de transmissão máxima definida nas especificações dadas pelo fabricante, e a respetiva potência de transmissão e sensibilidade. Com base nestes dados, foram deduzidas expressões de potência de transmissão e sensibilidade do recetor em função de taxa de transmissão, para o modo de funcionamento *half-duplex* e *full-duplex*, para serem usadas na implementação do modelo que corresponde a um simulador desenvolvido no programa *Matlab* R2017a e que permite dimensionar a rede no Cenário L e C, respetivamente.

Na aferição foram simulados vários cenários, variando o valor de diversas variáveis e confirmaram-se os resultados obtidos usando uma calculadora gráfica *Tl-nspire CX CAS*. Usando os resultados obtidos neste processo, simulou-se o alcance máximo da rede em função do número de UAVs usados, para diferentes taxas de transmissão associadas à informação gráfica; e o alcance da rede em função do número de fontes de vídeo selecionadas. A análise destes resultados é apresentada na primeira secção do Capítulo 4.

Observou-se, tal como seria de esperar, que o alcance aumenta com o número de UAVs na rede, diminui com a adição de fontes de imagem/vídeo, e é tanto menor quanto maior é a taxa de transmissão associada à informação gráfica.

No Capítulo 4, numa primeira fase é apresentada uma análise geral dos resultados associados aos cenários considerados na fase da aferição do modelo. Seguidamente, são definidos dois cenários reais de operação, cuja configuração corresponde aos dois cenários analisados nesta Dissertação: linear, em que a GCS se encontra localizada no aeródromo de Torres Vedras e os UAVs patrulham a zona marítima; e circular, em que a GCS se encontra no centro de uma coluna de navios que navega em alto mar. Seguidamente são representados e analisados os alcances máximos estimados para redes com diferentes números de UAVs, de fontes de informação gráfica, a transmitir vídeo com taxa de transmissão de 2 ou 4 Mbps.

Relativamente ao Cenário L, para a localização da GCS escolheu-se o Aeródromo Municipal de Torres Vedras e uma distribuição de UAVs em linha sobre o oceano atlântico, a uma altitude de 200 m em relação ao MSL. Nas condições definidas para este cenário, e assumindo a LB e esquema de modulação mais alto, determinou-se o número máximo de UAVs numa rede *ad-hoc*: para vídeo com taxa de transmissão de 2 Mbps, 500 UAVs se se considerar apenas uma fonte de informação gráfica ($M = 1$) e 6 UAVs, caso se considere que todos os nós captam e transmitem vídeo ($M = N$), no caso em que a taxa de transmissão associada ao vídeo é 2 Mbps; 416 UAVs para $M = 1$ e apenas 3 UAVs para $M = N$, no caso em que a taxa de transmissão de vídeo é 4 Mbps. Note-se que os valores obtidos para $M = 1$ não são realistas e apenas servem para demonstrar que, no caso em que apenas o UAV extremo transmite vídeo, a capacidade não é fator limitativo no dimensionamento da rede. Numa situação real, com os recursos que a FA dispõe atualmente, não seria viável operar com uma rede constituída por mais de 8 UAVs considerados nesta dissertação. É de referir, ainda que os resultados referentes ao Cenário L foram obtidos considerando o modo de funcionamento *half-duplex* dos rádios. No entanto, segundo o fabricante, prevê-se que a próxima versão dos rádios pDDL2450 permita a sua utilização em *full-duplex*, mesmo sendo usados como retransmissores, o que implica resultados diferentes dos que são estimados neste estudo.

Relativamente aos resultados obtidos para o cenário linear, quando $M = 1$, no caso em que o vídeo tem uma taxa de transmissão de 2 Mbps os alcances variam entre ~200 km e 340 km para uma rede com um total de 4 a 7 UAVs, respetivamente; e para vídeo de 4 Mbps, obteve-se um alcance entre ~150 km e 240 km para redes compostas por 4 e 7 UAVs, respetivamente. Em ambos os casos, o alcance da rede é tanto maior quanto maior for o número total de UAVs na rede. Para o caso em que se considerou que todos os UAVs da rede são fontes de informação gráfica, as distâncias máximas estimadas diminuíram significativamente. Por exemplo, para uma rede de 4 UAVs, dois dos quais transmitem vídeo de 4 Mbps e outros dois de 2 Mbps, o alcance máximo obtido foi de 83,4 km.

Dos resultados obtidos na análise do cenário real em linha, conclui-se que o aumento da rede não é linearmente proporcional ao número de nós, pois o alcance é fortemente influenciado pela taxa de transmissão dos dados que fluem na rede. Para além disso, observa-se que, tipicamente, em redes em que o débito binário dos dados é baixo (por exemplo, redes com uma fonte de vídeo) o fator limitativo

é maioritariamente a distância de RH, pois do ponto de vista do desempenho do SC ou autonomia é possível atingir distâncias superiores. Já no caso em que existem várias fontes de informação gráfica, a distância de RH não se revela limitativo. Note-se que, por exemplo para uma rede de 4 UAVs em linha, a transmitir vídeo de 2 Mbps, obteve-se um alcance de 208,88 km para $M = 1$ e apenas 170,08 km para $M = N$.

É de observar ainda que os alcances estimados se encontram dentro dos valores desejados para a realização das missões em que se pretende utilizar o sistema de UAVs da FA após a implementação dos rádios pDDL2450.

Para o cenário real circular definiu-se que a GCS se localiza no centro de uma coluna de navios que realiza uma missão no oceano atlântico e obtiveram-se resultados efetuando uma análise semelhante à realizada para o cenário em linha, mas para $N = 3, 4, 5$ e 6 . Verificou-se, nesta análise, que quanto maior é o número de UAVs na rede, menor é o raio circular do caminho descrito por estes.

No caso em que há apenas uma fonte de vídeo, a diminuição do alcance (imposto pelo SC) com o aumento do número de UAVs é mínima ($< 0,5$ km com adição de um UAV na rede). Já no caso em que todos os UAVs transmitem vídeo, a distância máxima imposta pelo SC reduz significativamente. Por exemplo, no caso em que a taxa de transmissão de vídeo é 4 Mbps, obteve-se um alcance de 12,70 km e de 8,45 km para $N = 5$ e 6 , respetivamente.

Após a análise realizada, é possível concluir que mesmo não havendo problemas do ponto de vista de cobertura, a capacidade do sistema revela-se importante no dimensionamento de uma rede, pois é a que determina o número máximo de UAVs que podem ser utilizados e o número de fontes de vídeo. Para além disso, a arquitetura da rede é um fator determinante para se poder calcular a distância máxima possível de alcançar. Note-se que, por exemplo, no Cenário L o alcance aumenta com o aumento do número de nós na rede, já no Cenário C o efeito provocado pela adição de UAVs é contrário – o alcance diminui. Quanto à capacidade da rede, esta é tanto maior quanto superior a LB e esquema de modulação escolhidos.

Relativamente às propostas de trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos no seguimento desta dissertação, o modelo proposto não tem em conta as perdas devido a colisões de pacotes de dados durante o percurso. Como tal, sugere-se uma otimização do modelo analisando este fator.

No caso do cenário circular, assumiu-se que a localização da GCS coincide com o centro do caminho circular descrito pelos UAVs o que implica que todos os UAVs se encontrem à mesma distância da GCS. Sugere-se que seja realizada uma análise da capacidade e cobertura de uma rede em que a GCS se encontre numa localização diferente, como por exemplo, no primeiro ou no último navio da coluna. Para além disso, poderiam ser exploradas outras arquiteturas de rede, como por exemplo, multi-camada ou multi-grupo.

Sugere-se, ainda, a análise de interferência devido a multipercurso e multicanal, os diferentes tipos de multiplexagem e topologias de rede.

Anexo A

ANTEX-X02 *Extended*

O presente anexo destina-se à descrição dos sistemas que constituem a plataforma aérea ANTEX-X02 *Extended*, nomeadamente a sua estrutura física, o sistema de propulsão, de energia e de *failsafe*, de *payload*, e os respetivos sistemas secundário e primário de voo.

A.1 Estrutura física

O sistema estrutural do UAV em estudo é composto pelas seguintes unidades, sujeitas à ação das forças de gravidade, de propulsão e aerodinâmica: a fuselagem; a asa; as superfícies estabilizadoras; as superfícies de controlo de voo e o trem de aterragem.

O ANTEX-X02 *Extended* apresenta uma envergadura de 3,5 m, um comprimento total de 1,9 m e 0,6 m de altura do solo. As componentes que constituem a plataforma são independentes, permitindo facilitar o transporte dos UAVs e agilizar as operações de manutenção e reparação do UAV. Na Figura A.1 encontra-se apresentado o desenho técnico da plataforma, bem como algumas dimensões relevantes.

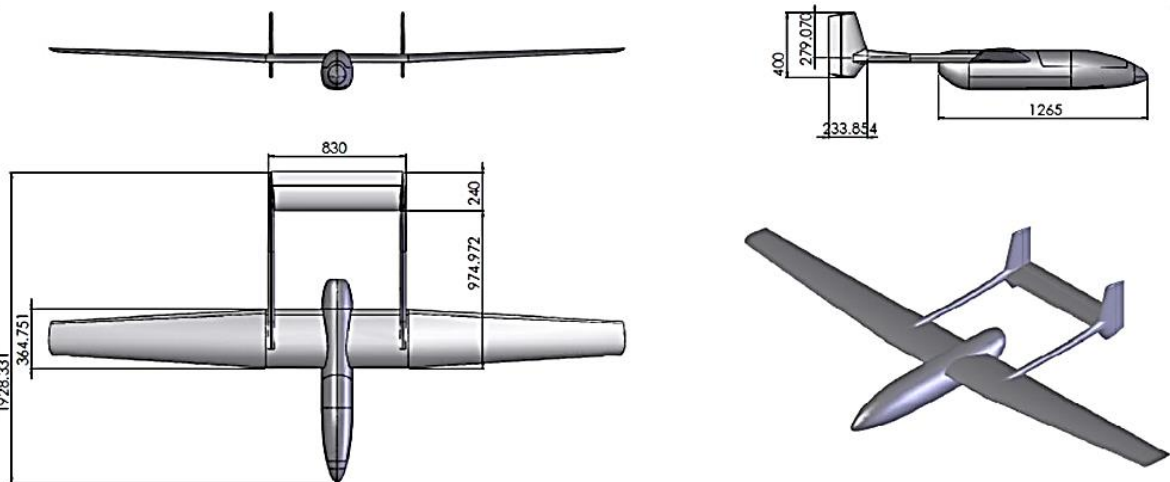


Figura A.1 – Desenho técnico e dimensões relevantes do UAV (extraído de [Crit17]).

O UAV tem a capacidade de descolar com um peso máximo de 25 kg, sendo que o peso associado à estrutura, ao sistema propulsivo e aos servo-atuadores das superfícies de controlo é de, aproximadamente, 12 kg. Desta forma, os 13 kg de diferença destinam-se à instalação do sistema de navegação e controlo de voo, do *payload* de missão e do combustível. Assim, a autonomia depende do volume e do peso disponível para transportar combustível, cujo depósito é localizado na asa central que, por sua vez, é um dos constituintes do corpo central.

O corpo central, para além de conter a asa central, cujo volume interior é utilizado como tanque de combustível, é também constituído pela fuselagem, onde se encontra instalado o sistema de navegação e controlo de voo, o *payload* de missão e o tanque coletor de combustível; o corta-fogo; o trem de aterragem; e os apoios de cauda.

Para além do corpo central, fazem parte da estrutura física do UAV: o painel exterior da asa, que tem uma envergadura de 1,3 m e um afilamento de 0,54 m, e no qual se encontram instalados os *flaps* e ailerons; os estabilizadores verticais duplos, que se encontram encaixados nos apoios de cauda do corpo central, e lemes de direção; e o estabilizador horizontal e leme de profundidade, que são suportados pelos dois estabilizadores verticais do UAV.

A.2 Sistema de propulsão

O sistema de propulsão do ANTEX-X02 *Extended* é constituído: pelo motor 3 W 28i *pusher*, com um sistema de geração de energia; pelo sistema de combustível e pela hélice, assim como todos os dispositivos eletrónicos necessários para a sua monitorização. O gerador a bordo é constituído pelo GPU e tem a capacidade de fornecer 100 W de potência máxima contínua aos sistemas a bordo do UAV. A Tabela A.1 representa as especificações técnicas do motor 3 W 28i e do respetivo sistema de geração de energia, instalados no ANTEX-X02 *Extended*.

Tabela A.1 – Especificações técnicas do Motor 3 W 28i e do GPU (extraído de [Crit17]).

Especificações técnicas	
Motor 3W 28i	GPU
Modelo: 3 W 28i, dois tempos;	Gama de tensões de saída: 10 – 35 V;
Potência: 3.35 hp (28i);	Tensão de alimentação externa: 13 – 50 V;
Capacidade: 28 cc;	Tipo de baterias: 3 células, polímero de lítio;
Gama de velocidades: 1500-8500 rpm;	Tensão da bateria: 12,6 V;
Relação Lubrificante/Combustível: 2 % mix;	Corrente máxima de alimentação da bateria de reserva: 2A;
Hélices recomendados: 18 x 10, 20 x 8;	Corrente máxima (contínua) debitada pelo GPU: 4.3A;
Massa (incluindo ignição): 1,2 kg;	Corrente máxima (pico) debitada pelo GPU: 8 A;
	Tensão de saída: 6 V e 12 V;

A.3 Sistemas primário e secundário de voo

O sistema primário de voo, que permite à plataforma o voo autónomo, é o *Piccolo II*, representado na Figura A.2. Esta tecnologia possui: um *software* de C2 que permite edição e envio de planos para o piloto automático, sendo estes executados de forma autónoma pelo veículo; um microcontrolador que executa algoritmos de estabilização e navegação da plataforma, e determina automaticamente quais as entradas adequadas nas superfícies de voo e no motor para seguir as referências fornecidas ao UAV tendo em conta o estado atual deste último, dado pelos seus sensores. A comunicação entre o piloto automático e os restantes sistemas a bordo é realizada recorrendo a portas de comunicação série, através das quais todos os sistemas secundários e de comunicações são integrados com o *Piccolo II*, conferindo-lhe desta forma capacidades adicionais, como é o caso da aterragem autónoma ou comunicação por satélite com a estação terrestre.



Figura A.2 – Piloto automático *Piccolo II* (extraído de [Crit17]).

Para além dos sistemas primariamente responsáveis pelo voo, existem outros equipamentos que adicionam capacidades de voo adicionais. Estes equipamentos são opcionais, pelo que apenas são incluídos no UAV quando existe um requisito que não é cumprido pelos sistemas primários de voo. Estes requisitos podem ter as seguintes origens: para melhorar o cumprimento da missão; para garantir a navegabilidade; ou, para facilitar a operação da plataforma aérea. Exemplos dos sistemas secundários de voo são o *Differential Global Positioning System* (DGPS) e o *transponder*.

O DGPS é um sistema de aumento de precisão do sistema de posicionamento por satélite (GPS). Na sua versão mais simples, o DGPS consiste na transmissão de correções de uma estação de referência para um equipamento GPS móvel. Essas correções são obtidas pela diferença entre a medição do GPS da estação de referência e a sua posição (real) conhecida.

O *transponder* permite aumentar a segurança de voo, ao permitir que as plataformas sejam corretamente identificadas, mesmo quando se encontram em espaço aéreo congestionado. Apesar do radar tradicional (*Primary Surveillance Radar* – PSR) permitir a deteção de uma determinada plataforma, através da reflexão de energia EM, é quase impossível diferenciar duas plataformas entre si (especialmente se forem plataformas semelhantes). Assim, para além da transmissão do sinal do PSR, existe um radar secundário (*Secondary Surveillance Radar* – SSR) que emite uma sequência de impulsos que servem de interrogação. Quando estes impulsos chegam à plataforma existe um dispositivo denominado *transponder* (*Transmitter-Responder*), que os interpreta e emite outra sequência de impulsos como resposta.

A.4 Sistema de energia e *payload*

Tal como mencionado anteriormente, todos os sistemas de bordo são alimentados através de um gerador de energia acoplado ao motor, que tem a capacidade de gerar uma potência máxima de 100 W. O consumo típico dos sistemas de bordo é estimado em aproximadamente 80 W, que corresponde também à potência debitada pelo gerador para as rotações por minuto típicas, considerando a fase de voo de cruzeiro. No entanto, prevêem-se fases de voo em que o motor funciona em regimes mais baixos, como por exemplo no caso em que o UAV desce de altitude. Nesses casos, o excesso de potência requerido pelos sistemas de bordo é compensado pelas baterias de reserva do GPU.

Relativamente ao sistema de *payload* é constituído por todos os dispositivos, como sistemas computacionais e sensores, incluídos no UAV. Estes podem ser divididos em dois conjuntos: base, que corresponde aos equipamentos que devem estar a bordo da plataforma, independentemente da missão a executar; e os opcionais, que podem ou não ser inseridos no UAV.

No caso do ANTEX-X02 *Extended*, das plataformas computacionais fazem parte o SEC2 e o SEP, que cumprem a norma PC104 – norma tipicamente utilizada em sistemas embarcados, que apresenta uma relação adequada entre a capacidade computacional, consumo energético, possibilidade de ligação a diferentes periféricos (ou outros sistemas computacionais), massa e volume.

O SEC2 é responsável pelo controlo da trajetória da plataforma, correndo rotinas de *software* que, com base na informação previamente processada proveniente dos sensores instalados, lhe permitirá enviar referências de navegação para a plataforma, de modo a esta realizar missões como por exemplo o seguimento de alvos ou vigilância marítima. É também através deste sistema computacional que é estabelecida a comunicação entre os restantes sistemas e sensores de bordo e a GCS.

A plataforma computacional SEP é responsável pela gestão dos sensores a bordo e respetivo processamento de sinal. Como tal, a capacidade do seu processador, memória RAM e a placa gráfica integrada são superiores ao do sistema SEC2.

Relativamente aos sensores a utilizar nas diversas missões realizadas pelo ANTEX-X02 *Extended*, estes são passivos. No entanto, são sensíveis a diferentes bandas do espectro EM, podendo ser utilizados: sensores para o espectro visível, infravermelhos, sensores multiespectrais e ainda sensores hiper-espectrais.

Pode ser ainda utilizado o sistema de identificação automático (AIS), que é um sistema de monitorização automático usado em navios e por serviços de monitorização/controlo de tráfego marítimo para identificação e localização de embarcações. Desta forma, é obrigatório por lei que embarcações de dimensão superior a 15 metros possuam a bordo um sistema AIS (*Automatic Identification System*) para trocar informação relativa à identificação, posição, rumo e velocidade das embarcações próximas da sua posição. A taxa de atualização da disseminação da informação depende da velocidade de deslocação do próprio navio e pode variar entre 3 minutos (navios atracados) e 2 segundos (navios movendo-se a alta velocidade). A informação disseminada por cada embarcação é adicionalmente recolhida por sistemas de controlo de tráfego marítimo nacionais, localizados ao longo

da costa, ou por sistemas de monitorização por satélite. O objetivo de instalação do AIS nos UAVs é o de obter informação relativa à posição, rumo e velocidade dos navios que se encontrem na mesma zona da sua operação.

A Tabela A.2 representa o peso e o respetivo consumo energético associado aos diferentes sistemas utilizados nos UAVs.

Tabela A.2 – Consumo energético dos sistemas dos UAVs (adaptado de [Crit17]).

Sistema	Designação	Massa [kg]	Consumo [W]		
			Típico	Máximo	
Configuração base	Sistema de voo primário	<i>Piccolo II</i>	0,20	4,00	4,80
		Servos	0,30	0,70	0,80
	Sistema de voo secundário	Transponder Modo S	0,10	8,00	14,0
		DGPS	0,34	1,40	1,7
	SC UHF	<i>Microhard pDDL2450</i>	0,22	1,98	2,38
	Sistema de propulsão	Fuel sensor	0,08	0,12	0,14
		Sensor de temperatura	0,10	0,10	0,12
	Sistema de energia	Baterias de reserva + GPU	1,70	0,50	0,70
	<i>Payload</i>	SEP	2	21,30	28,5
		SEC2	2	6,30	8,00
	TOTAL		7,04	44,40	61,14
Sistemas Opcionais	SC SAT	Iridium	0,47	4,40	9,6
	<i>Payload</i>	TASE 150	1,08	8,60	11,5
		Câmara hiper-espectral	0,60	5,00	6,0
		Gobi	0,50	3,60	4,3
		JAI	0,32	3,80	4,6
		Recetor AIS	0,03	1,00	1,2
	TOTAL		3,00	26,4	37,2

Anexo B

Microhard pDDL2450

Neste anexo encontram-se as características mais relevantes da tecnologia *Microhard* pDDL2450, nomeadamente, os diferentes tipos de modelação a utilizar, aos quais correspondem valores máximos de taxa de transmissão e, por sua vez, valores de sensibilidade e de potência de transmissão máxima.

A tecnologia *Microhard* pDDL2450 opera a uma frequência entre os 2,402 GHz e os 2,478 GHz e tem um peso de, aproximadamente, 0,22 kg. Os modos de operação possíveis são P2P, de um ponto para vários pontos (P2MP) ou em malha. As potências de transmissão máximas, a sensibilidade e as respectivas taxas de transmissão permitidas para larguras de banda de 8, 4 e 2 MHz encontram-se apresentadas na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Especificações de desempenho do sistema pDDL2450 (adaptado de [Micro18]).

Especificações de desempenho				
Tipo de modulação	Taxa de transmissão [Mbps]		Taxa de transmissão @ Sensibilidade [dBm]	Potência de transmissão máxima [dBm] +/- 1dB
	<i>Full-duplex</i>	<i>Half-duplex</i>		
8 MHz				
BPSK_1/2	3	1,5	-96	30
QPSK_1/2	6	3	-94	30
QPSK_3/4	9	4,5	-91	30
16QAM_1/2	12	6	-88	29
16QAM_3/4	17	8,5	-85	29
64QAM_2/3	23	11,5	-80	27
64QAM_3/4	25	12,5	-78	27
64QAM_5/6	28	14	-76	27
4 MHz				
BPSK_1/2	1,5	0,75	-99	30
QPSK_1/2	3	1,5	-98	30
QPSK_3/4	4,5	2,25	-96	30
16QAM_1/2	6	3	-92	29
16QAM_3/4	9	4,5	-88	29
64QAM_2/3	11,5	5,75	-83	27
64QAM_3/4	12,5	6,25	-82	27
64QAM_5/6	14	7	-80	27
2 MHz				
BPSK_1/2	0,78	0,39	-101	30
QPSK_1/2	1,5	0,75	-100	30
QPSK_3/4	2,2	1,1	-97	30
16QAM_1/2	2,9	1,45	-93	29
16QAM_3/4	4,3	2,15	-90	29
64QAM_2/3	5,5	2,75	-86	27
64QAM_3/4	6	3	-84	27
64QAM_5/6	6,5	3,25	-82	27

Com base nos valores apresentados na Tabela B.1, obtiveram-se os gráficos representados nas Figuras B.1 e B.2 usando o programa *Matlab* R2017a, através dos quais foram deduzidas expressões aproximadas dos parâmetros de potência máxima de transmissão e de sensibilidade em função da taxa de transmissão. A Tabela B.2 representa os desvios máximos, σ , da curva representativa das expressões aproximadas relativamente aos dados da folha de especificações.

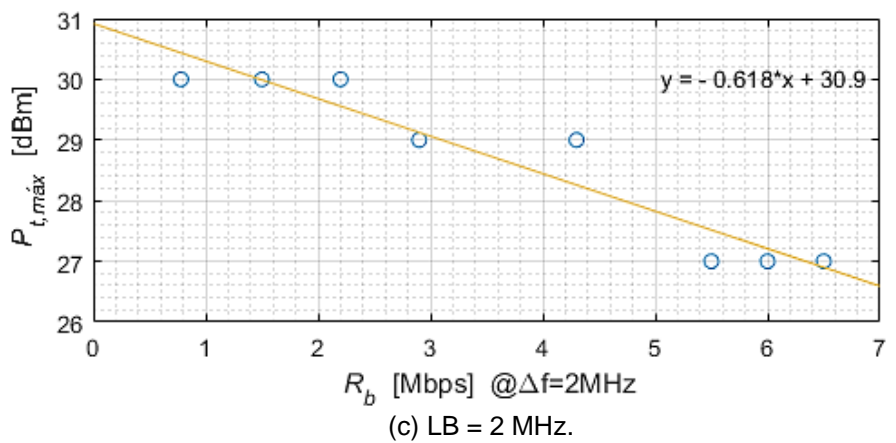
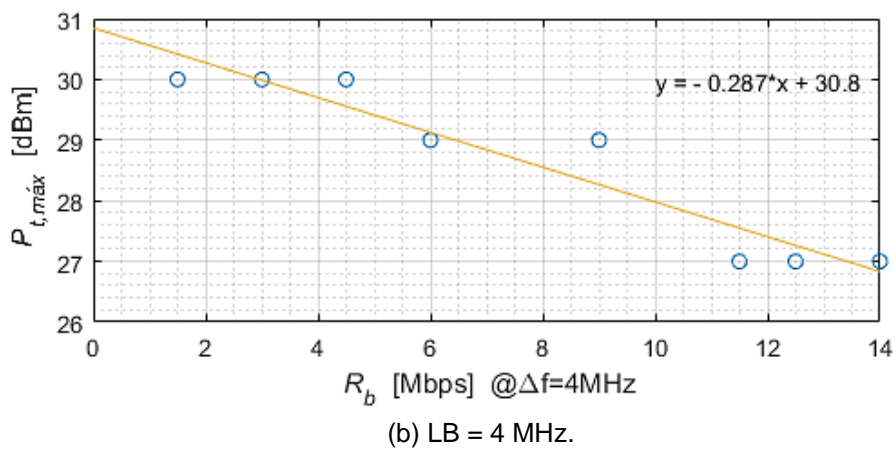
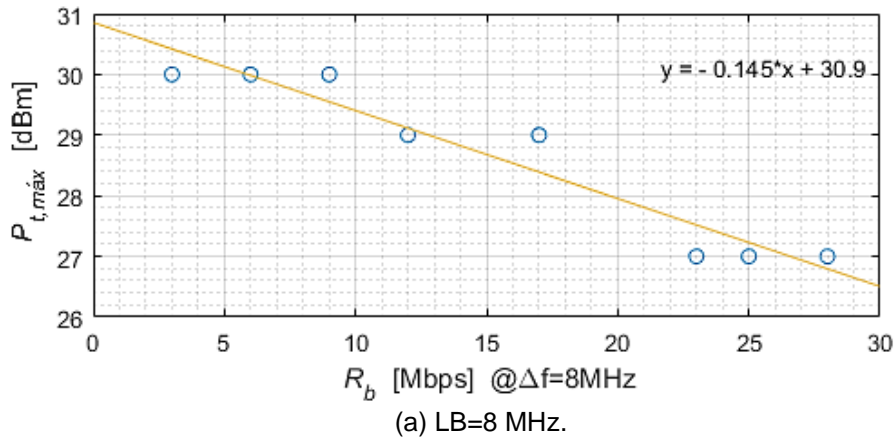


Figura B.1 – Potência de transmissão máxima em função da taxa de transmissão.

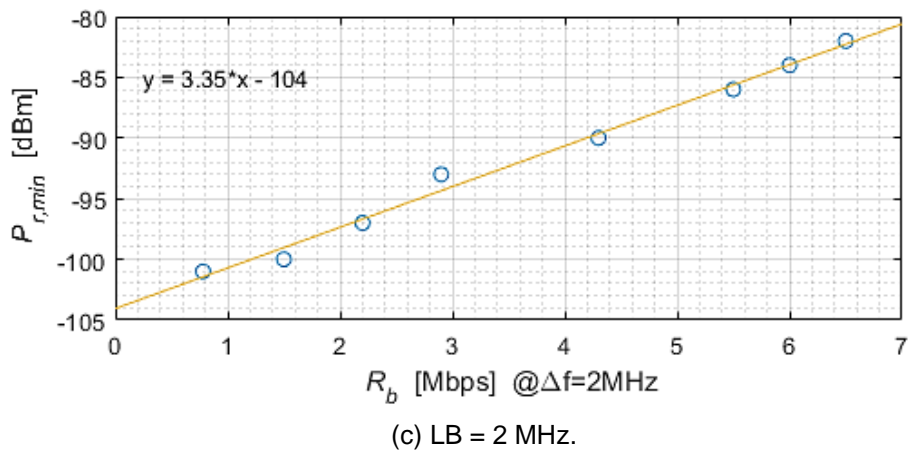
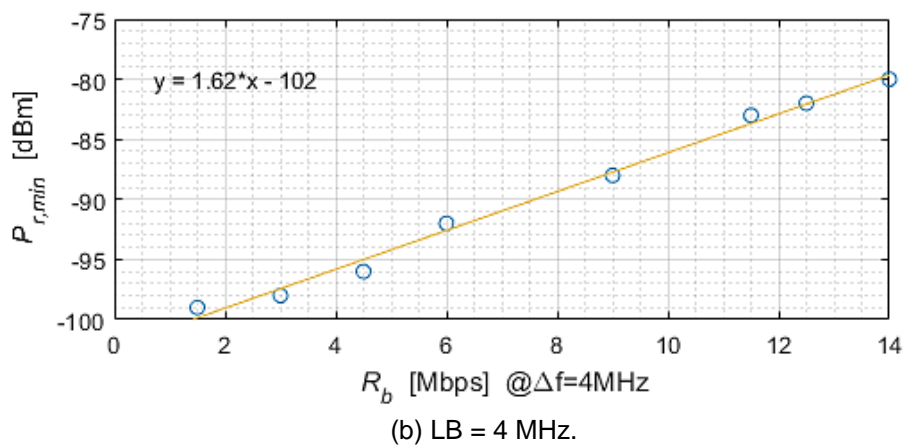
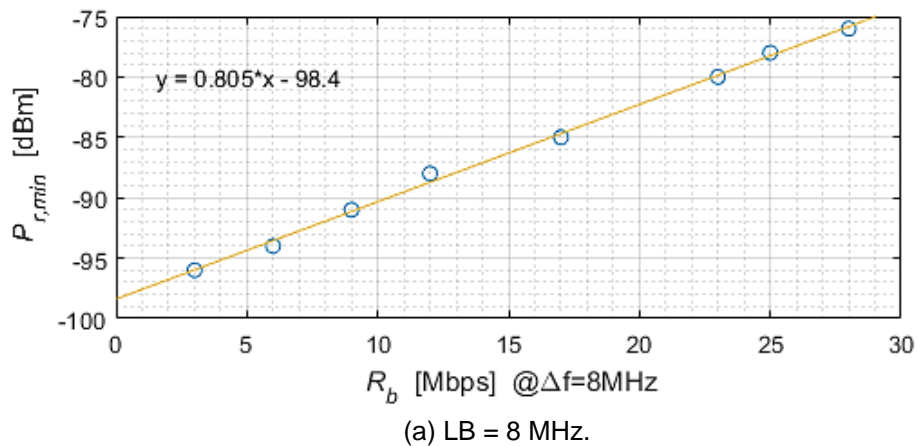


Figura B.2 – Sensibilidade do recetor em função da taxa de transmissão.

Tabela B.2 – Desvios das funções aproximadas da potência de transmissão e da sensibilidade.

	LB=8 MHz	LB=4 MHz	LB=2 MHz
	$\pm\sigma$ [dB]	$\pm\sigma$ [dB]	$\pm\sigma$ [dB]
$P_{t, \text{máx}}$	0,6	0,7	0,7
$P_{r, \text{mín}}$	0,7	1,0	1,1

Anexo C

Antenas usadas nos UAVs e na GCS

Neste anexo encontram-se as especificações da antena usada no SC instalado nas plataformas aéreas, TL-ANT2405CL, e das que são utilizadas na GCS, TL-ANT2424B e OD12-2400.

C.1 Antena TL-ANT2405CL

Na plataforma aérea em estudo na presente dissertação de mestrado é utilizada uma antena omnidirecional, cujo diagrama de radiação se encontra na Figura C.1 e as especificações detalhadas na Tabela C.1.

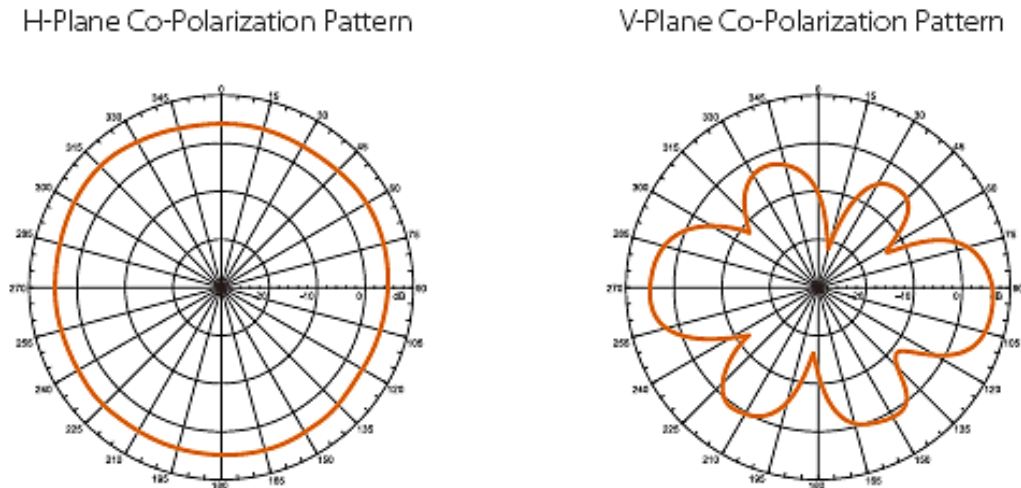


Figura C.1 – Diagrama de radiação da antena usada nos UAVs (extraído de [TP-L18a]).

Tabela C.1 – Especificações da antena instalada nos UAVs (extraído de [TP-L18a]).

Alcance de frequência	2,4 ~ 2,4835 GHz
Ganho (Excluindo as perdas nos cabos)	5 dBi
VSWR	1,92:1
HPBW/H [°]	360
HPBW/V [°]	32
Impedância	50 Ω Nominal
Interface	RP-SMA Fêmea (Plug)
Polarização	Linear, Vertical
Temperatura de operação	-20°C ~ 65°C (-4°F ~ 149°F)
Temperatura de armazenamento	-30°C ~ 75°C (-22°F ~ 167°F)
Humidade de operação	10 % ~ 90 % sem condensação
Humidade de armazenamento	5 % ~ 90 % sem condensação
Normas	RoHS, WEEE

C.2 Antena TL-ANT2424B

Na GCS do Cenário L utiliza-se a antena parabólica direcional, cujo diagrama de radiação se encontra na Figura C.2 e as especificações detalhadas na Tabela C.2.

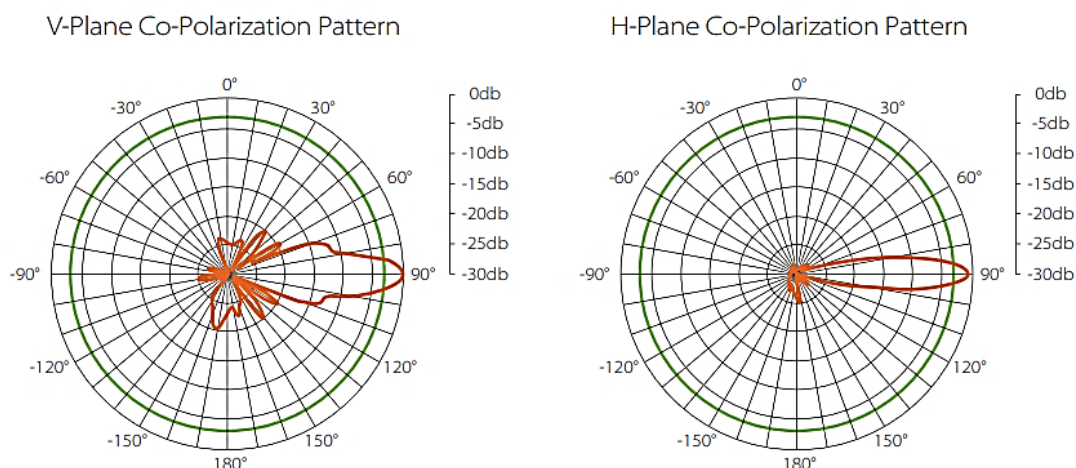


Figura C.2 – Diagrama de radiação da antena usada na GCS (extraído de [TP-L18b]).

Tabela C.2 – Especificações da antena instalada na GCS do Cenário L (extraído de [TP-L18b]).

Alcance de frequência	2,4~2,4835 GHz
Ganho (Excluindo as perdas nos cabos)	24 dBi
VSWR	≤1,5
HPBW/H [°]	10
HPBW/V [°]	14
Relação Frente-Costas	> 30 dB
Impedância	50 Ω
Potência admitida	100 W
Interface	N Fêmea
Polarização	Vertical ou Horizontal
Mastro de montagem	Ø30 ~ Ø50 mm
Montagem	Numa parede ou poste
Velocidade do vento máx. suportada	216 Km/h (134 Milhas/h)
Temperatura de operação	- 40°C ~ 60°C (- 40°F ~ 140°F)
Temperatura de armazenamento	- 40°C ~ 60°C (- 40°F ~ 140°F)
Normas	RoHS, WEEE

C.3 Antena OD12-2400

Na GCS do Cenário C utiliza-se a antena omnidirecional, ilustrada na Figura C.3, cujas especificações se encontram detalhadas na Tabela C.3. Esta antena permite uma cobertura omnidirecional uniforme.



Figura C.3 – Antena OD12-2400 omnidirecional (extraído de [RSCo18]).

Tabela C.3 – Especificações da antena instalada na GCS do Cenário C (extraído de [RSCo18]).

Frequência	2,4~2,485 GHz
Ganho	12 dBi
HPBW/V [°]	7
Relação Frente-Costas	> 30 dB
Impedância nominal	50 Ω
Potência máxima	25 W
Interface	N Fêmea

Anexo D

Testes experimentais aos rádios pDDL2450

Neste anexo encontram-se os principais resultados obtidos dos primeiros testes experimentais realizados aos rádios pDDL2450, usando os programas *iPerf* e *TamoSoft*, cujo objetivo é testar a conexão entre os rádios bem como o seu desempenho em rede.

D.1. Teste com *iPerf*

Para obter os resultados apresentados nesta Secção foi definida, para todos os rádios (R1, R2 e R3) uma LB de 8 MHz, uma potência de transmissão de 29 dBm e esquema de modulação QPSK ¾.

```
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 192.168.168.134, port 51783
[ 5] local 192.168.168.2 port 5201 connected to 192.168.168.134 port 59321
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter         Lost/Total Data
rams
[ 5] 0.00-1.00 sec      840 KBytes   6.88 Mbits/sec  13.943 ms      0/105 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec      968 KBytes   7.93 Mbits/sec  14.656 ms      0/121 (0%)
[ 5] 2.00-3.00 sec      992 KBytes   8.13 Mbits/sec  13.466 ms      0/124 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec      944 KBytes   7.73 Mbits/sec  16.501 ms      0/118 (0%)
[ 5] 4.00-5.00 sec     1000 KBytes  8.19 Mbits/sec  13.858 ms      0/125 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec      976 KBytes   7.99 Mbits/sec  13.807 ms      0/122 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec      984 KBytes   8.06 Mbits/sec  13.039 ms      0/123 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec      968 KBytes   7.93 Mbits/sec  13.020 ms      0/121 (0%)
[ 5] 8.00-9.00 sec      960 KBytes   7.86 Mbits/sec  15.172 ms      0/120 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec     1008 KBytes  8.26 Mbits/sec  11.975 ms      0/126 (0%)
[ 5] 10.00-10.11 sec     104 KBytes   7.54 Mbits/sec  11.538 ms      0/13 (0%)
-----
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter         Lost/Total Data
rams
[ 5] 0.00-10.11 sec     0.00 Bytes   0.00 bits/sec   11.538 ms      0/1218 (0%)
-----
Server listening on 5201
```

a) Teste iP1.

```
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 192.168.168.134, port 51784
[ 5] local 192.168.168.2 port 5201 connected to 192.168.168.134 port 53429
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter         Lost/Total Data
rams
[ 5] 0.00-1.00 sec      392 KBytes   3.21 Mbits/sec  27.814 ms      2/51 (3.9%)
[ 5] 1.00-2.00 sec      368 KBytes   3.01 Mbits/sec  25.541 ms      8/54 (15%)
[ 5] 2.00-3.00 sec      192 KBytes   1.57 Mbits/sec  32.822 ms      41/65 (63%)
[ 5] 3.00-4.00 sec      136 KBytes   1.11 Mbits/sec  38.698 ms      51/68 (75%)
[ 5] 4.00-5.00 sec      104 KBytes   852 Kbits/sec  51.501 ms      74/87 (85%)
[ 5] 5.00-6.00 sec      96.0 KBytes  786 Kbits/sec  44.773 ms      111/123 (90%)
-----
[ 5] 6.00-7.00 sec      80.0 KBytes  655 Kbits/sec  37.451 ms      124/134 (93%)
[ 5] 7.00-8.00 sec      80.0 KBytes  655 Kbits/sec  42.853 ms      117/127 (92%)
[ 5] 8.00-9.00 sec      96.0 KBytes  786 Kbits/sec  38.862 ms      108/120 (90%)
[ 5] 9.00-10.00 sec     120 KBytes   983 Kbits/sec  38.305 ms      114/129 (88%)
[ 5] 10.00-10.87 sec     88.0 KBytes  828 Kbits/sec  39.554 ms      94/105 (90%)
-----
[ ID] Interval          Transfer      Bandwidth      Jitter         Lost/Total Data
rams
[ 5] 0.00-10.87 sec     0.00 Bytes   0.00 bits/sec   39.554 ms      844/1063 (79%)
-----
Server listening on 5201
```

b) Teste iP2.

```

[ 5] 0.00-10.74 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec 35.572 ms 111/600 (18%)
-----
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 192.168.168.134, port 51870
[ 5] local 192.168.168.2 port 5201 connected to 192.168.168.134 port 49307
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Jitter          Lost/Total Datag
rams
[ 5] 0.00-1.00 sec 384 KBytes 3.15 Mbits/sec 27.395 ms 0/48 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec 472 KBytes 3.87 Mbits/sec 22.918 ms 0/59 (0%)
[ 5] 2.00-3.00 sec 264 KBytes 2.16 Mbits/sec 43.216 ms 26/59 (44%)
[ 5] 3.00-4.00 sec 104 KBytes 852 Kbits/sec 49.031 ms 49/62 (79%)
[ 5] 4.00-5.00 sec 96.0 KBytes 786 Kbits/sec 48.228 ms 61/73 (84%)
[ 5] 5.00-6.00 sec 64.0 KBytes 524 Kbits/sec 42.849 ms 69/77 (90%)
[ 5] 6.00-7.00 sec 72.0 KBytes 590 Kbits/sec 45.556 ms 90/99 (91%)
[ 5] 7.00-8.00 sec 104 KBytes 852 Kbits/sec 40.949 ms 86/99 (87%)
[ 5] 8.00-9.00 sec 80.0 KBytes 655 Kbits/sec 41.223 ms 105/115 (91%)
-----
[ 5] 9.00-10.00 sec 96.0 KBytes 786 Kbits/sec 44.650 ms 105/117 (90%)
[ 5] 10.00-10.75 sec 112 KBytes 1.22 Mbits/sec 35.832 ms 83/97 (86%)
-----
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Jitter          Lost/Total Datag
rams
[ 5] 0.00-10.75 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec 35.832 ms 674/905 (74%)
-----
Server listening on 5201
-----

```

c) Teste iP3.

```

[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Jitter          Lost/Total Datag
rams
[ 5] 0.00-10.86 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec 34.218 ms 17/604 (2.8%)
-----
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 192.168.168.134, port 51877
[ 5] local 192.168.168.2 port 5201 connected to 192.168.168.134 port 63343
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Jitter          Lost/Total Datag
rams
[ 5] 0.00-1.00 sec 416 KBytes 3.40 Mbits/sec 27.713 ms 0/52 (0%)
[ 5] 1.00-2.00 sec 472 KBytes 3.88 Mbits/sec 22.517 ms 0/59 (0%)
[ 5] 2.00-3.00 sec 416 KBytes 3.41 Mbits/sec 28.814 ms 0/52 (0%)
[ 5] 3.00-4.00 sec 464 KBytes 3.80 Mbits/sec 29.534 ms 1/59 (1.7%)
[ 5] 4.00-5.00 sec 464 KBytes 3.80 Mbits/sec 26.296 ms 0/58 (0%)
[ 5] 5.00-6.00 sec 424 KBytes 3.47 Mbits/sec 27.963 ms 0/53 (0%)
[ 5] 6.00-7.00 sec 448 KBytes 3.67 Mbits/sec 27.569 ms 0/56 (0%)
[ 5] 7.00-8.00 sec 448 KBytes 3.67 Mbits/sec 29.644 ms 2/58 (3.4%)
[ 5] 8.00-9.00 sec 472 KBytes 3.87 Mbits/sec 25.777 ms 0/59 (0%)
[ 5] 9.00-10.00 sec 464 KBytes 3.80 Mbits/sec 26.890 ms 0/58 (0%)
[ 5] 10.00-10.72 sec 328 KBytes 3.74 Mbits/sec 27.472 ms 0/41 (0%)
-----
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Jitter          Lost/Total Datag
rams
[ 5] 0.00-10.72 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec 27.472 ms 3/605 (0.5%)
-----
Server listening on 5201
-----

```

d) Teste iP4.

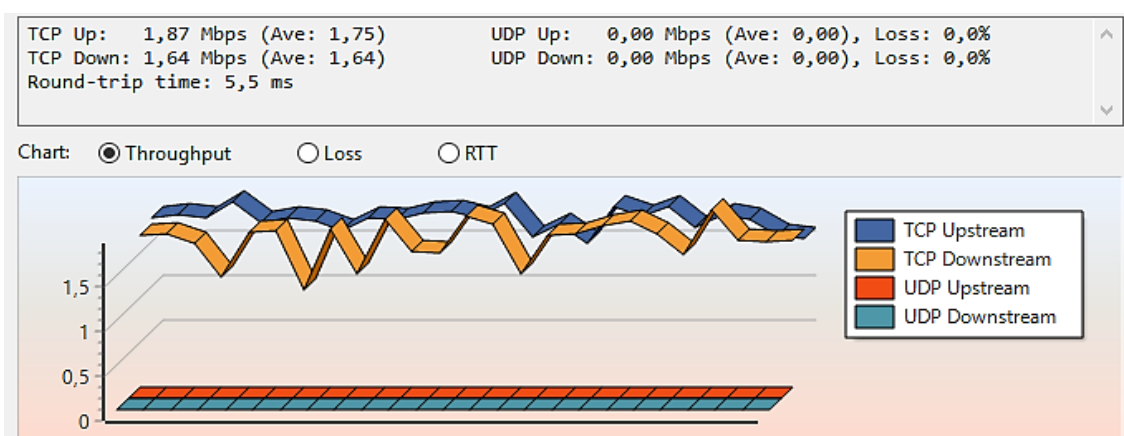
Figura D.1 – Resultados dos testes realizados com o *iPerf*.

D.2. Teste com *TamoSoft*

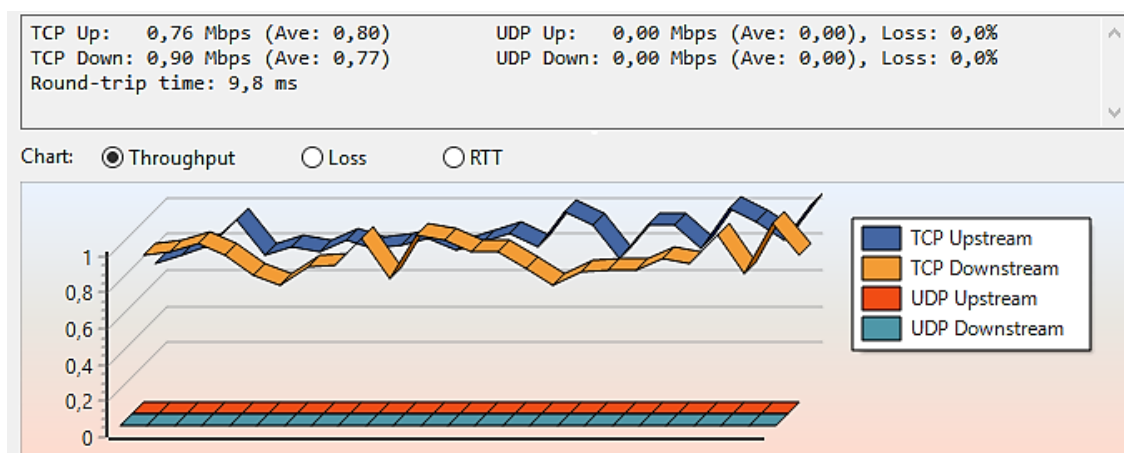
Nesta Secção são apresentados os resultados de alguns testes realizados com o programa *TamoSoft*. A designação e os respetivos parâmetros definidos nos testes realizados encontram-se na Tabela D.1.

Tabela D.1 – Caracterização dos testes realizados com o *software TamoSoft*.

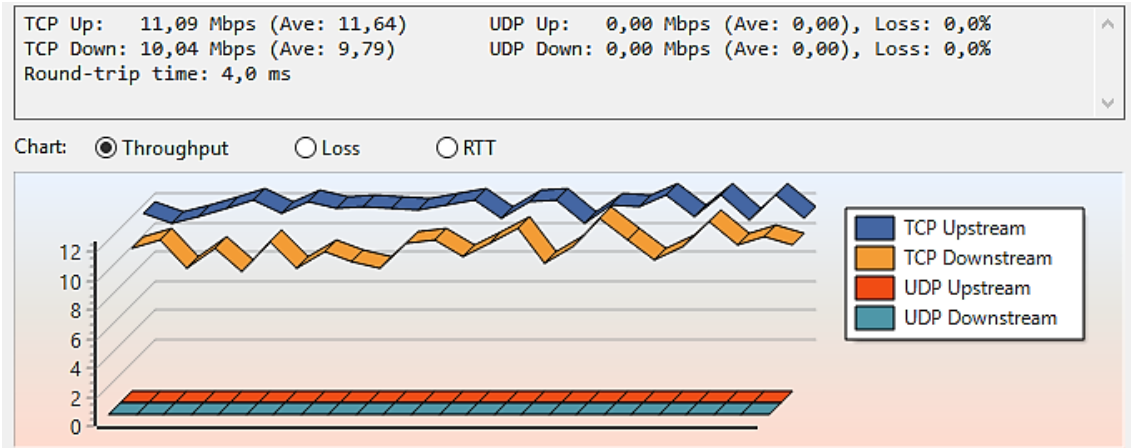
Designação do Teste	LB [MHz]	Esquema de Modulação	Ligação
TS1D	2	QPSK $3/4$	R1 ← R3
TS1S			R1 ← R2 ← R3
TS2D	4	64 QAM $5/6$	R1 ← R3
TS2S			R1 ← R2 ← R3
TS3D	8	16 QAM $1/2$	R1 ← R3
TS3S			R1 ← R2 ← R3



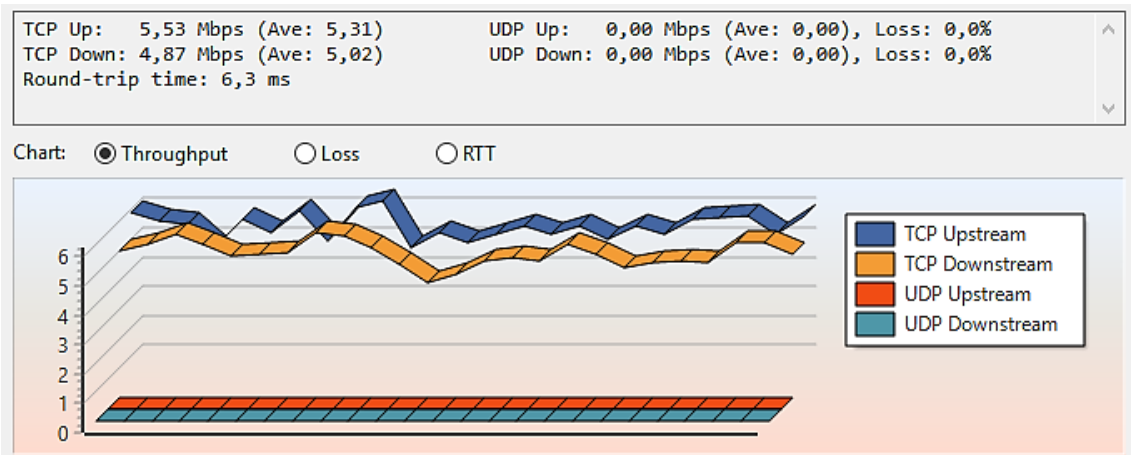
a) Teste TS1D.



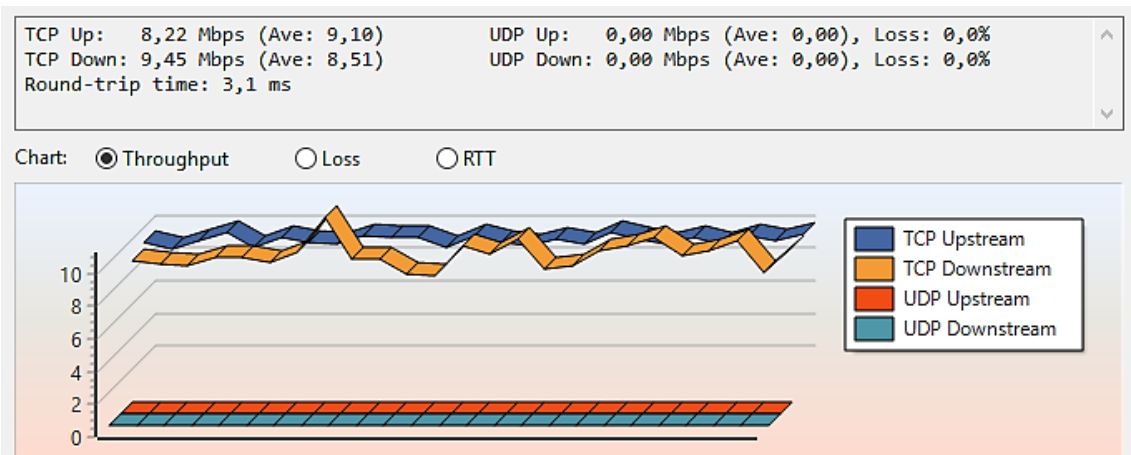
b) Teste TS1S.



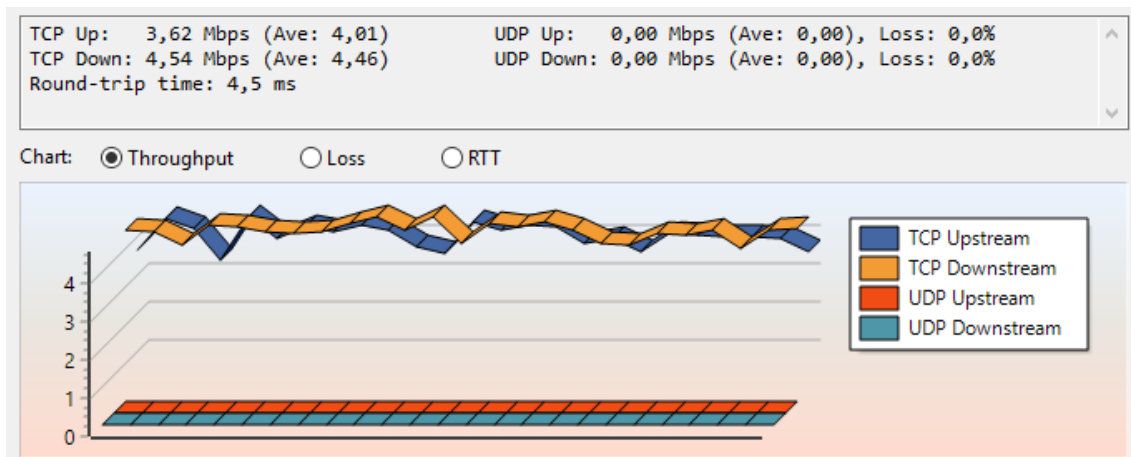
c) Teste TS2D.



d) Teste TS2S.



e) Teste TS3D.



f) Teste TS3S.

Figura D.2 – Resultados dos testes realizados com o *TamoSoft*.

Nos gráficos da Figura D.2, a taxa de transmissão é representada em função do tempo, t , em que t varia entre 0 e, aproximadamente, 3 minutos.

Referências

- [AFA18] Academia da Força Aérea – Investigação – Projetos, <http://www.emfa.pt/www/po/unidades/subPagina-10D00-019.005.003-projetos>, Mar. 2018.
- [AhKJ16] N. Ahmed, S. S. Kanhere e S. Jha, “On the Importance of Link Characterization for Aerial Wireless Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 54, Nr. 5, Maio 2016, pp. 52-57 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7470935&tag=1>).
- [AHSY14] T. Andre, K.A. Hummel, A.P. Schoellig, E. Yanmaz, M. Asadpour, C. Bettstetter, P. Grippa, H. Hellwagner, S. Sand e S. Zhang, “Application-Driven Design of Aerial Communication Networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, Nr. 5, Maio 2014, pp. 129-137 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6815903>).
- [Alti17] Altigator – Aerial View Aircrafts, <https://altigator.com/drone-uav-uas-rpa-or-rpas/>, Abr. 2018.
- [BAAS17] J. Braga, A. Alessandretti, A. P. Aguiar e J. Sousa, “A Feedback Motion Strategy Applied to a UAV to Work as an Autonomous Relay Node for Maritime Operations”, em *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, EUA, Jul. 2017 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7991434>).
- [BaDa16] R. Balloch e H. Davies, “Protection against Assymmetric Threats”, em *MAST – Maritime/Air Systems & Technologies Conference*, Amesterdão, Holanda, Jun. 2016.
- [BBAS17] J. Braga, F. Balampanis, A. P. Aguiar, J. Sousa, I. Maza e A. Ollero, “Coordinated Efficient Buoys Data Collection in Large Complex Coastal Environments using UAVs”, em *OCEANS 2017 – Anchorage*, Anchorage, AL, EUA, Dez. 2017 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8232161>).
- [BJAS17] J. Braga, R. P. Jain, A. P. Aguiar e J. Sousa, “Self-Triggered Time Coordinated Deployment Strategy for Multiple Relay UAVs to Work as a Point-to-Point Communication Bridge”, em *Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, Linkoping, Suécia, Nov. 2017 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8101634>).
- [Blye06] P. Blyenburgh, “UAV Systems: Global Review”, em *Avionics’06 Conference*, Amesterdão, Holanda, Mar. 2006 (http://www.drdr-aero.com/link/uav/uav_sys_global_review.pdf).
- [BeBB15] M. Benslama, M. Boucenna e H. Batatia, “Ad Hoc Networks: Study and discussion of

performance”, em John Wiley & Sons, Inc. (1ª ed.), *Ad Hoc Networks Telecommunications and Game Theory*, EUA, 2015.

- [BeST13] I. Bekmezci, O.K. Sahingoz e S. Temel, “Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey”, *Elsevier*, Vol. 11, Nr. 3, Maio 2013, pp. 1254-1270 (https://ac.els-cdn.com/S1570870512002193/1-s2.0-S1570870512002193-main.pdf?_tid=b4bfe64f-441f-4c4f-98bf-e7030515377a&acdnat=1535967032_29794e54b3a2f1785477ddd0045bb1ee).
- [BuPR18] A. Bujari, C. E. Palazzi e D. Ronzani, “A Comparison of Stateless Position-based Packet Routing Algorithms for FANETs”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 17, Nr. 11, Nov 2018, pp. 2468–2482 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8305664>).
- [Caja09] V.L. Cajarabille, “A Segurança no Mar Português”, *Nação e Defesa*, Vol. 4, Nr. 122, Primavera 2009, pp.101-115 (<https://core.ac.uk/download/pdf/62685385.pdf>).
- [ChFG12] J. Chen, Q. Fei e Q. Geng, “The Design of Data Link for Multi-UAVs”, em *4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Nanchang, China, Ago. 2012 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6305636>).
- [Chin18] China Indonesia Information, <http://chindonews.blogspot.com/2014/08/parade-kapal-perang-dalam-rimpac-2014.html>, Set. 2018.
- [CIAF18] Centro de Investigação da Academia da Força Aérea, *Livros de Registo Modelo: Antex X-02 Alfa Extended*, PCI1.IM25.00.
- [Corr18] L. Correia, *Mobile Communications Systems – Theoretical Lessons*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2018.
- [Crit17] A. Bernardino, G. Cruz, N. Ferreira, R. Batista, S. Ferreira e T. Oliveira, *Especificação Detalhada dos VANTs*, SEAGULL – Sistemas Inteligentes de Suporte ao CSM baseados em VANTs, CSW-SEAGULL-2013-DDS-04154, Critical Software S.A., Lisboa, Portugal, Jun. 2014.
- [CuDu16] İ. Çuhadar e M. Dursun, “Unmanned Air Vehicle System’s Data Links”, *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 4, Nr. 3, Jun. 2016, pp.189-193 (<http://www.joace.org/uploadfile/2015/1015/20151015021322106.pdf>).
- [DGRM18] DGRM - Direção Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos, <https://www.dgrm.mm.gov.pt/web/guest/am-ec-zonas-maritimas-sob-jurisdicao-ou-soberania-nacional>, Set. 2018.
- [EMFA12] Estado Maior da Força Aérea, *Sistema de Busca e Salvamento – Força Aérea Portuguesa*, Jun. 2012 (http://www.emfa.pt/www/conteudos/galeria/noticias/destaques/triptico-sistema-de-busca-e-salvamento-sar_1122.pdf).

- [Fran17] S. Francisco, "Portugal tenta duplicar território marítimo", *Diário de Notícias*, Ago. 2017 (<https://www.dn.pt/portugal/interior/portugal-tenta-duplicar-territorio-maritimo-8703814.html>).
- [GAMA18] GAMA – Gabinete de Investigação de Acidentes Marítimos e da Autoridade para a Meteorologia Aeronáutica, <http://www.gama.mm.gov.pt/index.php/investigacao-acidentes-maritimos/estatisticas-2/dados-estatisticos>, Set. 2018.
- [GrRB15] R. Grodi, D.B. Rawat e C. Bajracharya, "Performance Evaluation of Unmanned Aerial Vehicle Ad hoc Networks", em *Proc of the IEEE SoutheastCon*, Fort Lauderdale, FL, EUA, Abr. 2015 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7133020>).
- [GuJV15] L. Gupta, R. Jain e G. Vaszkun, "Survey of Important Issues in UAV Communication Networks", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 18, Nr. 2, Nov. 2015, pp. 1123-1152 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7317490>).
- [IHAC16] N. Islam, M.K. Hossain, G.G. Ali e P.H. Chong, "An Expedite Group Key Establishment Protocol for Flying Ad-Hoc Network (FANET)", em *5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision*, Dhaka, Bangladesh, Maio 2016 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7760017>).
- [JMAA17] I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, D.P. Agrawal e S. Zhang, "Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures", *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 84, Abr. 2017, pp. 93-108.
- [KGMF18] W. Khawaja, I. Guvenc, D. W. Matolak, U. Fiebig e N. Schneckenberger, *A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles*, arXiv:1801.01656, Jan. 2018 (<https://arxiv.org/pdf/1801.01656.pdf>).
- [LPZY16] Y. Lyu, Q. Pan, C. Zhao, C. Yu e J.Hu, "A UAV Sense And Avoid System Design Method Based On Software Simulation", em *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Arlington, VA, EUA, Jun. 2016 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7502673>).
- [LiZL13] J.Li, Y.Zhou e L.Lamont, "Communication Architectures and Protocols for Networking Unmanned Aerial Vehicles", em *Globecom 2013 Workshop – Wireless Networking and Control for Unmanned Autonomous Vehicles*, Atlanta, GA USA, Dez. 2013 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6825193>).
- [Mari18] MarineTraffic, <https://www.marinetraffic.com>, Out. 2018.
- [Mati16] G. Matias, *Crítérios da Regulamentação-Base Aplicável à Operação das Aeronaves Não Tripuladas (Drones) em Espaço Aéreo Nacional*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Educação e Ciências, Lisboa, Portugal, 2016 (<https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/17364/1/Regulamentação%20de%20drones%20-%20VFinal.pdf>).

- [Micro18] Microhard, *pDDL2450 – Operating Manual v1.3.0*, Ago. 2017.
- [MKKU13] J.M. Maddalon, K.J. Kelly, D.M. Koppen, J.M. Upchurch, A.T. Morris e H.A. Verstynen, *Perspectives on Unmanned Aircraft Classification for Civil Airworthiness Standards*, NASA Langley Research Center, L-20232, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, EUA, Fev. 2013 (<https://shemesh.larc.nasa.gov/people/jmm/NASA-TM-2013-217969.pdf>).
- [Moto07] Motorola, *Video Solutions Understanding Video Image Quality*, White Paper, Jul. 2008 (https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/business/products/software_and_applications/public_sector_applications/video_applications/mobile_video_sharing/_documents/static_files/motorola_video_quality_white_paper_v2_7.2008.pdf).
- [MSBD16] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis e M. Debbah, “Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage”, *IEEE Communications Letters*, Vol. 20, Nr. 8, Ago. 2016, pp. 1647-1650. (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7486987>).
- [NetC18] S. Sankaran, Net-Ctrl – Secure Managed Infrastructure, “The Theory of Wi-Fi Evolution and IEEE 802.11 Selection”, <http://www.net-ctrl.com/2016/07/14/the-theory-of-wi-fi-evolution-and-ieee-802-11-selection/>, Set. 2018.
- [Neve15] R. Neves, “Drone da portuguesa Tekever vai patrulhar o Mediterrâneo”, em *Jornal de Negócios*, Jun. 2015. (https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/tecnologias/detalhe/drone_da_portuguesa_tekever_vai_patrulhar_o_mediterraneo).
- [Oliv18] T. Oliveira, “*Moving Path Following – Aplicações para Veículos Autónomos de Asa Fixa*”, Academia da Força Aérea, Sintra, Portugal, Set. 2018.
- [Pena17] P. Pena, “*Drones portugueses ganham concurso de 66 milhões de euros*”, em *Público*, Mar. 2017. (<https://www.publico.pt/2017/03/18/politica/noticia/sao-portugueses-os-drones-com-que-a-uniao-europeia-vai-vigiar-o-mediterraneo-1765582>).
- [Pere16] A. Pereira, *Operacionalização, no contexto da Força Aérea, de um Sistema Aéreo Autónomo Não-Tripulado Classe II para Vigilância Marítima e Busca e Salvamento*, dissertação de Mestrado, Academia da Força Aérea, Sintra, Portugal, 2016. (https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/14369/1/DISSERTACAO_ASPAL_PILAV_PEREIRA.pdf).
- [Rife18] M. Rifer, “Extensão da plataforma continental vai estar fechada até 2021”, em *O Jornal Económico*, Ago. 2018 (<https://jornaleconomico.sapo.pt/noticias/extensao-da-plataforma-continental-vai-estar-fechada-ate-2021-345332>).
- [Rodr12] P. Rodrigues, *Avaliação de Sistemas de Comunicações para UAS em Diferentes Cenários de Operação*, dissertação de Mestrado, Academia da Força Aérea, Sintra, Portugal, 2012.

- [RSCo18] RS Components, OD Series Omni Antenna – *Datasheet*, (<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/09d6/0900766b809d6516.pdf>).
- [Serr17] A. Serralheiro, *Elementos de Telecomunicações e Rádio-Propagação*, Elementos de Estudo Elaborados para a Escola Naval, Instituto Universitário Militar, Lisboa, Portugal, 2017
(http://www.l2f.inesc-id.pt/~ajs/Academia_Militar/Livro_ElementosTelecomPropaga.pdf).
- [SkyD18] SkyDrones, <https://skydrones.com.br>, Mar. 2018.
- [TeBe14] S. Temel e I. Bekmezci, “Scalability Analysis of Flying Ad Hoc Networks (FANETs): A Directional Antenna Approach”, em *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*, Odessa, Ucrânia, Maio 2014
(<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6849036>).
- [TEKE18] TEKEVER, <http://airray.tekever.com/>, Set. 2018.
- [TP-L18a] TP-LINK, 2.4GHz 5dBi Indoor Omni-directional Antenna – TL-ANT2405CL – *Datasheet*, (http://www.microcom.com.ar/fotos/ficha6434TL-ANT2405CL_V1_Datasheet.pdf).
- [TP-L18b] TP-LINK, 2.4GHz 24dBi Grid Parabolic Antenna TL-ANT2424B – *Datasheet*, (https://nordickeyboards.se/info_sheets/tl-ant2424b.pdf).
- [VaVa15] K.P.Valavanis e G.J.Vachtsevanos, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer, Londres, Reino Unido, 2015.
- [Vice13] J.P. Vicente, *Guerra Aérea Remota – A revolução do Poder Aéreo e as oportunidades para Portugal*, Fronteira de Caos Editores, Porto, Portugal, 2013.
- [ZeZL16] Y. Zeng, R. Zhang e T.J. Lim, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 54, Nr. 5, Maio 2016, pp. 36-42 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7470933>).