



Otimização da Cobertura dos Serviços de Comunicação Aeronáutica Sediados nos Açores

Beatriz Isabel Rebelo Ruivo Ferreira

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

Orientador: Prof. Luís Manuel de Jesus Sousa Correia
Tenente Anna Olegivna Agamyryansc

Júri

Presidente: José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. Luís Manuel de Jesus Sousa Correia

Vogal: Prof. Custódio José De Oliveira Peixeiro

Vogal: Tenente Coronel António Pedro Amado de Matos

Novembro 2021

“A great man is hard on himself; a small man is hard on others.”

Confucius

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

Agradeço ao Instituto Superior Técnico por tudo o que me concedeu nos últimos três anos de percurso académico. À Academia da Força Aérea Portuguesa, por tudo aquilo com que me presenteou ao longo destes seis anos, tanto a nível profissional como pessoal.

Ao orientador desta dissertação, o Professor Luís M. Correia, não só pela orientação e tempo despendido ao longo deste último ano letivo, como também por ter contribuído para o meu desenvolvimento profissional e pessoal e ainda pela oportunidade de integrar o GROW.

À minha enquadrante e coorientadora, Tenente Anna Agamyryzjansc pelo acompanhamento desde o dia de ingresso na Academia até ao dia de entrega da dissertação. O meu percurso enquanto futura Engenheira Eletrotécnica da Força Aérea Portuguesa deve-se não só à ajuda no desenvolvimento da presente dissertação, assim como aos bons exemplos que tive ao longo deste percurso.

Ao Major Andrade e à esquadra 502, ao Capitão Costa da Silva e à esquadra 751 e ainda ao Capitão Farto, que contactei durante o processo de recolha de informação para a dissertação e que prontamente se disponibilizaram a ajudar a obter todas as informações que necessitei para o desenvolvimento da mesma.

Aos Distintos, agradeço todos os momentos vividos ao longo de todo o percurso na Academia da Força Aérea.

Aos meus amigos de infância, por permanecerem perto, mas longe, prestando apoio com as suas palavras de motivação. Às minhas amigas Sofia Varela, Fátima Martins e Maria Fontainha por toda a ajuda, apoio, compreensão e gargalhadas destes últimos anos. E um especial agradecimento à Sofia Patrício por me ter sido uma preciosa ajuda no desenvolvimento da presente dissertação.

Aos meus pais e ao meu irmão por me apoiarem incondicionalmente, pela paciência, pelos valores e por serem os responsáveis pela pessoa em que me tornei, o meu mais profundo obrigada.

Por último, deixo um especial agradecimento ao João, pelo seu apoio constante, conselhos e ajuda. Sem ti não teria sido fácil ultrapassar muitos dos obstáculos e, por isso, não tenho palavras para agradecer tudo o que fizeste e fazes por mim.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo estudar os conceitos teóricos necessários à resolução do problema de cobertura verificado no sistema de comunicações aeronáuticas militares que outrora se encontrou instalado no Arquipélago dos Açores. Os conceitos estudados são, na sua maioria, para resolução do problema de cobertura. Na dissertação são apresentadas as características do sistema de comunicações que outrora se encontrou instalado nos Açores, são estudados conceitos teóricos sobre modelos de propagação e cobertura e é apresentado um estado da arte sobre o tema. Posteriormente é desenvolvido o modelo, que se baseia nos modelos de propagação em Espaço Livre, modelo de comunicação Trans-horizonte e ainda dos modelos de *Knife-Edge* e de *Deygout*. Posteriormente é realizada a análise do mesmo e ainda a avaliação dos resultados obtidos. No final são apresentadas as conclusões do estudo realizado. Assim concluiu-se que é possível obter um alcance de cobertura de 200 km a uma altitude de voo de 600 m quando usadas antenas com ganhos superiores a 5.2 dBi e ainda se concluiu que o sistema poderá ter melhorias no seu desempenho se fosse possível instalar uma nova estação terrestre no topo da Montanha do Pico.

Palavras-chave

Cobertura; Comunicações Militares Aeronáuticas; Sistema de Comunicações VHF-AM; Aeronaves; Antenas.

Abstract

This dissertation aims to study the theoretical concepts necessary to solve the coverage problem verified in the military aeronautical communications system that was implemented in the Azores Archipelago. The concepts studied are mostly for the solution of the coverage problem. The dissertation presents the characteristics of the communication system that was once installed in the Azores, theoretical concepts on propagation and coverage models are studied and a state of the art on the subject is presented. Afterwards, the model is developed, making use of the models on free space propagation, the trans-horizon communication and the *Knife-Edge* and *Deygout*. Subsequently, one analyses the results obtained. At the end, the conclusions of the study are presented. It is concluded that it is possible to obtain a coverage range of 200 km at a flight altitude of 600 m when using antennas with gains greater than 5.2 dBi and it was also concluded that the system could improve its performance if it would be possible to install a new earth station on top of Pico Mountain.

Keywords

Coverage; Aeronautical Military Communications; VHF-AM Communication System; Aircrafts; Antennas.

Índice

Agradecimentos	vii
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
Índice.....	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas	xvi
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Software	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Motivação e Objetivos	4
2 Conceitos Fundamentais	7
2.1 Arquitetura e Especificações do Sistema de Comunicações	8
2.2 Modelos de Propagação.....	12
2.3 Antenas	16
2.4 Qualidade de Serviço para Voz.....	17
2.5 Estado da Arte.....	18
3 Desenvolvimento e Implementação do Modelo	21
3.1 Visão genérica do modelo a implementar	22
3.2 Cenários de Aplicação.....	23
3.3 Modelos de Propagação.....	27
3.3.1 Potência Recebida.....	27
3.3.2 Propagação Espaço Livre.....	27
3.3.3 Modelo Terra Plana	29

3.3.4	Modelo Terra Esférica	31
3.3.5	Comunicações trans-horizonte	35
3.3.6	Modelos de <i>Knife-Edge</i> e <i>Deygout</i>	36
3.3.7	Visão geral da aplicação dos modelos ao problema em estudo	37
3.4	Desvanecimento	39
3.5	Diagramas de Radiação	40
3.6	Implementação do Modelo	43
3.7	Avaliação do Modelo	45
4	Análise de Resultados	53
4.1	Cenários em Estudo	54
4.2	Estações Omnidirecionais	57
4.3	Estações Setoriais	62
5	Conclusões	67
Anexo A: Antenas Instaladas nas Estações Terrestres		73
A.1	Fiberglass Collinear Antenna 2.5 dBd	74
Anexo B: Antenas Instaladas nas Aeronaves		75
B.1	Características das antenas instaladas nas aeronaves	76
Anexo C: <i>CST Simulation Tool</i>		77
C.1	Recursos do programa e características	78
C.2	Simulação	80
Anexo D: Tabela Comparativa		81
D.1	Tabela Comparativa dos Comportamentos dos Modelos	82
Referências		85

Lista de Figuras

Figura 1.1. Limites da zona de Busca e Salvamento (extraído de [CoGo17]).	3
Figura 2.1. Arquitetura do sistema de comunicações (adaptado de Google Maps).	8
Figura 2.2. Esquema simplificado do problema de propagação a solucionar (adaptado de [CaFe20]).	12
Figura 2.3. Tipologias de cobertura para espaço aéreo inferior (extraído de [Stac08]).	13
Figura 2.4. Modelo de propagação de dois raios (extraído de [Stac08]).	13
Figura 2.5. Modelo equivalente Terra Esférica (adaptado de [CaFe20]).	14
Figura 2.6. Representação dos diagramas dos terminais para percepção dos ângulos.	16
Figura 2.7. Estações RCAG na Índia (extraído de [AAIn20]).	20
Figura 3.1. Visão geral do modelo a implementar.	22
Figura 3.2. Perfil das trajetórias de voo das aeronaves C-295M e EH-101 Merlin.	25
Figura 3.3 Distâncias entre estações terrestres (adaptado de [GoEP21]).	26
Figura 3.4. Alcance máximo das aeronaves ao realizar missões do tipo SAR (trajeto ida e volta) (adaptado de [GoEP21]).	26
Figura 3.5. Situação geométrica favorável à aplicação do modelo de propagação Espaço Livre.	28
Figura 3.6. Distância máxima de aplicabilidade do modelo de propagação Espaço Livre.	29
Figura 3.7. Distância mínima de aplicabilidade do modelo Terra Plana.	30
Figura 3.8. Distância máxima de aplicação do modelo Terra Plana.	31
Figura 3.9 Distância mínima de aplicação do Modelo Terra Esférica considerando o ângulo de incidência.	33
Figura 3.10. Esquema exemplificativo da influência da distância de Rádio Horizonte.	34
Figura 3.11. Distância de Rádio Horizonte em função das altitudes dos terminais.	34
Figura 3.12. Perdas de caminho do Modelo Trans-horizonte em função da altitude e da distância.	36
Figura 3.13. Geometria do modelo <i>Knife-Edge</i> (adaptado de [Corr20]).	37
Figura 3.14. Linha condutora do modelo a desenvolver.	38
Figura 3.15. Diagrama de radiação das antenas presentes nas aeronaves.	41
Figura 3.16. Corte 2D para o campo distante ($\phi=0^\circ$).	43
Figura 3.17. Visão genérica do simulador.	43
Figura 3.18. Fluxograma do simulador que avalia a cobertura do sistema.	44
Figura 3.19. Fluxograma do simulador dos modelos <i>Knife-Edge</i> e <i>Deygout</i> .	45
Figura 3.20. Fluxograma do simulador do Modelo Trans-Horizonte.	45
Figura 3.21. Potência recebida em função da distância.	47
Figura 3.22. Potência recebida em função da altitude para o modelo Trans-horizonte.	47
Figura 3.23. Potência recebida em função da distância entre terminais.	48
Figura 3.24. Perfil de terreno e elipsoide de Fresnel para 8 km.	48
Figura 3.25. Perfil de terreno e elipsoide de Fresnel para 2 km.	49
Figura 3.26. Potência recebida em função da distância entre terminais com atenuação de obstáculo.	49
Figura 3.27. Evolução do ângulo θ em função da distância entre os terminais.	50
Figura 3.28. Evolução do ganho em função das distâncias entre os terminais.	50

Figura 3.29. Comparação da potência recebida com diferentes valores de ganho sem atenuação de obstáculo.....	51
Figura 3.30. Comparação da potência recebida com diferentes valores de ganho com atenuação de obstáculo.....	51
Figura 4.1. Diagrama de radiação da antena 7500143 (extraído de [AmPr20]).	55
Figura 4.2. Diagrama de radiação da antena 470.31.05.00 (extraído de [AmPr20]).	56
Figura 4.3. Diagrama de radiação da antena S.M2-145 (extraído de [AmPr20]).	56
Figura 4.4. Diagramas de cobertura e sombra da antena 7500143 no topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).	57
Figura 4.5. Potência recebida em função da distância na direção no Morro Alto na direção de 310°.....	58
Figura 4.6. Diagramas de cobertura e sombra da antena 470.31.05.00 no topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).	59
Figura 4.7. Diagramas de cobertura e sombra da antena 7500143 a dois terços do topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).	59
Figura 4.8. Diagramas de cobertura e sombra da antena 470.31.05.00 a dois terços do topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).	60
Figura 4.9. Diagramas de cobertura e sombra da antena 470.31.05.00 no topo da torre de suporte quando considerada uma estação terrestre na Ilha do Pico (adaptado de [GoEP21]).	61
Figura 4.10. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Morro Alto (adaptado de [GoEP21]).	63
Figura 4.11. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Cabeço Gordo (adaptado de [GoEP21]).	63
Figura 4.12. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Santa Bárbara (adaptado de [GoEP21]).	64
Figura 4.13. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre da Barrosa (adaptado de [GoEP21]).	64
Figura 4.14. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Pico Alto (adaptado de [GoEP21]).	65
Figura A. 1. Diagrama de radiação da antena omnidirecional (extraído de [Cart08]).	74
Figura B. 1 Diagrama de radiação aproximado das antenas das aeronaves (adaptado de [LDLL15]).	76
Figura C. 1. Representação de uma célula Yee (adaptado de [Laak15]).	79
Figura C. 2. <i>Design</i> do dipolo com influência da torre de suporte no CST, vista de topo [extraído de CST].....	80

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Frequências atribuídas a cada ligação VHF-FM (extraído de [Cart08]).	9
Tabela 2.2. Número de antenas direcionais instaladas em cada estação terrestre (extraído de [Cart08]).	9
Tabela 2.3. Localização exata das estações terrestres e informações sobre as antenas instaladas (extraído de [EMFA20e]).	10
Tabela 2.4. Especificações das antenas instaladas nas aeronaves (extraído de [EMFA20e]).	10
Tabela 2.5. Localização das estações terrestres do novo sistema de comunicações (extraído de [EMFA20e]).	11
Tabela 3.1. Altitudes de voo para missão SAR - aeronave C-295M (extraído de [EMFA20e]).	24
Tabela 3.2. Altitudes de voo para missão SAR - aeronave EH-101 Merlin (extraído de [EMFA20e]).	24
Tabela 3.3. Resumo dos requisitos do sistema de comunicações.	25
Tabela 3.4. Distância entre estações terrestres.	26
Tabela 3.5. Requisitos de operação considerando as características do sistema.	27
Tabela 3.6. Distâncias limite de aplicação dos modelos.	39
Tabela 3.7. Testes a realizar para a validação do simulador.	46
Tabela 4.1. Especificações da antena 7500143 (adaptado de [AmPr20]).	55
Tabela 4.2. Especificações da antena 470.31.05.00 (adaptado de [AmPr20]).	55
Tabela 4.3. Especificações da antena S.M2-145 (extraído de [AmPr20]).	56
Tabela 4.4. Alcance máximo de cobertura quando usada a antena 7500143.	57
Tabela 4.5. Alcance máximo de cobertura quando usada a antena 470.31.05.00.	59
Tabela 4.6. Alcance máximo de cobertura quando considerada uma estação terrestre alternativa na Ilha do Pico usando a antena 470.31.05.00.	61
Tabela 4.7. Alcance máximo de cobertura quando usado o conjunto das três antenas S.M2-145.	62
Tabela A. 1. Especificações das antenas omnidirecionais (extraído de [Cart08]).	74
Tabela B. 1. Especificações da antena instalada na aeronave EH-101 (extraído de [EMFA20e]).	76
Tabela B. 2. Especificações da antena instalada na aeronave C-295M (extraído de [EMFA20e]).	76
Tabela C. 1. Parâmetros de design do dipolo e da estrutura da torre de suporte	80
Tabela D. 1. Tabela comparativa das perdas de caminho dos modelos.	82

Lista de Abreviaturas

AAI	Autoridade de Aeroportos da Índia
AFA	Academia da Força Aérea
AGC	<i>Automatic Gain Controller</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
BA	Base Aérea
BA4	Base Aérea nº4
CA	Comando Aéreo
CZAA	Comando da Zona Aérea dos Açores
CC	Comando e Controlo
FA	Forças Armadas
FAP	Força Aérea Portuguesa
FEM	Método do Elemento Finito
FIR	<i>Flight Information Region</i>
FIT	Técnica de Integração Finita
FL	<i>Flight Level</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
HF	<i>High Frequency</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IST	Instituto Superior Técnico
LOS	<i>Line of Sight</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RCAG	<i>Remote Controlled Air to Ground Communication</i>
SAR	<i>Search and Rescue</i>
SATCOM	Comunicações Via Satélite
SINR	Relação Sinal-Ruído mais Interferência
SNR	Relação Sinal-Ruído
TLM	Matriz de Linha de Transmissão
TMA	<i>Terminal Manoeuvring Area</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
ZEE	Zona Económica Exclusiva

Lista de Símbolos

λ	Comprimento de onda
β	Parâmetro Indicativo sobre o tipo de solo e de polarização
δ	Diferença de fase entre duas antenas sucessivas do agregado
σ	Condutividade elétrica
Γ	Coefficiente de reflexão em Terra Esférica
Γ_0	Coefficiente de reflexão em Terra Plana
θ	Ângulo vertical criado pela ligação entre os terminais
γ	Diferença de fase entre os sinais radiados pelas antenas para agregados verticais
ϕ	Direção da ligação em relação ao ponto cardeal norte
φ'	Aproximação do ângulo limite de incidência
ψ	Ângulo de incidência
b	Constante para cálculo auxiliar
c	Constante para cálculo auxiliar
d	Distância entre terminais
d_1	Distância entre a aeronave e o ponto de reflexão
d_2	Distância entre a estação terrestre e o ponto de reflexão
d_a	Distância entre o ponto central dos elementos do agregado
D	Fator de Divergência
d_{limite}	Distância limite entre dois modelos de propagação
d_{max-EL}	Distância máxima de aplicabilidade do modelo Espaço Livre
d_{max-TE}	Distância máxima de aplicabilidade do Modelo Terra Esférica
d_{max-TP}	Distância máxima de aplicabilidade do Modelo Terra Plana
d_{min-TE}	Distância mínima de aplicabilidade do Modelo Terra Esférica
d_{min-TH}	Distância mínima de aplicabilidade do Modelo Trans-Horizonte
d_{min-TP}	Distância mínima de aplicabilidade do Modelo Terra Plana
d_{ORx}	Distância do obstáculo ao recetor
d_{RH}	Distância de rádio horizonte
d_{TxO}	Distância do transmissor ao obstáculo
E	Campo elétrico
E_a	Campo radiado por um único elemento
f	Frequência do sinal transmitido
F_{aa}	Fator de agregado

F_{aa}^{norm}	Fator de agregado normalizado
$f_{A/ET}$	Diagrama de radiação em função de um determinado ângulo para a antena da aeronave/estação terrestre
$G_{A/ET}$	Ganho generalizado da antena da aeronave/estação terrestre
$G_{max A/ET}$	Ganho máximo da antena da aeronave/estação terrestre
G_r	Ganho da antena recetora
G_t	Ganho da antena emissora
H	Campo magnético
h_A	Altitude da antena da aeronave
h_{ANMM}	Altitude da antena da aeronave em relação ao nível médio do mar
$h_{eq,A}$	Altitude equivalente em Terra Esférica da antena da aeronave
$h_{eq,ET}$	Altura equivalente em Terra Esférica da antena da estação terrestre
h_{ET}	Altura da antena da estação terrestre
h_{ETNMM}	Altura da antena da estação terrestre em relação ao nível médio do mar
h_{OEF}	Distância entre o centro do elipsoide e o topo do obstáculo
K	Fator de Rice
k	Fator multiplicativo
k_{no}	Número de onda
I_m	Valor máximo de corrente
l	Comprimento de meio dipolo
L_0	Atenuação espaço livre
L_{KE}	Atenuação de obstáculo
L_p	Perdas de caminho
m	Constante para cálculo auxiliar
N_a	Número de elementos do agregado
P_t	Potência de emissão
P_r	Potência de recepção
R	Raio da Terra
r_d	Raio direto
R_e	Raio efetivo da Terra
r_e	Raio do primeiro elipsoide de Fresnel à distância w do primeiro terminal
v	Grau de obstrução do elipsoide
w	Distância do primeiro terminal até ao ponto em que é calculado o raio do elipsoide
Z	Fator de normalização da admitância de superfície
Z_0	Impedância

Lista de *Software*

FEIXER	<i>Software</i> para estudo de feixes hertzianos
Draw.io	<i>Software Online</i> para Fluxogramas
Google Earth	<i>Software</i> para recolha de mapas e informações geográficas
Google Earth Pro	<i>Software</i> para recolha de dados geográficos e topográficos
Matlab R2018a	<i>Software</i> para as simulações numéricas
Microsoft Excel 2018	<i>Software</i> de folhas de cálculo
Microsoft Word 2018	<i>Software</i> de processamento de texto
<i>CST Simulation Tool</i>	<i>Software</i> de simulação de diagramas de radiação

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentada a contextualização da dissertação. É exposta a necessidade do sistema de comunicações VHF nos Açores, assim como os motivos que levaram à escolha deste tema de dissertação, os seus objetivos e respetiva estrutura.

1.1 Enquadramento

A Força Aérea Portuguesa (FAP) realiza diversas missões no Arquipélago dos Açores, como tal existe a necessidade de se instalar um sistema de comunicação aeronáutica no mesmo, e o desenvolvimento do presente tema de dissertação advém desta necessidade. Como tal, a presente dissertação é realizada em estreita colaboração entre o Instituto Superior Técnico (IST), a FAP e a Academia da Força Aérea (AFA).

A soberania de um Estado depende dos direitos e liberdades que são garantidos aos seus cidadãos. As Forças Armadas (FA) auxiliam na tarefa de garantir a segurança dos cidadãos portugueses, o que se deve ao facto de às FA poderem ser incumbidas missões de apoio à população e de proteção civil [AsRe05].

A FAP, como parte integrante do sistema de forças nacional, tem a missão de cooperar na defesa militar e da República, sendo responsável pela realização de operações aéreas de defesa do espaço nacional bem como de missões de interesse público para a satisfação de necessidades das populações [EMFA20a]. Sendo o território português composto por Portugal Continental e pelas Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira, é necessário garantir a segurança e satisfação das necessidades de todos os que habitam estas regiões.

A Base Aérea nº4 (BA4) - Base Aérea das Lajes está integrada no Comando da Zona Aérea dos Açores (CZAA) desde 1978. Desde então que lhe estão atribuídas diversas missões, entre as quais: Busca e Salvamento (*Search and Rescue* – SAR), Transporte Tático e Patrulhamento Marítimo na área do arquipélago. No entanto, atualmente, a BA4 não só mantém estas missões como também presta apoio às populações e autoridades civis locais, nomeadamente na realização de evacuações sanitárias e no transporte inter-ilhas [EMFA20b].

Para a realização destas missões estão delimitadas zonas de atuação, como está ilustrado na Figura 1.1. Esta figura apresenta os raios de ação de duas das aeronaves da FAP, bem como as delimitações da Zona Económica Exclusiva (ZEE), da Plataforma Continental e da Zona de Busca e Salvamento, também designada por Região de Informação de Voo (FIR). Como é possível ver na Figura 1.1, estão delimitadas duas zonas SAR, uma delas encontra-se sobre a alçada do Comando Aéreo (CA), sediado em Monsanto, e a outra é da responsabilidade do CAA.

Para a execução desta missão encontram-se duas aeronaves destacadas na Base Aérea das Lajes que efetuam as três tipologias de missão referidas anteriormente, que são uma de asa fixa *EADS C-295M*, com um alcance máximo de 770 nm (1 426 km) e uma autonomia máxima de 10 h, e o helicóptero *AUGUSTA-WESTLAND EH-101 MERLIN*, com um alcance máximo de 400 nm (740 km) e uma autonomia máxima de 8h30, quando consideradas as condições da tipologia de voo utilizada para a realização das missões SAR [EMFA20c], [EMFA20d].

A zona SAR da responsabilidade do CAA é uma área extensa e, como tal, é necessário que existam meios de comunicação entre as estações terrestres e a aeronave para que estas consigam desempenhar a sua missão de forma eficiente. Visto que, na sua maioria, as missões efetuadas pelas

aeronaves são missões de SAR e evacuação médica, é necessário que os meios de comunicação permitam a realização destas missões da forma mais célere possível. Contudo, o sistema que se encontrava instalado nos Açores tinha uma área de cobertura muito inferior à área que as aeronaves conseguem alcançar e ainda apresentava várias zonas de sombra. Para a melhor compreensão da importância desta BA e do sistema de comunicações nela sediado, fez-se o levantamento do número de missões realizados pelas aeronaves referidas anteriormente, associada à respetiva missão, e o número de horas de voo associado.

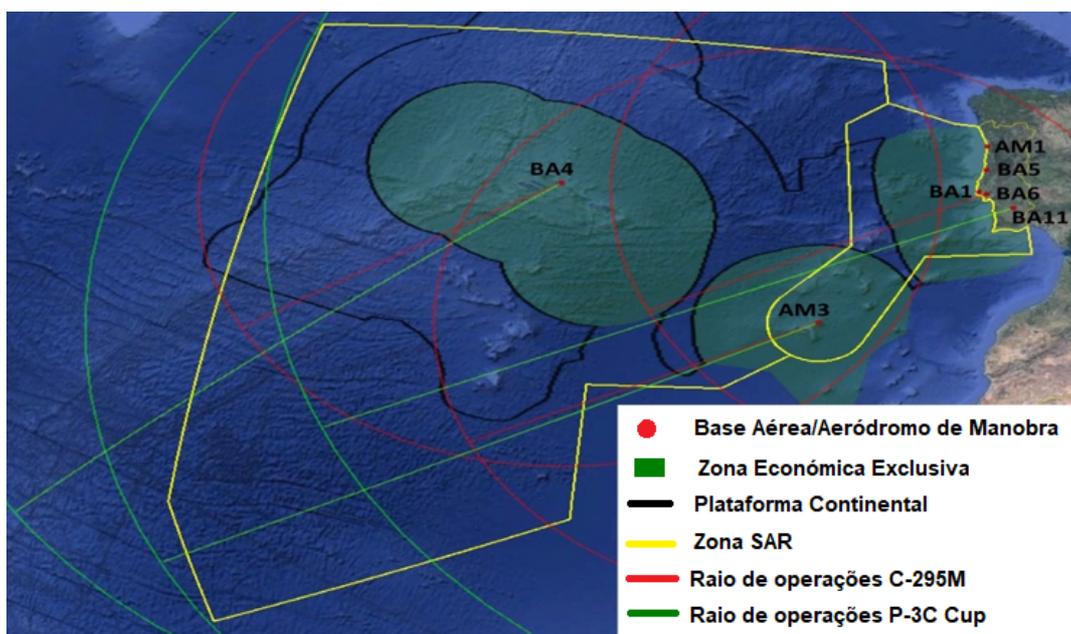


Figura 1.1. Limites da zona de Busca e Salvamento (extraído de [CoGo17]).

No ano de 2019 foram contabilizados 650 doentes transportados e 26 vidas salvas em alto mar perfazendo um total de 876 horas de voo para o transporte urgente de doentes. Neste âmbito, as aeronaves EH-101, C-295M e *Falcon* 50 realizaram 498 missões e transportaram 611 doentes. Das missões anteriormente referidas 272 realizaram-se no Arquipélago dos Açores, com o transporte de 320 doentes [Expr19]. Para o apoio à população das regiões autónomas a partir da Base Aérea nº6 no Montijo, da Base Aérea nº4 nas Lajes, e do Aeródromo de Manobra nº3 em Porto Santo, foram realizados 498 transportes médicos urgentes entre ilhas ou das ilhas para o continente, com o apoio a 611 doentes. Foram realizados também 39 resgates a navios, transportando 44 pessoas, e 78 missões SAR [Expr19].

No ano de 2020 foram contabilizados, só no Arquipélago dos Açores, 365 missões de transporte aéreo de doentes no que resultou um total de 457 doentes transportados e 1 068 horas de voo, contando com o apoio das aeronaves referidas anteriormente. Foi também contabilizado um total de 31 missões de resgate em navios, resultando num total de 29 doentes resgatados em toda a FIR, perfazendo um total 201 horas de voo desta missão, ainda foram contabilizadas 39 missões SAR que tiveram como resultado 6 salvamentos, perfazendo um total de 201 horas de voo. Foram ainda realizadas 76 horas de voo de transporte aéreo de órgãos, o que resultou num total de 30 missões realizadas [FAPo20].

1.2 Motivação e Objetivos

O sistema de comunicações VHF AM/FM instalado nos Açores em 2007 para apoio às respetivas missões encontra-se inoperativo desde, aproximadamente, 2011. Atualmente, com os sistemas de comunicações que se encontram instalados, verificam-se diversos problemas com as comunicações, existindo localizações em que as aeronaves não têm capacidade de efetuar comunicações. Neste sentido existe a necessidade de instalação de um novo sistema VHF com o objetivo de mitigar os problemas apresentados.

O antigo sistema era constituído por estações terrestres com antenas de transmissão e por um sistema de interligação e monitorização remota, e o propósito do mesmo era garantir a cobertura de comunicações para as aeronaves em missão.

No entanto, este sistema não conseguia cumprir na totalidade o seu propósito. Visto que o CZAA tem uma área de responsabilidade de SAR extensa, é oportuno que o novo sistema tenha uma abrangência de cobertura igualmente extensa. Outro problema detetado está relacionado com zonas de sombra: a área que outrora se encontrava abrangida por este sistema tinha diversas zonas de sombra, i.e., locais sem cobertura.

Assim, o objetivo da dissertação é desenvolver um modelo que otimize a cobertura do sistema de comunicação aeronáutica a implementar nos Açores. Para otimizar a cobertura do sistema serão considerados dois aspetos principais: obter o maior alcance de cobertura possível e ainda minimizar, tanto quanto possível, as zonas de sombra e as suas respetivas áreas. Para isso, é analisado não só o sistema que já se encontrou instalado, como também os requisitos operacionais de comunicação que são necessários, as principais características do sistema e ainda algumas opções de antenas que poderão vir a ser instaladas no sistema. Ainda serão analisadas possíveis localizações alternativas, ou complementares, de estações terrestres para otimizar as áreas de cobertura e mitigar as zonas de sombra.

O estudo apresentado revela-se pertinente, na medida em que as missões anteriormente citadas são de carácter importante para a segurança dos cidadãos portugueses, bem como daqueles que navegam a área SAR portuguesa. Como tal, a otimização do sistema de comunicações, não só é proveitosa para o desempenho mais eficaz destas missões nos Açores, como também poderá ser aplicável a outros sistemas semelhantes.

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos: o primeiro é o capítulo introdutório, o segundo aborda as especificações do problema a estudar e alguns aspetos teóricos sobre o mesmo, o terceiro aborda o desenvolvimento do modelo e a sua implementação, no quarto é realizada a análise dos resultados obtidos e, por fim, no quinto capítulo encontram-se as conclusões.

De forma mais detalhada, no primeiro capítulo é feito o enquadramento do problema a resolver, são apresentadas as informações genéricas sobre o sistema de comunicações que se encontrava instalado nos Açores. Ainda neste capítulo são apresentadas as motivações e objetivos para o desenvolvimento deste tema de dissertação.

Posteriormente, no segundo capítulo, é apresentada a arquitetura do sistema de comunicações que se encontrou instalado nos Açores e que será a base para o desenvolvimento do sistema a instalar. São apresentados alguns conceitos teóricos que são os pilares para a resolução do problema, assim como um estado da arte sobre o mesmo.

No terceiro capítulo são apresentados os modelos teóricos que serão a base para o modelo a implementar e o raciocínio no desenvolvimento do mesmo. São ainda apresentados os parâmetros de entrada e saída do modelo a desenvolver e ainda é feita a implementação do modelo.

De seguida, no quarto capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos da aplicação do modelo desenvolvido anteriormente. Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as considerações finais da presente dissertação.

Capítulo 2

Conceitos Fundamentais

Neste capítulo é apresentada a arquitetura do sistema em reestruturação e as suas especificações. Também são abordados os modelos de propagação que serão considerados para a elaboração da solução do problema em estudo e por fim o estado da arte.

2.1 Arquitetura e Especificações do Sistema de Comunicações

O sistema de comunicações militar, atualmente inoperacional, sediado nos Açores operava na gama VHF e tinha como objetivo facilitar as comunicações entre as aeronaves SAR e o núcleo de operações da BA4. Este era composto por dois tipos de comunicações, as comunicações terra-terra (VHF-FM), entre estações terrestres, e as comunicações terra-ar, entre as aeronaves e uma das estações terrestres (VHF-AM) [Cart08].

Relativamente às comunicações entre as estações terrestres, como é possível ver na Figura 2.1 o sistema era composto por quatro estações terrestres e um sistema de monitorização. Na figura também se encontram representadas as ligações diretas entre estações terrestres [Cart08]. O sistema de monitorização encontrava-se na ilha Terceira, na BA4. As diversas estações terrestres estavam localizadas na ilha Terceira – Santa Bárbara, na Ilha das Flores – Morro Alto, na ilha de São Miguel – Barrosa, e ilha do Faial – Cabeço Gordo [Cart08].

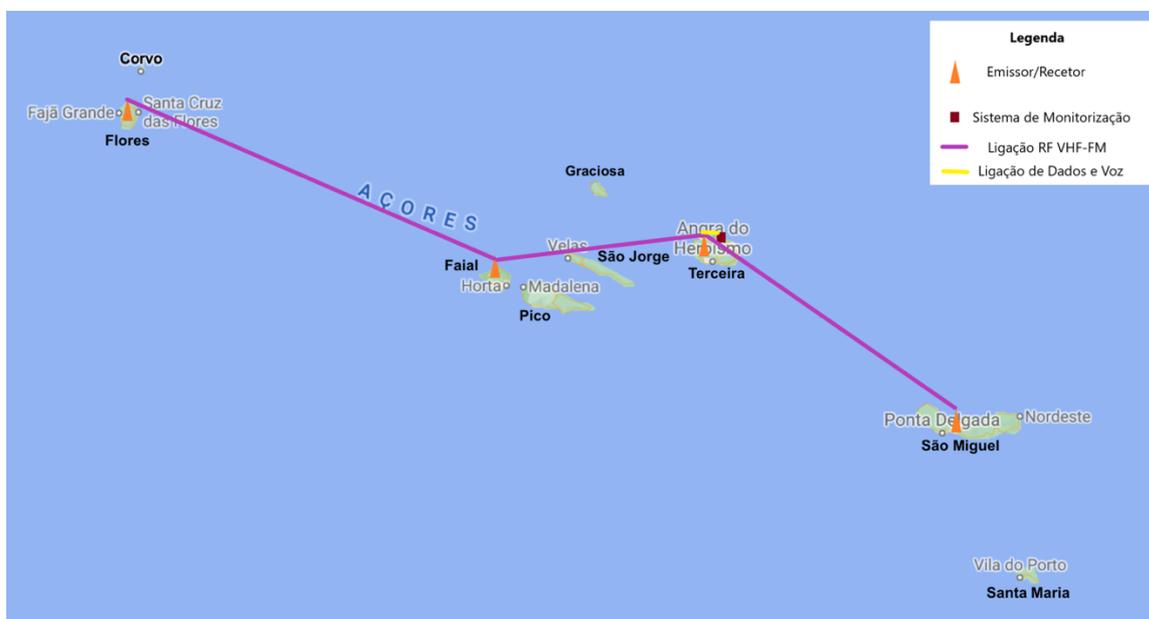


Figura 2.1. Arquitetura do sistema de comunicações (adaptado de Google Maps).

Nas comunicações entre as diversas estações terrestres, os sinais eram modulados em frequência (FM – *Frequency Modulation*) e, para estabelecer estas ligações, eram usadas antenas direcionais [Cart08]. Na figura apenas estão representadas as ligações diretas que o sistema de comunicações possuía. No entanto, existindo quatro ligações permanentes neste sistema, a ligação não representada é entre as estações terrestres da Terceira e das Flores que, devido à distância entre as mesmas, era efetuada via Faial [Cart08].

A comunicação entre estações terrestres era realizada na banda de frequências entre os 146 MHz e os 148 MHz. A largura de banda atribuída para voz era entre 300 Hz e 2 500 Hz e a largura de banda atribuída para dados era entre 2 700 Hz e 3 000 Hz [Cart08].

Para as ligações estabelecidas entre as estações terrestres existia uma atribuição de frequências diferentes a cada ligação. Essas frequências encontram-se discriminadas na Tabela 2.1 [Cart08].

Tabela 2.1. Frequências atribuídas a cada ligação VHF-FM (extraído de [Cart08]).

Links	Terceira<->Faial		Terceira<->São Miguel		Terceira<->Flores	
	Terceira	Faial	Terceira	São Miguel	Terceira	Flores
Frequência de Recepção [MHz]	146.750	147.950	146.825	147.950	146.725	146.725
Frequência de Transmissão [MHz]	147.950	146.750	147.950	146.825	147.875	147.975

No que diz respeito ao número de antenas, cada estação terrestre possuía um número de antenas direcionais proporcional ao número de ligações diretas estabelecidas com estações terrestres vizinhas. O número de antenas direcionais é apresentado na Tabela 2.2 [Cart08].

Tabela 2.2. Número de antenas direcionais instaladas em cada estação terrestre (extraído de [Cart08]).

Estação Terrestre	Terceira	Faial	São Miguel	Flores
Antenas Direcionais	3	3	1	1

Visto que a estação terrestre da Terceira tinha ligação com todas as outras estações terrestres, a monitorização e interligação do sistema de comunicações era feita a partir da conexão desta com o sistema de interligação e monitorização que se encontra na BA4 [Cart08].

No que concerne ao número de antenas omnidirecionais, cada estação terrestre possuía uma antena omnidirecional [Carto08].

Relativamente às comunicações terra-ar e ar-terra, os sinais eram modulados em amplitude (*Amplitude Modulation* - AM). As comunicações entre as aeronaves e as estações terrestres eram estabelecidas na frequência nominal de 139.3 MHz. O sistema a instalar fará uso da mesma frequência nominal. No entanto, utilizará com uma diferença de 5 kHz entre emissores. Assim a estação terrestre que se encontrará na ilha das Flores terá um *offset* de -7.5 kHz, no Faial terá um *offset* de -2.5 kHz, na Terceira terá um *offset* de +2.5 kHz e em São Miguel terá um *offset* de +7.5 kHz e ainda na possível nova estação terrestre a considerar, em Santa Maria terá um *offset* de -7.5 kHz. Cada estação terrestre transmite um sinal dentro de uma largura de banda de 25 kHz com um *offset* específico associado a cada estação terrestre [Cart08].

Quando se considera o sistema de comunicações a reestruturar nesta dissertação, que atualmente se encontra inoperativo, este tinha como objetivo assegurar um sinal superior a 4 μ V num raio de 110 nm, equivalente a 200 km, a uma altitude até, pelo menos, 2 000 pés, equivalente a 600 m de altitude [Cart08].

Relativamente às antenas que se encontravam em uso aquando da vigência do sistema são de dois

tipos: as antenas omnidirecionais, utilizadas para as comunicações com as aeronaves, *Fiberglass Collinear 2.5 dBd*, e as antenas utilizadas para a realização das comunicações entre estações terrestres, *Directional Yagis*. As especificações da antena omnidirecional encontram-se no Anexo A [Cart08].

Na Tabela 2.3 são apresentadas algumas especificações relativas às diferentes estações terrestres, nomeadamente a sua localização exata, altura das antenas em relação ao solo e especificações das antenas instaladas nas estações terrestres. Na Tabela 2.4 são apresentadas especificações das antenas que se encontram instaladas nas aeronaves EH-101 Merlin e EADS C-295M. Mais informações sobre as antenas instaladas nas aeronaves encontram-se especificadas no Anexo B.

Tabela 2.3. Localização exata das estações terrestres e informações sobre as antenas instaladas (extraído de [EMFA20e]).

Estação Terrestre	Flores	Faial	Terceira	São Miguel
Local	Morro Alto	Cabeço Gordo	Santa Bárbara	Barrosa
Latitude [N]	39°27'48,4"	38°34'34.7"	38°43'47"	37°45'34.8"
Longitude [W]	31°13'12.9"	28°42'46.8"	27°19'05"	25°29'30"
Altitude [m]	979	1 108	1 015	972
Altura da antena [m]	20	20	20	20
Ganho da antena [dBi]	2.5	2.5	2.5	2.5
Potência de emissão [dBm]	56	56	56	56
Sensibilidade [dBm]	-95	-95	-95	-95

Tabela 2.4. Especificações das antenas instaladas nas aeronaves (extraído de [EMFA20e]).

Aeronave	EH-101 Merlin	EADS C-295M
Ganho da antena [dBi]	-3	-3
Potência de emissão [dBm]	44	43
Sensibilidade [dBm]	-98	-97

Como a frequência das comunicações entre as estações terrestres e as aeronaves era realizada numa frequência comum, esta frequência de trabalho comum poderia trazer problemas ao sistema de comunicações no que diz respeito à interferência. No entanto, este problema não é preponderante no

tipo de sistema em estudo, pois é ultrapassado devido a três fatores: usualmente apenas se encontra uma aeronave a realizar missão SAR, não existindo interferência entre as comunicações entre a aeronave e as estações terrestres, as estações terrestres encontram-se a distâncias consideráveis entre si e é utilizado o sistema de *voting* [EMFA20e].

O sistema de *voting* permite que um sistema que possui vários transmissores e recetores que utilizam a mesma frequência de trabalho não interfiram entre si. Este sistema tem dois tipos de funcionamento, *downlink* e *uplink*. O *voting* permite assim que não exista interferência devido ao facto do recetor escolher o melhor sinal possível de entre todas as estações terrestres que se encontram a transmitir na sua frequência de trabalho. Este processo de escolha é realizado em três passos:

- Primeiro - o rádio do emissor procura atividade no seu canal num processo de varrimento.
- Segundo - o recetor mede a qualidade do sinal de todos os canais.
- Terceiro - o recetor escolhe o canal que tem a maior intensidade do sinal e ativa o recetor [Tait20].

Com a reestruturação do sistema de comunicações pretende-se que este assegure maioritariamente as comunicações de baixa altitude fazendo uso das estações terrestres da ilha Terceira, da ilha de São Miguel, da ilha do Faial, da ilha das Flores e, uma nova estação terrestre instalada, na ilha Santa Maria. No que diz respeito ao raio mínimo e à altitude mínima, os requisitos operacionais mantêm-se relativamente ao sistema instalado anteriormente [EMFA20e].

Na Tabela 2.5 são apresentadas as localizações exatas das estações terrestres do novo sistema de comunicações a instalar no Arquipélago dos Açores. Quando comparado o sistema a instalar nos Açores com o antigo sistema, atualmente inoperativo, este utilizará uma nova estação terrestre localizada na ilha de Santa Maria. O novo sistema de comunicações deve garantir vias de comunicação direta entre as aeronaves em operação e o órgão de comando e controlo (CC) instalado na BA4 e ainda evitar retransmissão (ecos) de comunicações, pois, para as comunicações com as aeronaves, todas as estações terrestres emitem e recebem na mesma frequência [EMFA20e].

Tabela 2.5. Localização das estações terrestres do novo sistema de comunicações (extraído de [EMFA20e]).

Estação Terrestre	Flores	Faial	Terceira	São Miguel	Santa Maria
Local	Morro Alto	Cabeço Gordo	Santa Bárbara	Barrosa	Pico Alto
Latitude [N]	39°27'48"	38°34'33"	38°43'47"	37°45'35"	36°58'59"
Longitude [W]	31°13'13"	28°42'47"	27°19'06"	25°29'31"	25°05'27"
Altitude [m]	979	1 108	1 015	972	561

2.2 Modelos de Propagação

Existem diversos modelos de propagação que são aplicados em conformidade com os ambientes envolventes aos sistemas de comunicações.

Na presente dissertação são estudadas as comunicações entre as estações terrestres e as aeronaves para o auxílio da missão SAR no Arquipélago dos Açores, como tal a propagação dos sinais ocorre entre meios terrestre e marítimo. No entanto, estando em causa a missão SAR, a propagação tem maior ocorrência em meio marítimo. A Figura 2.2 representa, de forma simplificada, o problema em estudo, i.e., comunicações entre uma estação terrestre e uma aeronave que voa a baixa altitude.

Como o problema em estudo envolve aeronaves, é necessário ter em conta a terminologia aeronáutica aplicada aos diferentes meios de propagação. Como tal, existe a cobertura em rota, cobertura da área de manobra do terminal (*Terminal Manoeuvring Area* - TMA) e a cobertura local do aeroporto [Stac08].



Figura 2.2. Esquema simplificado do problema de propagação a solucionar (adaptado de [CaFe20]).

Nas comunicações aeronáuticas é necessário dividir o espaço aéreo em dois, o superior e o inferior. Esta separação acontece no chamado nível de voo (*Flight Level* – FL), 24 500 pés, que corresponde a aproximadamente uma altura de 7 450 m [Stac08].

Como o problema em estudo trata propagações até aos 600 m de altitude, altura máxima a que as aeronaves voam para realizar as missões SAR, é necessário ter em conta as características de propagação no espaço aéreo inferior.

A resolução de um problema semelhante já foi endereçada em dissertações anteriores, como na dissertação elaborada pela Cristina Dias, como tal bibliografia semelhante foi utilizada para a resolução do problema em estudo na presente dissertação [CDia17].

Na Figura 2.3 é apresentada a tipologia de cobertura para o espaço aéreo inferior, onde ocorre a propagação dos feixes hertzianos para as comunicações em estudo. No espaço aéreo inferior, tendo em conta os meios em que se dá a propagação, as limitações podem ser de vários tipos.

Considerando a propagação no meio terrestre que, apesar de não ser a mais preponderante neste sistema, se dá em redor das estações terrestres, é necessário ter em conta a tipologia do terreno, edifícios desordenados ou outras possíveis obstruções à linha de vista (LOS – *Line of Sight*) da ligação.

De seguida deve considerar-se também o facto de existirem reflexões no solo ou sobre a superfície do mar. Estas reflexões podem ser então construtivas e, por isso, não degradam o sinal, ou destrutivas e, por isso, o sinal sofre degradação. Esta degradação acontece devido às diferenças de fase que se

pode verificar entre o raio direto e o raio refletido. Nas comunicações aeronáuticas noutras gamas de frequências estes fenómenos podem ser usados a favor das comunicações. No entanto, no caso da gama VHF estes fenómenos podem gerar perdas, dificultando as comunicações, mesmo quando existe uma situação de LOS. Nestas situações deve ser tido em conta o Modelo de Dois Raios [Stac08].

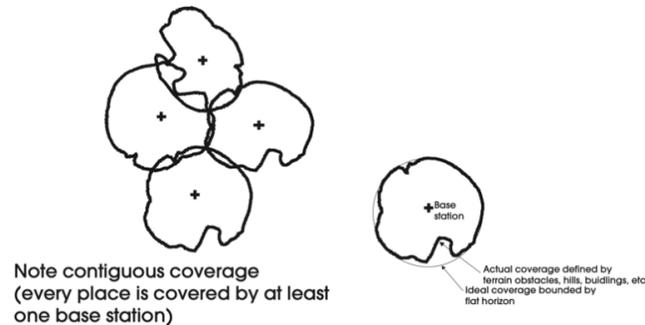


Figura 2.3. Tipologias de cobertura para espaço aéreo inferior (extraído de [Stac08]).

O modelo anteriormente referido considera o raio direto e o raio refletido, que partem de uma mesma antena transmissora para chegarem a uma mesma antena recetora. A Figura 2.4 apresenta a situação estudada pelo modelo [Stac08].

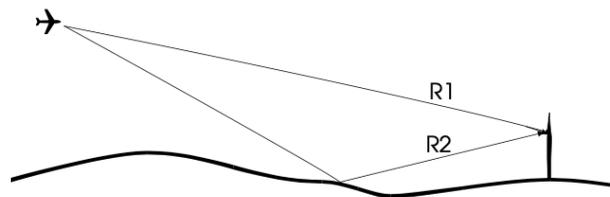


Figura 2.4. Modelo de propagação de dois raios (extraído de [Stac08]).

Este fenómeno é chamado de multi-percurso e é significativo em comunicações próximas da superfície da Terra, sobre o mar ou próximas de aeroportos, três situações que se verificam nas comunicações em estudo na presente dissertação [Stac08].

Outro aspeto que deve ser tido em consideração é a distância da ligação. Quando consideradas ligações a curtas distâncias, o efeito da curvatura da Terra pode ser desprezado e, por isso, é utilizado o modelo Terra Plana [Corr20], [CaFe20].

Caso não exista qualquer tipo de obstáculo entre o terminal e a aeronave considera-se que estes se encontram em LOS e, por isso, apenas existe um fator de atenuação, a atenuação em espaço livre.

Até aqui foi considerada a propagação nas proximidades das estações terrestres, na proximidade da TMA e na cobertura local do aeroporto. No entanto, as comunicações ocorrem, na grande maioria do tempo, quando a aeronave se encontra a voar sobre o mar. Como tal é necessário ter em conta as longas distâncias a que a aeronave se encontra da estação terrestre e, por isso, outros fenómenos de propagação devem ser considerados pois estes poderão levar a outros problemas nas ligações.

A primeira grande diferença prende-se com o facto de quando a aeronave se encontra a distâncias

consideráveis da antena transmissora, pois passa a ser necessário ter em consideração a curvatura da Terra [CaFe20].

O modelo que tem em conta a curvatura da Terra é o modelo Terra Esférica. Este modelo, ao invés de considerar a altura real das antenas transmissora e emissora, considera a altura equivalente, i.e., altura das antenas considerando uma aproximação equivalente em Terra Plana, tal como é exemplificado da Figura 2.5 [CaFe20].

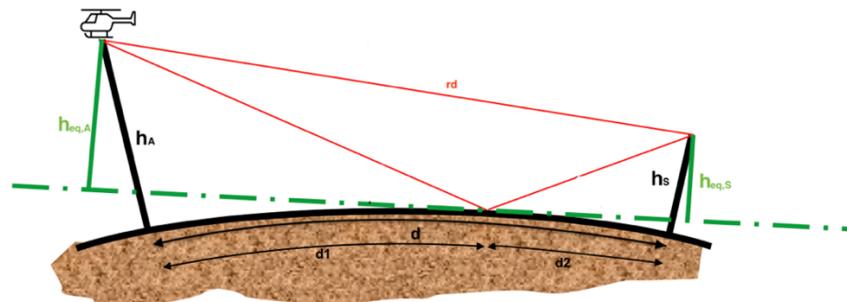


Figura 2.5. Modelo equivalente Terra Esférica (adaptado de [CaFe20]).

Nesta situação a curvatura da Terra também pode interferir com o alcance da ligação. A distância máxima considerada que possibilita manter a ligação, tendo em conta que se considera a propagação de raio direto entre a estação terrestre e a aeronave, é a distância de Rádio Horizonte. No entanto, cada antena tem a sua distância de Rádio Horizonte, como tal, a máxima distância a que a aeronave consegue estabelecer comunicações com a estação terrestre é a soma das duas distâncias de Rádio Horizonte [CaFe20].

Os únicos mecanismos de propagação além da distância de Rádio Horizonte quando consideradas frequências acima dos 30 MHz são a dispersão na superfície da Terra e a dispersão nas irregularidades atmosféricas. Quando considerados os mecanismos de dispersão na superfície da Terra pode-se considerar a reflexão, difração e refração [ChSi02].

Quando analisada a situação de reflexão, mesmo existindo LOS, por vezes dão-se perdas, o que se deve à diferença de amplitudes dos raios direto e refletido e à diferença de fase entre os dois raios, que pode criar uma interferência destrutiva, como já foi visto anteriormente [ChSi02].

Considerando o modelo Terra Esférica e as reflexões segundo este modelo, quando considerados ângulos de incidência pequenos, o coeficiente de reflexão é aproximadamente -1; nesta situação a intensidade de campo do raio direto e refletido são iguais, mas têm uma diferença de fase de aproximadamente 180°. Nas bandas UHF (*Ultra High Frequency*) e VHF, o índice de refração da água do mar é de cerca de -1, devido à superfície do mar ser um bom refletor para essas ondas de rádio. Assim, como a banda em estudo é a VHF, em algumas condições, os sinais detetados no recetor são a soma de diretos e refletidos [ITUR21].

A difração ocorre quando o percurso entre o emissor e o recetor é obstruído por uma superfície com irregularidades, gerando perdas [ChSi02].

A refração ocorre quando existe uma mudança do índice de refração, i.e., quando a onda eletromagnética atravessa meios diferentes. Em condições favoráveis extremas, o raio pode curvar mais do que é considerado comum e alcançar uma distância superior ao Rádio Horizonte, o que leva à criação de ductos [ChSi02]. A comunicação por ductos, apesar de, por vezes, permitir chegar até centenas de quilômetros, não é fiável, pois depende de fatores atmosféricos, que são variáveis no tempo. Os efeitos na transmissão VHF dependem maioritariamente da localização da antena recetora. Se esta se encontrar dentro de um ducto o sinal recebido será mais forte e a ligação poderá atingir uma distância além do horizonte [ChSi02], [ITUR07].

Até aqui foram consideradas apenas situações nas quais não se verificam obstáculos entre a aeronave e a estação terrestre. No entanto, caso existam obstruções à linha de vista, como edifícios ou irregularidades do terreno, dever-se-á estudar a obstrução do primeiro elipsóide de Fresnel [Stac08], [Corr20].

Considerando o caso de obstrução de LOS, referido anteriormente, os obstáculos causarão uma atenuação extra. Como tal, para analisar se o obstáculo causa atenuação ou não deve ser estudado o raio do primeiro elipsóide de Fresnel, pois é neste que se concentra a maioria da energia do raio transmitido [ARJA20]. Se o primeiro elipsóide de Fresnel se encontrar obstruído sabe-se que existe uma atenuação considerável; para saber o valor da atenuação causada pelo obstáculo é usado o modelo *Knife-Edge* [ARJA20]. No entanto, é necessário ter em conta que, para que este modelo possa ser aplicado é necessário que a dimensão do obstáculo seja superior à dimensão do comprimento de onda. Nesta dissertação, as frequências são na gama VHF, i.e., compreendidas entre 30 MHz a 300 MHz e, por isso, os comprimentos de onda variam entre 1 m e 10 m, sendo assim cumpridas as condicionantes do modelo a considerar, pois tanto edifícios como irregularidades no terreno têm dimensões superiores a 10 m. Quanto maior for a área do primeiro elipsóide de Fresnel obstruída, maior será a atenuação causada pelo obstáculo em causa [ARJA20], [Corr20], [CaFe20].

Pode acontecer que exista mais do que um obstáculo entre o emissor e o recetor, e nesse caso utiliza-se o método de *Deygout* [ARJA20]. Neste método primeiro calculam-se os parâmetros de atenuação de obstáculos para todos os obstáculos existentes entre o emissor e o recetor. Posteriormente comparam-se os valores de atenuação individual e aquele que apresentar valor mais alto é considerado o obstáculo principal. O segundo passo é calcular a atenuação causada pelo obstáculo principal. De seguida divide-se a ligação em duas, entre o transmissor e o obstáculo principal e entre o obstáculo principal e o recetor. Se existir mais do que um obstáculo nesta segunda ligação, repete-se o procedimento indicado anteriormente até que todos os obstáculos tenham sido considerados. A atenuação total causada pelos obstáculos é a soma de todas as atenuações calculadas anteriormente [CGCF01].

2.3 Antenas

As antenas das estações terrestres devem, por princípio, ter um diagrama de radiação omnidirecional no plano azimutal, sendo comumente considerados dipolos simples. No entanto, por vezes, é necessário atingir maiores valores de ganho, como tal poderá ser necessário considerar agregados de antenas, que podem ser omnidirecionais ou setoriais [Corr20], [MaSi20].

Para o estudo do sistema será necessário considerar o valor do ganho generalizado das antenas, que depende da posição dos terminais um em relação ao outro, como tal, será uma função de dois ângulos distintos, como representado na Figura 2.6. Na figura encontram-se representados os ângulos tanto para o caso da aeronave como para o da estação terrestre.

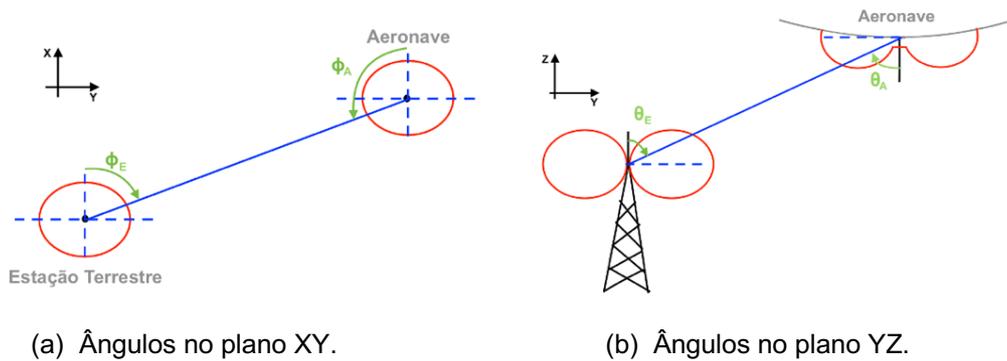


Figura 2.6. Representação dos diagramas dos terminais para percepção dos ângulos.

A expressão que descreve o ganho generalizado nos planos horizontal e vertical vai depender do campo elétrico radiado por um dipolo genérico [Corr20]:

$$\mathbf{E}(r_d, \theta) = j \frac{Z_0 I_m e^{-jk_{no} r_d} \cos[k_{no} l \cos(\theta)] - \cos(k_{no} l)}{2\pi r_d \sin(\theta)} \mathbf{u}_\theta \quad (2.1)$$

$$k_{no}[\text{rad/m}] = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2)$$

onde:

- Z_0 : impedância;
- I_m : valor máximo de corrente;
- l : comprimento de meio dipolo;
- k_{no} : número de onda;
- λ : comprimento de onda.

No caso em estudo são considerados dipolos simples e agregados de dipolos, sendo o campo total radiado por um agregado dado por [Corr20]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_a F_{aa} \quad (2.3)$$

onde:

- E_a : campo radiado por um único elemento, dado por (2.1);
- F_{aa} : fator de agregado uniforme, dado por [Corr20]:

$$F_{aa} = e^{j(N_a-1)\frac{\gamma}{2}} \frac{\sin(N_a\gamma/2)}{\sin(\gamma/2)} \quad (2.4)$$

onde:

- N_a : número de elementos do agregado;
- γ : diferença de fase entre os sinais radiados pelas antenas para agregados verticais, dado por:

$$\gamma = k_{no} d_a \cos(\theta) + \delta \quad (2.5)$$

onde:

- d_a : distância entre o ponto central dos elementos do agregado;
- δ : diferença de fase entre duas antenas sucessivas do agregado.

O valor máximo da expressão do fator de agregado é igual ao número de elementos que compõem o agregado, sendo a expressão normalizada do fator de agregado dada por [Bala16]:

$$F_{aa}^{norm} = \frac{1}{N_a} \frac{\sin(N_a\gamma/2)}{\sin(\gamma/2)} \quad (2.6)$$

2.4 Qualidade de Serviço para Voz

Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) é definida como um conjunto de requisitos que devem ser fornecidos aos diferentes utilizadores de um sistema de telecomunicações por forma a que o serviço atinja o desempenho exigido pelo mesmo aquando da realização do contrato [FCTM20].

Quando considerados sistemas de comunicações aeronáuticas, tem de se ter em conta fatores como a segurança, tanto dos pilotos como dos tripulantes da aeronave e das pessoas que estão a ser sujeitas à missão SAR, considerando tipos de sistemas de comunicações como o analisado na presente dissertação.

Assim, neste tipo de comunicações é necessário que o sistema de comunicação por voz bidirecional tenha um atraso que não seja significativo e que tenha grande disponibilidade, por forma a não colocar vidas em risco [EUOS09].

A QoS de um determinado serviço pode ser degradada devido a vários fatores, como um grande volume de tráfego ou atrasos na receção do sinal, devido ao baixo desempenho dos equipamentos, à comunicação ser realizada entre dois pontos com distâncias significativas, ao facto do sistema ter largura de banda disponível limitada ou a uma gestão deficiente da banda atribuída a cada canal [FCTM20].

No que concerne ao volume de tráfego, este é um fator que não é tido em conta quando considerada

a degradação da QoS no sistema em estudo. Tal deve-se ao facto de, na maioria das vezes, existir apenas uma aeronave a realizar a missão SAR, pelo que o sistema se encontra totalmente disponível para realizar as comunicações com a aeronave em operação.

O conceito de QoS é associado à percepção que o utilizador tem sobre o serviço, pelo que os parâmetros de análise usados para a sua avaliação não utilizam uma linguagem técnica, considerando-se assim que esta é uma análise qualitativa do serviço. No entanto existe a sua correspondência para os termos técnicos, usados assim para medir a QoS com parâmetros quantitativos [ASLM17].

Outro conceito utilizado para se proceder à análise da QoS no que diz respeito aos serviços de voz é a *Mean Opinion Score* (MOS). Esta avaliação é realizada pelo utilizador do serviço e fornece uma estimativa da QoS que é percebida pelos utilizadores, desta forma é possível considerar os parâmetros estáticos e dinâmicos do serviço e detetar a degradação da forma mais célere possível. A MOS é um indicador quantitativo que varia entre 0 e 5, em que o utilizador realiza a avaliação do serviço conforme a satisfação sobre o mesmo [BRER10].

Quando considerados os parâmetros avaliados do ponto de vista do sistema e do equipamento, é necessário considerar os diversos tipos de sistemas. Por exemplo, o sistema em estudo é um sistema sem fios, no entanto também existem sistemas de comunicações que fazem uso dos protocolos de *internet* e, por isso, existem diferentes parâmetros para a avaliação de QoS para os diferentes sistemas [ASLM17].

Como foi referido anteriormente, diferentes tipologias de sistemas utilizam diferentes parâmetros que quantificam a QoS, e.g., o atraso e a disponibilidade [ASLM17].

Os fatores que afetam de forma significativa a QoS em sistemas como o que se encontra em estudo são a relação sinal-ruído (SNR) na antena recetora e o tipo de antenas utilizado no sistema. No que concerne ao SNR, esta pode ser otimizado escolhendo de forma adequada a modulação utilizada ou o tipo de codificação, por exemplo. Outro fator, relacionado com a SNR é a relação sinal – ruído+interferência (SINR), que deve ser o considerado neste tipo de serviços pois tem em conta a interferência a que as ligações podem estar sujeitas [ASLM17].

No que diz respeito às antenas utilizadas, as antenas direcionais apresentam vantagens relativamente às antenas omnidirecionais para determinados tipos de sistemas. Esta vantagem deve-se ao facto das antenas direcionais aumentarem não só a capacidade do sistema, como também reduzem os atrasos devido a retransmissões por várias estações emisoras. Outra vantagem é o facto de reduzirem a interferência o que leva ao aumento da QoS [DaiH09].

2.5 Estado da Arte

O tema em estudo na presente dissertação prende-se com a melhoria da área de cobertura do sistema de comunicações VHF para ajudar nas operações SAR a realizar na FIR que se encontra na

responsabilidade do CZAA. Os estudos anteriores relevam-se antigos e, por isso, existem algumas semelhanças relativamente a dissertações anteriores sobre o mesmo tema. Como tal, a bibliografia consultada em alguns dos pontos apresentados assemelha-se à bibliografia consultada para a realização da dissertação da Cristina Dias, como referido anteriormente.

Com o aumento do tráfego aéreo em áreas oceânicas a necessidade de comunicar em distâncias para além da distância de rádio horizonte tornou-se um problema a resolver, e os sistemas VHF tornaram-se uma hipótese para ultrapassar este problema. Tal deve-se ao facto de os sinais terem a capacidade de se propagar de variadas formas, como por exemplo, por refração atmosférica ou a difração. No entanto, todos os tipos de propagação deste tipo de sinais vão levar a elevados níveis de atenuação que podem ser ultrapassados se forem considerados sistemas como amplificadores de alta potência nos transmissores, pré-amplificadores de baixo ruído nos recetores ou antenas de alto ganho [BoCh02]. No problema em estudo na presente dissertação serão analisadas antenas omnidirecional e setoriais devido à tipologia de comunicação em estudo.

Foram implementados cerca de 20 sistemas VHF para-além-do-horizonte pela *Park Air Systems* em locais na Gronelândia, Islândia e China. Atualmente a empresa opta por propor soluções melhoradas deste sistema, apresentadas em [PASi21]. Os sistemas em análise foram construídos e testados no Reino Unido e posteriormente transportados e instalados nos locais onde ficaram a operar [MarG04].

O sistema implementado na China superou as expectativas, na medida em que fornece comunicações de tráfego aéreo de longo alcance ao longo do Mar da China Meridional, resultado de um acordo entre o Vietname e a China para que fosse considerada uma área de responsabilidade conjunta, encontrando-se instalado em Sanya, uma cidade costeira do sul [MarG04]. Neste sistema o transmissor encontra-se conectado a um par de antenas direcionais alinhadas por forma a projetar um feixe na direção necessária. Cada antena é composta por uma matriz Yagi de seis elementos do tipo dipolo, cada dipolo montado num suporte horizontal onde, posteriormente, se encontram montados numa torre com nível de potência de 750 W. A largura de feixe de meia-potência horizontal resultante é de 90° e a vertical é de 60° [MarG04].

O tipo de antenas utilizado influencia o desempenho das ligações, sendo também necessário fazer o estudo das antenas que poderão vir a ser usadas no sistema. Outro aspeto a considerar é o facto das mesmas necessitarem de manutenção e, como tal, será necessário ter em conta as características das mesmas na sua escolha visto que estas poderão encontrar-se em locais de difícil acesso. No sistema em estudo são considerados dois tipos de antenas a analisar, as omnidirecionais e as sectoriais. Anteriormente foi dado um exemplo de sucesso na aplicação de antenas sectoriais nas comunicações VHF aeronáuticas. A aplicação de antenas sectoriais leva a um aumento da diretividade, que se revela importante na medida em que o ganho e a diretividade são diretamente proporcionais, permitindo assim que seja possível aumentar o alcance de cobertura do setor.

Outro caso de sucesso no que diz respeito ao aumento da área de cobertura do sistema VHF é o aumento de cobertura do espaço aéreo indiano sobre o oceano, apresentado no relatório da ICAO. A cobertura do centro de controlo aéreo do aeroporto de Mumbai e Trivadrur foi otimizada com a instalação de um Sistema de Comunicações de Controlo Remoto Ar-Terra (*Remote Controlled Air to*

Ground Communication - RCAG) na ilha de Agatti. Para permitir melhorias adicionais às já implementadas, a Autoridade de Aeroportos da Índia (AAI) instalou um transmissor VHF de alta potência com uma antena direcional em Chennai e Porto Blair e um transmissor de alta potência em Calcutá e Visakhapatnam [ICAO04]. Como é possível notar na Figura 2.7, a estação RCAG de Porto Blair tem uma cobertura mais abrangente, devido à instalação das antenas diretivas [AAIn20].

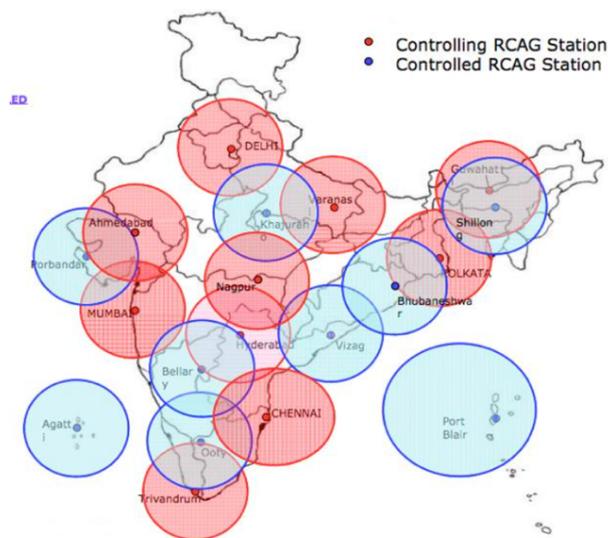


Figura 2.7. Estações RCAG na Índia (extraído de [AAIn20]).

Existem outros sistemas que poderão ser utilizados para a realização do tipo de comunicações em estudo na presente dissertação. Assim, podem ser consideradas outras alternativas como comunicações por onda curta (*HF-High Frequency*) ou ainda comunicações via satélite (*SATCOM*). Quando analisadas as duas alternativas percebe-se que para o problema em estudo poderão ser soluções pouco viáveis. No que diz respeito às comunicações por onda curta, esta é uma solução que utiliza as reflexões ao longo do percurso para conseguir atingir maiores distâncias. Assim, ao depender das condições atmosféricas torna uma solução pouco fiável. Quando consideradas as *SATCOM*, estas comunicações têm a vantagem de poderem ser efetuadas em qualquer ponto a que a aeronave se encontre, sendo um aspeto vantajoso. Contudo, este sistema tem algumas desvantagens como envolver custos elevados e ainda as posições que a aeronave adota em voo podem levar a perder a ligação, inviabilizando a comunicação [RaGr18], [JaTr16].

Capítulo 3

Desenvolvimento e Implementação do Modelo

Neste capítulo é apresentada inicialmente a proposta e descrição do modelo a implementar. Posteriormente é feita a sua implementação e avaliação. Deste modo pretende-se avaliar teoricamente a extensão de cobertura do sistema de comunicação a implementar nos Açores.

3.1 Visão genérica do modelo a implementar

Atualmente não se encontra instalado nenhum sistema de comunicações de apoio à missão SAR nos Açores. No entanto, este sistema revela-se importante na medida em que é realizado um grande número de missões de apoio à população neste arquipélago. Assim, pretende-se projetar o sistema de comunicações aeronáuticas VHF-AM considerando um mínimo de cobertura que deverá ser garantido, mas tendo em vista a maior área de cobertura que será possível atingir. Para responder a esta necessidade serão analisadas as estações terrestres que já se encontram disponíveis. Contudo, poderá ser realizado o estudo de outras possíveis localizações para as mesmas. Também serão estudados diversos tipos de antenas, com o objetivo de compreender qual será o tipo mais vantajoso a implementar no sistema em análise. A Figura 3.1 apresenta o esboço do modelo a desenvolver.

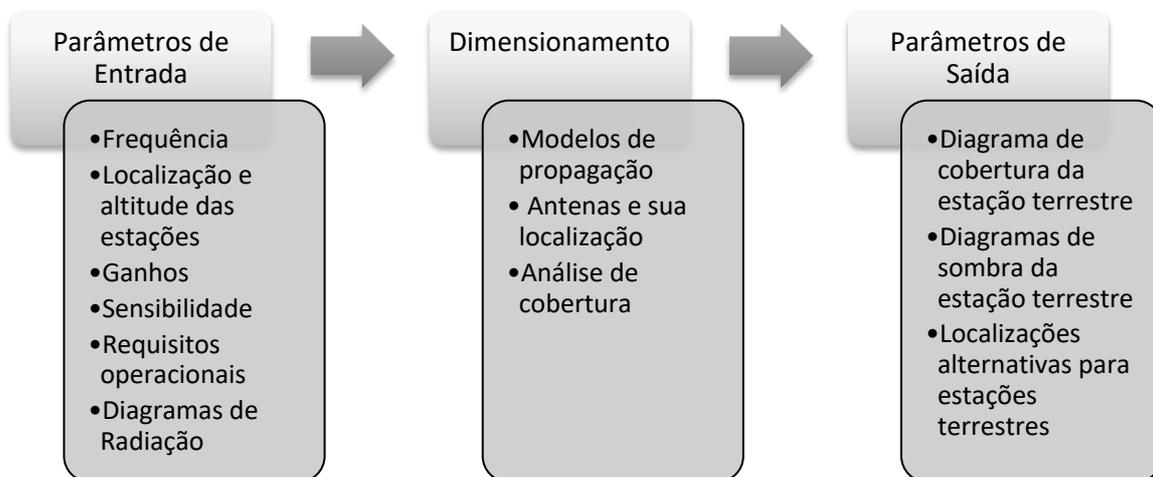


Figura 3.1. Visão geral do modelo a implementar.

No que concerne aos parâmetros de entrada deve considerar-se:

- **Frequência:** Frequência da ligação, que no sistema em análise é a frequência nominal de 139.3 MHz; este parâmetro tem impacto nas perdas.
- **Localizações das antenas das estações terrestres:** Para primeira análise devem ser consideradas as estações terrestres já existentes e apenas numa análise posterior fazer o estudo de outras possíveis localizações que se revelem mais vantajosas.
- **Altura das antenas das estações terrestres:** Para fazer a análise da área de cobertura é necessário saber a altura a que as antenas se encontram.
- **Antena utilizada nas estações terrestres e respetivo diagrama de radiação:** Para fazer a análise de cobertura é necessário saber o diagrama de radiação associado à antena. Como os diagramas de radiação são diferentes conforme as antenas utilizadas, para saber o diagrama é necessário fazer o estudo do tipo de antena mais vantajoso a instalar.
- **Antena utilizada na aeronave e respetivo diagrama de radiação:** Tendo em conta que se estão a considerar duas aeronaves distintas, considerar-se-á o pior caso entre as duas, i.e., a que possuir parâmetros menos favoráveis para o estudo em causa.

- **Sensibilidade do recetor:** Para os níveis de sensibilidade dever-se-á considerar o pior caso. Este valor é importante na medida em que informa sobre a potência mínima que a antena deverá receber para que se consiga estabelecer a ligação entre emissor e recetor.
- **Ganhos:** É necessário saber os ganhos das antenas emissoras e recetoras.
- **Potência de emissão:** É necessário saber a potência de emissão. Será usado o valor mais baixo de entre os sistemas considerados.
- **Requisitos operacionais:**
 - **Altitude mínima de cobertura:** O sistema deve garantir cobertura até um mínimo de 2 000 pés, o equivalente a 600 m de altitude.
 - **Raio de cobertura mínimo que o sistema deve alcançar:** O sistema deve garantir um raio de cobertura de, no mínimo, 110 nm, o equivalente a 200 km.
 - **Amplitude do sinal recebido:** A amplitude do sinal recebido deve ser, no mínimo de 4 μ V.

Em relação aos principais parâmetros de saída consideram-se:

- **Diagrama de cobertura das estações terrestres:** Será necessário perceber se foi possível atingir os requisitos de cobertura, como tal será necessário ter acesso ao diagrama de cobertura das estações terrestres.
- **Diagrama de sombra das estações terrestres:** Será necessário perceber se dentro da área coberta pelo sistema existem algumas zonas de sombra devido à presença de obstáculos.
- **Localizações alternativas para as antenas:** Já existem localizações pré-definidas para as antenas das estações terrestres. No entanto, estas localizações podem não ser aquelas que conseguem otimizar os diagramas de cobertura. Como tal, serão estudadas ainda outras possíveis localizações para as antenas das estações terrestres por forma a ser possível atingir uma maior área de cobertura.

3.2 Cenários de Aplicação

No problema em estudo são consideradas duas aeronaves diferentes e, por isso, estas têm diferentes propósitos na realização das missões SAR. A aeronave de asa fixa, C-295M, presta apoio à realização da missão SAR através do lançamento para o mar de uma balsa salva-vidas, enquanto a aeronave de asa rotativa, EH-101 Merlin, tem a capacidade de realizar recolha de pessoas [AIPe16].

A aeronave de asa fixa tem um raio de alcance máximo de 1 420 km. Esta aeronave, por ter um maior alcance possibilita a deteção e auxílio dos alvos sujeitos a busca e salvamento que se encontrem a maiores distâncias [AIPe16].

A aeronave de asa rotativa permite fazer a realização dos salvamentos por conseguir ficar imóvel e relativamente estável sobre o alvo sujeito à missão SAR. No entanto esta tem um raio de ação de 740 km [AIPe16].

Para a realização destas missões as aeronaves podem encontrar-se a diversas altitudes. Para isso

dever-se-á considerar diversos cenários, em que cada um deles pode ser caracterizado por uma ou mais altitudes tomadas pelas aeronaves.

Considerando a aeronave C-295M, sabe-se que, nesta tipologia de missão, a aeronave deverá voar a uma altitude máxima de 600 m. No entanto, existe um intervalo de altitudes que se considera comum para a realização dos voos para o auxílio desta missão. Assim devem ser considerados os dois percursos, pois estes utilizam intervalos de altitudes diferentes. Na Tabela 3.1 são apresentados os intervalos de altitudes mais comuns utilizados pela aeronave C-295M durante os seus percursos na realização desta tipologia de missão. Para os efeitos do estudo também será considerada a altitude de 600 m, o requisito mínimo de altitude [EMFA20e].

As altitudes apresentadas encontram-se divididas nos dois segmentos do percurso. Esta divisão deve-se ao facto de no processo de encontrar o alvo existir a necessidade da realização de um voo de baixa altitude, para que assim seja possível efetuar a sua deteção. No percurso de regresso, já não existe a necessidade da aeronave voar a altitudes tão baixas. Devido a motivos operacionais existe a subida do nível de voo, que é condicionada pela meteorologia. Assim, não é possível fixar valores para as altitudes de voo, mas sim usar valores considerados típicos.

Tabela 3.1. Altitudes de voo para missão SAR - aeronave C-295M (extraído de [EMFA20e]).

Trajeto de ida		Trajeto de regresso	
Altitude [ft]	Altitude [m]	Altitude [ft]	Altitude [m]
800-1000	245-305	1 500-2000	460-600

Quanto à aeronave EH-101 Merlin, esta missão exige que a aeronave se mantenha durante certos períodos de tempo a altitudes baixas, para que seja possível realizar a recuperação do(s) indivíduo(s). Esta altitude encontra-se dentro de um intervalo de valores por depender não só da meteorologia, como também das condições do mar. No entanto, durante o seu trajeto não é necessário voar a altitudes tão baixas, como tal na Tabela 3.2 encontram-se as altitudes mais comuns de voo da aeronave EH-101 Merlin para as diferentes situações.

Tabela 3.2. Altitudes de voo para missão SAR - aeronave EH-101 Merlin (extraído de [EMFA20e]).

Trajeto de ida e de regresso		Voo estacionário de recuperação	
Altitude [ft]	Altitude [m]	Altitude [ft]	Altitude [m]
1800-2000	550-600	60-100	18-30

Na Figura 3.2 encontra-se um esquema simplificado do perfil das trajetórias de voo das aeronaves C-295M e EH-101 Merlin.

Sabendo as altitudes mais comuns de operação das aeronaves é necessário ter em conta as altitudes das estações terrestres. Assim, a Tabela 3.3 apresenta as altitudes a que se encontram as antenas

das estações terrestres em relação ao nível do mar, bem como os restantes requisitos de operação.

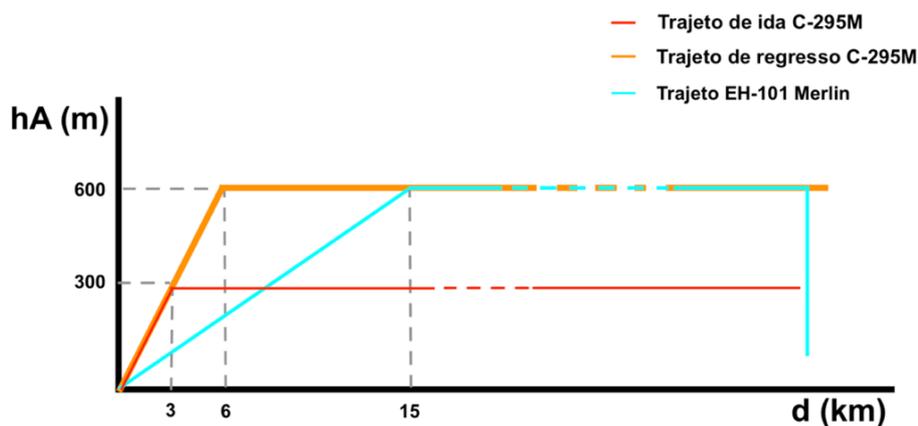


Figura 3.2. Perfil das trajetórias de voo das aeronaves C-295M e EH-101 Merlin.

Como é possível notar na Tabela 3.3, um dos requisitos de operação que, possivelmente, trará mais complicações é o raio de cobertura. Isto deve-se ao facto de se pretender um raio de cobertura a partir de cada estação terrestre de 200 km e, caso as estações se encontrem próximas, tal trará problemas de interferência. Como tal, foram analisadas as distâncias entre as estações terrestres e estas encontram-se apresentadas na Tabela 3.4 e representadas na Figura 3.3.

Tabela 3.3. Resumo dos requisitos do sistema de comunicações.

Frequência de Ligação [MHz]	139.3	
Altitude mínima de cobertura [m]	20	
Altitude máxima de cobertura [m]	600	
Raio mínimo de cobertura [km]	200	
Altitude das antenas das estações terrestres [m]	Flores	999
	Faial	1 128
	Terceira	1 035
	São Miguel	992
	Santa Maria	581

Outro aspeto a ter em conta para a otimização da cobertura do sistema de comunicações são os alcances de ambas as aeronaves. Na Figura 3.4 é apresentada a ilustração do alcance máximo de ambas as aeronaves para a tipologia de missão a considerar na presente dissertação.

Tabela 3.4. Distância entre estações terrestres.

Distância [km]	Cabeço Gordo	Santa Bárbara	Barrosa	Pico Alto
Morro Alto	238	346	522	608
Cabeço Gordo		122	295	365
Santa Bárbara			172	276
Barrosa				93

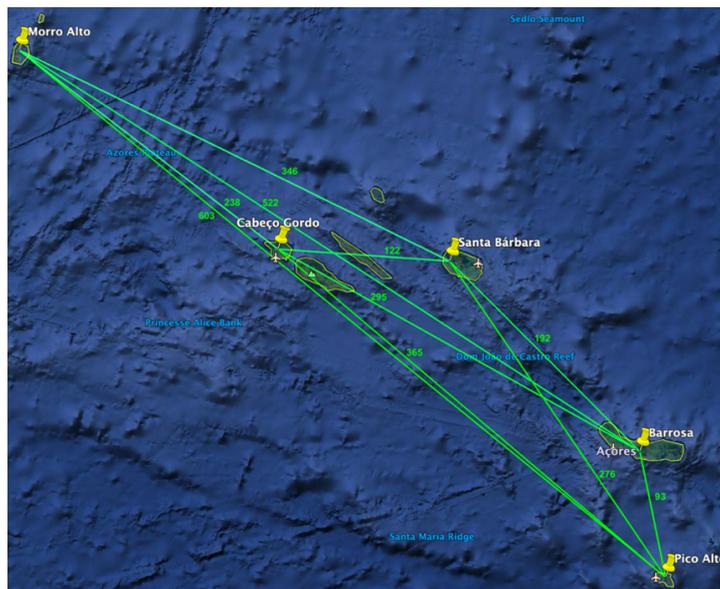


Figura 3.3 Distâncias entre estações terrestres (adaptado de [GoEP21]).

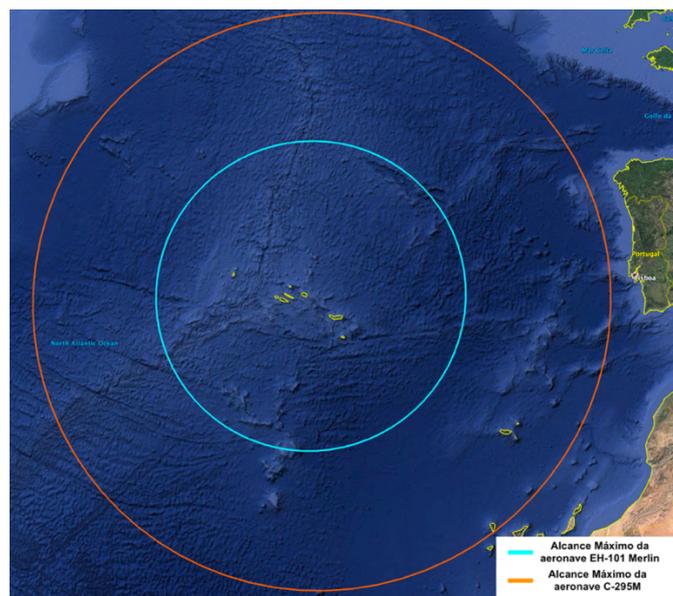


Figura 3.4. Alcance máximo das aeronaves ao realizar missões do tipo SAR (trajeto ida e volta) (adaptado de [GoEP21]).

3.3 Modelos de Propagação

Para o desenvolvimento do modelo para a resolução do problema em estudo é necessário ter em conta as formulações matemáticas dos modelos de propagação a considerar.

3.3.1 Potência Recebida

Quando considerados os modelos de propagação, é necessário ter atenção às condições de chegada do sinal à estação recetora. Como tal, para saber se o sistema de comunicações cumpre os requisitos é necessário calcular a potência recebida pela estação recetora, obtida por [Corr20]:

$$P_{r[\text{dBm}]} = P_{t[\text{dBm}]} + G_{t[\text{dBi}]} + G_{r[\text{dBi}]} - L_p[\text{dB}] \quad (3.1)$$

onde:

- P_t : potência de emissão;
- G_t : ganho da antena emissora;
- G_r : ganho da antena recetora;
- L_p : perdas de caminho.

Na Tabela 3.5 são apresentados os requisitos de operação a considerar, a partir dos quais se chega ao valor mínimo da potência de receção apresentado. A partir do mesmo será possível proceder à avaliação da cobertura do sistema e proceder aos ajustes necessários durante o desenvolvimento do modelo.

Tabela 3.5. Requisitos de operação considerando as características do sistema.

Antena	$G_{r[\text{dBi}]}$	$f_{[\text{MHz}]}$	$P_{r\text{min}[\text{dBm}]}$	$P_{t[\text{dBm}]}$
Aeronave EH-101	-3	139.3	-95	43
Aeronave C-295M				
Estação Terrestre	4.65			

Quando consideradas várias estações terrestres onde se pretendem alcances superiores a algumas das distâncias entre estações poder-se-ia verificar situações de interferência. No entanto, no sistema em estudo tal não se verifica, devido ao facto dos terminais possuírem um sistema que garante a não existência de interferência em consequência de as diferentes frequências de *offset* associadas a cada estação terrestre estarem todas espaçadas de 5 kHz entre si.

3.3.2 Propagação Espaço Livre

Seguindo a linha condutora utilizada previamente dever-se-á começar pela análise das equações que

definem a situação mais simples de propagação, i.e., uma situação em que a aeronave se encontra em LOS com a antena da estação terrestre.

Este modelo é aplicável em situações em que a aeronave se encontre nas proximidades da estação terrestre, nas proximidades do aeroporto ou do TMA. No presente modelo deve ter como critério de aplicação o facto do elipsoide de Fresnel se encontrar totalmente desimpedido.

Como tal, para as ligações que se encontrem em LOS, o único fator de atenuação existente é a atenuação em espaço livre, que pode ser calculado por [Corr20]:

$$L_{0[\text{dB}]} = 32.44 + 20 \log_{10}(d_{[\text{km}]}) + 20 \log_{10}(f_{[\text{MHz}]}) \quad (3.2)$$

onde:

- d : distância entre terminais;
- f : frequência da ligação.

Para o estudo da distância máxima de aplicação do modelo foram consideradas as várias altitudes comuns de voo das duas aeronaves, bem como as diferentes altitudes das estações terrestres.

As distâncias máximas de aplicação do modelo de propagação Espaço Livre, em função das altitudes dos dois terminais, foram determinadas com o auxílio do *software* FEIXER [DRRG04].

A partir deste *software* será avaliado se o elipsóide de Fresnel se encontra, de alguma maneira, obstruído, sabendo-se que, para ser possível aplicar o modelo, o primeiro elipsóide deverá encontrar-se totalmente desobstruído. Para isso é calculado o raio do elipsóide ao longo da totalidade do percurso e é avaliado se este entra em contacto com a superfície da Terra; se o fizer significa que não poderá ser utilizado o presente modelo, caso contrário, pode ser aplicado. Na Figura 3.5 é apresentada a situação em que é possível aplicar o modelo de propagação espaço livre, visto que não existe obstrução do primeiro elipsóide.

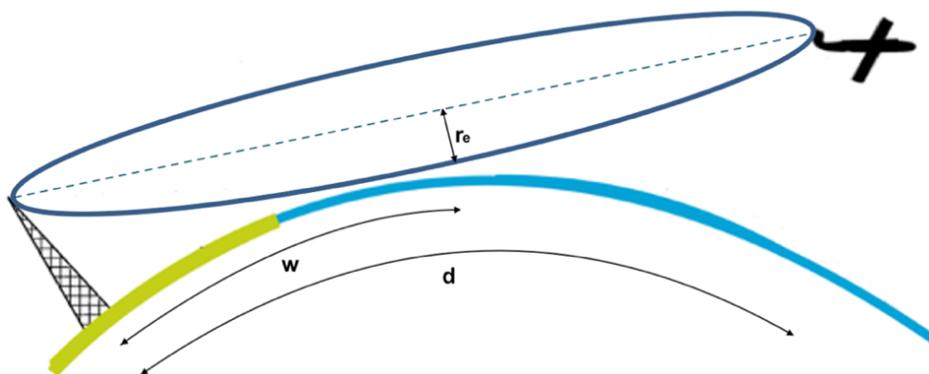


Figura 3.5. Situação geométrica favorável à aplicação do modelo de propagação Espaço Livre.

Para o cálculo do raio do elipsóide ao longo do percurso que a ligação percorre utiliza-se a expressão [ARJA20]:

$$r_{e[m]} = \sqrt{\frac{w_{[m]}(d_{[m]} - w_{[m]})}{d_{[m]}} \lambda_{[m]}} \quad (3.3)$$

onde:

- r_e : raio do primeiro elipsóide de Fresnel à distância w do primeiro terminal;
- w : distância do primeiro terminal até ao ponto em que é calculado o raio do elipsóide.

Sabendo o centro do elipsóide, bem como o perfil do terreno ao longo da ligação e ainda o raio do elipsóide é possível saber se este se encontra totalmente desobstruído, a distância máxima com o elipsóide desobstruído sendo a distância máxima de aplicação do modelo.

Logo, para o cálculo da distância de aplicação do modelo usa-se a expressão deduzida:

$$d_{MEL[m]} = \frac{w_{[m]}^2 \lambda_{[m]}}{r_e^2_{[m]} - w_{[m]} \lambda_{[m]}} \quad (3.4)$$

O processo de avaliação da possibilidade da utilização do presente modelo, como foi referido anteriormente, foi realizado com o auxílio do *software* FEIXER, devido à complexidade dos cálculos a realizar. Este processo deu-se de forma iterativa, i.e., foram realizados diversos testes para diversas distâncias de ligação, procedendo-se à avaliação do raio do elipsóide ao longo do percurso e percebendo-se se este se encontrava em contacto com a superfície da Terra. Neste processo foi estudado o melhor caso, i.e., o caso em que não existe qualquer tipo de obstáculo entre os dois terminais. As distâncias máximas de aplicação do modelo, obtidas a partir do *software* FEIXER, para o melhor caso encontram-se representadas na Figura 3.6. Como é possível ver, o presente modelo tem aplicabilidade para todos os casos em estudo, pelo que este modelo é utilizado até à distância a partir da qual deve ser utilizado o modelo seguinte, sempre que não exista nenhum obstáculo a obstruir a ligação.

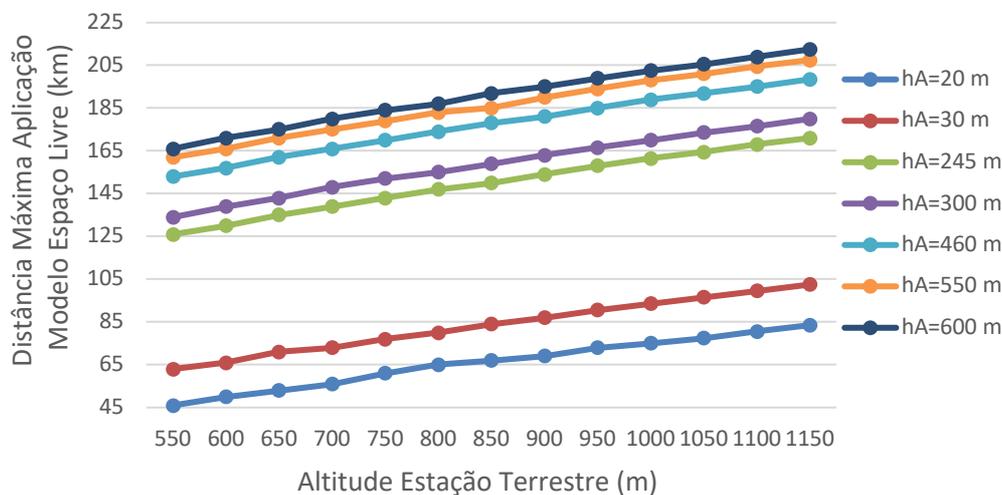


Figura 3.6. Distância máxima de aplicabilidade do modelo de propagação Espaço Livre.

3.3.3 Modelo Terra Plana

O modelo em análise considera a Terra como uma superfície plana quando as comunicações são efetuadas em distâncias consideradas curtas, na ordem das dezenas de quilómetros [Corr20].

Como tal, este modelo é utilizado quando a aeronave se encontra em LOS, embora já considerando possíveis casos de reflexões. No modelo Terra Plana a atenuação é dada por [Corr20]:

$$L_{p[\text{dB}]} = 90 - 20 \log_{10}(h_{ET[\text{m}]}) - 20 \log_{10}(h_{A[\text{m}]}) + 40 \log_{10}(d_{[\text{km}]}) \quad (3.5)$$

onde:

- h_{ET} : altitude da estação terrestre;
- h_A : altitude da aeronave.

Para perceber a possibilidade de aplicação deste modelo devem considerar-se as distâncias mínimas e máximas da sua aplicação. Considerando as altitudes das estações terrestres e as possíveis altitudes das aeronaves, a distância mínima de aplicabilidade é dada por [Corr20]:

$$d_{min-TP[\text{km}]} = \frac{10 h_{ET[\text{km}]} h_{A[\text{km}]}}{\lambda_{[\text{km}]}} \quad (3.6)$$

onde:

- d_{min-TP} : distância mínima de aplicabilidade do Modelo Terra Plana.

Na Figura 3.7 encontra-se representada a evolução das distâncias mínimas em função das altitudes dos terminais.

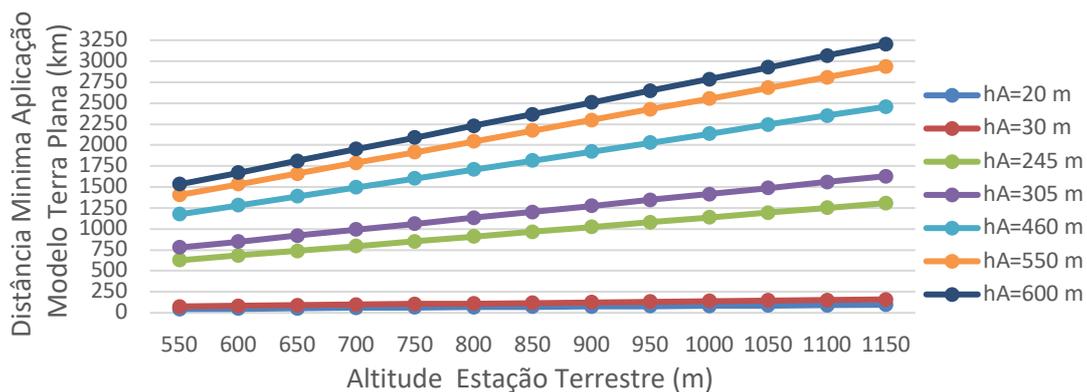


Figura 3.7. Distância mínima de aplicabilidade do modelo Terra Plana.

A distância máxima é dada por [Corr20]:

$$d_{max-TP[\text{km}]} = \sqrt{\frac{2 R_e[\text{km}](h_{ET[\text{km}]} + h_{A[\text{km}]})^3}{40 h_{ET[\text{km}]} h_{A[\text{km}]} + (h_{ET[\text{km}]}^2 + h_{A[\text{km}]}^2)}} \quad (3.7)$$

onde:

- d_{max-TP} : distância máxima de aplicabilidade do modelo Terra Plana;
- R_e : raio efetivo da Terra (8 500 km).

Na Figura 3.8 encontra-se resumida a informação sobre a distância máxima de aplicação tendo em conta as altitudes que ambos os terminais podem tomar.

Quando comparados os gráficos obtidos para os cálculos das distâncias máximas e mínimas de aplicabilidade do modelo, conclui-se que este modelo apenas é aplicável para uma das altitudes de voo, 20 m. Tal, deve-se ao facto de nos restantes casos a distância mínima de aplicabilidade ser superior à distância máxima. Como tal, exclui-se a aplicação do modelo de propagação Terra Plana do

modelo a desenvolver para a resolução do problema em estudo.

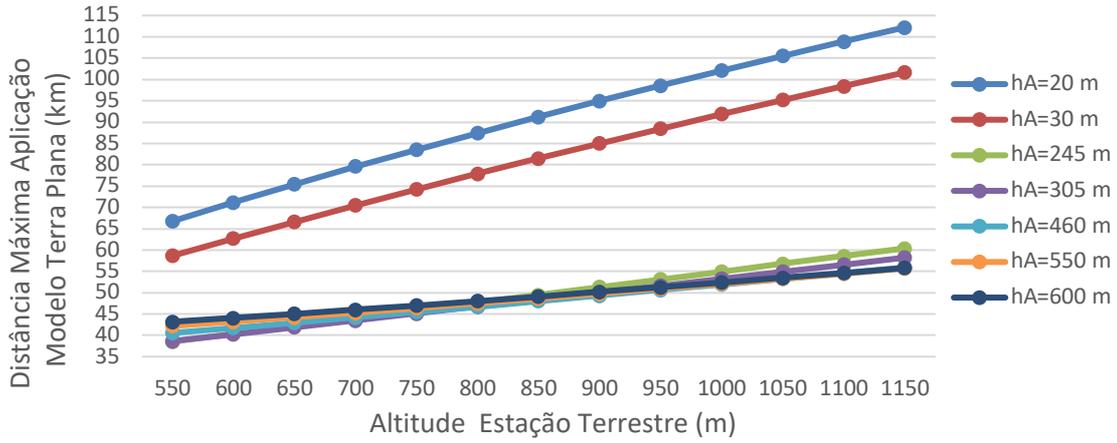


Figura 3.8. Distância máxima de aplicação do modelo Terra Plana.

3.3.4 Modelo Terra Esférica

Como se concluiu anteriormente, o modelo Terra Plana não é adequado para o estudo a realizar, sendo necessário avaliar a possibilidade de aplicação do modelo Terra Esférica, que usa uma equivalência em Terra Plana, como pode ser observado na Figura 2.5.

A perda total ao longo do percurso para o modelo Terra Esférica, considerando que não prevalecem as perdas por difração, é dada pela expressão [CaFe20]:

$$L_{p[\text{dB}]} = 32,44 + 20 \log_{10}(f_{[\text{MHz}]}) + 20 \log_{10}(d_{[\text{km}]}) - 20 \log_{10} \left(\left| 1 + |\Gamma| D e^{-j(k_0 \frac{h_{eq,A}[\text{m}]}{d_{[\text{m}]} h_{eq,ET}[\text{m}]} - \arg\{\Gamma\})} \right| \right) \quad (3.8)$$

onde:

- k_0 : número de onda (valor estático do momento de dipolo elétrico associado a um par de cargas);
- $h_{eq,A}$: altura equivalente em Terra Esférica da antena da aeronave, dado por:

$$h_{eq,A[\text{km}]} = h_{A[\text{km}]} - \frac{d_1^2[\text{km}]}{2 R[\text{km}]} \quad (3.9)$$

onde:

- d_1 : distância entre a aeronave e o ponto de reflexão.
- R : raio da Terra (~6400 km);
- $h_{eq,ET}$: altura equivalente em Terra Esférica da antena da estação terrestre, dado por:

$$h_{eq,ET[\text{km}]} = h_{ET[\text{km}]} - \frac{d_2^2[\text{km}]}{2 R[\text{km}]} \quad (3.10)$$

onde:

- d_2 : distância entre a estação terrestre e o ponto de reflexão.
- Γ : coeficiente de reflexão em Terra Esférica, dado por [ITUR21]:

$$\Gamma = D \Gamma_0 \quad (3.11)$$

onde:

- Γ_0 : coeficiente de reflexão em Terra Plana (-1).
- D : fator de divergência, dado por:

$$D = \left[1 + \frac{2}{R_{[\text{km}]} d_{[\text{km}]} \sin(\Psi)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

onde:

- ψ : ângulo de incidência.

A análise da reflexão na superfície requer a determinação geométrica do ponto de reflexão especular a uma distância d_1 de um dos terminais. A determinação deste valor exige a realização de aproximações para chegar ao resultado esperado, para isso são usadas as expressões presentes em [ITUR21], chegando-se a um valor aproximado do ângulo de incidência dado por:

$$\psi_{[\text{mrad}]} = \frac{h_{ET[\text{m}]} + h_{A[\text{m}]}}{d_{[\text{km}]}} [1 - m (1 + b^2)] \quad (3.13)$$

onde:

$$m = \frac{d_{[\text{km}]^2}}{4 R_{e[\text{km}]} (h_{1[\text{km}]} + h_{2[\text{km}]})} \quad (3.14)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos\left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \cos^{-1}\left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}}\right)\right] \quad (3.15)$$

$$c = \frac{h_{ET[\text{km}]} - h_{A[\text{km}]}}{h_{ET[\text{km}]} + h_{A[\text{km}]}} , h_{ET} > h_A \quad (3.16)$$

$$d_{1[\text{km}]} = \frac{d_{[\text{km}]}}{2} (1 + b) \quad (3.17)$$

No entanto, é necessário avaliar se existe prevalência do fenômeno de difração. Assim um valor a ter em conta para perceber a possibilidade de utilização desta equivalência é o ângulo limite de incidência dado por [ITUR21]:

$$\varphi_{[\text{mrad}]} = \left(\frac{2100}{f_{[\text{MHz}]}} \right)^{1/3} \quad (3.18)$$

onde:

- φ : ângulo limite de incidência.

Foi feita a análise dos ângulos de incidência para os diversos cenários a considerar, apresentados na Figura 3.9, mostrando-se a distância mínima de aplicação do modelo Terra Esférica tendo em consideração o critério de relação do ângulo de incidência com o ângulo limite de incidência.

A partir de (3.18) obteve-se o valor do ângulo limite de incidência, a partir do qual se deduziu a expressão da distância mínima de aplicação do mesmo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{[\text{mrad}]} < \varphi_{[\text{mrad}]} \\ d_{[\text{km}]} = \frac{h_{ET[\text{m}]} + h_{A[\text{m}]}}{\Psi_{[\text{mrad}]}} [1 - m (1 + b^2)] \end{array} \right. \quad (3.19)$$

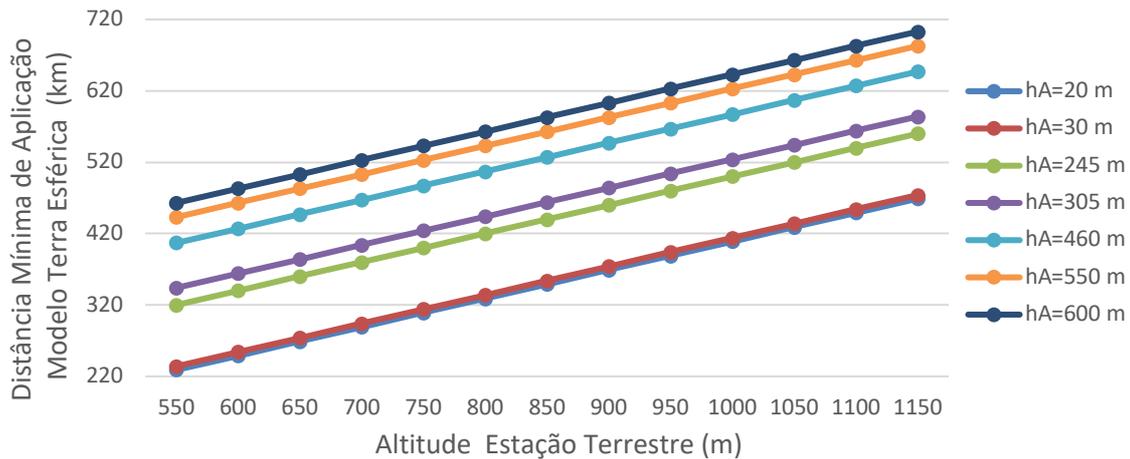


Figura 3.9 Distância mínima de aplicação do Modelo Terra Esférica considerando o ângulo de incidência.

Relativamente às distâncias mínimas e máximas de aplicabilidade do modelo Terra Esférica, sem ter em conta o critério analisado anteriormente, i.e., considerando que não existe prevalência do fenómeno de difração, pode começar-se por analisar um dos casos analisados anteriormente.

$$d_{min-TE} = d_{max-TP} \quad (3.20)$$

No que diz respeito à distância mínima de aplicação do modelo Terra Esférica considera-se (3.20) e, por isso, pode ser usada como referência a Figura 3.6, ou seja, a distância máxima de aplicação do modelo Terra Plana é a distância mínima de aplicação do modelo Terra Esférica.

Quando considerada a distância máxima de aplicação do modelo, a curvatura da Terra também interfere com o alcance da ligação, como tal a distância de Rádio Horizonte é considerada como a distância máxima que é possível manter a ligação em LOS, situação que se encontra representada na Figura 3.10. Considerando a linha a tracejado como referência, a zona após o ponto de contacto desta linha com a superfície da Terra é a zona de sombra. A zona de sombra é a zona de cobertura dentro da qual não é possível realizar comunicações sem se considerar os mecanismos de comunicações além do horizonte.

No caso em estudo, esta distância será a distância máxima a que a aeronave conseguirá comunicar com a estação terrestre mais próxima. Como a distância de Rádio Horizonte depende da altura a que cada antena se encontra, a distância máxima a que os terminais conseguem comunicar é a soma das distâncias de radio horizonte das duas antenas intervenientes. No sistema de comunicações em estudo, as aeronaves não têm uma altitude fixa para a realização dos voos e as antenas das diversas estações terrestres não se encontram todas à mesma altura. Assim para cada caso estudado tem que se considerar as respetivas distâncias de Rádio Horizonte.

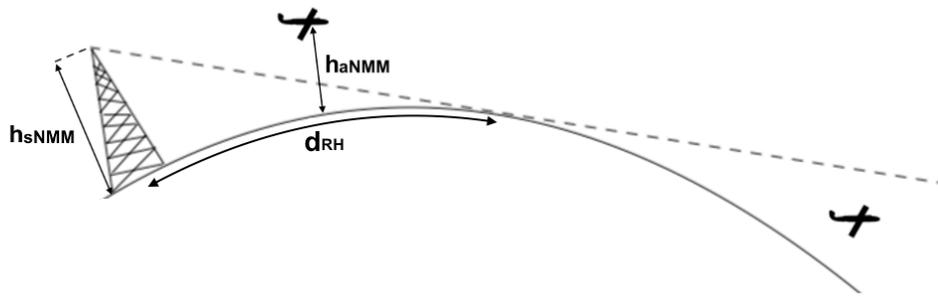


Figura 3.10. Esquema exemplificativo da influência da distância de Rádio Horizonte.

A distância máxima a que a aeronave consegue comunicar em LOS com a estação terrestre mais próxima é dada por [CaFe20]:

$$d_{RH[\text{km}]} = \sqrt{2 R_e[\text{km}] h_{ETNMM[\text{km}]}} + \sqrt{2 R_e[\text{km}] h_{ANMM[\text{km}]}} , \quad R_e[\text{km}] \gg h_{ETNMM[\text{km}]}, h_{ANMM[\text{km}]} \quad (3.21)$$

onde:

- d_{RH} : distância de Rádio Horizonte;
- h_{ETNMM} : altura da antena da estação terrestre em relação ao nível médio do mar;
- h_{ANMM} : altura da antena da aeronave em relação ao nível médio do mar;

Como as altitudes de operação das duas aeronaves são diferentes, a Figura 3.11 apresenta as distâncias de Rádio Horizonte para duas aeronaves em função das altitudes das estações terrestres e das altitudes de voo das duas aeronaves,

$$d_{max-TE} = d_{RH} \quad (3.22)$$

A distância máxima de aplicação deste modelo é dada por (3.22) e, por isso, pode usar-se como referência a Figura 3.11, i.e., a distância máxima de aplicação do modelo é a distância de Rádio Horizonte.

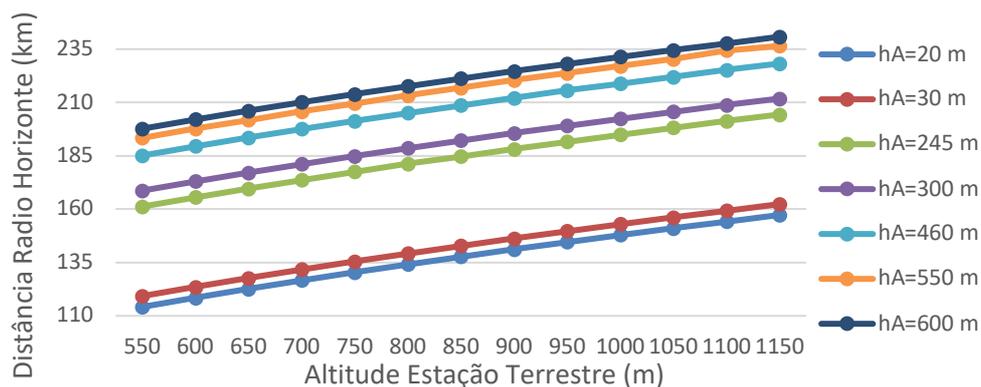


Figura 3.11. Distância de Rádio Horizonte em função das altitudes dos terminais.

Por comparação da distância mínima de aplicação do modelo Terra Esférica, considerando que pode prevalecer o fenómeno de difração (Figura 3.9) com a distância máxima de aplicação do presente modelo, distância de Rádio Horizonte (Figura 3.11), conclui-se que o modelo Terra Esférica não tem aplicabilidade no problema em estudo. Tal deve-se ao facto de, para todos os casos em estudo, a distância máxima de aplicação do modelo ser inferior à distância mínima de aplicação do mesmo

quando considerados os ângulos de incidência.

Conclui-se assim que para a resolução do problema em estudo, o modelo de propagação Terra Esférica é excluído.

3.3.5 Comunicações Trans-Horizonte

A difração sobre a superfície da Terra é um mecanismo de propagação permanente para frequências superiores a 30 MHz e que atingem distâncias além do horizonte. Como no sistema de comunicações em estudo, a ligação a considerar usa uma frequência de 139.3 MHz este mecanismo deverá ser considerado quando se trata de comunicações para distâncias que se encontrem nestas condições. No entanto, apesar da difração poder atingir distâncias além do horizonte, também pode fazer interferência com o sistema e, por isso, gerar perdas [ITUR18].

A perda total devido à difração numa ligação com distância, d , é dada por [ITUR18]:

$$L_{p[\text{dB}]} = L_{0[\text{dB}]} - [F(X) + G(Y_1) + G(Y_2)] \quad (3.23)$$

onde $F(X)$ é o termo que dá a distância e é dado por:

$$F(X) = \begin{cases} 11 + 10 \log_{10}(X) - 17.6X, & X \geq 1.6 \\ -20 \log_{10}(X) - 5,6488X^{1.425}, & X < 1.6 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\text{sendo } X = 2.188 \beta f_{[\text{MHz}]}^{\frac{1}{3}} R_e^{-\frac{2}{3}} d_{[\text{km}]} \quad (3.25)$$

onde:

- β : parâmetro identificativo do tipo de solo e polarização, é dado por:

$$\beta = \frac{1 + 1.6Z^2 + 0.75Z^4}{1 + 4.5Z^2 + 1.35Z^4} \quad (3.26)$$

Este parâmetro está relacionado com o fator de normalização da admitância de superfície, Z . Para polarização vertical e em frequências abaixo de 300 MHz sobre o mar, β deve ser calculado como uma função do valor de Z , dado por:

$$Z^2 = 6.89 \frac{\sigma_{[\text{S/m}]}}{k^{\frac{2}{3}} f_{[\text{MHz}]}^{\frac{5}{3}}} \quad (3.27)$$

onde:

- σ : condutividade elétrica. Para o mar $\sigma = 5 \text{ S/m}$;
- k : fator multiplicativo, tipicamente $\frac{4}{3}$.

$G(Y)$, o termo que dá o ganho de altura é dado por:

$$G(Y_{A,ET}) = \begin{cases} 17.6\sqrt{B-1.1} - 5 \log_{10}(B-1.1) - 8, & B > 2 \\ 20 \log_{10}(B+0.1B^3), & B \leq 2 \\ 2 + 20 \log_{10} Z, & G(Y) < 2 + 20 \log_{10} Z \end{cases} \quad (3.28)$$

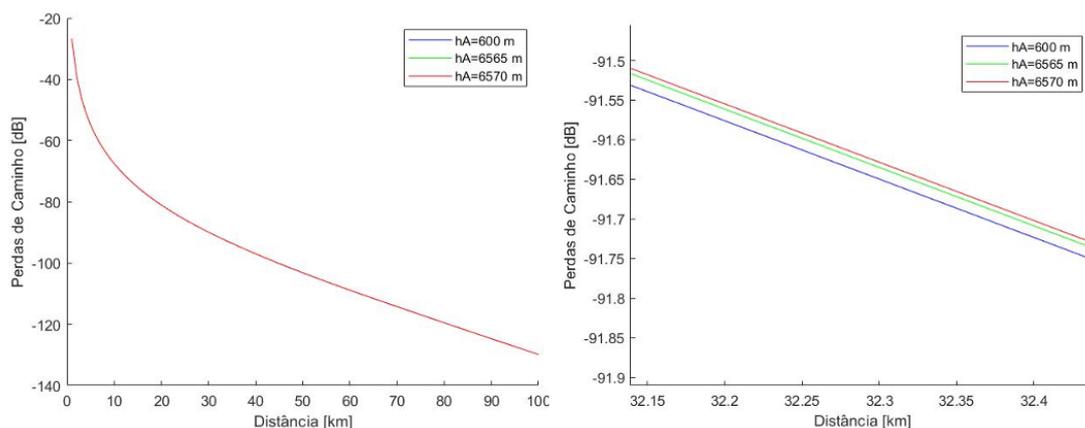
$$Y_{A,ET} = 9.575 \times 10^{-3} \beta f_{[\text{MHz}]}^{-\frac{2}{3}} R_e^{-\frac{1}{3}} h_{A,ET} [\text{m}] \quad (3.29)$$

$$B = Y_{A,ET} \beta \quad (3.30)$$

Assim, este modelo será utilizado sempre que se verifique a existência de comunicações trans-horizonte. No caso em estudo, visto que nem o Modelo Terra Plana nem o modelo Terra Esférica podem ser utilizados, então a distância mínima de aplicação deste modelo é a distância máxima de aplicação do Modelo de Propagação Espaço Livre.

$$d_{\min-TH} = d_{\max-EL} \quad (3.31)$$

O presente modelo apresenta diferentes comportamentos para as diferentes altitudes de voo da aeronave. Percebe-se que abaixo de uma determinada altitude tomada pela aeronave o modelo perde a dependência com a altitude, pois as altitudes são relativamente baixas. Assim, como é possível ver na Figura 3.12, para altitudes inferiores a $h_A = 6565$ m, o modelo perde a dependência da altitude de voo, fazendo uso da terceira condição de (3.28) para o cálculo de G. Para altitudes entre $h_A = 6565$ m e $h_A = 6570$ m, o modelo usa a segunda condição e para altitudes acima de $h_A = 6570$ m usa a primeira condição. Também foi possível notar que para distâncias maiores a altitude de voo da aeronave tem maior influência. Os testes efetuados foram realizados tendo em consideração a altitude da estação terrestre igual a 1000 m, em relação ao nível médio do mar.



(a) Perdas de Caminho

(b) Imagem aproximada para as três altitudes

Figura 3.12. Perdas de caminho do Modelo Trans-horizonte em função da altitude e da distância.

3.3.6 Modelos de *Knife-Edge* e *Deygout*

No caso da ligação não se encontrar desobstruída deverão ser consideradas também perdas por difração em obstáculos. Como tal deve analisar-se o grau de impedimento do primeiro elipsóide de Fresnel.

Na Figura 3.13 é apresentada a representação gráfica do modelo a analisar. Quanto maior for a área

do primeiro elipsóide de Fresnel obstruída, maior será a atenuação causada e, conseqüentemente, maior o valor de v , grau de obstrução da ligação, dado por (3.32) [ARJA20].

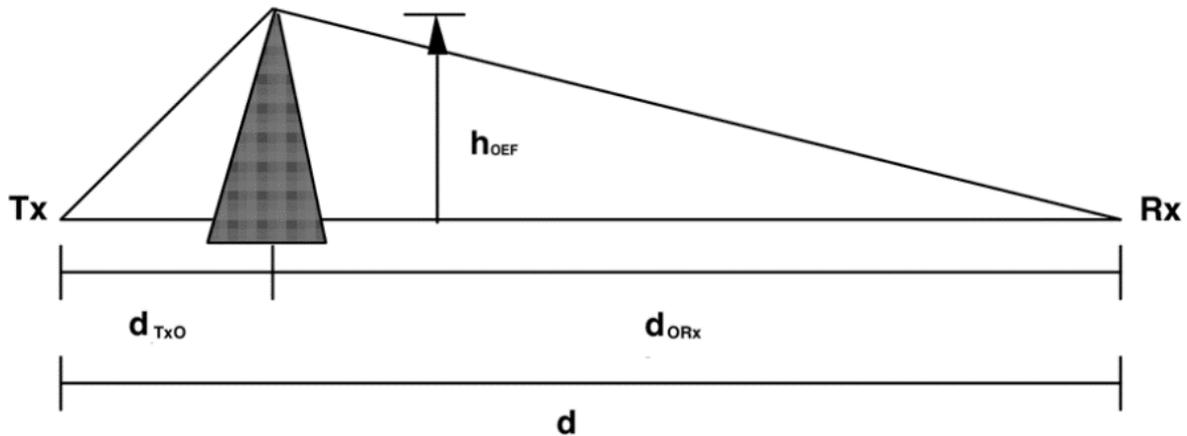


Figura 3.13. Geometria do modelo *Knife-Edge* (adaptado de [Corr20]).

$$v = h_{OEF[m]} \sqrt{\frac{2 d_{[m]}}{\lambda_{[m]} d_{TxO[m]} d_{ORx[m]}}} \quad (3.32)$$

onde

- h_{OEF} : diferença entre a altura do topo do obstáculo e o centro do elipsóide de Fresnel (este valor pode ser negativo caso o obstáculo se encontre abaixo do centro do elipsóide);
- d_{TxO} : distância do transmissor ao obstáculo;
- d_{ORx} : distância do obstáculo ao recetor.

Calculado o grau de obstrução do elipsóide consideram-se duas hipóteses: a primeira hipótese é $v < -0,7$, onde este modelo é aplicável e não existe qualquer obstrução do elipsóide; caso contrário, o modelo não é aplicável, pois a obstrução do mesmo é significativa.

Sabendo o grau de obstrução do elipsóide, é possível calcular a atenuação de obstáculo. Para $v \geq -0,7$ a atenuação de obstáculo dada pelo modelo *Knife-Edge* é dada por (3.33). Caso o valor de v seja inferior a $-0,7$, a atenuação pode ser negligenciada [ARJA20].

$$L_{KE[dB]} = 6.9 + 20 \log_{10}(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1) \quad (3.33)$$

Assim, este modelo será aplicado, sempre que existam obstáculos a obstruir a ligação. No caso da existência de apenas um único obstáculo será aplicado de forma direta o modelo *Knife-Edge*. No entanto, caso exista mais do que um obstáculo a obstruir a ligação será utilizado o Modelo de *Deygout*, multiplicação da aplicação do modelo de *Knife-Edge* a vários segmentos do caminho entre os terminais somando os diversos valores das atenuações de obstáculo.

3.3.7 Visão geral da aplicação dos modelos ao problema em estudo

Considerados os modelos apresentados ao longo do presente subcapítulo, chegou-se à conclusão que,

para a resolução do problema em estudo, o modelo a desenvolver deverá seguir as considerações genéricas apresentadas na Figura 3.14.

O modelo Terra Plana foi excluído da resolução do problema. Esta exclusão deveu-se ao fato de, para a maioria das altitudes dos terminais a considerar no estudo, este modelo não ser aplicável, como é possível notar na Subsecção 3.3.3, onde se concluiu que o único caso em que existe a possibilidade de usar o modelo é para o caso em que a aeronave se encontra a uma altitude de 20 m. No entanto, o intervalo de distâncias não se pode considerar suficientemente significativo para que se considere este modelo, como tal, deu-se a sua exclusão.

O modelo Terra Esférica foi excluído da resolução do problema em estudo. Como foi possível ver na Subsecção 3.3.4 este modelo foi excluído pois a distância máxima de aplicação do modelo, para todos os casos avaliados, era inferior à distância mínima de aplicação do modelo quando considerados os ângulos de incidência.

Assim, nas proximidades da estação terrestres e sempre que não existam obstáculos a obstruir a ligação será utilizado o modelo de propagação Espaço Livre. Na Subsecção 3.3.2 é apresentada a distância máxima que será possível utilizar este modelo, quando não são consideradas as características do terreno e os diversos obstáculos. No caso de existirem obstáculos contornar-se-á este problema aplicando o modelo de *Knife-Edge* ou, no caso de existirem múltiplos obstáculos aplica-se o modelo de *Deygout*, apresentados na Subsecção 3.3.6.

Assim, a partir da distância limite de aplicação do Modelo Espaço Livre serão considerados os mecanismos de comunicação Trans-horizonte, como é o caso da difração, apresentado na Subsecção 3.3.5.

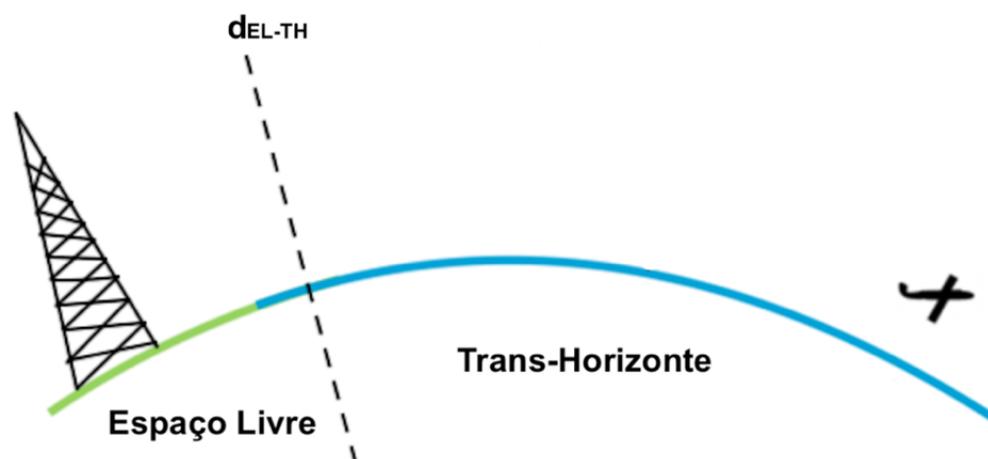


Figura 3.14. Linha condutora do modelo a desenvolver.

Considerando as diferentes altitudes de voo das duas aeronaves e ainda as diferentes altitudes das estações terrestres chegou-se às distâncias limite de utilização de cada modelo de propagação. Estes resultados encontram-se sumariamente apresentados na Tabela 3.6. Para determinar a distância limite de aplicação entre os modelos foram utilizados os cálculos apresentados anteriormente. Assim, a distância limite de transição entre o modelo Espaço Livre e o modelo Trans-horizonte é a distância

máxima de aplicação do primeiro modelo referido.

Tabela 3.6. Distâncias limite de aplicação dos modelos.

d_{limite} [km]			h_A [m]						
			20	30	245	300	460	550	600
h_{ET} [m]	550	EL-TH	46	63	126	134	153	162	166
	1000	EL- TH	75	94	162	170	189	198	203
	1050	EL- TH	78	97	165	174	192	201	206
	1100	EL- TH	81	100	168	177	195	205	209
	1150	EL- TH	84	103	171	180	199	208	213

3.4 Desvanecimento

O desempenho dos canais de comunicação sem fios é muitas das vezes afetado por desvanecimento (*fading*), i.e., a alteração significativa de amplitude do sinal recebido considerando um intervalo de tempo específico. Existem diferentes tipos de desvanecimento que devem ser considerados, e para as comunicações em análise devem ser considerados os dois tipos mais comuns: o lento e o rápido. O primeiro é definido como aquele que depende essencialmente das condições do terreno que circundam os terminais, como os edifícios, terreno montanhoso e outros. O segundo depende de vários fatores entre os quais o movimento dos terminais, a alteração de velocidades de um dos terminais e ainda os fenómenos de multi-percurso [SMAI15].

No caso em estudo existe sempre movimento de um dos terminais, logo o sistema estará sempre na presença de desvanecimento rápido. Contudo, devido à geografia do terreno, também pode existir obstrução da ligação e, por isso, poderá existir situações em que se poderá revelar necessário a consideração da ocorrência de desvanecimento lento.

Considerando os dois tipos de desvanecimento aplicados ao sistema, aquele que terá um impacto substancial na ligação será o desvanecimento rápido. Como tal, esse será o considerado para o estudo da cobertura do sistema [SMAI15]. Este tipo de desvanecimento, no tipo de comunicações a considerar, é comumente gerado pelos reflexos na superfície da Terra, reflexos na fuselagem das aeronaves e ainda gerados devido aos movimentos das pás dos rotores [CJRB93].

Por vezes, o desvanecimento lento gera perdas mais profundas, conseguindo gerar uma perda de sinal entre 10 dB e 20 dB, podendo durar entre segundos a minutos. Tanto as modulações analógicas como

as digitais sofrem deste tipo de desvanecimento causando perdas na relação sinal-ruído no recetor rádio. No entanto, na presença de sinais fortes, este problema pode ser ultrapassado pela ação do *automatic gain controller* (AGC) [CJRB93].

Quando considerado o desvanecimento rápido, geralmente, não gera perdas durante períodos tão perlongados. No entanto, quando consideradas modulações analógicas, como é o caso do problema em estudo, estas são severamente afetadas por este tipo de desvanecimento, por este motivo considera-se o predominante no sistema de comunicações em estudo. Para contornar este problema o AGC deverá ser suficientemente rápido para responder a este tipo de desvanecimento e ainda cancelar as componentes de frequência que tenham sido afetadas. Poderá ser considerada ainda a utilização de mecanismos de equalização [CJBR93].

Segundo [PHEH21], para o problema em estudo o cenário a considerar é aquele em que a aeronave se encontra em movimento, *en-route*. Assim, neste tipo de cenário, como foi referido anteriormente, o tipo de desvanecimento predominante é o desvanecimento rápido. Como tal, a distribuição estatística apropriada para definir este tipo de desvanecimento é a Distribuição de Rice. Na situação em estudo o fator de Rice associado pode variar entre $K = [2, 20]$ dB, sendo $K = 2$ dB o pior caso e $K = 20$ dB o melhor. No entanto, para a situação em que a aeronave se encontra em movimento, um valor considerado típico é $K = 15$ dB.

3.5 Diagramas de Radiação

Um dos aspetos que influencia os resultados obtidos é o ganho das antenas, que depende do diagrama de radiação das antenas emisoras e recetoras. O ganho generalizado das antenas em função da relação da posição dos terminais é dado por:

$$G(\phi, \theta)_{A/E[dBi]} = G_{maxA[dBi]} + 10 \log_{10}(f_{A\setminus E}(\theta)) + 10 \log_{10}(f_{A\setminus E}(\phi)) \quad (3.34)$$

onde:

- $G(\theta, \phi)_{A\setminus E}$: ganho generalizado da antena da aeronave/estação terrestre;
- $G_{maxA\setminus E}$: ganho máximo da antena da aeronave/estação terrestre;
- $f_{A\setminus E}(\theta)$: diagrama de radiação normalizado no plano vertical da antena da aeronave/estação terrestre;
- $f_{A\setminus E}(\phi)$: diagrama de radiação normalizado no plano horizontal da antena da aeronave/estação terrestre.

As antenas que se encontram instaladas nas aeronaves são monopolos de um décimo de comprimento de onda, pois o comprimento de onda é da ordem dos 2 m e as antenas têm um comprimento não superior a 20 cm [MaSi20]. Na Figura 3.15 encontra-se uma representação dos diagramas de radiação das antenas que se encontram nas aeronaves. Ambas as aeronaves têm uma antena na parte superior da aeronave e duas antenas na parte inferior. Para efeitos de cálculo serão consideradas duas antenas,

uma na parte superior da aeronave e outra na parte inferior. Os diagramas de radiação de ambas são iguais.

Sabendo que as antenas dispostas nas aeronaves se comportam como um monopolo curto, o diagrama de radiação vertical, tanto para a antena no topo da aeronave, como para a antena na zona inferior da mesma, é dado por (3.35) [MaSi20]. O diagrama de radiação horizontal destas antenas tem ligeiras diferenças relativamente ao diagrama de radiação do plano vertical do monopolo curto, que se deve ao facto das antenas nas aeronaves serem antenas em lâmina. Assim, uma aproximação da função do diagrama de radiação no plano horizontal é dado pela Figura 3.15 (b). Para o cálculo do ganho generalizado no plano horizontal é utilizada (3.36), por a aeronave se movimentar radialmente em relação às estações terrestres, na grande maioria do tempo, e ainda para que seja considerado o pior caso de estudo [DTKS17].

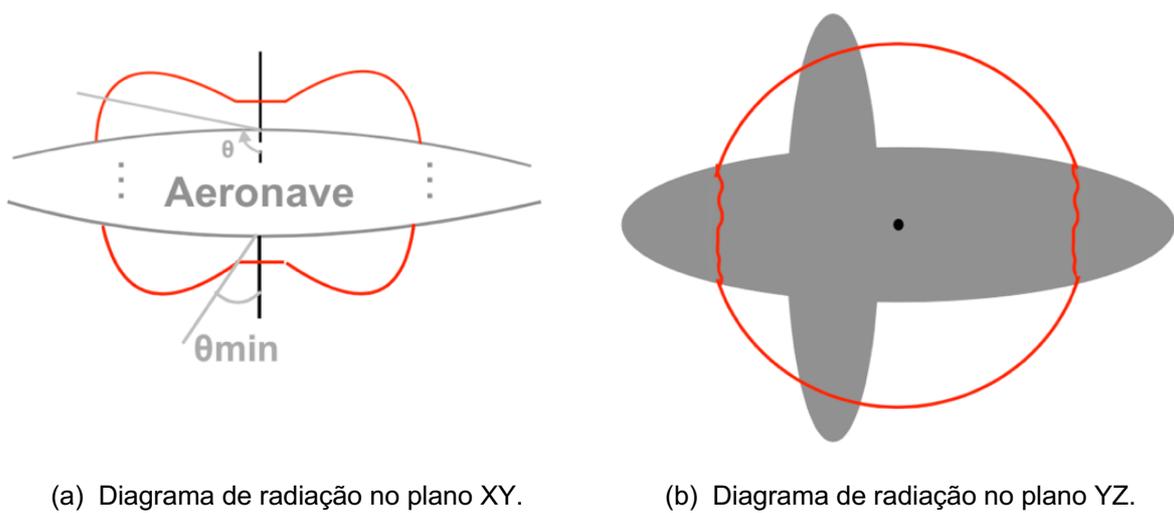


Figura 3.15. Diagrama de radiação das antenas presentes nas aeronaves.

$$f_A(\theta) = \begin{cases} (\sin \theta)^2, & \theta_{min} < \theta \leq 90^\circ \\ 0.001, & 0 \leq \theta \leq \theta_{min} \\ \theta_{min} = 1,81^\circ \end{cases} \quad (3.35)$$

$$f_A(\phi) = \begin{cases} 1, & 315^\circ \leq \phi \leq 45^\circ \wedge 135^\circ \leq \phi \leq 225^\circ \\ \frac{2}{\sqrt{2}} \sin \phi, & 45^\circ < \phi < 135^\circ \wedge 225^\circ < \phi < 315^\circ \end{cases} \quad (3.36)$$

No que concerne às antenas das estações terrestres são efetuados testes considerando antenas omnidirecionais e setoriais, de modo a perceber quais são as mais indicadas para o sistema. Assim são consideradas duas antenas omnidirecionais com valores de ganho distintos e uma antena setorial. A antena omnidirecional com o valor de ganho mais baixo é um dipolo de meio comprimento de onda, como tal o seu diagrama de radiação vertical, em condições ideais, é descrito por (3.37) e o seu diagrama de radiação horizontal é omnidirecional, por isso pode ser normalizado por (3.36).

$$f_{ET}(\theta) = \left| \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} \cos(\theta) \right] - \cos \left(\frac{\pi}{2} \right)}{\sin(\theta)} \right|^2 \quad (3.37)$$

$$f_{ET}(\phi) = 1 \quad (3.38)$$

No que diz respeito à antena omnidirecional com valor de ganho superior, esta é um agregado uniforme composto por três dipolos de meia onda espaçados entre si por uma distância de meio comprimento de onda, sendo o seu diagrama de radiação na vertical é descrito por (3.39), enquanto o diagrama horizontal é descrito por (3.38).

Relativamente à localização das antenas omnidirecionais nas torres de suporte, a localização ideal seria no topo do mesmo para que o seu diagrama de radiação não apresentasse reflexões. Quanto às antenas setoriais, a sua localização na torre de suporte não trará grandes alterações ao seu diagrama de radiação [MaSi20].

$$f_{ET}(\theta) = \left| \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right|^2 \frac{1}{3} \frac{\sin(3\pi \cos(\theta))}{\sin(\pi \cos(\theta))} \quad (3.39)$$

A localização ideal para as antenas omnidirecionais poderá não ser possível, visto que se prevê que as antenas sejam instaladas em torres metálicas que suportam antenas de outros sistemas de comunicações. Para todas as estações terrestres, prevê-se uma localização de, aproximadamente, a dois terços da respetiva estrutura de suporte, caso não seja possível a localização ideal. Deste modo, espera-se que o seu diagrama de radiação sofra alterações.

Sabendo que a localização das antenas omnidirecionais irá influenciar o seu desempenho, através do auxílio da aluna Sofia Patrício e do uso do programa *CST Simulation Tool* foi estudada a influência da torre de suporte no diagrama de radiação da antena. Como é possível constatar a partir da Figura 3.16, o diagrama de radiação fica com alterações significativas, deixando de ser omnidirecional. Todo o processo de utilização do programa para o desenvolvimento do estudo da influência da torre de suporte no diagrama de radiação da antena da estação terrestre se encontra detalhado no Anexo C.

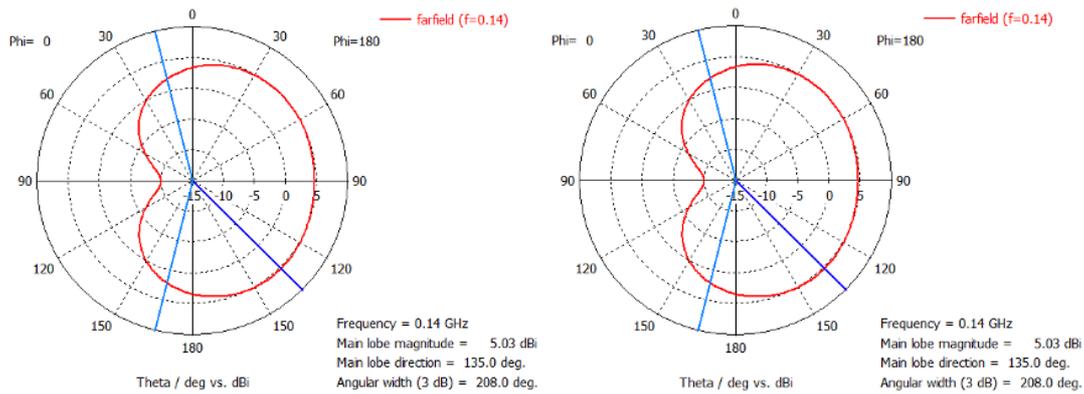
Para os cálculos do ganho das antenas será utilizada a expressão (3.34). Contudo, o diagrama de radiação horizontal da antena omnidirecional, quando colocada a sensivelmente dois terços da altura da torre de suporte fica alterado devido às reflexões na torre de suporte. Como tal as expressões dos diagramas de radiação horizontais das antenas omnidirecionais, (3.37), são substituídos:

$$f_{ET}(\phi) = \frac{1 - \cos(\phi)}{2} \quad (3.40)$$

A antena setorial é um agregado composto por três dipolos de meia onda, como tal o seu diagrama de radiação vertical é dado por (3.41) e o seu diagrama de radiação horizontal é dado por (3.42).

$$f_{ET}(\theta) = \left| \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right|^2 \frac{1}{3} \frac{\sin\left(3 \frac{5\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{5\pi}{2} \cos(\theta)\right)} \quad (3.41)$$

$$f_{ET}(\phi) = \frac{1 + \frac{\cos(\phi)}{2}}{1.5} \quad (3.42)$$



(a) Diagrama de ganho

(b) Diagrama de campo elétrico

Figura 3.16. Corte 2D para o campo distante ($\phi=0^\circ$).

3.6 Implementação do Modelo

Os modelos apresentados na Secção 3.3, bem como as conclusões sobre os mesmos, foram implementados num simulador por meio do *software Math Works* usando linguagem *MATLAB r2018a*.

O principal objetivo do simulador é determinar o raio de cobertura para diversas direções a partir da estação terrestre e, posteriormente, perceber possíveis soluções para ultrapassar as zonas de sombra e raios de cobertura inferiores aos requisitos operacionais, como é possível ver na visão genérica do simulador, Figura 3.17. Para a avaliação de cobertura são comparados os valores da potência recebida estimada com o valor da sensibilidade do recetor, tendo em conta as características dos terminais, o perfil do terreno, os diagramas de radiação das antenas e ainda as perdas de caminho.

Para proceder à análise de cobertura é necessário fazer a análise apresentada na Figura 3.18 para cada estação terrestre a considerar. Para isso é necessário ter em conta os perfis de elevação dos diversos caminhos em estudo, a distância entre o terminal e a aeronave, as altitudes de ambos os terminais e ainda os diagramas de radiação das antenas dos terminais. Tendo em conta estes aspetos é possível realizar a análise de cobertura considerando os modelos de propagação apresentados na secção anterior.



Figura 3.17. Visão genérica do simulador.

Depois de se reunirem todos os parâmetros de entrada é necessário proceder-se à avaliação do modelo a aplicar para a distância a que os terminais se encontram. Posteriormente procedem-se aos cálculos das perdas. Esta avaliação é feita a partir das distâncias limite entre aplicação dos modelos, como é possível notar na Figura 3.14.

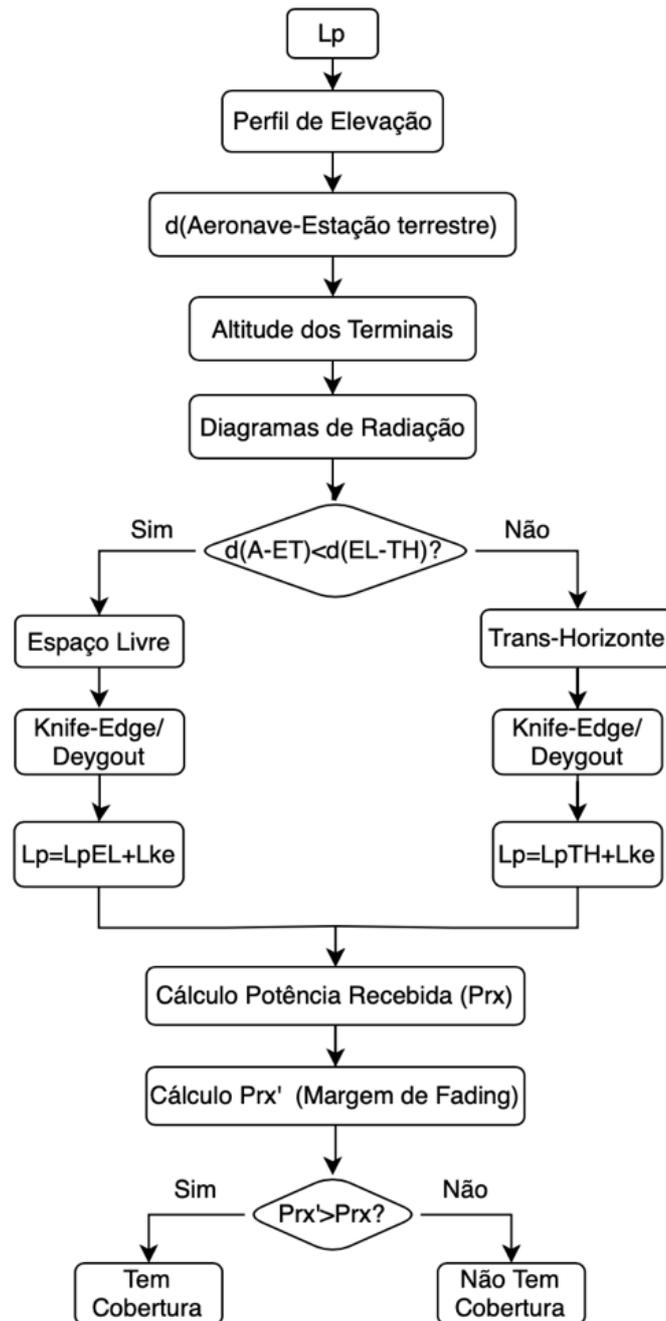


Figura 3.18. Fluxograma do simulador que avalia a cobertura do sistema.

No modelo propagação de Espaço Livre é feita a aplicação direta da equação das perdas em espaço livre e, posteriormente, aplicado o modelo de *Knife-Edge* ou de *Deygout*, caso existam obstáculos.

O modelo de *Knife-Edge* ou *Deygout*, apresentado na Figura 3.19, é aplicado em todas as avaliações independentemente do modelo a aplicar visto que é neste modelo que é avaliado o perfil de elevação da ligação, como é possível notar na mesma figura.

Caso a distância a que os terminais se encontram for superior à distância limite de aplicação do modelo Espaço Livre, é aplicado o modelo Trans-Horizonte, apresentado na Figura 3.20.

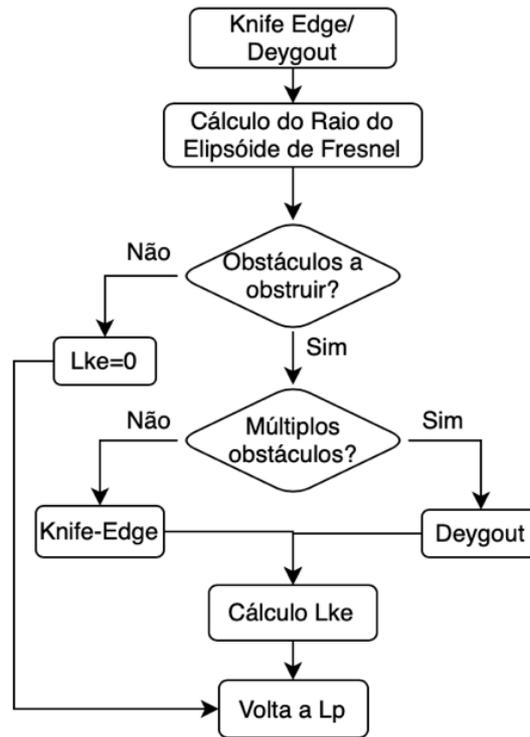


Figura 3.19. Fluxograma do simulador dos modelos *Knife-Edge* e *Deygout*.

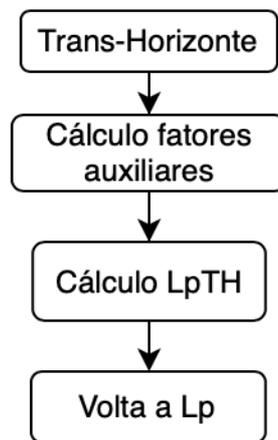


Figura 3.20. Fluxograma do simulador do Modelo Trans-Horizonte.

3.7 Avaliação do Modelo

O objetivo da presente secção é validar o modelo apresentado para implementação na Secção 3.6.

A Tabela 3.7 sumariza os pontos fundamentais a avaliar. Assim para se proceder à aferição do modelo este foi submetido a 7 testes diferentes. Os resultados obtidos nos testes foram comparados com o comportamento conhecido dos modelos para perceber se estes estão em conformidade.

Tabela 3.7. Testes a realizar para a validação do simulador

Teste	Descrição
1	Verificar se as perdas de caminho para o modelo Espaço Livre variam com a distância da forma esperada, avaliando a potência recebida.
2	Verificar se as perdas de caminho para o modelo Trans-horizonte variam com a distância da forma esperada, avaliando a potência recebida.
3	Verificar se as perdas de caminho para o modelo Trans-horizonte variam com a altitude dos terminais da forma esperada, avaliando a potência recebida.
4	Verificar se o cálculo da potência recebida ao longo da distância para o modelo desenvolvido segue o padrão esperado.
5	Verificar se o perfil do terreno é considerado corretamente nos cálculos da atenuação de obstáculo.
6	Verificar se a evolução do ângulo θ e do valor do ganho acontece da forma esperada.
7	Verificar se os diagramas de radiação são considerados corretamente nos cálculos da potência recebida.

Para a realização dos testes foram utilizados os valores apresentados na Tabela 3.5 e a altitude da estação terrestre igual a 550 m, i.e., a estação terrestre localizada na ilha de Santa Maria. Como tal, para os testes descritos também foi utilizado um perfil de elevação associado a esta mesma estação terrestre, o perfil que corresponde aos 240° usando o ponto cardinal Norte como o eixo de referência, i.e., os 0°.

Para a realização dos testes 1 e 2 foi feito o cruzamento dos dados obtidos na simulação numérica com cálculos manuais com intervalos de 10 km. Quando realizado o cruzamento dos resultados concluiu-se que ambos apresentavam os mesmos valores, como é possível ver quando comparados os valores apresentados na tabela que se encontra no Anexo D. Quando avaliado o comportamento de ambos os modelos, concluiu-se também que estes se encontravam de acordo com o esperado em função da distância, como é possível verificar na Figura 3.21.

Como foi possível ver na Subsecção 3.3.5, para altitudes de voo abaixo dos 6 565 m esta não exerce qualquer interferência com a evolução do modelo. Assim, para as três altitudes em estudo, em função da altitude da aeronave, mantendo contante a altitude da estação terrestre, foi possível concluir que os resultados se encontram de acordo com o que era esperado, como é possível observar na Figura 3.22. Na figura encontram-se sobrepostas as três curvas, pois a altitude da aeronave não exerce influência no comportamento do Modelo, concluindo-se que o Modelo Trans-horizonte apresenta o comportamento esperado.

No que concerne ao cálculo da potência recebida pela aeronave ao longo da distância espera-se que o comportamento tenha duas fases distintas, i.e., uma primeira fase, até à distância limite de transição entre os dois modelos, em que os valores são calculados pelo modelo de propagação Espaço Livre, e a partir dessa distância limite verifica-se uma quebra a partir da qual os valores da potência recebida são calculados a partir do modelo de propagação Trans-horizonte.

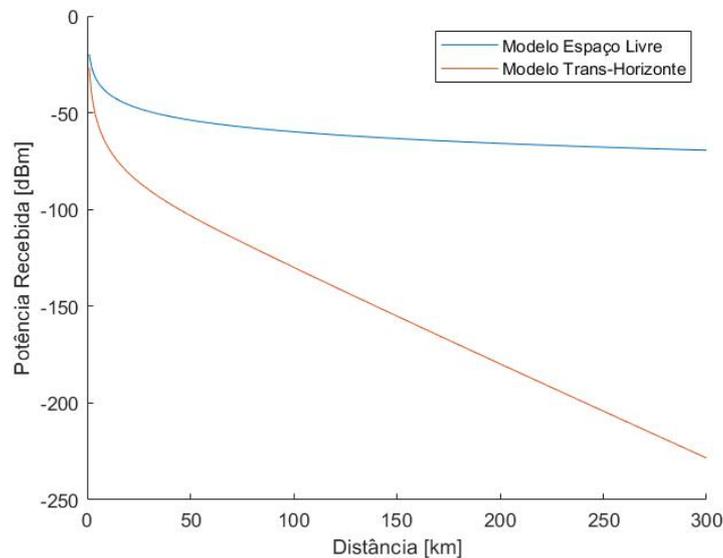


Figura 3.21. Potência recebida em função da distância.

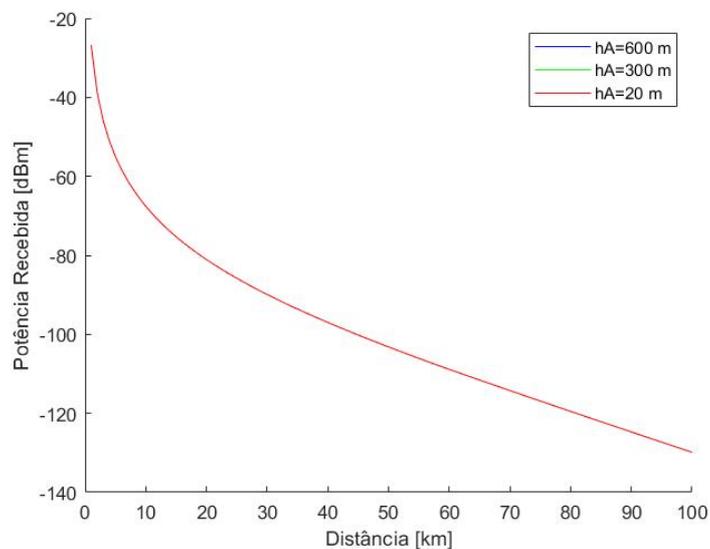


Figura 3.22. Potência recebida em função da altitude para o modelo Trans-horizonte.

A partir da Figura 3.23 é possível observar uma quebra na curva da potência recebida, tal como era esperado, visto que a partir da distância limite muda o modelo a ser aplicado para o cálculo desta. Assim conclui-se que, no que diz respeito ao cálculo da potência recebida em função da distância, o modelo corresponde ao padrão esperado. Ainda nesta mesma figura é possível notar que se encontram três curvas distintas, observa-se que em termos de evolução ao longo da distância para as três curvas não existe influência da altitude exceto no que concerne à transição entre os modelos, onde a altitude já exerce influência.

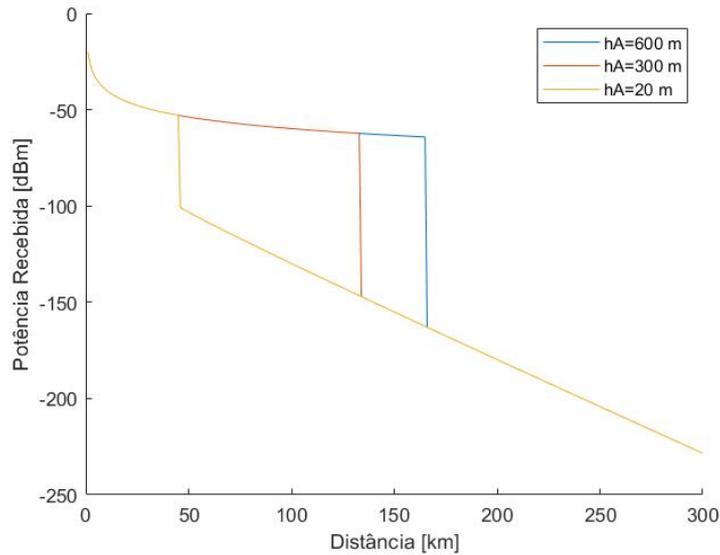


Figura 3.23. Potência recebida em função da distância entre terminais.

Para todos os resultados apresentados anteriormente, nenhum deles tem em consideração as perdas devido a obstáculos no caminho. Para isso, como foi abordado em secções anteriores será aplicado o modelo de *Knife-Edge*, quando existir apenas um obstáculo entre os terminais, ou o modelo de *Deygout* quando se estiver na presença de múltiplos obstáculos. Como é possível ver na Figura 3.24, caso o obstáculo se encontre dentro do primeiro elipsóide de Fresnel, representado a vermelho, é calculado o grau de obstrução do mesmo. Se o grau de obstrução seja superior a -0.7 é calculado o valor da atenuação de obstáculo.

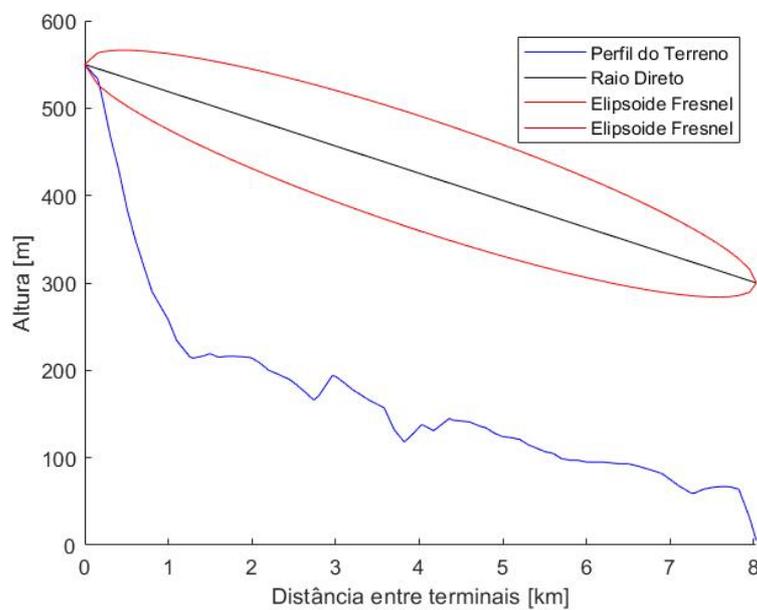


Figura 3.24. Perfil de terreno e elipsoide de Fresnel para 8 km.

Como é possível observar na Figura 3.24, não existe a presença de obstáculos entre os terminais e, apesar de, no interior do elipsoide se encontrar uma parte do perfil do terreno, este cruzamento não é suficiente para que o grau de obstrução seja superior a -0.7 e, por isso, as perdas por obstáculo foram consideradas nulas. Para os testes de atenuação de obstáculo foi considerada uma atitude de voo da

aeronave igual a 300 m.

Quando considerada a mesma altitude de voo, mas uma distância de ligação inferior, já se verificam perdas devido à presença de obstáculos. Esta situação encontra-se representada na Figura 3.25. Considerando a ligação com 2 km, existe uma obstrução significativa do elipsoide o que levou a uma atenuação de obstáculo de 2,97 dB. Na Figura 3.26 encontra-se representada a potência recebida em função da distância considerando a atenuação de obstáculo.

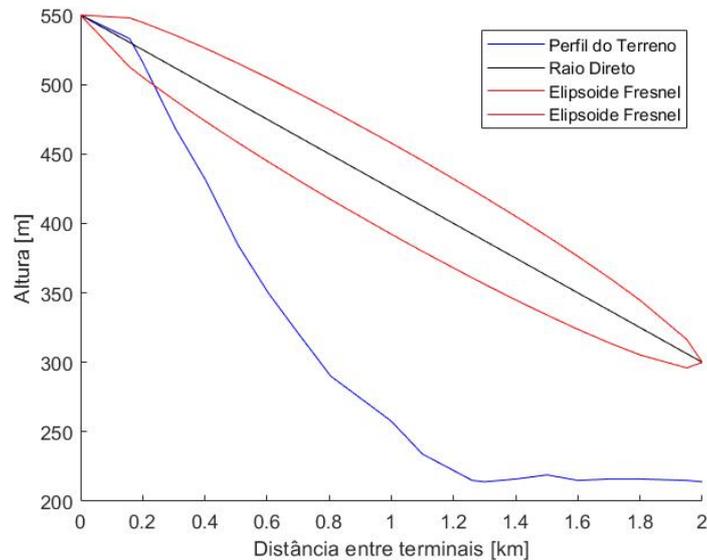


Figura 3.25. Perfil de terreno e elipsoide de Fresnel para 2 km.

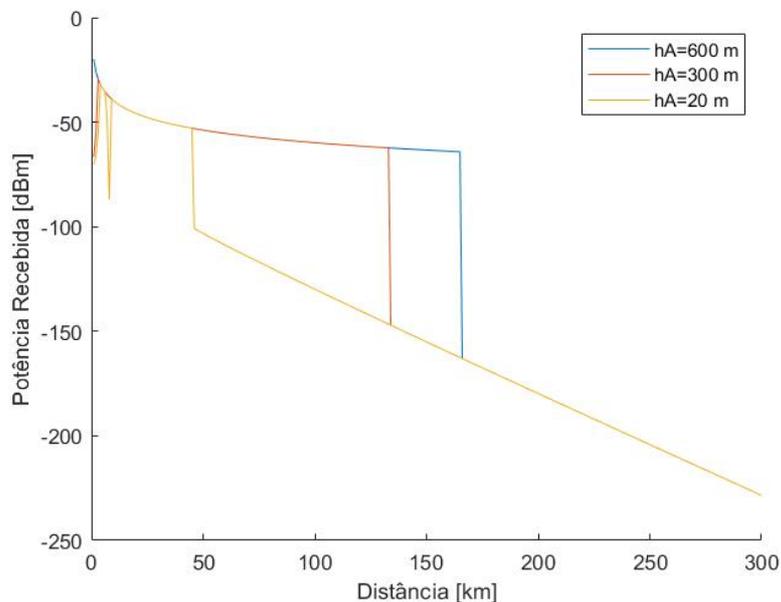


Figura 3.26. Potência recebida em função da distância entre terminais com atenuação de obstáculo.

Depois do modelo ser sujeito a todos os testes acima apresentados e de responderem da forma esperada aos mesmos, procederam-se aos últimos testes: perceber se os diagramas de radiação são considerados corretamente nos cálculos da potência recebida. Em todos os testes realizados até aqui foram considerados ganhos constantes, i.e., os ganhos máximos das antenas de ambos os terminais.

Para proceder ao cálculo dos ganhos em função das distâncias e dos ângulos entre os terminais inicialmente foi analisada a evolução dos ângulos em função da distância, apresentado na Figura 3.27. É esperado que, quando a aeronave está acima da estação terrestre, o ângulo θ tenda a aumentar com o aumento da distância. Quando a estação terrestre se encontra abaixo da estação terrestre, espera-se que o ângulo θ tenda a diminuir com o aumento da distância. Também é esperado que com o aumento da distância o ângulo entre os terminais tenda a aproximar-se de 90° .

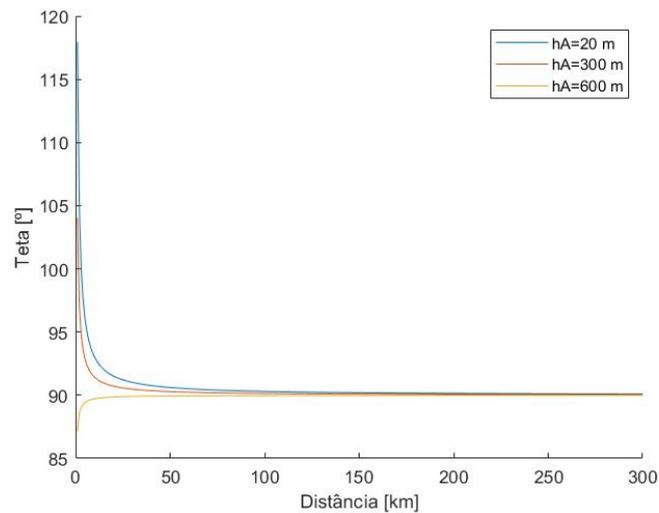


Figura 3.27. Evolução do ângulo θ em função da distância entre os terminais.

Ao analisar a Figura 3.27 percebe-se que os ângulos evoluem da forma esperada ao longo da distância.

Considerando o plano correspondente ao ângulo θ , quando θ se aproxima dos 90° , o valor do ganho é máximo. Assim espera-se que para as três altitudes de voo o ângulo tenda a aumentar até a alcançar um valor máximo.

Como é possível constatar ao analisar a Figura 3.28, o ganho tem a evolução esperada em função da distância.

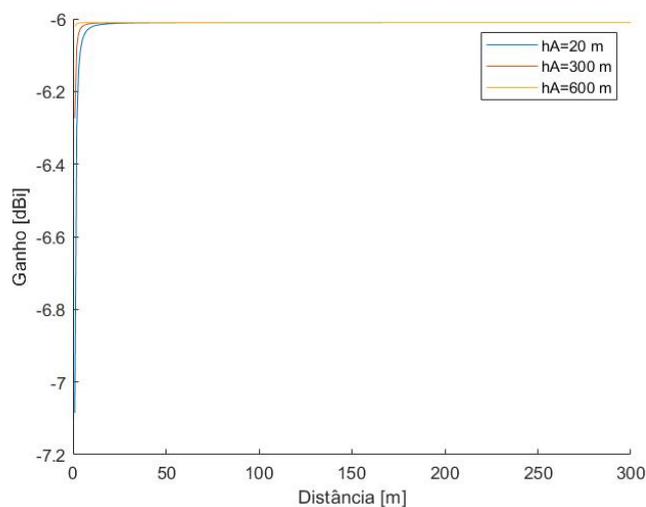


Figura 3.28. Evolução do ganho em função das distâncias entre os terminais.

Para a análise da potência recebida em função da distância, com e sem consideração da atenuação de obstáculo, foi considerada a situação mais favorável para uma antena omnidirecional instalada na estação terrestre, i.e., a antena encontra-se instalada no topo da torre de suporte. Assim, é esperado que no gráfico se verifique um ligeiro decréscimo da potência recebida em relação aos valores apresentados nas Figuras 3.23 e 3.26. Assim nas Figuras 3.29 e 3.30 são apresentas comparações dos valores da potência recebida, sendo a altitude da aeronave 20 m, quando é considerado o ganho máximo dos terminais e quando o ganho é considerado como uma função de θ e de ϕ , sem e com atenuação de obstáculo considerada, respetivamente.

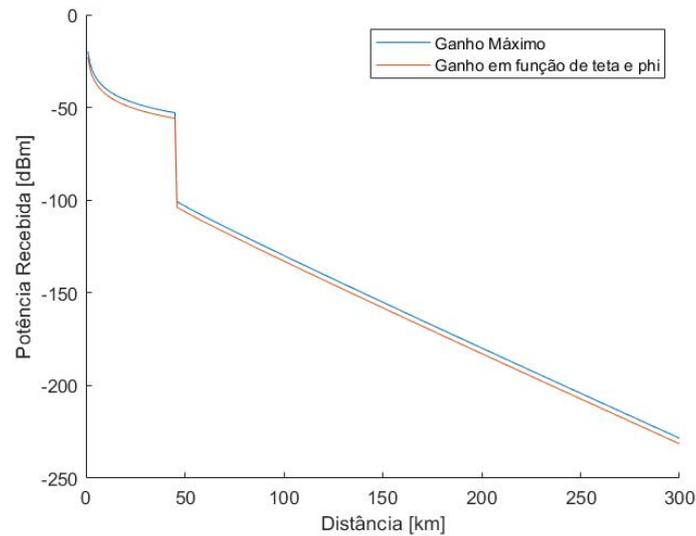


Figura 3.29. Comparação da potência recebida com diferentes valores de ganho sem atenuação de obstáculo.

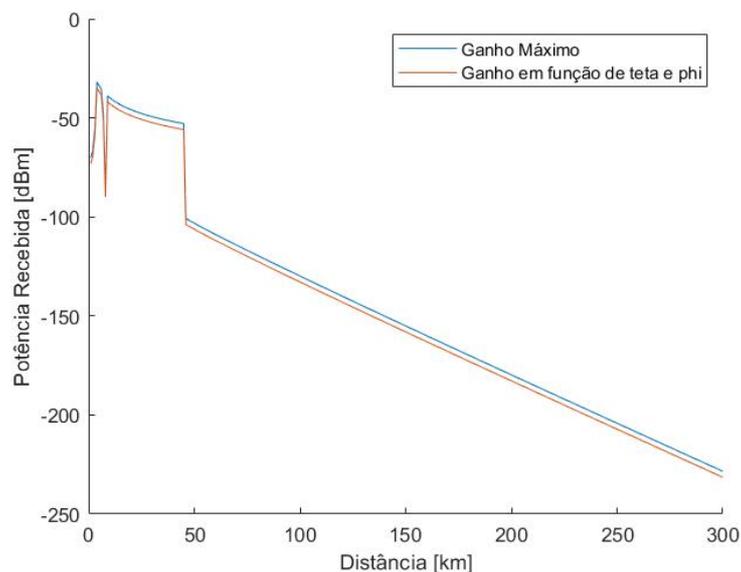


Figura 3.30. Comparação da potência recebida com diferentes valores de ganho com atenuação de obstáculo.

Como é possível observar nos gráficos comparativos, estes correspondem ao que é esperado. A potência recebida, quando considerado o ganho em função dos ângulos, mesmo na situação mais

favorável para a antena omnidirecional, é ligeiramente inferior à potência recebida quando considerado o ganho máximo e constante.

Assim, conclui-se que o programa desenvolvido para a resolução do problema em estudo comporta-se de acordo com o esperado e está apto a ser utilizado para a realização dos diversos testes ao possível sistema a implementar.

Capítulo 4

Análise de Resultados

Neste capítulo são descritos os cenários para a análise de desempenho e das soluções propostas na implementação do modelo. São apresentadas as antenas para a realização dos estudos e ainda os resultados obtidos. Por fim é realizada a análise dos resultados obtidos.

4.1 Cenários em Estudo

No presente capítulo são apresentados os cenários de aplicação do modelo. São testadas várias antenas, percebendo qual a configuração adequada para o sistema em estudo.

Para o estudo a realizar são considerados três aspetos: a localização das estações terrestres, as antenas que se encontram instaladas nas aeronaves e as antenas que poderão vir a ser instaladas nas estações terrestres.

Como foi visto na secção 3.2, serão consideradas cinco estações terrestres distintas, que se encontram localizadas nas ilhas das Flores, Faial, Terceira, São Miguel e Santa Maria.

Na Secção 3.5, foram apresentados os diagramas de radiação das antenas que se encontram instaladas nas aeronaves. Como tal, para a realização do projeto do sistema de comunicações a implementar nos Açores é necessário perceber qual o tipo de antena mais favorável a utilizar. Deste modo, realizou-se a pesquisa de várias antenas, compatíveis com os requisitos operacionais do sistema. Após a pesquisa, escolheram-se três antenas distintas para a realização dos testes no modelo desenvolvido. No final dos testes, apresentar-se-á a melhor solução para o projeto do sistema, de entre as antenas escolhidas.

Para a realização dos testes, de entre todas as antenas analisadas, foram escolhidas duas antenas omnidirecionais: aquela que apresenta o maior valor de ganho e a que apresenta o menor valor de ganho. Adicionalmente, foi escolhida uma antena setorial com o maior ganho.

O facto de serem estudadas antenas com diagramas de radiação diferentes leva a que os resultados obtidos, no que concerne ao alcance de cobertura e às zonas de sombra, também sejam diferentes.

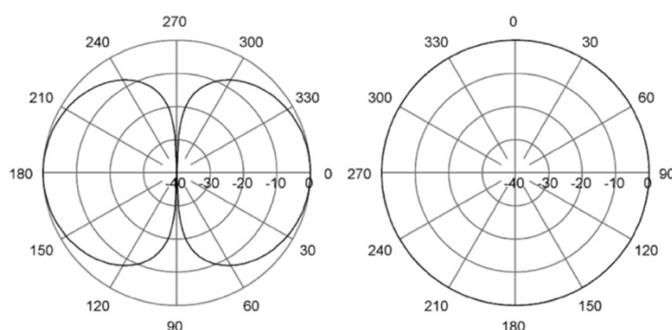
As antenas omnidirecionais são submetidas a dois tipos de testes: o primeiro com a antena localizada no topo da torre de suporte; o segundo com a antena a cerca de dois terços da altura máxima da torre de suporte. Como foi visto no capítulo anterior, o facto da antena omnidirecional não se encontrar no topo da torre de suporte leva a que o seu diagrama de radiação sofra alterações, o que influencia os resultados relativamente aos diagramas de cobertura. Relativamente ao segundo teste, a antena é manipulada de forma que o máximo de ganho da mesma se encontre direcionado para localizações mais afetadas pela zona de sombra, considerando sempre a mesma altura.

Relativamente às antenas setoriais, o diagrama de radiação não sofre alterações devido à torre de suporte, como tal a localização em termos de altura na mesma não é um fator limitador, no que concerne ao diagrama de radiação. Contudo, no que diz respeito ao número de antenas utilizado por estação terrestre, este é avaliado por forma a que se consiga obter uma cobertura total dada pelo conjunto de antenas o mais semelhante possível a uma antena omnidirecional.

A primeira antena em estudo é a antena 7500143 [AmPr20], que é omnidirecional e é a que, de todas as estudadas, apresenta o menor valor de ganho. Na Tabela 4.1 são apresentadas as características da antena que são relevantes para os testes e na Figura 4.1 encontra-se o diagrama de radiação da mesma.

Tabela 4.1. Especificações da antena 7500143 (adaptado de [AmPr20]).

Diagrama de Radiação	Omnidirecional
Ganho [dBi]	2.2



(a) Plano Vertical.

(b) Plano Horizontal.

Figura 4.1. Diagrama de radiação da antena 7500143 (extraído de [AmPr20]).

Para o primeiro teste é considerado o diagrama de radiação como apresentado na Figura 4.1. Assim as expressões para os diagramas de radiação vertical e horizontal da presente antena, são descritos por (4.1) e (4.2), respetivamente.

$$f_{ET}(\theta) = \left| \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos(\theta)\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right|^2 \quad (4.1)$$

$$f_{ET}(\phi) = 1 \quad (4.2)$$

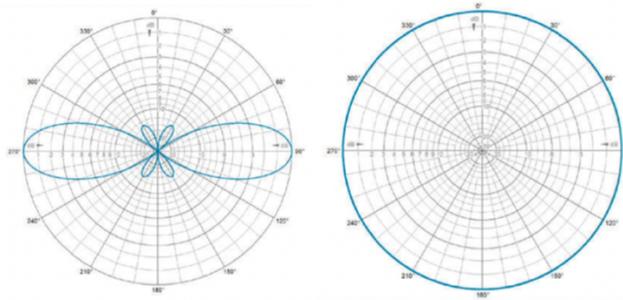
A segunda antena estudada, também omnidirecional, é a antena 470.31.05.00 [AmPr20]. Na Tabela 4.2 são apresentadas as características da antena que são relevantes para os testes e na Figura 4.2 encontra-se o diagrama de radiação da mesma.

Tabela 4.2. Especificações da antena 470.31.05.00 (adaptado de [AmPr20]).

Diagrama de Radiação	Omnidirecional
Ganho [dBi]	5.2

Para os testes com a presente antena é considerado o diagrama de radiação apresentado na Figura 4.2. Assim as expressões para os diagramas de radiação vertical e horizontal da presente antena, são descritos por (4.3) e (4.2), respetivamente.

$$f_{ET}(\theta) = \left| \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos(\theta)\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right|^2 \frac{1}{3} \frac{\sin(3\pi\cos(\theta))}{\sin(\pi\cos(\theta))} \quad (4.3)$$



(a) Plano vertical.

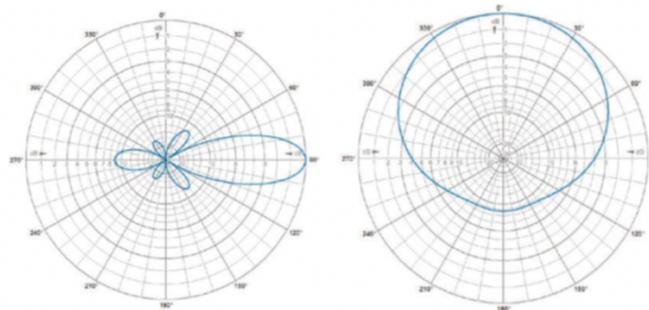
(b) Plano Horizontal.

Figura 4.2. Diagrama de radiação da antena 470.31.05.00 (extraído de [AmPr20]).

A terceira antena estudada é a antena S.M2-145 [AmPr20] e, de todas é a única setorial que é utilizada nos testes. Na Tabela 4.3 são apresentadas as características da antena que são relevantes para os testes e na Figura 4.3 encontra-se o diagrama de radiação da mesma.

Tabela 4.3. Especificações da antena S.M2-145 (extraído de [AmPr20]).

Diagrama de Radiação	Setorial
Largura feixe 3dB	36°
Ganho [dBi]	7.2



(a) Plano vertical.

(b) Plano Horizontal.

Figura 4.3. Diagrama de radiação da antena S.M2-145 (extraído de [AmPr20]).

Para o primeiro teste é considerado o diagrama de radiação como apresentado na Figura 4.3. Assim, as expressões para os diagramas de radiação vertical e horizontal da presente antena, são dadas por (4.4) e (4.5), respectivamente.

$$f_{ET}(\theta) = \left| \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos(\theta)\right] - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right|^2 \frac{1}{3} \frac{\sin\left(3\frac{5\pi}{2}\cos(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{5\pi}{2}\cos(\theta)\right)} \quad (4.4)$$

$$f_{ET}(\phi) = \frac{1 + \frac{\cos(\phi)}{2}}{1.5} \quad (4.5)$$

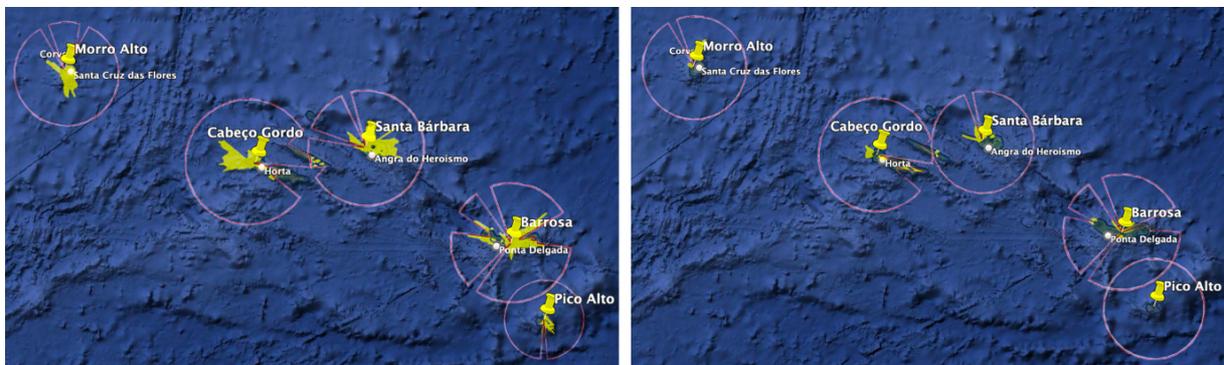
4.2 Estações Omnidirecionais

Nos primeiros testes realizados considerou-se a configuração mais simples do sistema, i.e., em todas as estações terrestres são consideradas antenas iguais e omnidirecionais. Para isso foram realizados testes com as duas antenas omnidirecionais localizadas no topo das torres de suporte para as três altitudes de voo das aeronaves. Nas figuras apresentadas é possível observar a cobertura garantida por cada estação terrestre e ainda as zonas de sombra.

Quando analisados os resultados apresentados na Tabela 4.4 e na Figura 4.4 percebe-se que as diferenças se prendem com as zonas de sombra quando considerada esta antena. Quanto maior for a altitude de voo a que a aeronave se encontra, menores vão ser as zonas de sombra.

Tabela 4.4. Alcance máximo de cobertura quando usada a antena 7500143.

Alcance Máximo de Cobertura [km]					
Estação Terrestre	Morro Alto	Cabeço Gordo	Santa Bárbara	Barrosa	Pico Alto
$h_A [\text{m}] = 20$	64	64	64	64	46
$h_A [\text{m}] = \begin{cases} 300 \\ 600 \end{cases}$	64	64	64	64	64



(a) Altitude de voo de 20 m.

(b) Altitude de voo de 600 m.

Figura 4.4. Diagramas de cobertura e sombra da antena 7500143 no topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).

Para confirmar a existência das zonas de sombra foram analisados simultaneamente os gráficos que apresentam a potência recebida em função da distância entre terminais. Assim, na Figura 4.5 encontra-se um exemplo do mesmo, correspondente à estação terrestre de Morro Alto numa direção de 310° contabilizado a partir do ponto cardinal Norte no sentido dos ponteiros do relógio. Quando comparadas as Figura 4.4 (a) e a Figura 4.4 (b), percebe-se que estas se encontram concordantes. A partir da Figura 4.5 é possível notar que nas proximidades da estação terrestre existe uma zona de sombra mais extensa e posteriormente uma área em que é garantida a cobertura até à distância de alcance máximo de cobertura.

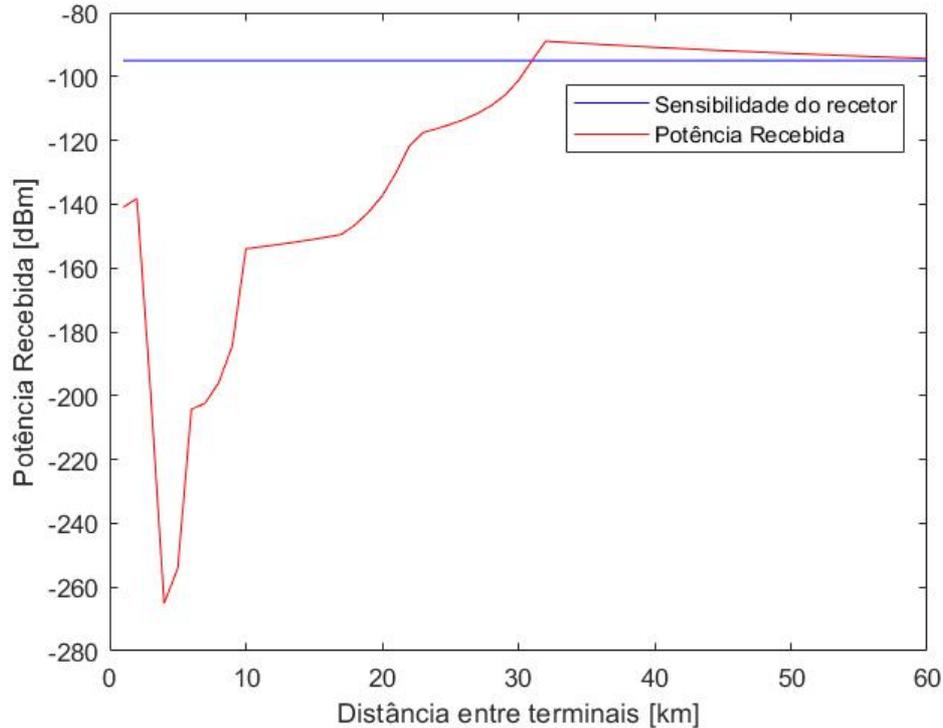


Figura 4.5. Potência recebida em função da distância na direção no Morro Alto na direção de 310°.

Quando comparado o desempenho da presente antena com os requisitos de cobertura percebe-se que esta não cumpre os mesmos, visto que é necessária uma cobertura de 200 km a uma altitude de 600 m. Assim esta não será uma antena indicada para o sistema em análise visto que não cumpre os requisitos operacionais.

Quando analisados os resultados das simulações para a antena 470.31.05.00 percebe-se que, ao contrário da antena analisada anteriormente, esta antena cumpre os requisitos operacionais. Quando comparadas as Tabelas 4.4 e 4.5 constata-se que houve melhorias quanto ao alcance máximo de cobertura para a maioria das altitudes de voo estudadas. Quando comparadas as Figuras 4.4 e 4.6 percebe-se ainda que as zonas de sombra são inferiores quando usada a antena 470.31.05.00, tanto para uma altitude de voo de 20 m como para os 600 m.

Em todos os resultados apresentados anteriormente na presente secção as antenas foram consideradas no topo das torres de suporte. Nos testes seguintes as antenas são consideradas a uma altura de aproximadamente dois terços da altura máxima da torre de suporte. Com as variáveis consideradas foram realizados os diversos testes, com as antenas direcionadas para diferentes locais, para as três altitudes de voo e para as duas antenas. Os resultados seguidamente apresentados são os melhores que foi possível obter para as condições em estudo.

O alcance máximo de cobertura obtido para a antena 7500143 mantém-se inalterado quando comparado com o resultado obtido com a antena no topo da torre de suporte, apresentado na Tabela 4.4. No entanto, no que concerne à área de cobertura esta diminui significativamente, como é possível observar na Figura 4.7.

Tabela 4.5. Alcance máximo de cobertura quando usada a antena 470.31.05.00.

Alcance Máximo de Cobertura [km]						
Estação Terrestre	Morro Alto	Cabeço Gordo	Santa Bárbara	Barrosa	Pico Alto	
h_A [m]	20	75	84	78	75	46
	300	170	180	174	170	134
	600	203	213	206	203	166



(a) Altitude de voo de 20 m.



(b) Altitude de voo de 600 m.

Figura 4.6. Diagramas de cobertura e sombra da antena 470.31.05.00 no topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).



(a) Altitude de voo de 20 m.

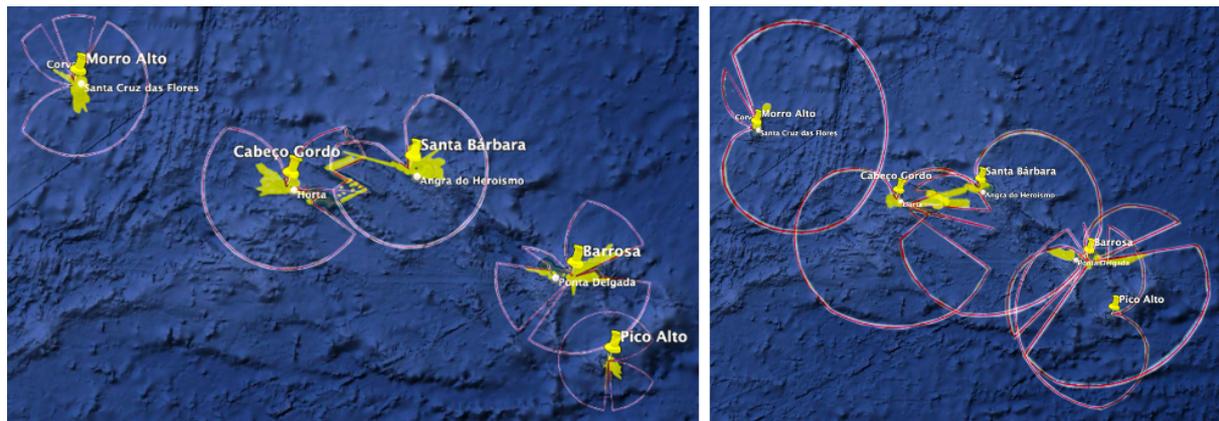


(b) Altitude de voo de 600 m.

Figura 4.7. Diagramas de cobertura e sombra da antena 7500143 a dois terços do topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).

Quando analisado o alcance de cobertura da antena 470.31.05.00 quando colocada a dois terços da altura máxima da torre de suporte percebe-se que o valor do alcance máximo não sofre qualquer tipo de alterações. No entanto verificaram-se alterações no que diz respeito à área de cobertura, como é

possível observar na Figura 4.8.



(a) Altitude de voo de 20 m.

(b) Altitude de voo de 600 m.

Figura 4.8. Diagramas de cobertura e sombra da antena 470.31.05.00 a dois terços do topo da torre de suporte (adaptado de [GoEP21]).

Quando comparado o desempenho das duas antenas, percebe-se que ambas perdem performance quando colocadas a dois terços da altura máxima da torre de suporte. Também é possível constatar que, caso se opte por usar uma antena omnidirecional no sistema, entre as estudadas, deve-se optar pela antena 470.31.05.00, visto que das duas é a única que cumpre os requisitos operacionais e apresenta áreas de sombra inferiores.

A partir da Figura 4.8 b) é ainda possível perceber que a nova estação terrestre, na ilha de Santa Maria, permitiu aumentar a área total de cobertura do sistema e ainda mitigar zonas de sombra referentes à estação terrestre mais próxima.

Pelas figuras é possível constatar que na zona entre as estações terrestres de Cabeço Gordo e Santa Bárbara é o local onde existe a maior prevalência da zona de sombra quando considerada a antena 470.31.05.00. Estas zonas de sombra devem-se à Ilha do Pico, mais especificamente à Montanha do Pico que, sendo o ponto de maior altitude de Portugal, gera perdas devido a obstáculos acabando por obstruir a ligação. Como tal, para efeitos de estudo, foi considerada uma estação terrestre no topo da montanha do Pico. Considerando-se a mesma antena, 470.31.05.00, colocada numa torre de suporte de 20 m de altitude e sabendo que a altitude do ponto onde se encontra instalada a antena é 2 351 m relativamente ao nível médio das águas do mar.

Quando analisados os resultados obtidos observa-se que, caso existisse a possibilidade de instalar uma estação terrestre no topo da Montanha do Pico, o seu alcance máximo seria superior ao das restantes estações terrestres, como era expectável e as zonas de sombra eram menos extensas, como é possível observar na Tabela 4.6 e na Figura 4.9.

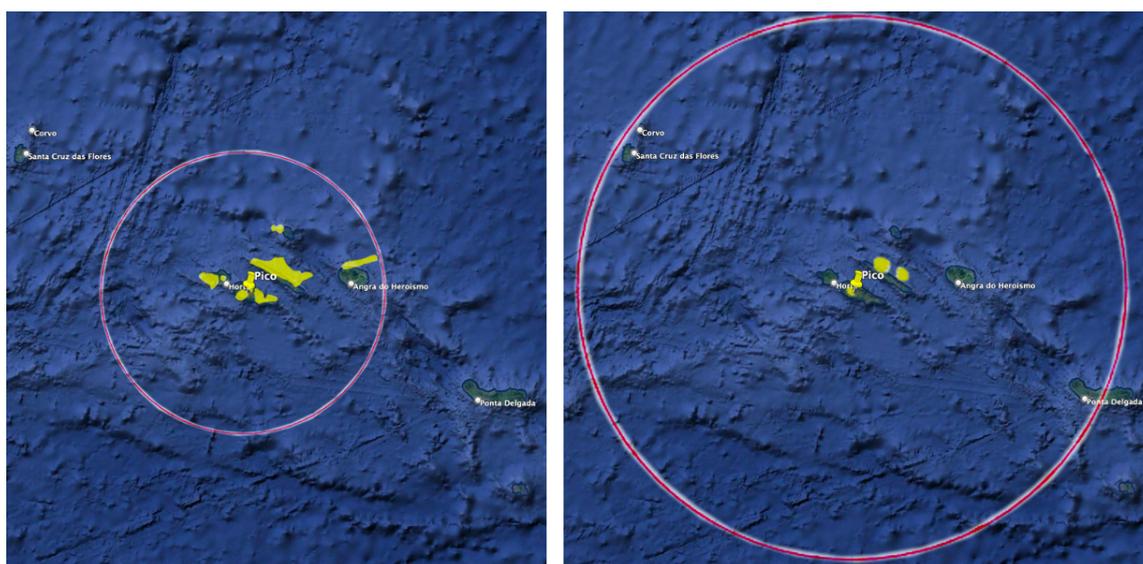
Quando comparadas as Figuras 4.6 e 4.9 percebe-se que na zona da Ilha do Pico, entre as estações terrestres de Cabeço Gordo e Santa Bárbara, as zonas de sombra diminuem significativamente se fosse considerada uma estação terrestre alternativa na Ilha do Pico, resultado representado pela Figura 4.9. Outro benefício possível com a instalação da estação terrestre na Montanha do Pico é o

facto da cobertura garantida por esta estação terrestre conseguir mitigar a maioria das zonas de sombra existentes no seu raio de cobertura.

Esta situação não é expectável que se concretize devido à impossibilidade de instalar as antenas nesta localização, visto que não existem torres de suporte para este fim nesta localização. Assim, visto que todas as estações terrestres consideradas no sistema se encontram na melhor localização possível, i.e., nos pontos mais altos das respetivas ilhas, a única localização alternativa seria instalar uma estação terrestre na Ilha do Pico. Outro fator que se pode revelar limitador para a instalação da estação terrestre alternativa são os aspetos logísticos, i.e., seria necessário adquirir todo o material necessário à instalação da mesma e ainda o facto da manutenção da mesma ser difícil, visto que é um local de difícil acesso.

Tabela 4.6. Alcance máximo de cobertura quando considerada uma estação terrestre alternativa na Ilha do Pico usando a antena 470.31.05.00.

h_A [m]		20	300	600
Estação Terrestre	Pico	145	241	275



(a) Altitude de voo de 20 m.

(b) Altitude de voo de 600 m.

Figura 4.9. Diagramas de cobertura e sombra da antena 470.31.05.00 no topo da torre de suporte quando considerada uma estação terrestre na Ilha do Pico (adaptado de [GoEP21]).

Na maioria dos casos estudados o alcance máximo obtido foi igual à distância máxima de aplicação do modelo de Espaço Livre. Tal deve-se ao facto do valor das perdas para o modelo Trans-horizonte ser muito superior ao das perdas no modelo de Espaço Livre. Deste modo, a potência recebida tem uma diminuição abrupta na zona de transição entre os modelos, deixando de ser possível realizar as comunicações.

Os critérios de avaliação da qualidade da ligação não foram considerados na análise da ligação. Tal deve-se ao facto de existir um decaimento contínuo e regular da qualidade da ligação até que, na zona

de transição entre os modelos, existe a quebra abrupta e deixa de ser possível estabelecer a ligação entre os terminais.

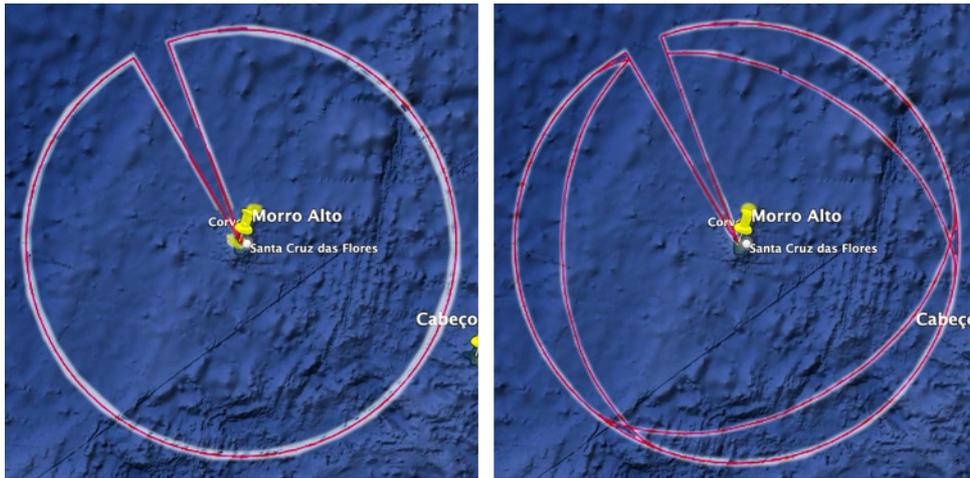
4.3 Estações Setoriais

De seguida foi testado o desempenho do sistema considerando a antena setorial. À semelhança das antenas omnidirecionais foi testado o seu desempenho para todas as estações terrestres e para as três altitudes de voo consideradas no estudo. Para os testes efetuados foram testadas duas configurações de antenas. Considerou-se uma configuração com duas antenas setoriais por estação terrestre e outra considerando três antenas setoriais, com o objetivo de, no final, o diagrama de cobertura obtido fosse semelhante ao de uma antena omnidirecional. Percebe-se que seriam necessárias três antenas do tipo S.M2-145 para garantir a cobertura desejada.

A Tabela 4.7 apresenta os valores de alcance máximo do sistema para as três altitudes de voo da aeronave quando as antenas são consideradas no topo da torre de suporte com uma diferença de 120° entre elas. Nas Figuras 4.10 a 4.14 encontram-se os diagramas dos alcances máximos de cobertura e os diagramas de sombra para a altitude de voo de 600 m quando as antenas são consideradas no topo da torre de suporte para a antena omnidirecional 470.31.05.00 e para o conjunto das antenas setoriais S.M2-145.

Tabela 4.7. Alcance máximo de cobertura quando usado o conjunto das três antenas S.M2-145.

Alcance Máximo de Cobertura [km]						
Estação Terrestre	Morro Alto	Cabeço Gordo	Santa Bárbara	Barrosa	Pico Alto	
h_A [m]	20	75	84	78	75	47
	300	170	180	174	170	135
	600	203	213	206	203	167

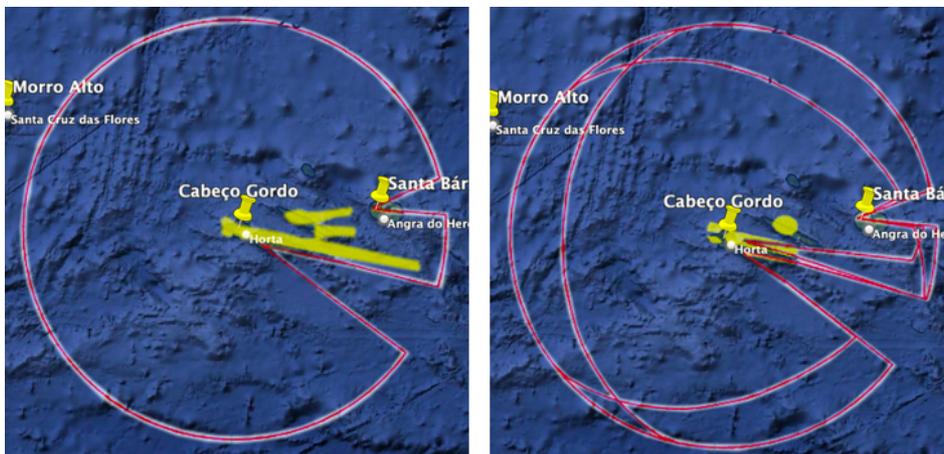


(a) Antena 470.31.05.00.

(b) Três antenas S.M2-145.

Figura 4.10. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Morro Alto (adaptado de [GoEP21]).

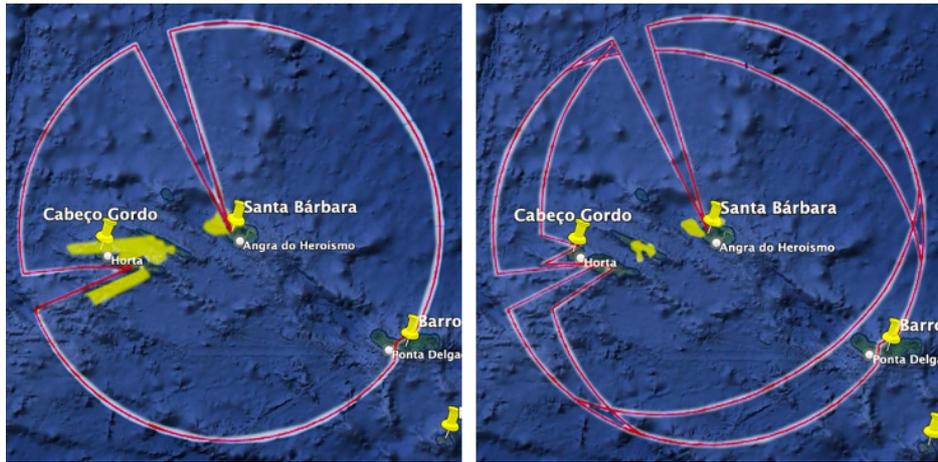
Quando comparadas as Tabelas 4.6 e 4.7 percebe-se que em termos de alcance máximo de cobertura a configuração com a antena omnidirecional 470.31.05.00 ou com o conjunto das setoriais seria muito semelhante, verificando-se apenas um ligeiro aumento na estação terrestres de Pico Alto, em Santa Maria. Em valores absolutos verificou-se um aumento de 1 km, e em termos relativos verificou-se um aumento de 2.2 %. No entanto, as diferenças prendem-se com as zonas de sombra obtidas. Nas Figuras 4.10 a 4.14 é possível analisar as zonas de sombra de cada estação terrestre quando usada a antena omnidirecional 470.31.05.00 ou as três antenas setoriais S.M2-145.



(a) Antena 470.31.05.00.

(b) Três antenas S.M2-145.

Figura 4.11. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Cabeço Gordo (adaptado de [GoEP21]).

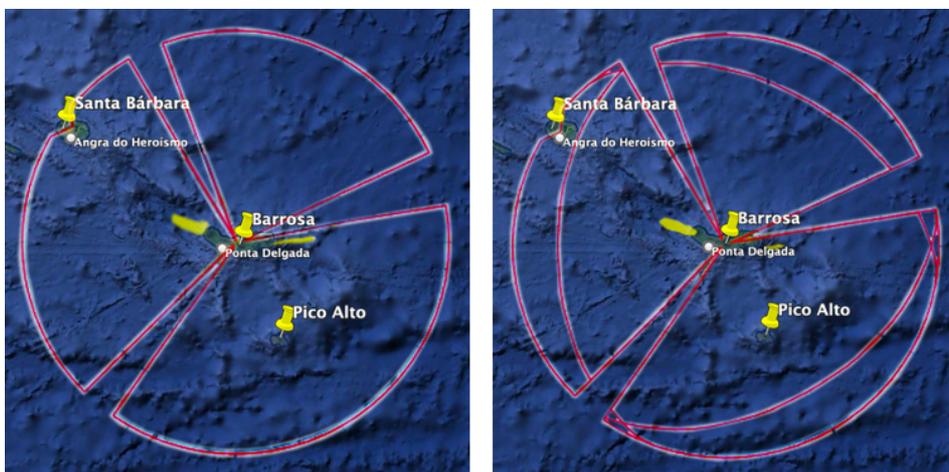


(a) Antena 470.31.05.00.

(b) Três antenas S.M2-145.

Figura 4.12. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Santa Bárbara (adaptado de [GoEP21]).

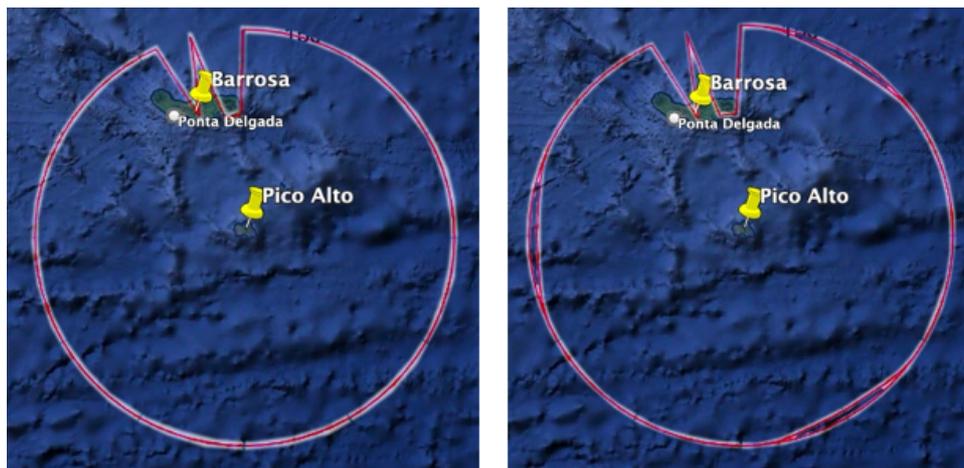
Quando comparadas as zonas de sombra para todas as estações terrestres considerando a antena omnidirecional de melhor desempenho e as três antenas setoriais percebe-se que existem melhorias significativas quando usado o conjunto das três antenas setoriais. A estação terrestre de Pico Alto permanece sem zonas de sombra. No entanto, como visto anteriormente, aumenta em 1 km o seu alcance. No que concerne a todas as outras estações terrestres observa-se uma diminuição significativa nas áreas das zonas de sombra, sendo que a estação terrestre com a melhoria mais significativa é a de Cabeço Gordo.



(a) Antena 470.31.05.00.

(b) Três antenas S.M2-145.

Figura 4.13. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre da Barrosa (adaptado de [GoEP21]).



(a) Antena 470.31.05.00.

(b) Três antenas S.M2-145 .

Figura 4.14. Alcance de cobertura e zonas de sombra da estação terrestre de Pico Alto (adaptado de [GoEP21]).

Posteriormente foi analisado o desempenho desta mesma configuração quando as antenas são instaladas a dois terços da altura máxima da torre de suporte, à semelhança das antenas estudadas anteriormente. Quando analisados os resultados obtidos percebe-se que a diferença de alturas das duas configurações das antenas não é suficiente para exercer influência significativa nos resultados obtidos. Assim, no que diz respeito ao alcance máximo de cobertura este diminuiu na ordem dos metros, podendo considerar-se a Tabela 4.7 como referência para os alcances máximos obtidos. Quando consideradas as zonas de sombra, estas mantêm-se inalteradas. Deste modo as Figuras 4.10 a 4.14 alíneas b) também são representativas do desempenho do sistema quando as antenas são consideradas a dois terços da altura máxima da torre de suporte.

Quando comparados os desempenhos das duas antenas com melhor performance conclui-se que no caso de existir possibilidade da antena ser instalada no topo da torre de suporte, tanto a antena omnidirecional 470.31.05.00, como o conjunto das três antenas setoriais S.M2-145 cumprem os requisitos operacionais. Como tal, se a escolha dependesse apenas do alcance máximo de cobertura qualquer uma das duas poderia ser escolhida para a implementação no sistema. No entanto, também se pretende mitigar, tanto quanto possível, as zonas de sombra. Assim, a melhor configuração para o sistema, no caso de ser possível instalar as antenas no topo da torre de suporte será a utilização do conjunto das três antenas setoriais. A antena omnidirecional 7500143 foi excluída visto que não cumpre os requisitos operacionais.

Quando considerada a hipótese das antenas terem que ser colocadas a dois terços da altura máxima da torre de suporte, a escolha prende-se entre a antena omnidirecional 470.31.05.00 e as três antenas setoriais S.M2-145, visto que são as únicas que cumprem os requisitos operacionais. Quando analisados os desempenhos das antenas, visto que a cobertura garantida pela antena omnidirecional é dada pela Figura 4.8 e a cobertura assegurada pelas três antenas setoriais é aproximadamente igual à cobertura garantida pelas três antenas no topo da torre de suporte, conclui-se que a melhor configuração seria o conjunto das três antenas setoriais.

Deste modo conclui-se que apesar da antena omnidirecional 470.31.05.00 cumprir os requisitos operacionais, a melhor alternativa a aplicar ao sistema, independentemente da altura a que as antenas são instaladas, é a utilização de três antenas setoriais S.M2-145.

No estudo efetuado, todas as estações terrestres consideradas se encontram no ponto com a altitude mais alta da respetiva ilha, o que faz com que não existam localizações alternativas para as estações terrestres dentro da própria ilha. No entanto, quando analisada a hipótese de instalar uma estação terrestres na Ilha do Pico, Figura 4.9, verifica-se que esta seria uma localização alternativa que traria melhorias ao sistema, visto que o seu alcance levaria a que determinadas zonas de sombra fossem mitigadas e as zonas de sombra desta estação terrestre fossem reduzidas. Contudo, não é expectável que esta alternativa se concretize devido à impossibilidade de instalar as antenas nesta localização, visto que não existem infraestruturas necessárias para este fim nesta localização. Como foi referido anteriormente, as questões logísticas levam a que seja uma alternativa de difícil execução.

No que concerne à avaliação da qualidade de serviço, à semelhança do que foi referido na secção anterior, a avaliação não foi realizada visto que existe uma degradação gradual da qualidade do sinal até que se verifica uma quebra abrupta, quebra essa que automaticamente impossibilita a realização de comunicações.

Capítulo 5

Conclusões

Este é o último capítulo do presente trabalho. Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido e ainda algumas possibilidades para trabalhos futuros que poderão ser realizados no seguimento da presente dissertação.

O objetivo da presente dissertação foi desenvolver um modelo que otimizasse a cobertura do sistema de comunicações aeronáuticas a instalar nos Açores tendo em conta os requisitos operacionais. Esta otimização visava a aumentar o alcance máximo de cobertura e a diminuir as zonas de sombra, tanto quanto possível. Assim, numa fase inicial da análise das possíveis futuras características do sistema foi considerado um sistema semelhante que outrora se encontrou instalado no arquipélago dos Açores.

O Capítulo 1 foi iniciado com o enquadramento do tema, designadamente pelas responsabilidades das FA e em especial da FAP no que diz respeito às missões de apoio à população. O sistema em estudo é de apoio, mais especificamente, às missões de busca e salvamento. Deste modo foram apresentados os números de vidas salvas e de horas de voo realizadas no âmbito deste tipo de missão nos Açores. De seguida foram apresentados os motivos que levaram ao desenvolvimento da presente dissertação e ainda os respetivos objetivos. No final deste capítulo descreve-se a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 são estudados os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do tema e ainda é apresentado o estado da arte. A primeira secção deste capítulo apresenta a arquitetura e especificações de um sistema semelhante que outrora se encontrou instalado nos Açores. Este sistema serviu como base de estudo ao modelo desenvolvido, visto que ambos os sistemas têm características semelhantes, como o caso das localizações da maioria das estações terrestres. Adicionalmente, os requisitos operacionais mantiveram-se inalterados. Na secção seguinte são apresentados os modelos de propagação que serão usados no desenvolvimento do modelo. Na terceira secção são estudadas as características das antenas, tanto omnidirecionais como setoriais, para posteriormente ser feita a análise de possibilidades de antenas a instalar no sistema. Seguidamente, estuda-se a qualidade de serviço para voz e como esta pode ser analisada. Por fim, é apresentado o estado da arte. Nesta secção são apresentados trabalhos realizados anteriormente no âmbito das comunicações aeronáuticas VHF. A análise dos mesmos revela-se pertinente para o desenvolvimento da presente dissertação.

No Capítulo 3 é apresentada a visão genérica do modelo que será implementado, de seguida são abordados os cenários de aplicação do modelo e todas as características do sistema necessárias à implementação do mesmo. Posteriormente é realizado o estudo dos modelos de propagação que têm aplicação no sistema em estudo, seguindo-se da visão geral da aplicação dos modelos de propagação ao modelo a desenvolver e ainda algumas considerações sobre o desvanecimento. Adicionalmente, são apresentados os diagramas de radiação das possibilidades de antenas a instalar no sistema e ainda os diagramas de radiação das antenas que as aeronaves fazem uso. No final deste capítulo é descrito o processo de formulação do modelo a implementar através da apresentação do método de desenvolvimento do mesmo terminando com a aferição do modelo desenvolvido.

O modelo a desenvolver pretende dar apoio às missões de busca e salvamento realizadas no arquipélago dos Açores. Estas missões são efetuadas, maioritariamente, pelas aeronaves C-295M e EH-101. Atualmente não existe nenhum sistema VHF a operar na zona referida e existe necessidade de mitigar as zonas em que não existe cobertura por outros sistemas de comunicação disponíveis.

Relativamente aos cenários de operação, foram considerados três distintos, visto que as duas aeronaves têm comportamentos de voo diferentes durante a realização das missões. Os cenários têm

em conta que os resultados obtidos devem cumprir os requisitos de operação, i.e., que a uma altitude máxima de 600 m seja possível obter um alcance de cobertura de, no mínimo, 200 km. No que diz respeito à aeronave de asa fixa, tipicamente, esta efetua os voos de ida até ao local pretendido a uma altitude de 300 m e os voos de regresso a 600 m. No que concerne à aeronave EH-101 esta, geralmente, efetua os trajetos a uma altitude de 600 m. No entanto, esta última, sendo helicóptero, tem a capacidade de realizar voo estacionário para a realização de salvamentos e, neste caso, mantém-se a altitudes que rondam os 20 m. Devido a estes três casos, foram considerados três cenários diferentes conforme as três altitudes de voo mais comumente utilizadas pelas duas aeronaves.

Para perceber se ao longo do percurso radial em relação às estações terrestres existia cobertura foi analisada a potência recebida nos terminais. Para isso, nos testes iniciais foram utilizadas as características do sistema que se encontrou instalado nos Açores no passado. Assim, foi considerado o ganho das estações terrestres de 2.5 dBi, uma frequência de operação de 139.3 MHz, a sensibilidade dos terminais igual a -95 dBm e a potência de emissão igual a 43 dBm. Considerou-se, ainda, um ganho das antenas das aeronaves, igual a -3 dBi.

No que diz respeito aos modelos de propagação, numa análise preliminar, considerou-se que seriam utilizados o modelo de propagação em Espaço Livre, de seguida o modelo Terra Plana, posteriormente o modelo Terra Esférica e, por fim, o modelo de propagação para Comunicações Trans-horizonte. Sendo considerados em simultâneo, quando necessário, os modelos de *Knife-Edge* e de *Deygout*.

Quando analisadas as condições de aplicabilidade de cada modelo, percebeu-se que o modelo Terra Plana não pode ser usado no modelo a desenvolver, por a distância mínima de aplicação ser superior à distância máxima. O modelo Terra Esférica também foi excluído pois a distância máxima de aplicação do modelo terra esférica é inferior à distância mínima de aplicação do mesmo quando considerada a avaliação da prevalência de fenómenos de difração.

Assim, o modelo desenvolvido utiliza o modelo de propagação Espaço Livre até à distância máxima de aplicação do mesmo e após essa distância será aplicado o modelo de propagação para Comunicações Trans-horizonte. Em simultâneo é avaliado o perfil do terreno e é analisado se este poderá ser um obstáculo à ligação. No caso de existir um obstáculo único será utilizado o modelo de *Knife-Edge*. Caso existam múltiplos obstáculos, será utilizado o modelo de *Deygout*.

O desempenho das comunicações pode ser afetado por desvanecimento. No caso em estudo pode acontecer um dos dois tipos de desvanecimento mais comuns: rápido e lento, ou ambos em simultâneo. No desenvolvimento do modelo foi considerado o pior caso possível e, por isso, foi usada a margem de desvanecimento considerada típica para terminais em movimento. Deste modo considerou-se uma margem de desvanecimento igual a 15 dB.

Depois do desenvolvimento do modelo foi feita a sua aferição. Para isso foram testados os vários processos de desenvolvimento do modelo. Avaliou-se a evolução da potência recebida em função da distância entre terminais, tendo em conta os modelos de propagação em Espaço Livre e Trans-horizonte. Posteriormente foram comparados os valores obtidos no modelo desenvolvido com os resultados obtidos na calculadora gráfica *CASIO fx-9860GII SD*.

De seguida foi analisado o comportamento da potência recebida em função da distância. Esperava-se que este tivesse duas fases distintas: uma primeira fase em que as perdas de caminho são influenciadas pelo modelo de propagação Espaço Livre, até à distância máxima de aplicação do mesmo; e uma segunda fase em que as perdas de caminho são influenciadas pelo modelo de Comunicações Trans-Horizonte. Assim, esperava-se que a potência recebida apresentasse um degrau de transição entre estas duas fases, o que foi confirmado pelos resultados obtidos.

Todos os testes apresentados foram realizados sem considerar as perdas devido à existência de obstáculos. Como tal seria necessário perceber a correção com que se estavam a realizar os cálculos das perdas devido à presença de obstáculos.

Pretendeu-se perceber a evolução da potência recebida em função da distância, considerando as perdas devido à presença de obstáculos. Esperava-se que os resultados obtidos fossem semelhantes aos referidos, mas, desta vez, com desníveis nas zonas em que existiam obstáculos a obstruir a ligação. Os resultados revelaram-se de acordo com o esperado.

Adicionalmente, é necessário ter em conta para o estudo os diagramas de radiação das antenas instaladas nas aeronaves e das antenas instaladas nas estações terrestres. Como tal, o teste seguinte pretendia comparar a evolução do ganho considerando a variação dos ângulos e o valor constante do ganho máximo. Esperava-se que o primeiro fosse ligeiramente inferior, e o resultado confirmou a expectativa.

No Capítulo 4, são apresentados os cenários de aplicação do modelo. A avaliação dos cenários tem em conta resultados que foram obtidos na aferição do mesmo. Nos cenários analisados foram consideradas as cinco estações terrestres e os respetivos perfis de elevação, e ainda diferentes tipos de antenas: duas delas omnidirecionais e uma setorial.

Como a instalação das antenas na torre de suporte poderá depender de outras antenas previamente instaladas, foram considerados dois cenários diferentes no que concerne à localização das antenas. O primeiro cenário foi considerar as antenas instaladas no topo das torres de suporte. No segundo cenário consideraram-se as antenas a dois terços da altura máxima da torre de suporte. Quando considerado o segundo cenário, observaram-se diferenças significativas no que diz respeito ao diagrama de radiação das antenas omnidirecionais. No que concerne às antenas setoriais, considerou-se a instalação de três antenas por estação terrestre. Deste modo, a soma dos diagramas de radiação das três antenas equivale ao raio do diagrama de uma antena omnidirecional.

No que diz respeito às antenas, duas delas são omnidirecionais, uma com ganho máximo igual a 2.2 dBi, a antena 7500143; e outra com ganho máximo igual a 5.2 dBi, a antena 470.31.05.00; e uma antena setorial, com ganho máximo de 7.2 dBi, a antena S.M2-145. O objetivo seria perceber a diferença de desempenhos entre as antenas estudadas e se estas cumpriam os requisitos operacionais. Posteriormente pretendeu-se perceber se existiam melhorias significativas quando comparado o resultado destas antenas com a antena setorial, tanto a nível dos diagramas de cobertura como dos diagramas das zonas de sombra.

Para perceber a configuração mais indicada para o sistema em estudo foram realizados vários testes

com as antenas estudadas e, ainda, foi analisada a possibilidade de existirem localizações alternativas para as estações terrestres para melhorar a performance do mesmo.

Assim, começou-se por analisar a configuração mais simples do sistema, i.e., em todas as estações terrestres consideraram-se as mesmas antenas omnidirecionais e no topo da torre de suporte de todas as estações terrestres. Quando analisados os resultados da antena 7500143 percebeu-se que esta não cumpria os requisitos operacionais. O seu alcance máximo para uma altitude de voo da aeronave igual a 600 m era de 64 km, revelando-se insuficiente.

Quando analisados os resultados da antena 470.31.05.00 percebeu-se que esta antena cumpria os requisitos operacionais para as estações terrestres de Morro Alto, Cabeço Gordo, Santa Bárbara e Barrosa, sendo o valor mais baixo de alcance máximo igual a 203 km. Para a estação terrestre de Pico Alto não é possível cumprir os requisitos operacionais, pois tem um alcance máximo de 166 km. No entanto, quando comparados os diagramas das zonas de sombra percebeu-se que as áreas das zonas de sombra diminuíram significativamente.

Nos testes seguintes as antenas foram consideradas a uma altura de aproximadamente dois terços da altura máxima da torre de suporte. Assim, quando comparado o desempenho das duas antenas omnidirecionais, percebe-se que ambas perdem performance quando colocadas a dois terços da altura máxima da torre de suporte. Também foi possível constatar que, caso se opte por usar uma antena omnidirecional no sistema, entre as estudadas, deve-se optar pela antena 470.31.05.00, visto que das duas é a única que cumpre os requisitos operacionais e ainda as áreas de sombra são inferiores.

Percebeu-se também que entre as estações terrestres de Cabeço Gordo e Santa Bárbara é o local onde existe a maior prevalência de zonas de sombra quando considerada a antena 470.31.05.00. Estas zonas de sombra devem-se à Montanha do Pico, que se encontra entre a ilha do Faial e Terceira. Como tal, para efeitos de estudo, foi considerada uma estação terrestre no topo da Montanha do Pico.

Quando analisados os resultados obtidos, observou-se que, caso existisse a possibilidade de instalar uma estação terrestre no topo da Montanha do Pico, o seu alcance máximo seria superior ao das restantes estações terrestres, atingindo um valor de 275 km, e as zonas de sombra eram menos extensas, outra vantagem que se verifica é o facto da cobertura garantida por esta estação terrestre ter a capacidade de mitigar a maioria das zonas de sombra das estações terrestres à sua volta.

Posteriormente foi testado o desempenho do sistema considerando a antena setorial. Quando comparado o desempenho da antena omnidirecional 470.31.05.00 com o conjunto das três antenas setoriais S.M2-145 percebeu-se que o alcance máximo das duas antenas era igual. No entanto, observaram-se diferenças significativas no que diz respeito às zonas de sombra, sendo que a sua área diminui quando usadas as três antenas setoriais em detrimento da antena omnidirecional. Verificou-se ainda que a estação terrestre com as melhorias mais significativas foi a estação de Cabeço Gordo.

Posteriormente, foi analisado o desempenho desta mesma configuração quando as antenas setoriais são instaladas a dois terços da altura máxima da torre de suporte. Quando analisados os resultados obtidos percebeu-se que a diferença de alturas das duas configurações das antenas não é suficiente para influenciar os resultados obtidos, considerando assim que os resultados se mantiveram

inalterados tanto no que diz respeito ao alcance máximo como nas áreas das zonas de sombra.

Quando comparados os desempenhos das três antenas, conclui-se que a antena 7500143 é excluída das possibilidades, visto que não cumpre os requisitos operacionais. Conclui-se também que no caso de existir possibilidade da antena ser instalada no topo da torre de suporte, tanto a antena omnidirecional 470.31.05.00, como as três antenas setoriais S.M2-145 cumprem os requisitos operacionais.

No entanto, como se pretende mitigar as zonas de sombra tanto quanto possível, a melhor configuração para o sistema, tanto no caso de ser possível instalar as antenas no topo da torre de suporte, como a dois terços da altura máxima da mesma, seria a utilização do conjunto das três antenas setoriais.

No estudo efetuado, todas as estações terrestres consideradas se encontravam no ponto com a altitude mais alta da respetiva ilha, o que faz com que não existam localizações alternativas que melhorem a performance do sistema quando comparadas com as localizações consideradas. Contudo, quando analisada a hipótese de instalar uma estação terrestre na Montanha do Pico, verificou-se que esta seria uma localização alternativa que traria melhorias significativas ao sistema, visto que o seu alcance levaria a que determinadas zonas de sombra fossem mitigadas e, ainda, as zonas de sombra desta estação terrestre serem reduzidas. Contudo, não é expectável que esta alternativa se concretize devido à impossibilidade de instalar as antenas nesta localização, visto que não existem infraestruturas necessárias para este fim nesta localização. Outra condição para a impossibilidade da instalação da estação terrestre remete a questões logísticas, entre as quais o difícil acesso ao local em análise.

Os resultados dos testes realizados mostraram que o alcance máximo de cobertura é, em muitos dos casos analisados, igual à distância de transição entre os modelos Espaço Livre e Trans-horizonte, o que se deve ao facto de existir um aumento significativo no valor das perdas de caminho quando é feita a transição entre os dois modelos.

A avaliação da qualidade de serviço não foi realizada de modo detalhado visto que a qualidade da ligação decai gradualmente e continuamente com a distância até que, no ponto de transição entre modelos de propagação, existe a degradação total da ligação.

Relativamente às propostas para trabalhos futuros, a presente dissertação não considera alternativas específicas que visam mitigar as zonas de sombra. Como tal sugere-se o estudo de soluções para a eliminação das zonas de sombra, nomeadamente o estudo de novas localizações para as antenas das estações terrestres com recurso a repetidores. Sugere-se também o estudo da combinação dos sinais recebidos nas várias antenas instaladas na aeronave por forma a que o sinal resultante seja o melhor possível, aumentando assim a qualidade das comunicações e podendo trazer melhorias ao nível da cobertura. Outro estudo considerado pertinente seria o uso de aeronaves não tripuladas com função de repetidores por forma a aumentar a cobertura do sistema e assim beneficiar do alcance máximo de cobertura garantido pelas aeronaves em estudo. Finalmente, sugere-se a hipótese de realizar um estudo de complementaridade do sistema em estudo com o sistema de comunicações via satélite.

Anexo A

Antenas Instaladas nas Estações Terrestres

Neste anexo encontram-se as especificações das diferentes antenas que se encontraram instaladas nas estações terrestres, as antenas para as comunicações VHF-AM.

A.1 Fiberglass Collinear Antenna 2.5 dBd

No sistema de comunicações em estudo na presente dissertação é utilizada uma antena omnidirecional para as comunicações entre as estações terrestres e as aeronaves. O diagrama de radiação e as suas especificações são apresentadas na Figura A.1 e na Tabela A.1.

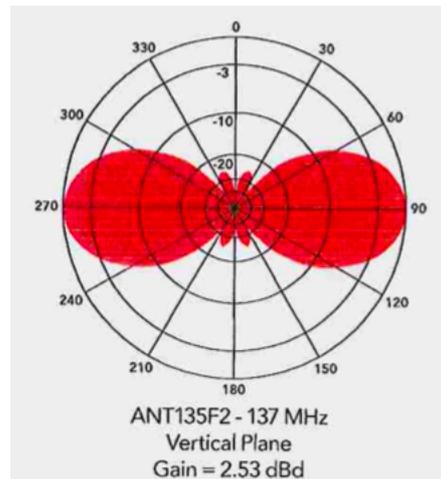


Figura A. 1. Diagrama de radiação vertical da antena omnidirecional (extraído de [Cart08]).

Tabela A. 1. Especificações das antenas omnidirecionais (extraído de [Cart08]).

Alcance de Frequência	125-150MHz
Ganho	4.65 dBi
Potência	500 W
VSWR	$\leq 1.51:1$
Diagrama de Radiação	Omnidirecional
HPBW/V	38°
Interface	<i>Recessed N-Fêmea</i>

Anexo B

Antenas Instaladas nas

Aeronaves

Neste anexo encontram-se as especificações das diferentes antenas que se encontram instaladas nas duas aeronaves para as comunicações VHF-AM.

B.1 Características das antenas instaladas nas aeronaves

A antena instalada na aeronave EH-101 para a realização das comunicações VHF-AM tem as características apresentadas na Tabela B.1.

Tabela B. 1. Especificações da antena instalada na aeronave EH-101 (extraído de [EMFA20e]).

Alcance de Frequência	108-174 MHz
Ganho	-3 dBi (108-174 MHz)
Potência	25 W
VSWR	2.5:1
Diagrama de Radiação	Omnidirecional

A antena instalada na aeronave C-295M para a realização das comunicações VHF-AM é a AS-4424/A e tem as características apresentadas na Tabela B.1.

Tabela B. 2. Especificações da antena instalada na aeronave C-295M (extraído de [EMFA20e]).

Alcance de Frequência	30-400 MHz
Ganho	-3 dBi (108-174 MHz)
Potência	23 W
VSWR	2.5:1
Diagrama de Radiação	Omnidirecional

Ambas as antenas são de pequenas dimensões, pelo que se considera um monopolo curto, como tal o diagrama de radiação de ambas assemelha-se ao da Figura B.1.

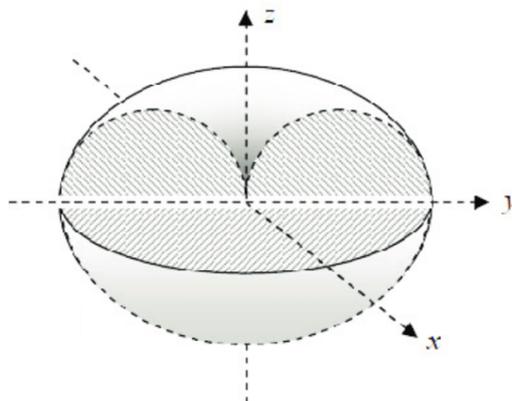


Figura B. 1 Diagrama de radiação aproximado das antenas das aeronaves (adaptado de [LDLL15]).

Anexo C

CST Simulation Tool

Neste anexo é apresentada a ferramenta *CST Simulation Tool*. São apresentadas algumas das principais características e funcionalidades do programa necessárias à simulação desenvolvida para a dissertação. Por fim são apresentados os resultados das simulações e uma breve descrição dos mesmos.

C.1 Recursos do programa e características

CST Studio Suite é um software de análise 3D para projetar, analisar e otimizar componentes e sistemas eletromagnéticos [Dass21a].

O *CST Studio Suite* é adequado para projetos na gama das altas frequências, simplificando o projeto da estrutura ao fornecer uma modelagem gráfica detalhada de sólidos, baseada no *kernel* de modelagem ACIS. Após o desenho do modelo e antes da simulação, o *software* aplica um procedimento de malha de forma automática, seguindo-se o processamento e a visualização dos resultados [Dass21a].

Ao iniciar o *CST Studio Suite*, é necessário configurar o modelo do projeto, onde são escolhidos os parâmetros básicos necessários à realização da simulação [Dass21a].

Para a simulação em análise, escolheram-se os parâmetros *Microwaves & RF & Optical* como área de aplicação, *Antennas* como *workflow* e *Wire* como o tipo de antena. Posteriormente, escolheu-se um solucionador para o fluxo de trabalho, neste caso, o Domínio do Tempo.

O programa oferece dois possíveis solucionadores desse tipo: o solucionador de Transientes, baseado na Técnica de Integração Finita (FIT) e o método Matriz de Linha de Transmissão (TLM), ambos em malha hexaédrica. Esses solucionadores simulam o comportamento do campo eletromagnético, mostrando os efeitos do domínio da frequência, permitindo o entendimento do desempenho das antenas enquanto simula o padrão de radiação das mesmas. Segundo [Dass19], para o caso em estudo, o solucionador mais adequado é o Transiente. Ao contrário do FEM, os requisitos numéricos do FIT escalam linearmente, i.e., o tempo de simulação aumenta na mesma proporção que o número de células da malha, permitindo a simulação de problemas maiores usando menos recursos computacionais e demorando menos tempo.

A malha hexaédrica é constituída por cubos de pequenas dimensões, formando as células em forma de grade. Cada célula representa um pequeno volume no espaço, tendo associado um comportamento específico de campo elétrico, E , e magnético, H . O comportamento dessas células é baseado no método de Yee, onde, em cada célula, os campos elétricos e magnéticos são organizados espacialmente de forma que cada elemento de E seja circundado por quatro elementos de H e cada elemento de H seja circundado por quatro elementos de E , descrevendo assim as equações de Maxwell no espaço. A representação de uma célula Yee é apresentada na Figura C.1.

Quanto maior o número de células usadas na simulação, mais precisa esta será. Porém, é importante notar que com o aumento do número de células, o tempo de simulação também pode aumentar. Assim, é necessário existir um balanço entre estes dois fatores. No entanto, o número total de células da malha não pode ser controlado diretamente, sendo resultado do tamanho das células: mín./máx. O resultando anterior dá o número de células da malha necessárias para a realização da simulação.

A definição da malha também é um aspeto muito importante a ter em conta, pois a qualidade e o tipo da malha afetarão o tempo e a precisão da simulação. Existem duas maneiras diferentes de definir uma malha hexaédrica sem ser necessário fazê-lo manualmente.

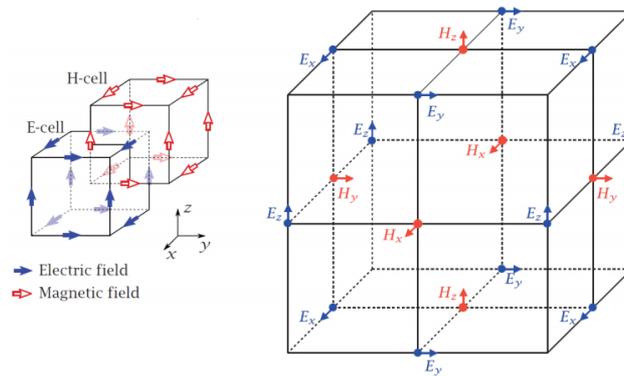


Figura C. 1. Representação de uma célula Yee (adaptado de [Laak15]).

Ao projetar a estrutura, o CST gera automaticamente uma malha adaptada ao projeto, a “Geração automática de malha com um sistema especializado”. Também é possível realizar o “Refinamento de Malha Adaptável” que descobre a melhor malha por um *loop*, onde uma malha inicial é criada e será redefinida gradualmente até se obter a solução final, adaptada ao projeto do utilizador.

Para fazer o controlo da malha, é necessário definir algumas configurações como [Dass21b]:

- **Célula máxima:** Define o maior tamanho de célula permitido no domínio de cálculo. Para simulações eletromagnéticas de alta frequência, o tamanho máximo da célula é frequentemente definido em relação ao comprimento de onda, a fim de fornecer uma taxa de amostragem espacial ideal. A maior frequência de interesse determina o menor comprimento de onda. Existem duas possibilidades para fornecer esta definição baseada no comprimento de onda do tamanho máximo da célula:
 - Células por comprimento de onda: Define o limite superior para o tamanho da célula em relação ao comprimento de onda enquanto também define a taxa de amostragem espacial para os sinais dentro da estrutura.
- **Célula mínima:** Usada para evitar o super-refinamento devido a pequenos detalhes geométricos, como regiões finas ou lacunas. Este parâmetro influencia a largura do intervalo de tempo e, portanto, a velocidade geral da simulação.
- **Fração da célula máxima próxima ao modelo:** O tamanho mínimo permitido da célula é calculado dividindo o tamanho máximo da célula próxima ao modelo por este valor.

Outro aspeto importante a considerar ao simular uma estrutura em CST são as condições de contorno, uma vez que, do ponto de vista computacional, todas as simulações requerem uma expansão finita. No CST, é utilizado um sistema de grade retangular, sendo definido por posições máximas e mínimas (X_{max} , X_{min} , Y_{max} , Y_{min} , Z_{max} , Z_{min} ,) em cada direção de coordenada a fim de identificar as seis superfícies limites.

Para simulação de alta frequência, existem sete condições de contorno possíveis: elétrico, magnético, aberto (PLM), periódico, parede condutora, célula unitária e, por fim, aberto (com espaço). Para a simulação em causa utilizou-se a última condição visto, que é a mais recomendada para problemas com antenas por se centrar na frequência de trabalho desejada.

C.2 Simulação

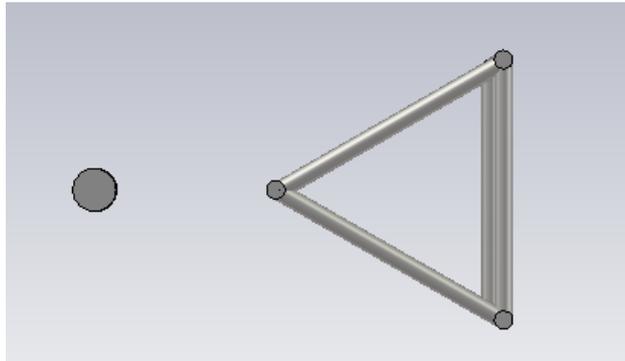


Figura C. 2. *Design* do dipolo com influência da torre de suporte no CST, vista de topo [extraído de CST].

Para a realização da simulação representada na Figura C.2 foram considerados os parâmetros apresentados na Tabela C.1. Além dos parâmetros apresentados, foi considerada uma distância entre a antena e a torre de suporte de 200 mm e a antena foi colocada num dos vértices do prisma.

Tabela C. 1. Parâmetros de design do dipolo e da estrutura da torre de suporte

Parâmetros do dipolo [mm]		Parâmetros da torre de suporte [mm]	
Comprimento de Onda	2141.37	Altura	2×10^3
Raio	60		
Comprimento	10^3	Raio dos tubos	50
<i>Feed gap</i>	40		

Configurando a frequência entre 130 e 150 MHz, o dipolo de meio comprimento de onda é alimentado com uma impedância de 50Ω e uma potência de entrada igual a 1W. Considerando as opções de malha, opta-se pelo tipo de malha hexaédrica, com precisão de -30 dB. Como propriedades de malha escolhidas, temos 15 células por comprimento de onda para perto do modelo e longe do modelo, resultando em 257.193 células de malha. O objetivo é obter o melhor equilíbrio entre a velocidade e a precisão da simulação.

Uma vez que a antena irradia para o espaço livre, devem utilizar-se as condições de limite aberto. No entanto, para a condição de limite aberto, para cálculos de campo distante, é necessário que exista um espaço entre a antena e os planos limite, para que se obtenham cálculos precisos.

Todas as simulações realizadas foram executadas num computador pessoal equipado com processador AMD Ryzen 5 2500U com CPU Radeon Vega Mobile Gfx com velocidade de relógio de 2GHz e 20 GB de RAM.

Anexo D

Tabela Comparativa

Neste anexo encontra-se uma tabela comparativa dos valores dos modelos de propagação Espaço Livre e Trans-horizonte em função da distância, calculados a partir da simulação numérica e a partir de cálculos.

D.1 Tabela Comparativa dos Comportamentos dos Modelos

Para perceber se a implementação do modelo foi realizada corretamente foi analisada a evolução dos dois modelos. Compararam-se os resultados das perdas de cada um dos modelos obtidos a partir da simulação numérica, as colunas LpEL e LpTH apresentadas na Tabela D.1, e cálculos efetuados manualmente, colunas LpEL' e LpTH'.

Tabela D. 1. Tabela comparativa das perdas de caminho dos modelos.

D(A-ET) [m]	LpEL [dB]	LpEL' [dB]	LpTH [dB]	LpTH' [dB]
1	75.319	75.319	82.2528	82.2528
10	95.319	95.319	123.0787	123.0787
20	101.3396	101.3396	136.5662	136.5662
30	104.8614	104.8614	145.4122	145.4122
40	107.3602	107.3602	152.4908	152.4908
50	109.2984	109.2984	158.6836	158.6836
60	110.882	110.882	164.3739	164.3739
70	112.2210	112.2210	169.7344	169.7344
80	112.3808	112.3808	275.0049	275.0049
90	114.4039	114.4039	180.0271	180.0271
100	115.3190	115.3190	185.3553	185.3553
110	116.9026	116.9026	190.4599	190.4599
120	116.9026	116.9026	195.5284	195.5284
130	117.5979	117.5979	200.566	200.566
140	118.2416	118.2416	205.5791	205.5791
150	118.8408	118.8408	210.5694	210.5694
160	119.4014	119.4014	215.5403	215.5403
170	119.9280	119.9280	220.4942	220.4942

180	120.4245	120.4245	225.4331	225.4331
190	120.8941	120.8941	230.3586	230.3586
200	121.3396	121.3396	235.2720	235.2720

Referências

- [AAIn20] *Airport Authority of India, Air Traffic Flow Management –India, Internal Report*, India, 2020 (http://us-indiaacp.com/downloads/seminars/atfm/ATFM_ACP.pdf).
- [AIPe16] Pereira, A., *Operacionalização, no contexto da Força Aérea, de um Sistema Aéreo Autônomo Não-Tripulado Classe II para Vigilância Marítima e Busca e Salvamento*, Tese de Mestrado, Academia da Força Aérea, Sintra, Portugal, 2016 (https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/14369/1/DISSERTACAO_ASPAL_PILAV_PEREIRA.pdf).
- [AmPr20] Amphenol Procom - Base Station Antennas, <https://amphenolprocom.com/products/base-station-antennas>, Aug. 2020.
- [ARJA20] Rodrigues, A., Sanguino, J., *Feixes Hertzianos – Formulário, Material de Apoio à Unidade Curricular de Sistemas de Telecomunicações Via Rádio*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2020 (<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/disciplinas/STVR77/2020-2021/1-semester/material-de-apoio>).
- [ASLM17] Al-Shehri, S., Loskot, P., Mert, M., *Common Metrics for Analyzing, Developing and Managing Telecommunication Networks*, Cornell University, USA, 2017. (<https://arxiv.org/pdf/1707.03290.pdf>).
- [AsRe05] Assembleia da República, *Parlamento-Estatuto e Competências-Constituição da República Portuguesa-Artigo 275º*, 2005. (<https://www.parlamento.pt/Legislacao/Paginas/ConstituicaoRepublicaPortuguesa.aspx>)
- [Bala16] *Balanis, C.A., Antena Theory: Analysis and Design, Fourth Edition, Jonh Wiley Sons*, Hoboken, New Jersey, USA, Feb. 2016.
- [BRER10] Bellafkih, M., Raouyane, B., Errais, M., Ramdani, M., “MOS Evaluation for VoD service in an IMS network”, in *Proc. of International Symposium on I/V Communications and Mobile Networks*, Rabat, Morocco, Dec. 2010.
- [BoCh02] Bower A., Chandler D., “Extended Range VHF Communications improve performance of air transport operations”, *ICAO Journal*, Vol.57, Nº3, pp.23 e pp.31, Nov. 2002.
- [CaFe20] Fernandes, C., *Radiopropagação, Aulas Teóricas*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2020.
- [Cart08] Cartil – Telecomunicações e Eletrónica, S.A., *Telas Finais Sistema de Comunicações VHF para o Arquipélago dos Açores*, Lisboa, Portugal, 2008.

- [CGCF01] Correia, L.M., Gil, F., Claro, A., Ferreira, J. e Pardelinha, C., "A 3-D Interpolation Method for Base-Station Antenna Radiation Patterns", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 43, No. 2, Apr. 2001.
- [CGTM20] Gouveia, C., Magedanz, T., "Telecommunication Systems and Technologies – Vol.II – Quality of Service in Telecommunication Networks", *Technical University of Berlin*, Berlin, Germany, 2020.
- [ChSi02] Sim, C., "The propagation of VHF and UHF radio waves over sea paths", Master Thesis, University of Leicester, United Kingdom, 2002.
- [CJRB93] Chen, C., Howland, J., Millar, R., White, B., Wilson, W., VHF Air/Ground Communications for Air Traffic Control: A Decision Tree Approach to System Innovation, *DTIC*, Vol. 2, Jul. 1993.
- [CoGo17] Cosme, F., Gomes, J., "Aumento da Dimensão da Plataforma Continental Atlântica", *Revista Militar*, Nº2591, Dez. 2017.
- [Corr20] Correia, L.M., Mobile Communications Systems, *Theoretical Lessons*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2020.
- [CDia17] Dias, C., *Extension of communication aeronautical services coverage over the ocean via antenna optimization*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2017.
- [DaiH09] Dai, H., "Throughput and Delay in Wireless Sensor Networks using Directional Antennas", in Proc. of *International Conference of Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, Melbourne, Australia, Dec. 2009.
- [Dass19] Dassault Systems, High Frequency Simulation, *CST Microwave Studio guide*, Deutschland, Aug. 2019.
- [Dass21a] Dassault Systemes, CST Studio Suite Presentation, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>, Mar. 2021.
- [Dass21b] Dassault Systemes, CST Studio Suite 2020 Help, file:///C:/Program%20Files%20(x86)/CST%20Studio%20Suite%202020/Online%20Help/cst_studio_suite_help.htm#general/welcome_de.htm, May 2021.
- [DRRG04] Rosa, D., Guilhoto, R., FEIXER- Programa de Feixes Hertzianos, *Software*, Out. 2004. (<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/disciplinas/STVR77/2020-2021/1-semester/projecto>).
- [DTKS17] Deepak, B., Takeshare, K., Kumar, P., Sairam, C., Design of a Wide-Band Blade Monopole Antenna in 135-175 MHz Band, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 68, No. 25-32, India, 2017.
- [EMFA20a] Estado Maior da Força Aérea, Missão – Missão, https://www.emfa.pt/p-181-missao_visao, Out. 2020.
- [EMFA20b] Estado Maior da Força Aérea, Base Aérea nº4 – História, <https://www.emfa.pt/unidade->

27-base-aerea-n-4, Out. 2020.

- [EMFA20c] Estado Maior da Força Aérea, Esquadra 502 – Destacamento Aéreo dos Açores, <https://esquadra.emfa.pt/link-502-005.003.002-daa>, Out. 2020.
- [EMFA20d] Estado Maior da Força Aérea, Esquadra 751, <https://www.emfa.pt/esquadra-46-esquadra-751-pumas>, Out. 2020.
- [EMFA20e] Estado Maior da Força Aérea, Sistema de Comunicações VHF Militar sediado nos Açores, *Relatório Confidencial*, Lisboa, Portugal, 2020.
- [EUOS09] European Organisation for The Safety of Air Navigation, *Implications of end-to-end Communication for Air Traffic Control*, Internal Report, 2009. (https://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2009/023_End_to_end_communications_in_ATC.pdf).
- [Expr19] Expresso, “Força Aérea Transportou em 2019 mais de 650 doentes e salvou 26 vidas do mar”, Dez. 2019 (<https://expresso.pt/sociedade/2019-12-31-Forca-Aerea-transportou-em-2019-mais-de-650-doentes-e-salvou-26-vidas-no-mar>).
- [FAPo20] FAP Oficial – *Instagram*, https://www.instagram.com/p/CJnZagilVa0/?utm_source=ig_web_copy_link, Nov. 2020.
- [FCTM20] Gouveia, C., Magedanz, ., “Telecommunication Systems and Technologies – Vol.II - Quality of Service in Telecommunication Networks”, Technical University of Berlin, Berlim, Alemanha, 2020. (<https://www.eolss.net/sample-chapters/C05/E6-108-14-00.pdf>)
- [GoEP21] Google Earth Pro, Set. 21
- [HHVR90] Hitney, H., Vieth, R., “Statistical Assessment of Evaporation Duct Propagation”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 38, No. 6, June 1990.
- [ICAO04] ICAO, VHF coverage over Indian Airspace, *Eight Meeting of the Communications /Navigation /Surveillance and Meteorology Sub-Group (CNS/MET SG/8) of APANPIRG*, Thailand, July 2004 (https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/2004/CNSMET_SG8/ip20.pdf).
- [JaTr16] Trindade, J., Sistema de comunicação ótica inter - satélites para aplicações em Defesa-I, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Academia Militar, Lisboa, 2016.
- [ITUR07] ITU, Effects of tropospheric refraction on radio wave propagation, *ITU-R Recommendation P.834-836*, ITU, Switzerland, 2007.
- [ITUR18] ITU, Propagation by diffraction, *ITU-R Recommendation P.526-14*, Switzerland, 2018.
- [ITUR21] ITU, Reflection from the surface of the Earth, *ITU-R Report 1008-1*, Switzerland, 2021.
- [Laak15] I. Laakso, Introduction to the FDTD method, *Department of Electrical Engineering and Automation*, Power Point Presentation, 2015

(https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/153433/mod_resource/content/3/Introduction%20to%20FDTD.pdf).

- [LDLL15] Lecuona, D., Lacerda, L., Metodologia para realização de testes de uma antena *offset* de 60 cm banda Ku com refletor ultraleve-Parte 1: comportamento eletromagnético, *Revista Tecnologia*, Brasil, 2015.
- [MarG04] Marsh, G., Longer Legs for VHF, *Avionics Magazine*, Mar. 2004 (http://www.aviationtoday.com/av/air-traffic-control/Longer-Legs-for-VHF_780.html).
- [MaSi20] Silveirinha, M., Lecture Notes of Antennas, *Instituto Superior Técnico*, Lisboa, Portugal, Mai. 2020 (<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/disciplinas/Ant4/2019-2020/2-semester/lecture-notes>).
- [PASi21] Park Air Systems – A Northrop Grumman Company, <https://www.parkairsystems.com/components/t6-vhf-uhf-radio>, Jan 2021.
- [PHEH21] Hoehner, P., Haas, E., Aeronautical Channel Modeling at VHF-Band, *Information and Coding Lab*, University of Kiel, Institute for Communication Technology, German Aerospace Center, Germany, 2021 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/797280>).
- [RaGr18] Grou, R., Sistema de Comunicações de Emergência Via Ionosfera para Ligação ANPC-Pedrogão Grande, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico e Academia da Força Aérea, Lisboa, Sintra, 2018.
- [SMAI15] Sadeque, Md., Mohonta, S., Ali, Md., Modeling and Characterization of Different Types of Fading Channel, *International Journal of Science*, IJSETR, Vol.4, May 2015. (https://www.researchgate.net/profile/Md-Golam-Sadeque/publication/336579078_Modeling_and_Characterization_of_Different_Types_of_Fading_Channel/links/5da6dc28299bf1c1e4c3a501/Modeling-and-Characterization-of-Different-Types-of-Fading-Channel.pdf).
- [Stac08] Stacey, D., Aeronautical Radio Communication Systems and Networks, *John Wiley & Sons, Ltd*, 2008.
- [Tait20] Tait Radio Academy, Basic Radio Awareness – Voting and Simulcast Networks, 2020 (<https://www.taitradioacademy.com/topic/voting-and-simulcast-networks-s-1/>).