



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

## **Projeto de uma ligação por feixe hertziano entre dois pontos terminais**

**Tiago Miguel de Sousa Nunes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

### **Comité de Avaliação**

Presidente: Prof. Doutor Fernando Duarte Nunes  
Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria João Marques Martins  
Co-orientador: Engenheiro Carlos Almeida e Silva  
Vogal: Prof. Doutor Carlos Manuel dos Reis Paiva

**Outubro 2012**



# Agradecimentos

Em primeiro agradeço o apoio imprescindível dado pela minha família, principalmente Mãe, Pai e Irmã, ao longo de toda a realização do curso, nos momentos bons e maus, pois sem o apoio deles nada seria possível. Agradeço à minha namorada que nos últimos anos me tem apoiado e ajudado imenso nesta dissertação e em tudo.

Agradeço à Professora Doutora Maria João Martins e ao Engenheiro Carlos Silva por aceitarem ser orientadores deste trabalho, pela paciência, motivação, conselhos e disponibilidade dada no decurso do mesmo.

A todos os meus amigos de Loulé, do IST e da TUIST que sempre se mostraram disponíveis a ajudar e partilhar conhecimentos para a realização do curso. Agradeço também à Professora Graça por me ter ajudado da correcção da dissertação.

A todos agradeço estes anos bem passados.  
Muito obrigado.



# Sumário

A versatilidade e a rapidez foram motivos que levaram à necessidade de descoberta das redes sem fios a alta frequência. Apesar de terem quase 100 anos de história, os sistemas por feixes hertzianos são um marco na evolução das telecomunicações sem fios. Para um controlador de tráfego aéreo, o sistema por feixe hertzianos é um dos mais importantes sistemas do seu quotidiano, uma vez que oferece informações indispensáveis para manter em segurança o espaço aéreo, pois transporta informação de vários pontos do país. A NAV Portugal é a empresa que presta serviços de tráfego aéreo, garantindo o cumprimento da regulamentação, actividade que só é possível através da utilização de todos os sistemas disponíveis, nomeadamente o sistema por feixe hertziano.

Um sistema por feixe hertziano é composto por vários componentes que só no seu todo faz o sistema funcionar. Todos os componentes têm ganhos ou atenuações, atenuações estas que também existem no espaço onde se propaga o feixe, tais como as atenuações espaço livre, atmosféricas, obstáculos ou vegetação. Revela-se assim necessário analisar as características de cada componente, procedendo à alteração dos componentes, se necessário, e garantir que no final existe potência de sinal suficiente para mostrar qualidade no sistema.

Esta dissertação de mestrado tem como proposta principal a apresentação de soluções a aplicar a um sistema por feixe hertziano existente, que apresenta anomalias, em parte do percurso, e que não garante a fiabilidade na transmissão de dados, como seria expectável. O factor mais evidente e que provoca as anomalias no sistema é a atmosfera. A atmosfera provoca alterações na direcção do feixe que irá desvia-lo do seu objectivo, que é a antena de recepção. Por esse motivo procedeu-se à preparação de um estudo, com base em estações meteorológicas amadoras, focado no comportamento da atmosfera na zona onde o sistema tiver registado mais falhas. Por fim, poderemos apresentar não só várias propostas para mudar o sistema, mas também estimativas de custo, que acreditamos ser o mais adequado para o sistema esteja operacional.

**Palavras-chave:** Feixe , Hertziano , NAV , Atmosfera



# Abstract

The Wireless discovery came from the necessity of new versatility and speed in networks. Although it's one hundred years of history, the microwave radio link still is a main reference in what concern to the evolution of wireless systems. In fact, to the air traffic controller, the microwave radio link, is one of the most important on his day to day, the main reason for that to happen it's because the system provides indispensable information from all across the country, to keep the security on the air space.

NAV Portugal is the company that provides air traffic services here in Portugal, ensuring regulatory compliance, an activity that is only possible through the use of all available systems, including the system by microwave radio link.

A system for microwave radio link is composed of several components that just makes the whole system work. All components are gains or attenuations, these attenuations also exist in space where the beam propagates, such as the free space attenuation, atmospheric obstacles or vegetation. It is thus necessary to analyze the characteristics of each component, proceeding to change the components, if necessary and ensure that at the end there is sufficient signal strength to display quality in the system.

This dissertation has as main purpose the presentation of solutions to be applied to an existing system by microwave radio link, which shows anomalies in part of the route and does not guarantee the reliability of data transmission, as would be expected. The most obvious factor that use to cause anomalies in the system is the atmosphere. The atmosphere causes changes in the direction of the beam that will deflect it from its purpose, which is the receiving antenna. For that reason we proceeded to prepare a small study, based on amateur weather stations, to focus on the behavior of the atmosphere in the area where the system has registered more failures. Finally, we will be able to present not only several proposals to change the system but cost estimates too, which we believe are the most appropriate for the system to be operational.

**Keywords:** Microwave , Link , NAV , Atmosphere



# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b>	<b>iii</b>
<b>Sumário</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objectivos . . . . .	2
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	3
1.4 Resultado Esperado . . . . .	3
<b>2 Problemática das Comunicações Terra-Ar</b>	<b>5</b>
2.1 Estado da Arte . . . . .	5
2.2 Sistemas de Comunicação . . . . .	6
2.3 Perturbações ao Desempenho dos Sistemas . . . . .	7
2.4 Âmbito da Dissertação . . . . .	8
<b>3 Estudo Teórico do Feixe Hertziano</b>	<b>11</b>
3.1 Perfis . . . . .	11
3.1.1 Elipsoide de Fresnel . . . . .	13
3.2 Atenuação . . . . .	14
3.2.1 Espaço Livre . . . . .	15
3.2.2 Atmosférica . . . . .	16
3.2.3 Obstáculos . . . . .	18
3.2.4 Vegetação . . . . .	19

3.2.5	Cabos e Guias . . . . .	20
3.3	Efeitos Refractivos . . . . .	21
3.4	Reflexões no Terreno . . . . .	26
3.5	Antenas . . . . .	27
3.6	Diversidade nos Sistemas . . . . .	28
3.7	Desvanecimento . . . . .	29
3.7.1	Desvanecimento Rápido . . . . .	29
3.8	Equipamento radio-eléctrico . . . . .	31
3.9	Cálculos para a ligação . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Simulação do Feixe Hertziano</b>	<b>47</b>
4.1	Comparação dos resultados teóricos com os resultados simulados e reais . . . . .	47
4.1.1	Elementos de Propagação . . . . .	47
4.1.2	Feixe Hertziano Digital . . . . .	50
4.2	Análise e Explicação das Discrepâncias Verificadas . . . . .	53
4.3	Proposta para Assegurar a Qualidade da Ligação . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>57</b>
5.1	Conclusão e perspectivas de trabalho futuro . . . . .	57
	<b>Anexos</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Materiais em Anexo</b>	<b>61</b>
A.1	Imagens do Perfil . . . . .	61
A.2	Elementos Fornecidos . . . . .	70
<b>B</b>	<b>Outros Materiais em Anexo</b>	<b>75</b>
B.1	Detalhe Atenuação Atmosférica . . . . .	75
B.2	Detalhe Atenuação da Chuva . . . . .	82
B.3	Cálculos em Diversidade . . . . .	84
	<b>Bibliografia</b>	<b>87</b>

# Lista de Figuras

2.1	Ligação . . . . .	8
3.2	Perfil total da ligação . . . . .	13
3.3	Elipsoide de Fresnel . . . . .	14
3.4	Definição dos Diferentes Tipos de Atenuação . . . . .	15
3.5	Tipos de Guias de Ondas . . . . .	21
3.6	Camadas esféricas com índices de refração . . . . .	22
3.7	Efeito da variação de $k_e$ . . . . .	24
3.8	Índice de refração modificado para vários tipos de atmosfera . . . . .	25
3.9	Índice de refração modificado com indicação de anomalias . . . . .	26
3.10	Tipos de Antenas usuais . . . . .	27
3.11	Outros Tipos de Antenas . . . . .	28
A.12	Marcação da antena no Aeroporto de Lisboa . . . . .	61
A.13	Marcação da antena na Serra de Montegordo . . . . .	61
A.14	Marcação da antena na Serra de Montejunto . . . . .	62
A.15	Marcação da antena na Serra d'Aire e Cadeeiros . . . . .	62
A.16	Marcação da antena na Serra da Lousã . . . . .	62
A.17	Subperfil entre o Aeroporto de Lisboa e a Serra de Montegordo (23.720 km) . . . . .	63
A.18	Subperfil entre a Serra de Montegordo e a Serra de Montejunto (24.035 km) . . . . .	64
A.19	Subperfil entre a Serra de Montejunto e a Serra d'Aire e Cadeeiros (48.397 km) . . . . .	65
A.20	Subperfil entre a Serra d'Aire e Cadeeiros e a Serra da Lousã (77.222 km) . . . . .	66
A.21	Gráfico de atenuações para guias de ondas, ref (livro) . . . . .	67
A.22	variações do índice de refração . . . . .	68
A.23	Gráfico ber para QAM . . . . .	69
A.24	Montagem 1+1 ODU com combinador híbrido . . . . .	70
A.25	Montagem 1+1 ODU para duas antenas . . . . .	70
B.26	Gráfico Dados Meteorológicos em Miranda do Corvo . . . . .	78
B.27	Gráfico Dados Meteorológicos em Barreira de Água . . . . .	79

B.28 Gráfico Dados Meteorológicos para o dia 15 de Junho de 2011 . . . . .	80
B.29 Localização de Estações Meteorológicas Amadoras . . . . .	81



# Lista de Tabelas

3.1	Coordenadas das Antenas . . . . .	11
3.2	Cotas do terreno e mastros . . . . .	12
3.3	Valores para $C_o$ . . . . .	31
3.4	Atenuação Espaço Livre (dB) . . . . .	34
3.5	Atenuação atmosférica (dB) . . . . .	34
3.6	Parâmetros para a atenuação devido á chuva . . . . .	34
3.7	Ganho de antenas para vários diâmetros (dBi) . . . . .	35
3.8	Atenuação nos Guias de Ondas Elípticos . . . . .	35
3.9	Potência de recepção (dB) . . . . .	36
3.10	Potência de recepção CIP (dB) . . . . .	36
3.11	Efeitos refractivos em função de condições meteorológicas . . . . .	37
3.12	Efeitos refractivos em função da altitude . . . . .	37
3.13	Feixe Digital . . . . .	38
3.14	$\frac{C}{N}_{CIP}$ (dB) . . . . .	38
3.15	Recomendações ITU . . . . .	39
3.16	Margem Selectiva $m_s$ . . . . .	39
3.17	Margem Uniforme $M_u$ . . . . .	40
3.18	Margem Real $M_r$ . . . . .	40
3.19	Margem de Segurança $M_{seg}$ . . . . .	41
3.20	Margem Uniforme $M_u$ . . . . .	41
3.21	Margem Real $M_r$ . . . . .	41
3.22	$P(rber)$ . . . . .	43
3.23	$sesr$ . . . . .	43
3.24	Margem Absoluta $M_{abs}$ . . . . .	43
3.25	$bber$ . . . . .	44
3.26	$esr$ . . . . .	44
3.27	Factor de melhoria para a diversidade . . . . .	45
3.28	Margem Selectiva com diversidade . . . . .	45
3.29	Margem de Segurança com diversidade, $M_{seg-div}$	45

3.30 <i>bber</i> com diversidade . . . . .	46
3.31 <i>esr</i> com diversidade . . . . .	46
4.32 Ganho de antenas para vários diâmetros simulado(dBi) . . . . .	48
4.33 Atenuação Espaço Livre Simulada(dB) . . . . .	48
4.34 Atenuação atmosférica Simulada (dB) . . . . .	49
4.35 Atenuação nos Guias de Ondas Elípticos Simulada . . . . .	49
4.36 Potência de recepção CIP Simulada (dB) . . . . .	49
4.37 $\frac{C}{N_{CIP}}$ Simulado (dB) . . . . .	50
4.38 Tempos Médios entre Avarias . . . . .	50
4.39 Feixe Digital . . . . .	51
4.40 $\frac{C}{N_{CIP}}$ (dB) . . . . .	51
4.41 <i>sesr</i> . . . . .	51
4.42 <i>bber</i> . . . . .	52
4.43 <i>esr</i> . . . . .	52
4.44 Estatística . . . . .	53
4.45 Preços para alteração de configurações . . . . .	55
A.46 Dados fornecidos . . . . .	71
A.47 Dias em que ocorreram erros . . . . .	72
B.48 Coeficientes de atenuação da chuva para polarização horizontal e vertical . . . . .	82
B.49 Cálculos Auxiliares para Margem Selectiva . . . . .	83
B.50 <i>sesr</i> - diversidade espacial . . . . .	84
B.51 <i>bber</i> - diversidade espacial . . . . .	84
B.52 <i>esr</i> - diversidade espacial . . . . .	84
B.53 <i>sesr</i> - diversidade em frequência . . . . .	85
B.54 <i>bber</i> - diversidade em frequência . . . . .	85
B.55 <i>esr</i> - diversidade em frequência . . . . .	85

## Lista de Acrónimos

- AM** Amplitude Modulation - Modulação em Amplitude
- ATT** American Telegraph and Telephone Corporation
- BER** Bit Error Rate
- BBER** Background Block Error Ratio
- CCIR** Le Comité Consultatif International des Radiocommunications
- CIP** Condições Ideais de Propagação
- DME** Distance Measuring Equipment
- ESR** Errored Second Ratio
- FM** Frequency Modulation - Modulação em Frequência
- IGOE** Instituto Geográfico do Exército
- ILS** Instrument Landing System
- IM** Instituto de Meteorologia
- ITU** International Telecommunication Union
- ITU-R** International Telecommunication Union Radiocommunication
- ITU-T** International Telecommunication Union Standardization
- MTBF** Mean Time Between Failures
- MTFF** Mean Time to First Failure
- NAV** Navegação Aérea de Portugal
- NDB** Non-Directional Beacon
- ODU** Out Door Unit
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation
- SESR** Severely Errored Second Ratio
- UHF** Ultra-High Frequency
- VHF** Very High Frequency
- VOR** VHF Omnidirectional Radio Range



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A realização de uma dissertação deve abranger as várias etapas de projecto, desenvolvimento e testes, que valorizam as competências profissionais de um engenheiro. No ramo das telecomunicações, a realização de um projecto de sistema por feixe hertziano, com as várias configurações do sistema, é parte importante a constituir no curriculum.

Os sistemas de telecomunicações apresentaram uma evolução muito expressiva nas últimas décadas, invocando uma posição importante na sociedade. A evolução dos sistemas de telecomunicações foi impulsionada pelo desenvolvimento dos mercados, serviços e culturas levando a que se tornasse necessário garantir a transmissão de informação cada vez mais rápida e eficaz, moldando-se aos comportamentos pessoais e comerciais do dia-a-dia.

Poucos anos antes da primeira guerra mundial, surge o que viria a ser um dos grandes sistemas de telecomunicações actuais, os feixes hertzianos, baseados em ondas rádio. Esta descoberta teve o seu início com o trabalho do matemático J. C. Maxwell, que propôs equações que descreviam as ondas rádio e de luz como ondas electromagnéticas espaciais. H. Hertz, para comprovar o trabalho de J. C. Maxwell, passou da teoria à prática, gerando ondas rádio, em laboratório. Foram muitas as experiências que se seguiram para pôr em prática a transmissão de informação através da utilização de ondas rádio.

Foi pela necessidade de transmitir informação entre distâncias consideráveis, que nascem os sistemas de telecomunicações por feixes hertzianos, tema base desta dissertação. As ligações por feixes hertzianos estão bem presentes no quotidiano, apresentando-se como o grande meio de transmissão de informação dos sistemas de televisão, sistemas de satélite, sistemas de comunicações de voz e sistemas de informação de controlo aéreo. É precisamente nos sistemas

de informação de controlo aéreo que incide o foco do projecto que esta dissertação documenta. Qualquer um dos sistemas é destinado ao transporte de informação (vídeo, áudio e dados) com elevado grau de exigência na continuidade de serviço.

Actualmente, os sistemas de feixes hertzianos têm um grande rival nas comunicações, os sistemas de fibra óptica no entanto, existem dois factores, o custo e a versatilidade, que fazem com que os sistemas de feixes hertzianos sejam os mais utilizados na transmissão de informação em médias e grandes distâncias.

## 1.2 Objectivos

Com esta dissertação, pretende-se projectar uma ligação entre dois pontos, utilizando algumas das variáveis disponíveis, nomeadamente, os tipos de antenas, potências de emissão e sensibilidade de receptores, e pretende-se também apresentar uma solução optimizada para resolver o problema. Esta ligação para transporte de informação é direccionada à aplicação no controlo de tráfego aéreo, caracterizada pela elevada exigência na continuidade de serviço.

A ligação referida nesta dissertação trata-se de uma ligação utilizada pela Navegação Aérea de Portugal (NAV) para transmissão de informação. Foi proposta a realização deste estudo pois a ligação apresenta durante o ano descontinuidade de serviço em certos períodos temporais pelo que se pretende analisar as condições geográficas e atmosféricas das regiões, bem como outro tipo de variáveis que possam condicionar a continuidade de serviço desta ligação.

A presente dissertação completará as seguintes etapas:

- Levantamento das condições geográficas dos terminais e perfil do terreno entre os terminais;
- Dimensionamento teórico do sistema em todas as vertentes (comprimento, atenuação, cotas das antenas, pontos intermédios, diversidade, equipamento, infra-estruturas);
- Simulação do sistema com o software apropriado;
- Comparação da solução teórica com a solução já implementada;
- Solução para o problema para melhorar o desempenho do sistema.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada na seguinte forma:

1. Introdução, na qual se explica o interesse científico do desenvolvimento de sistemas por feixe hertziano, os objectivos a alcançar, a organização do documento e o expectável contributo do desenvolvimento da dissertação;
2. A problemática das comunicações Terra-Ar, que inclui uma revisão histórica evolutiva dos sistemas por feixe hertziano, na qual se dão a conhecer os vários tipos de sistemas de apoio á navegação aérea, com maior ênfase para os sistemas de comunicação e as perturbações que um sistema pode sofrer e por fim uma descrição do tema da dissertação;
3. O estudo teórico do feixe hertziano apresentando todos os pontos-chave para o cálculo teórico de uma ligação, explicando todo o mecanismo envolvente de um sistema por feixe hertziano. São indicadas as referências ITU importantes, cálculo de perfis, atenuação, ganhos e equipamento;
4. A simulação do feixe hertziano, onde é feita a comparação de resultados teóricos com os resultados simulados e reais, a análise das discrepâncias verificadas e a proposta de resolução para assegurar a qualidade da ligação;
5. Conclusão, finalizando o estudo com as melhores hipóteses que visam melhorar os sistemas e na qual se apresenta uma breve perspectiva de futuros desenvolvimentos na área.

## **1.4 Resultado Esperado**

É expectável que no final se obtenha a caracterização electromagnética de um feixe hertziano bem como a apresentação de soluções que potencialmente vão melhorar a solução existente. Relativamente ao resultado pessoal passará pelo enriquecimento através do estudo de várias matérias, tais como teoria das antenas, a propagação e radiação, a optimização de soluções radioeléctricas e a comparação da solução real com a teórica.



## Capítulo 2

# Problemática das Comunicações

## Terra-Ar

### 2.1 Estado da Arte

Nesta secção apresenta-se um resumo do historial do tema desta dissertação, para que melhor seja compreendida a sua evolução.

Foi no início do ano de 1931 que, entre Calais (França) e St. Margarets Bay (Inglaterra), que se estabeleceu a primeira ligação por feixes hertzianos. Aquela ligação tinha apenas a capacidade para um canal telefónico ou telegráfico, mono via, a 1700  $MHz$ , com modulação AM. Pouco depois em 1933 é instalada a primeira ligação permanente, entre os aeroportos de Lympne (Inglaterra) e St. Inglevert(França). A empresa British General Post Office (correios britânicos) foi a primeira a inaugurar a ligação de feixes hertzianos multi via, com 9 canais telefónicos a 65  $MHz$  e modulação AM.

Na Alemanha, em 1935 começou-se a explorar estes sistemas, com uma ligação mono via a 500  $MHz$  e modulação AM. Quatro anos mais tarde, foi introduzida a modulação FM, com 10 vias a 1300  $MHz$ .

Nos Estados Unidos da América, não se verificou grande evolução nesta matéria até ao ano de 1941, altura em que se realizaram os primeiros testes de uma ligação multi via, modulada em AM, entre Cape Charles e Norfolk. Após a segunda guerra mundial, em 1945, a ATT desenvolveu sistemas digitais para 24 canais telefónicos apropriados para redes de capacidade reduzidas. Foi também nesta altura que se assinala o início da comercialização dos sistemas de

feixes hertzianos, pelo que se tornou indispensável aumentar a capacidade, para além da que já existia de 12 vias no equipamento militar. Nesta década, foram também realizados muitos outros avanços que impulsionaram a evolução dos feixes hertzianos, como a ligação New York - Philadelphia com vários canais de voz e um canal de música, a ligação New York - Boston, a 4 GHz com 100 canais telefónicos e o desenvolvimento de um novo equipamento instalado na primeira ligação permanente para televisão. Em 1950 as ligações para difusão de canais televisivos já percorriam 12000 km.

A coroação da rainha Isabel II, no ano de 1953, está também presente como marco histórico nos sistemas por feixe hertziano, pois foi a primeira vez que várias redes europeias foram interligadas a fim de transmitir o sinal de televisão por toda a Europa.

A partir dos anos 60, os sistemas por feixe hertziano sofrem uma forte expansão; mesmo ainda analógicos, passam a constituir a espinha dorsal das redes interurbanas de telecomunicações nos países mais desenvolvidos. Os sistemas por feixe hertziano digitais estiveram inicialmente limitados a capacidades reduzidas, 30 canais telefónicos, primeira hierarquia plesiócrona (E1), devido à dificuldade de realizar circuitos electrónicos fiáveis e económicos.

Na década de 70, começaram a ser comercializados no mercado sistemas por feixe hertziano digitais com capacidade de 120 e 480 canais telefónicos (E2 e E3, respectivamente) e, mais recentemente, a comercialização da quarta hierarquia plesiócrona (E4) e a primeira hierarquia síncrona (STM-1). A utilização de feixes hertzianos para transmissão de sinais televisivos apenas se inicia na década de 90, pois antes desta data não existiam mecanismos de conhecimento suficientes para o sinal televisivo poder ser transmitido por feixe hertziano.

## **2.2 Sistemas de Comunicação**

Os sistemas de comunicações são um dos ramos do conjunto de sistemas de apoio à navegação aérea. Ainda existem mais dois tipos de sistemas, os de vigilância e os de navegação. Nos sistemas de vigilância estão incluídos os radares (primários, secundários e de solo); os sistemas de navegação, VOR, ILS, DME e NDB, utilizados especialmente pelas aeronaves, têm como utilidade a orientação da aeronave em relação ao solo. Nos sistemas de comunicação, que estão directamente ligados a esta dissertação, podem-se encontrar as mesas de controlo, emissores VHF/UHF, gravadores de voz e dados e os feixes hertzianos.

Os sistemas por feixe hertziano apresentam um papel importante nos sistemas de comunicação para o apoio à navegação aérea, pois são os feixes hertzianos que transportam informação dos

pontos onde estão instaladas as estações intermediárias, com o propósito de aumentar a cobertura de um determinado centro de controlo de tráfego aéreo.

## **2.3 Perturbações ao Desempenho dos Sistemas**

Os feixes hertzianos são afectados por interferências electromagnéticas e estão assim sujeitos a vários tipos de perturbações que degradam o sinal, de tal forma que ocorrem situações de interrupção da ligação. As interferências electromagnéticas têm origem em motores eléctricos, torres e linhas de transmissão de energia eléctrica, turbinas eólicas e torres de suporte de antenas para comunicações móveis. Os feixes hertzianos também são afectados por outros elementos, nomeadamente, as condições atmosféricas e a qualidade e degradação dos materiais utilizados.

No âmbito dos sistemas de apoio à navegação aérea, os sistemas (VOR, ILS, DME e NDB) são afectados pelas turbinas eólicas e vários tipos de torres que interferem nos cálculos das trajectórias efectuadas pelos instrumentos de navegação aérea. Os feixes hertzianos, não sofrem normalmente interferências de obstáculos, pois tenta-se sempre efectuar as ligações com a linha de vista desobstruída, sendo esta situação normalmente controlável numa instalação. Já as interferências electromagnéticas provenientes da atmosfera não são assim tão contornáveis, sendo necessário fazer ajustes nas ligações para compensar as interferências. Os sistemas por feixes hertzianos são uns dos sistemas-raiz nos sistemas de apoio à navegação aérea, pois estes transportam todo o tipo de dados radar e voz, provenientes de estações distanciadas a algumas centenas de quilómetros.

A título de exemplo imagine-se que o sistema por feixes hertzianos está em pleno funcionamento num determinado momento e o comandante de uma aeronave necessita de comunicar algum tipo de informação ao controlador aéreo. A conversa começa, mas o sistema recebe um pico de interferência e a conversa não é transmitida na íntegra, e assim o controlador aéreo fica sem perceber as intenções da aeronave, podendo tratar-se de uma situação de emergência, ocasionando uma situação muito grave na navegação aérea.

É sobre este tipo de situações em que o estudo desta dissertação incide, visando melhorar os sistemas de apoio à navegação aérea e por sua vez a segurança aérea.

## 2.4 Âmbito da Dissertação

Inserida na área de telecomunicações, pretende-se resolver, concretamente a situação de descontinuidade existente na ligação, por feixe hertziano, entre Lisboa e a Serra da Lousã, figura 2.1. Serão tidos em conta os principais factores que podem influenciar a continuidade do serviço, que causam interferências no sinal. Para evitar interferências serão feitos ajustes em certos parâmetros de forma a aumentar a potência de sinal recebida.

Após toda a análise serão apresentadas soluções de forma a que a situação ocorrente fique resolvida e assim aumente a fiabilidade dos serviços prestados pelo sistema de feixe hertziano.



Figura 2.1: Ligação





## Capítulo 3

# Estudo Teórico do Feixe Hertziano

É objectivo desde capítulo dar a conhecer todos os procedimentos a realizar de forma a conseguir dimensionar um sistema por feixe hertziano, neste específico caso, um feixe que é constituído por vários troços de diferentes comprimentos. Este ponto do dimensionamento incide nos elementos de propagação e no feixe hertziano digital.

### 3.1 Perfis

A escolha do percurso é o elemento determinante para uma ligação por feixes hertzianos. Começa-se por localizar os pontos entre os quais se pretende estabelecer a ligação, utilizando cartas militares ou software específico, à escala de 1:25000 para obter o máximo de precisão. O software utilizado é o google earth e as cartas militares disponibilizadas no site do IGOE em forma de ficheiro, compatível e mapeado com o google earth.

Na dissertação são utilizadas as coordenadas das antenas da ligação existente, descritas na tabela 3.1 , e definidas no sistema WGS84.

Localidade	Latitude	Longitude
Aeroporto de Lisboa (A)	38° 46' 29.00" N	9° 07' 29.82" W
Vila F. de Xira - Serra de Montegordo (B)	38° 57' 44.20" N	8° 59' 36.33" W
Cadaval - Serra de Montejunto (C)	39° 10' 26.07" N	9° 03' 12.26" W
Alvados - Serra de Aire e Cadeeiros (D)	39° 31' 55.23" N	8° 43' 55.66" W
Castanheira de Pêra - Serra da Lousã (E)	40° 04' 38.35" N	8° 09' 47.91" W

Tabela 3.1: Coordenadas das Antenas

O levantamento do perfil dos vários troços da ligação é o primeiro passo para a realização de um projecto. O resultado é uma representação gráfica ou numérica do percurso realizado pelas ondas rádio entre dois pontos terminais, indicando a altura dos mastros das antenas e os vários pontos do trajecto. No trajecto há que ter em conta que a linha de visão deve estar desobstruída, de forma a conseguir menor atenuação, ou seja, maior potência de recepção.

Utilizando as ferramentas disponíveis e as coordenadas da tabela 3.1 obteve-se uma visualização das marcações para os pontos de localização dos terminais, em carta militar, mostrado no apêndice A nas figuras A.12, A.13, A.14, A.15 e A.16 . Após a marcação dos terminais e com o recurso ao GoogleEarth obtém-se o que se pode designar como sub-perfil ou altimetria do feixe hertziano, como é mostrado no apêndice A nas figuras A.17, A.18, A.19 e A.20. Cada sub-perfil tem o seu comprimento, como indicado na legenda de cada figura referida anteriormente, e que perfaz um comprimento total de 173.7 *km* para o sistema por feixe hertziano. Na marcação de cada sub-perfil teve-se logo em conta as cotas de terreno da localização das estações terminais e o mastros ou a altura a que as antenas se localizam em relação à cota do terreno, como mostrado na tabela 3.2.

Local	Cota do terreno	Mastro	Cota com mastro
Aeroporto de Lisboa (A)	85.95 m	10 m	95.95 m
Vila F. de Xira - Serra de Montegordo (B)	193.48 m	10 m	203.48 m
Cadaval - Serra de Montejunto (C)	649.62 m	10 m	659.62 m
Alvados - Serra de Aire e Cadeiros (D)	550 m	10 m	560 m
Castanheira de Pêra - Serra da Lousã (E)	1167 m	10 m	1177 m

Tabela 3.2: Cotas do terreno e mastros

O perfil total para a ligação é mostrado na figura seguinte 3.2.

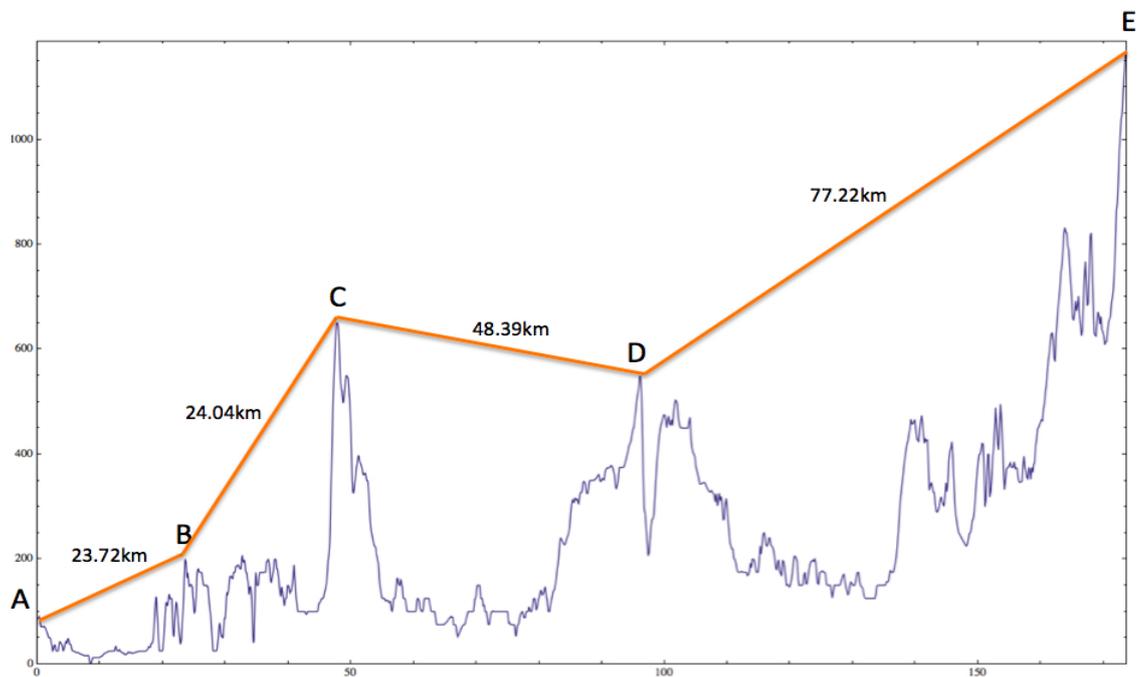


Figura 3.2: Perfil total da ligação

### 3.1.1 Elipsoide de Fresnel

A difracção de uma onda rádio ocorre quando a onda encontra um grande obstáculo cujas dimensões sejam maiores que o comprimento de onda. Para frequências inferiores a  $1\text{ GHz}$  existe difracção no obstáculo, aumentando a atenuação em função da área de obstrução do obstáculo. Acima de  $1\text{ GHz}$ , ao aumentar a área de obstrução, a atenuação aumenta muito rapidamente, de tal forma que até se pode tornar inviável a ligação. A quantidade real de atenuação depende da área obstruída em relação à área total do feixe e das propriedades de difracção do obstáculo. Em condições normais de transmissão, o feixe deve estar suficientemente distanciado dos obstáculos, para evitar a atenuação. A distância pode ser calculada recorrendo ao principio de Huygens e à teoria de Fresnel [25], considerando um ponto  $P$ , na zona entre a antena emissora e receptora,  $S_1$  e  $S_2$ , respectivamente, a uma distancia  $r_1$  e  $r_2$ , figura 3.3. Na zona de fresnel existem tantos quanto possíveis pontos  $P$ , que definem uma circunferência de raio  $R$  e um elipsoide concêntrico. A junção de todos os elipsoides definem a zona de Fresnel ou elipsoide de Fresnel.

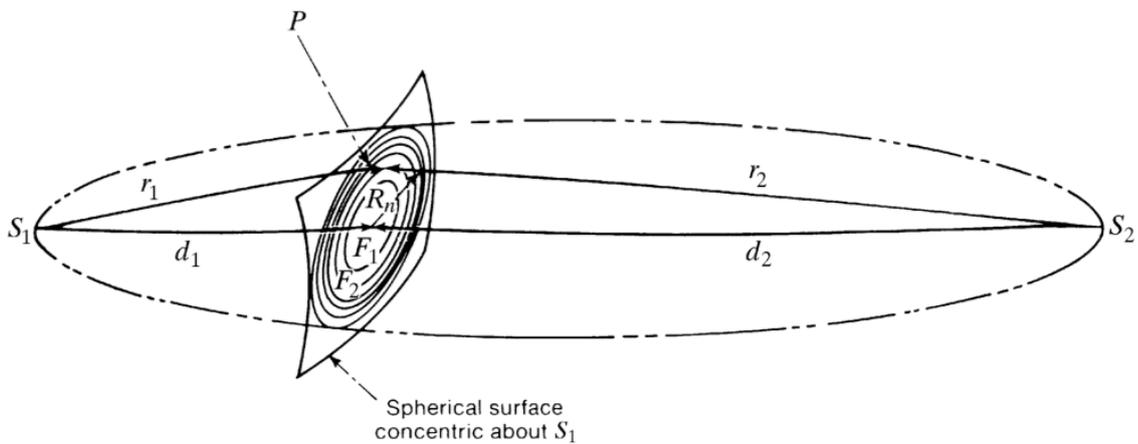


Figura 3.3: Elipsoide de Fresnel

Para calcular o raio da superfície perpendicular ao feixe, para qualquer ponto  $P$  genérico, é utilizada a seguinte equação:

$$r(m) = \sqrt{n \cdot \frac{z(d-z)}{d} \cdot \lambda} \quad (3.1)$$

, em que  $n$  é o índice da zona de fresnel,  $z$  é a distância entre a antena emissora e o ponto  $P$  e  $d$  é a distância do percurso.  $\lambda$  é o comprimento de onda, definido pela equação

$$\lambda(m) = \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

, em que  $c$  é a velocidade da luz, constante exacta igual a  $2.99792458 \times 10^{(8)}$  (m/s).

Como nota, é de referir que as equações utilizadas num projecto de uma ligação por feixe hertziano apenas se aplicam para distâncias superiores à distância mínima dada pela expressão 3.3, sendo  $d_a$  a maior abertura de qualquer antena de emissão ou recepção.

$$d_{min}(m) = \frac{2 \cdot d_a^2}{\lambda} \quad (3.3)$$

## 3.2 Atenuação

Em feixes hertzianos existem vários tipos de atenuações que podem prejudicar a qualidade do sinal. Este ponto está dividido de forma a explicar o que é cada tipo de atenuação bem como a sua influência numa ligação por feixes hertzianos.

Tendo como referência a Recomendação P.341-5 da ITU-R, podem-se definir os diferentes tipos de atenuação, como exemplificado na figura seguinte:

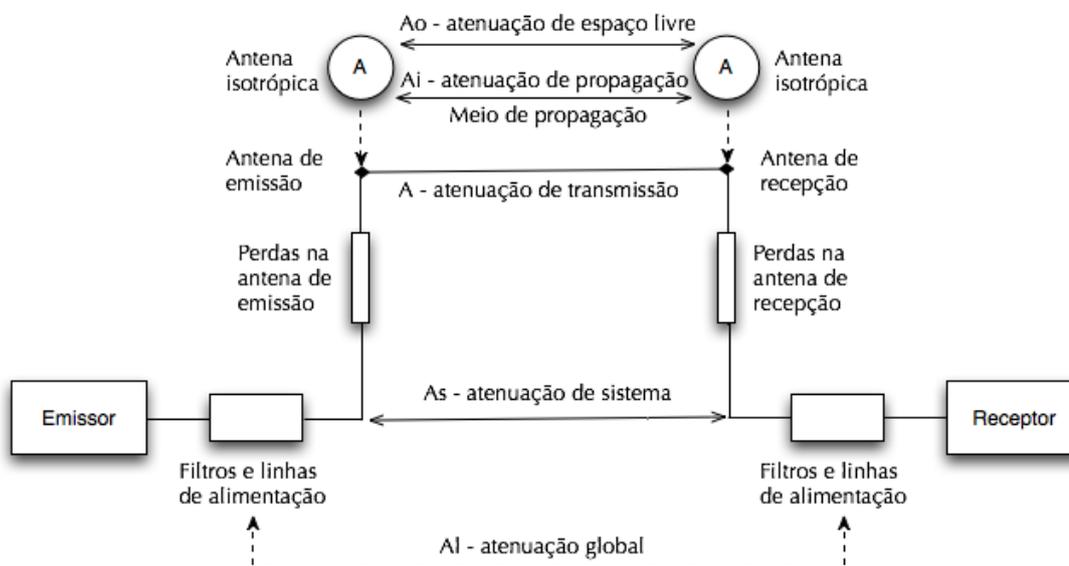


Figura 3.4: Definição dos Diferentes Tipos de Atenuação

De forma a perceber o diagrama anterior, atenuação espaço livre é a atenuação realizada pelo feixe num meio dielétrico ilimitado e homogéneo. A atenuação de propagação está incluída nos ganhos das antenas e é a atenuação entre antenas isotrópicas, caso as antenas fossem substituídas por antenas isotrópicas. A atenuação de transmissão é a relação entre a potência radiada pela antena de emissão e a potência disponível na antena receptora. A atenuação de sistema é a atenuação entre os terminais das antenas, que inclui todas as perdas dielétricas, circuitos de adaptação e resistências terminais. A atenuação global é a relação directa da potência fornecida pelo emissor e a potência ao receptor, ou seja, engloba todas as atenuações.

### 3.2.1 Espaço Livre

A primeira atenuação que se pode considerar é a atenuação em espaço livre, definida em função da frequência ao quadrado e do quadrado da distância; é a atenuação esperada de um sinal que viaja de um dispositivo emissor até ao dispositivo receptor.

Considerando a potência  $P_t$  radiada por uma antena, o sinal é radiado de maneira uniforme em todas as direcções e diverge ao longo do seu percurso até à antena receptora. Deste modo, pode-se dizer que a potência recebida é inversamente proporcional ao quadrado da distância percorrida.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (3.4)$$

Tendo como base a Leis de Friis 3.4, designa-se atenuação espaço livre à quantidade de  $a_0$  entre duas antenas, e é dada pela seguinte equação:

$$a_0 = \left(\frac{c}{4\pi f d}\right)^2 \quad (3.5)$$

, em que  $c$  é a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no vazio.

Ao aplicar logaritmos decimais à expressão 3.5 e utilizando grandezas expressas em unidade logarítmicas, tem-se:

$$A_0(dB) = 32.4 + 20 \cdot \log d + 20 \cdot \log f \quad (3.6)$$

, com a distancia  $d$  expressa em  $[km]$  e a frequência  $f$  em  $[MHz]$ .

### 3.2.2 Atmosférica

A atmosfera terrestre é um meio de propagação que não é ideal, e qualquer sistema de feixes hertzianos tem de ter em conta a atenuação proveniente da atmosfera. Existem cinco efeitos principais que influenciam uma ligação por feixe hertziano, são eles:

- Atenuação suplementar, está associada aos gases constituintes da atmosfera ( oxigénio e vapor de água) e aos hidro-meteoritos (chuva, nevoeiro, granizo ou neve), e depende do comprimento e inclinação da ligação;
- Alteração dos raios de onda, em função do índice de refração da atmosfera, as ondas efectuem um percurso curvilíneo e não o rectilíneo previsto;
- Ductos, que permitem a propagação de sinais a distâncias muito superiores às que são possíveis sem atmosfera;
- Flutuações na amplitude do sinal recebido [*fading*], devido à possibilidade da existência de vários percursos, cada um com um tempo de propagação próprio, entre as antenas de emissão e de recepção;

- Dispersão troposférica, provocada por irregularidades nas camadas superiores da troposfera que conduz a que pequenas fracções do sinal emitido atinjam distâncias muito elevadas.

A atenuação suplementar é mínima para frequências entre 1 a 10  $GHz$ , e para percursos de comprimento  $d$ , o valor da atenuação suplementar pode ser expressa por:

$$A_a(dB) = \int_0^d [\gamma_{oO}(x) + \gamma_{wO}(x)]dx \quad (3.7)$$

, em que  $x$  é o comprimento medido ao longo do raio directo e  $\gamma_{oO}$  e  $\gamma_{wO}$  são, respectivamente, os coeficientes de atenuação devidos ao oxigénio e ao vapor de água medidos em  $dB/km$ . A equação 3.7 pode mesmo ser simplificada na expressão 3.8 para percursos correspondentes a ligações terrestres.

$$A_a(dB) = [\gamma_{oO} + \gamma_{wO}]d \quad (3.8)$$

Incluído nos cálculos suplementares de uma ligação por feixe hertziano, a precipitação ou hidrometeoritos tem a sua influência na atenuação global da ligação. Pode provocar absorção, dispersão e alterações na polarização das ondas radio-eléctricas, mas estes efeitos só têm importância prática para frequências muito elevadas ao  $GHz$  e para períodos de tempo de elevada intensidade de precipitação. A precipitação, como é um fenómeno localizado, pode ser classificada em 4 tipos (Relatório 563-4 da CCIR) [1]: estratificada, convectiva, monções e tempestades tropicais. Em projectos de ligações por feixe hertziano é preferível obter elementos sobre a distribuição da intensidade de precipitação a partir de dados meteorológicos. Como na maior parte dos locais não se consegue ter os valores médios da intensidade de precipitação, recorre-se às distribuições das regiões climáticas definidas na recomendação P837-5 ITU-R [16]. Seguindo a recomendação, Portugal encontra-se dividido em duas regiões,  $H$  e  $K$ , no entanto, a região que interessa para esta dissertação é a região  $K$ . Prevê-se que a intensidade de precipitação seja de 42 mm/h o que corresponde a uma percentagem do tempo do ano em que o valor da intensidade de precipitação excedida é de 0,01. A atenuação provocada pela precipitação pode ser calculada com base na teoria da dispersão a Mie. Admitindo gotas esféricas, o coeficiente de atenuação por unidade de comprimento pode ser relacionado com a intensidade de precipitação, como a seguinte equação:

$$\gamma_r = k \cdot Ri^\alpha \quad (3.9)$$

, em que  $k$  e  $\alpha$  são valores em função da frequência e temperatura. Estes coeficientes de atenuação diferem entre a polarização horizontal e vertical, no entanto, neste caso as gotas de chuva têm a forma de elipsóide achatado, previsto por Laws e Parsons, para intensidades de precipitação inferiores a  $50 \text{ mm/h}$ , à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Os coeficientes são mostrados na tabela B.48, em que  $H$  e  $V$  correspondem a polarização horizontal e vertical, respectivamente. Os valores que não constam na tabela são calculados por interpolação usando escala logarítmica ( $k$  e  $f$ ) e linear ( $\alpha$ ).

Os valores  $k$  e  $\alpha$  para uma polarização linear inclinada  $\tau$  em relação à horizontal e ângulo de fogo  $\theta$  são calculados a partir de  $k_H, \alpha_H, k_V, \alpha_V$  com as equações seguintes:

$$k = \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2(\theta) \cdot \cos(2\tau)}{2} \quad (3.10)$$

$$\alpha = \frac{k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cdot \cos^2(\theta) \cdot \cos(2\tau)}{2k} \quad (3.11)$$

Para a polarização circular utiliza-se o valor de  $\tau = 45$ .

### 3.2.3 Obstáculos

Qualquer ligação por feixe hertziano pode sofrer perturbações devido a obstáculos, pois por vezes não é possível evitá-los. Existem quatro tipos de obstáculos que provocam situações de perturbação no sinal:

1. Obstáculo em lâmina isolado;
2. Obstáculo arredondado;
3. Obstáculos múltiplos em lâmina ;
4. Obstáculos múltiplos arredondados.

O obstáculo em lâmina isolado é caracterizado por um semi plano normal à direcção de propagação do feixe. Pode-se calcular a atenuação com,

$$A_{oi}[v](dB) = 6.9 + 20 \log_{10} (\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1) \quad (3.12)$$

, em que  $v$  é um parâmetro adimensional dado por,

$$v = \pm h \sqrt{\frac{2 * d}{\lambda * d_1 * d_2}} \quad (3.13)$$

,  $h$  é a altura do obstáculo acima(sinal positivo) ou abaixo(sinal negativo) do raio directo entre antenas,  $d$  é a distância entre antenas,  $d_1$  e  $d_2$  são as distâncias do obstáculo a uma e outra antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda correspondente à frequência  $f$ .

Quando a aproximação de um obstáculo real por um obstáculo equivalente em lâmina não for adequada, é por vezes, possível utilizar um modelo de obstáculo arredondado. A atenuação suplementar  $A_{or}$  provocado por este tipo de obstáculo pode ser calculada, de acordo com a Recomendação P.526-12 da ITU-R[17], como uma soma de atenuações devidas à difracção  $A_{ol}(v)$  e à curvatura do obstáculo  $T(m, n)$ ,

$$A_{or}(dB) = A_{ol}(v) + T(m, n) \quad (3.14)$$

, em que  $A_{ol}(v)$  é calculado com a expressão 3.12 e  $T(m, n)$  da seguinte forma,

$$T(m, n) = (8.2 + 12.0 * n) * m^{(0.73 + 0.27[1 - \exp - 1.43 * n])} \quad (3.15)$$

No caso em que não existe apenas um único obstáculo, com horizonte comum entre os dois terminais, mas vários obstáculos em lâmina, é possível designar esses obstáculos como um só. Para calcular a atenuação nestes casos, é necessário utilizar métodos específicos, como Millington [1], método exacto e de elevada dificuldade de aplicar para um número superior a dois obstáculos, ou, o método de Deygout [6], método aproximado e mais simples para estimar a atenuação. Para múltiplos obstáculos arredondados, é possível utilizar um processo de cálculo, generalizando o método de Deygout [6], que foi o que fez Assis[1].

### 3.2.4 Vegetação

Geralmente a atenuação suplementar devida a obstáculos, como o terreno e edifícios, pode ser estimada com um dos processos referidos no ponto 3.2.3, no entanto, existem obstáculos como as árvores em que os métodos não são seguramente aplicáveis. Existem dois casos, abordados na Recomendação ITU [13], o primeiro em que o emissor ou receptor está no interior da vegetação e outro em que as antenas estão em espaço livre e a vegetação está a obstruir a

linha de vista, por exemplo uma copa de uma árvore.

No primeiro caso a atenuação pode ser estimada como,

$$A_{vg}(dB) = A_m \cdot (1 - \exp(-\frac{\gamma_{vg} \cdot d_{vg}}{A_m})) \quad (3.16)$$

, em que  $d_{vg}$  é a distância dentro da vegetação,  $\gamma_{vg}$  é a atenuação suplementar para um percurso curto ( $dB/m$ ), em função da  $f$  ( $GHz$ )  $\gamma_{vg} = 0.2 \cdot f$ , e  $A_m$  que é dado com a relação  $A_m = 32.5 \cdot f^{0.752}$

### 3.2.5 Cabos e Guias

Nas instalações de sistemas por feixes hertzianos, entre a fonte emissora/receptora e a antena, a ligação é feita através de um meio de transporte específico, que consegue suportar as altas frequências utilizadas neste tipo de projecto. O cabo coaxial utiliza-se normalmente para frequências inferiores a  $2 GHz$  entre a ODU e a antena, no caso de frequências superiores, utilizam-se os guias de ondas metálicos. Pode haver excepções, pois cada vez existem mais cabos e tipos de cabo que com a evolução conseguem suportar altas frequências.

No ponto de vista da atenuação, é convencional utilizar o guia de ondas metálico para frequências superiores a  $2 GHz$ , pois para as frequências inferiores tem a secção transversal de dimensões elevadas e é de difícil aplicação.

Feitos normalmente de cobre, existem três tipos de guias de ondas metálicos: de secção rectangular, circular e elíptico, operados numa banda de frequências estreita, de forma a suportarem apenas o modo de propagação fundamental. Cada tipo de guia tem características próprias que justificam a sua adopção.

O guia rectangular, imagem 3.5(a), apresenta atenuação e coeficientes de onda estacionária medianos e, devido à sua diversidade de acessórios, os circuitos complexos e compactos tornam-se fáceis de implementar. Na generalidade, são utilizados nas interligações dos emissores e receptores.

Os valores mais baixos de atenuação e de taxa de ondas estacionárias são conseguidos com o guia circular, figura 3.5(b). Este permite a transmissão simultânea de polarizações lineares e ortogonais, mas tem custos muito elevados e só permite realizar troços rectilíneos.

O guia elíptico, imagem 3.5(c), é o mais usual, mesmo com elevada atenuação e coeficiente de onda estacionária, tem a grande vantagem de ser flexível, o que facilita muito a instalação e justifica a sua adopção.

A atenuação dos guias de ondas pode ser retirada do gráfico A.21, onde estão representados os vários tipos e modelos de guia, rectangular (WR), circular (WC) e elíptico (EW).



Figura 3.5: Tipos de Guias de Ondas

### 3.3 Efeitos Refractivos

Apesar de existir em todos os tipos de atenuação falados anteriormente, a atmosfera é responsável por modificações na direcção de propagação provocadas pelas variações do índice de refração, ao longo do percurso. O índice de refração  $n$  da atmosfera é uma função da pressão atmosférica  $p(hPa)$ , da pressão parcial do vapor de água  $e(hPa)$ , e da temperatura absoluta  $T(K)$ . Conforme a recomendação P.453-6 ITU-R o índice de refração pode ser obtido através da equação 3.17, em que  $N$  é a refractividade obtida com a equação 3.18.

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6} \quad (3.17)$$

$$N = \frac{77.6}{T} \left( p + \frac{4810 \cdot e}{T} \right) \quad (3.18)$$

A pressão parcial do vapor de água  $e(hPa)$  pode ser calculada de duas maneiras:

- a partir da humidade relativa  $H(\%)$  na equação 3.20 e com pressão parcial do vapor de

água saturado  $e_s$ , em função da temperatura  $T(C)$ , dada pela equação 3.19 ;

- a partir da concentração de vapor de água  $\rho$  e da temperatura  $T(C)$ , utilizando a expressão 3.21.

$$e_s = 6.1121 \cdot \exp\left(\frac{17.502 \cdot T}{240.97 + T}\right) \quad (3.19)$$

$$H = 100 \frac{e}{e_s} \quad (3.20)$$

$$\rho = 216.7 \cdot \frac{e}{T + 273.3} \quad (3.21)$$

A densidade do ar decresce com a altitude  $h$  e da mesma forma o índice de refração varia. Devido aos diferentes valores de índice de refração os feixes hertzianos apresentam uma trajetória em arco descendente já que o raio tende a voltar ao meio que possui índice de maior refração. Supondo que a atmosfera apresenta muitas camadas, figura 3.6, o índice de refração diminui com a altitude e mantêm-se homogêneo dentro de cada camada.

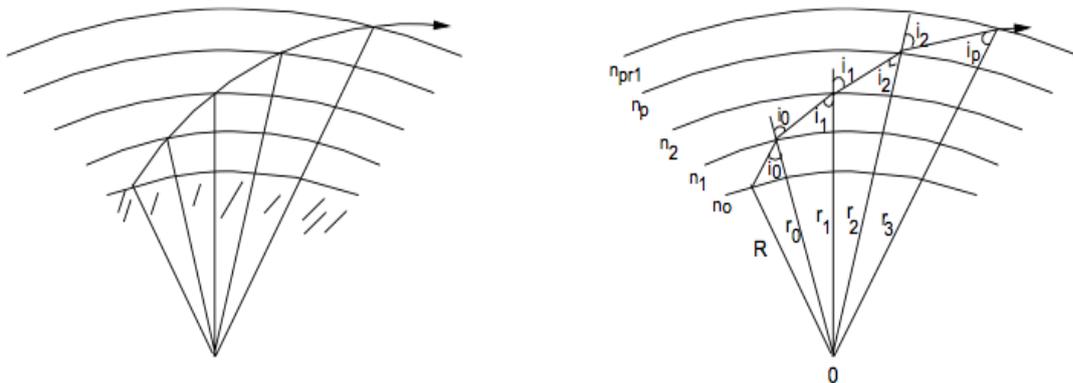


Figura 3.6: Camadas esféricas com índices de refração

Quando o feixe é enviado da camada inferior para uma camada superior o mesmo é desviado, provocando uma curva descontínua e descendente como indicado na figura anterior. Estas camadas são camadas que a espessura é aproximada a zero. Na ótica geométrica aplicamos aqui a lei de Snell, equação 3.23, que estabelece que, dados dois meios e uma superfície de separação, a incidência de um raio na superfície de separação que forme com a normal a essa

superfície um ângulo  $\theta_1$  dá origem a um raio refractado que faz com a normal um ângulo  $\theta_2$ .

$$\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2 \quad (3.22)$$

A lei de Snell é também aplicável em rádio frequência em função de:

$$\eta = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (3.23)$$

, em que  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa do meio e  $\epsilon_r$  a permitividade relativa desse mesmo meio. Após esta pequena explicação e de acordo com a recomendação P.453-7 ITU-R, o índice de refração ao variar com a altitude define-se da seguinte forma:

$$n(h) = 1 + a \cdot e^{-\frac{h}{h_0}} \quad (3.24)$$

em que  $a$  e  $h_0$  são constantes determinadas estatisticamente para cada clima, tomando-se como referência 0.000315 e 7.35 km, respectivamente. Ao aproximar a expressão anterior a uma expressão linear, equação 3.25, que é válida para as regiões inferiores da troposfera, é possível demonstrar que o efeito da curvatura dos raios ópticos, num modelo de Terra esférica com atmosfera, pode ser por um raio equivalente da Terra dado pela equação 3.26, em que  $r_0$  é o raio físico da Terra, cerca de 6370 km, e  $k_e$  é obtido através da expressão 3.27.

$$n(h) = n_0 - \Delta n \cdot h \quad (3.25)$$

$$r = k_e r_0 \quad (3.26)$$

$$k_e = \frac{1}{1 - \Delta n \cdot \frac{r_0}{n_0}} \quad (3.27)$$

Para valores de  $k_e$  superiores à unidade o raio da Terra aumenta e para valores negativos o raio da Terra diminui, o que faz com que passe de convexa a côncava. O raio aqui exposto é um raio equivalente que, para o caso de valores negativos, ocorre a situação de radiorizonte. A Terra plana acontece quando  $k_e = \infty$ . O raio equivalente é utilizado de forma a facilitar os cálculos neste tipo de projectos, substituindo assim  $r_0$  pelo raio calculado na expressão 3.26, exemplificado pela figura 3.7. Uma vez que o valor de  $k_e$  varia ao longo do tempo e, em cada instante, de

local para local, há que definir critérios para estabelecer o valor a utilizar. Fundamentalmente, o valor depende da qualidade de serviço a garantir e da região onde se situa a ligação. Para não existirem constrangimentos na ligação, a Recomendação P.530-10 ITU-R [15] estabelece um critério de desimpedimento de um percurso em que o valor mínimo de  $k_e$  e também a fracção do primeiro elipsóide de Fresnel a libertar é função do comprimento do percurso e das condições de propagação, para frequências superiores a 2 GHz. Na ligação por Feixe Hertziano deve-se garantir o cumprimento do mais severo dos seguintes pontos:

- libertação de  $r_{1e}$  para o valor de  $k_e$  apropriado ao local da ligação;
- libertação de  $0.6 \cdot r_{1e}$  para o valor mínimo de  $k_e$  em função da distância, para distâncias superiores a 30 km, em climas tropicais;
- libertação do raio directo, para  $k_e$  mínimo, em clima temperado, no caso de apenas um obstáculo ao raio directo;
- libertação de  $0.3 \cdot r_{1e}$  para  $k_e$  mínimo, em clima temperado, se existir um obstáculo extenso.

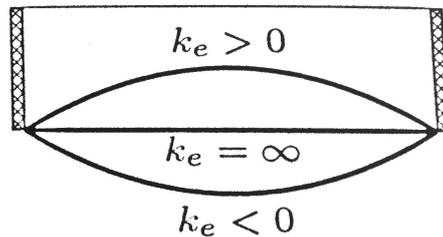


Figura 3.7: Efeito da variação de  $k_e$

A alteração do índice de refração acontece normalmente quando existe agitação atmosférica suficiente para garantir essa mesma alteração. Esta anomalia, capaz de afectar seriamente uma ligação por Feixe Hertziano, acontece em quase todo o tempo do ano, em terreno acidentado, montanhoso, vales protegidos e regiões planas, em especial, durante a noite e nas primeiras horas após o nascer do Sol. Esta análise pode ser simplificada com a utilização do índice de refração modificado  $M$ , que depende da variação da altura, definido como:

$$M(h) = N + 10^6 \log_e \left( 1 + \frac{h}{r_o} \right) \quad (3.28)$$

$$M = N_o + (157 - \Delta N)h \quad (3.29)$$

em que  $N$  é a refractividade definida em 3.18 e  $h \ll r_o$ . Pode-se simplificar a expressão conforme a equação 3.29. A figura 3.8 mostra o comportamento do índice de refração modificado conforme a altura e o tipo de atmosfera. Para atmosferas "sub-standard", a variação de  $M$  é linear, mas a inclinação da recta é diferente da atmosfera de referencia e tanto menor quanto menor o valor de  $\Delta N$ . Pelo contrário, para atmosferas "super-standard", a inclinação da recta aumenta atingindo a vertical, em que  $k_e = \infty$ . Quando  $k_e$  é negativo encontra-se a situação em que a Terra é côncava, o que significa que o índice de refração modificado passa a decrescer com a altitude.

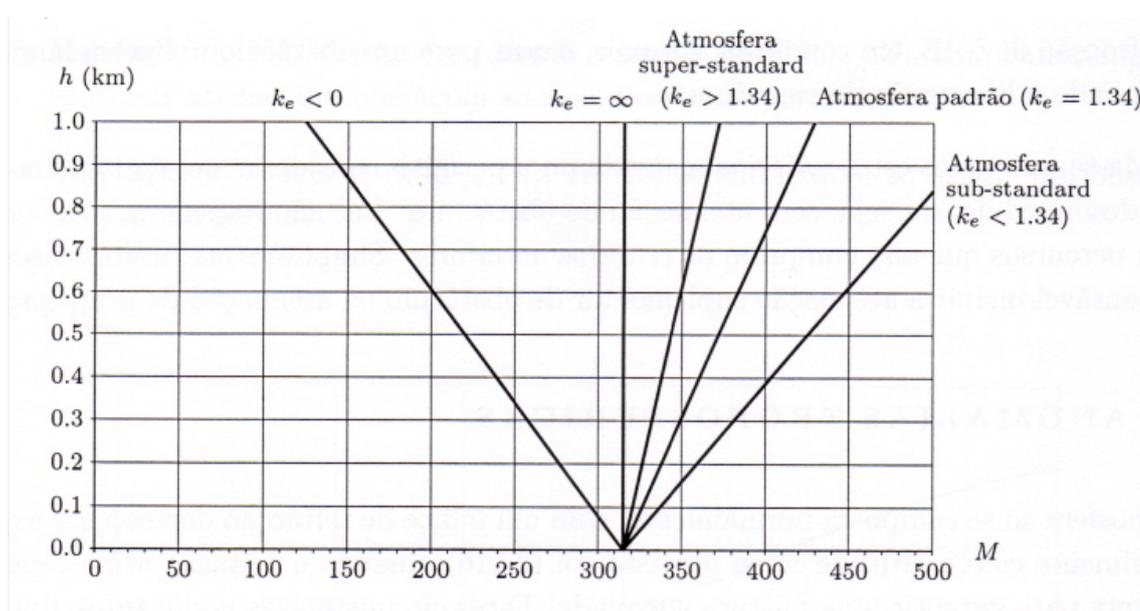


Figura 3.8: Índice de refração modificado para vários tipos de atmosfera

As variações do índice de refração modificado podem tomar forma de camadas superficiais com características marcadamente diferentes da restante troposfera ("sub-standard" ou "super-standard") ou ductos (superficiais ou altitude), representados na figura 3.9. Algumas camadas superficiais, como nevoeiros matinais ou camadas de ar húmido sobre alguns tipos de cultura provocam reflexões significativas do feixe. Por outro lado, os ductos, permitem que os sinais (superiores a 1 GHz) se propaguem a frequências inferiores à da propagação em espaço livre, provocando alcances mais elevados. Os ductos são formados com aumentos da temperatura com a altitude, designado por inversões de temperatura, ou com a diminuição de humidade com a altitude. Estas condições acontecem quando as camadas superiores da atmosfera estão muito quentes e secas em comparação com as inferiores. Geralmente em terra firme, os ductos ocorrem nas noites de Verão, sem vento, em especial se o solo estiver húmido; no mar ocorrem

devido a massas de ar quente vindas da terra que se sobrepõem a massas frias do mar. Também podem ocorrer por altura das trovoadas quando o ar frio se desloca para cima e para baixo, capaz de provocar uma inversão da temperatura.

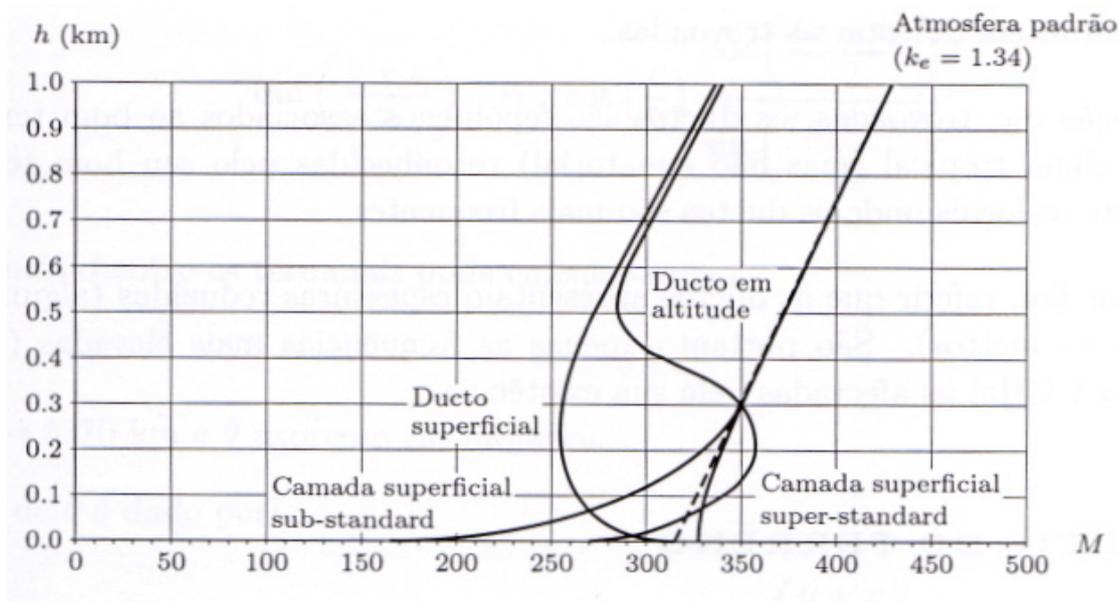


Figura 3.9: Índice de refração modificado com indicação de anomalias

### 3.4 Reflexões no Terreno

Uma onda rádio ao incidir na superfície da terra, não é reflectida a partir de um ponto mas sim de uma área de reflexão. A área pode ser suficientemente grande para abranger varias zonas do elipsoide de Fresnel ou poderá apenas ocupar uma pequena secção transversal.

As ondas rádio reflectidas geralmente sofrem mudança de fase, dependendo da polarização usada no sinal e do ângulo de incidência. Com a polarização horizontal, as ondas são reflectidas e sofrem uma mudança de fase de aproximadamente  $180^\circ$  o que reduz efectivamente o comprimento de onda para metade (electrical path length by on-half wave). No caso da polarização vertical, o desfasamento originado pela reflexão varia entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , dependendo do ângulo de incidência e do coeficiente de reflexão do terreno, que depende das condições do terreno.

No caso de polarização horizontal, se a superfície reflectora for grande o suficiente para abranger o elipsoide de Fresnel, então a onda é reflectida, fora de fase, para a antena receptora, provocando assim desvanecimento. Este fenómeno não é tão expressivo para a polarização vertical.

Para prevenir as reflexões do terreno, pode-se ajustar a altura das antenas e a a sua inclinação para que a área de reflexão fique bloqueada e assim não interfira com a ligação.

### 3.5 Antenas

Nas ligações por feixes hertzianos as antenas são escolhidas tendo em conta a frequência e a exigência do sistema. Existem diferentes tipos de antenas com diferentes aplicações, pois cada sistema tem a sua exigência e utilidade. As antenas do tipo reflector parabólico, figura 3.10(a), são utilizadas para frequências acima de  $1\text{ GHz}$ , com diâmetros compreendidos entre 0.5 a 4 metros.

Para acautelar intempéries e o vento forte, o tipo de antena reflector parabólico utiliza redomas para a protecção da antena, figura 3.10(b), sendo este o tipo mais utilizado.



(a) Reflector Parabólico



(b) Reflector Parabólico com Redoma

Figura 3.10: Tipos de Antenas usuais

Nas frequências compreendidas entre 1 e  $2\text{ GHz}$  os reflectores parabólicos não são maciços, mas sim formados por elementos como tubos ou rede, figura 3.11(a) reduzindo assim o peso da antena bem como a influência do vento sob o conjunto mastro-antena, diminuindo substancialmente o custo do mastro.

Quando é necessário garantir valores baixos do coeficiente de onda estacionária e uma elevada discriminação em polarizações ortogonais recorre-se às antenas do tipo corneta, figura 3.11(b).

Para frequências inferiores a  $1\text{ GHz}$  utilizam-se antenas helicoidais ou Yagi-Uda, figura 3.11(c),

isoladas ou em agregados, com ou sem planos reflectores, conforme a polarização, a largura de banda ou o ganho.

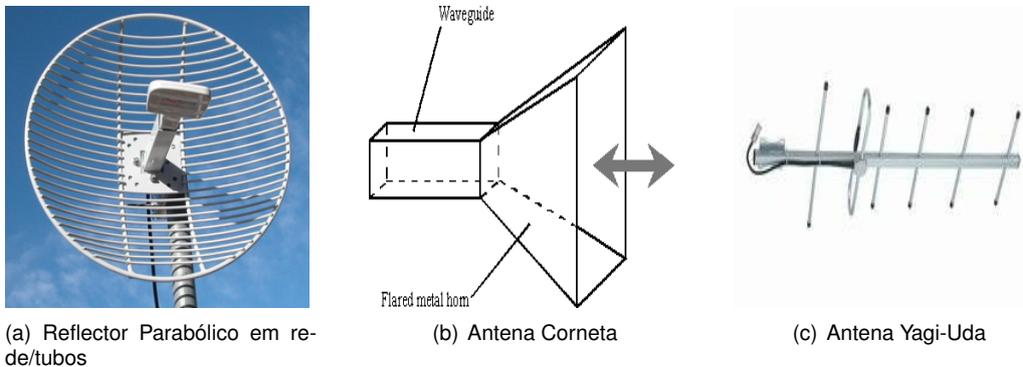


Figura 3.11: Outros Tipos de Antenas

Para as antenas do tipo reflector parabólico, o ganho da antena para o sistema é dado em [dBi] pela seguinte equação:

$$G = 20 \cdot \log \left( \frac{\pi \cdot d_a \cdot f}{300} \right) + 10 \cdot \log \eta \quad (3.30)$$

, em que  $d_a$  é o diâmetro da antena,  $f$  a frequência utilizada em [MHz] e  $\eta$  o rendimento da antena.

### 3.6 Diversidade nos Sistemas

Nas telecomunicações, existem esquemas de diversidade que se referem a métodos capazes de melhorar o desempenho de uma ligação. Em feixes hertzianos também se pode utilizar estes métodos, que desempenham um papel importante no combate às interferências e atenuação nos sistemas, existindo quatro tipos de diversidade: no tempo, no espaço, na frequência e de polarização.

Na diversidade no tempo os blocos de dados são transmitidos várias vezes em momentos diferentes, a diversidade na frequência utiliza vários canais em frequências diferentes para transmitir o mesmo sinal, combinando os sinais na recepção. Na diversidade no espaço, o sinal é transmitido por diferentes caminhos de propagação, utilizando múltiplas antenas de emissão e recepção, e na recepção é utilizado um combinador ou seleccionador que faz a escolha ou junção do sinal para que contenha a melhor qualidade possível. Por fim, a diversidade com a polarização, que

é muito parecida à diversidade no espaço, mas este utiliza polarizações diferentes entre as antenas.

## 3.7 Desvanecimento

Nas ligações de feixes hertzianos na troposfera, o sinal recebido apresenta flutuações do seu nível mediano, que se dá o nome de desvanecimento (fading). Define-se como a variação no tempo da fase, polarização ou nível de recepção do sinal, associado a frequências entre 300 *MHz* e 300 *GHz*. Geralmente está associado aos meios de propagação que envolvem a refração, reflexão, difracção, espalhamento, atenuação e os ductos. São estes meios que principalmente determinam o comportamento das ondas ao longo do tempo, o que é essencial é evitar os seus efeitos na qualidade do sinal.

Existem dois tipos de variações no desvanecimento, lentas e rápidas, algumas horas e fracções de segundos, respectivamente. Nas ligações com linha de vista, as variações lentas são normalmente originadas pelo índice de refração da atmosfera, provocando a diminuição do raio efectivo da Terra, o que pode originar intercepções com obstáculos. Quando existem condições do índice de refração fora do normal, superior a  $4/3$  ou negativo, a formação de ductos, pode reduzir-se a atenuação entre terminais durante algumas horas. Existe também outro caso que pode provocar variações lentas, embora normalmente associado ao desvanecimento rápido, que é o desvanecimento multipercurso que depende essencialmente da frequência e da localização das antenas dos terminais.

Multipercurso existe quando entre duas antenas terminais se consegue estabelecer mais do que um percurso distinto. Com atenuações semelhantes, a antena de recepção recebe interferências dos vários caminhos, com atenuações análogas e com fases relativas que dependem da diferença de comprimento dos percursos. Também podem existir reflexões nas camadas de atmosfera próximas do terreno, como a neblina ou nevoeiro e vales de muita humidade. Estas condições apenas se verificam em períodos temporais sem vento e durante a madrugada ou primeiras horas da manhã.

### 3.7.1 Desvanecimento Rápido

Considerando o clima temperado continental e terreno ondulado, nos percursos com linha de vista e sem reflexões apreciáveis, a probabilidade de potência recebida  $p$  tem de ser inferior ou

igual a  $p_o$ , no mês mais desfavorável. Pode-se estimar a probabilidade pela lei de Morita,

$$P(p \leq p_o) = 1.4 \cdot 10^{-8} \frac{p_o}{p_n} \cdot f \cdot d^{3.5} \quad (3.31)$$

, em que  $f$  é a frequência de trabalho em  $GHz$ ,  $d$  é o comprimento do percurso e  $p_n$  é a potência recebida sem desvanecimento.

A lei de Morita apenas é aplicada nas seguintes condições:

- $P_0 - P_n < -15dB$
- $P \leq 10^{-3}$
- $15 \leq d \leq 100$
- $2 \leq f \leq 37$

Segundo a Recomendação P.530-8 da ITU-R, é possível prever o desvanecimento rápido em qualquer local por dois métodos. No primeiro método, calcula-se o factor geoclimático  $K$ , para o mês mais desfavorável médio, calcula-se o módulo da inclinação do percurso  $\epsilon$  referente à altura das antenas de emissão, e também se calcula a probabilidade da potência recebida  $p$  ser inferior ou igual a  $p_o$ . O factor geoclimático é calculado com a equação 3.32, em que  $C_o$  que depende das contas inferiores das antenas, tabela 3.3,  $C_{Lat}$  é igual a zeros por nos encontrarmos entre a latitude 53°Norte e 53°Sul, e  $C_{Long}$  é igual a 3 para o continente Europeu.

Para o segundo método da Recomendação é possível calcular a fracção de tempo em que um dado valor do desvanecimento é excedido. Calcula-se primeiro o facto de ocorrência de multipercurso  $F$ , a profundidade do desvanecimento  $A_t$  à qual se processa a transição entre o desvanecimento pouco intenso e o muito intenso.

$$K = 5.0 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-0.1(C_o - C_{Lat} - C_{Long})} \cdot P_L^{1.5} \quad (3.32)$$

A margem selectiva do sistema é calculada com a equação 3.37, com base na recomendação ITU-R F.1093-1 Método B, e assim é necessário calcular o factor de ocorrência de desvanecimento profundo 3.31, tempo por símbolo equação 3.33, atraso médio do eco equação 3.34,  $P_{s/mp}$  equação 3.35 e  $\eta$  equação 3.36. Na equação 3.35,  $K_n$  é valor típico, dependente da modelação, neste caso é 5.5. Após estes cálculos consegue-se retirar os valores da margem

Cotas Inferiores (m)	$C_o$	Tipo
0 a 400	0	Planície
0 a 400	3.5	Colinas
400 a 700	2.5	Planície
400 a 700	6	Colinas
Maior 700	5.5	Planície
Maior 700	8	Colinas
Maior 700	10.5	Montanhas

Tabela 3.3: Valores para  $C_o$

selectiva, e todas as outras margens que são calculadas para obedecer às recomendações ITU da qualidade de ligação.

$$T_s = \frac{\log_2(m)}{f_b \cdot 10^6} \quad (3.33)$$

$$\tau_m = 0.7 \left( \frac{d}{50} \right)^n \quad (3.34)$$

$$P_{s/mp} = 2.16 \cdot K_n \frac{2(\tau_m \cdot 10^{-9})^2}{T_s^2} \quad (3.35)$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2k_t^{3/4}} \quad (3.36)$$

$$m_s = \frac{k_t}{\eta \cdot P_{s/mp}} \quad (3.37)$$

### 3.8 Equipamento radio-eléctrico

O equipamento radioelétrico, geralmente montado na base dos mastros que suportam as antenas, é constituído por módulos que podem ser emissores, receptores, fontes de alimentação, oscilador, modulador-desmodulador ou combinador de diversidade. Em sistemas de feixes hertzianos, embora dependa da frequência, a potência de emissão é inferior a 10 W e pode-se estimar com,

$$p_E \leq \frac{10}{f} \quad (3.38)$$

, sendo a potência dada em [W] e a frequência em [GHz]. Nesta dissertação, este tópico apenas serve como demonstração de que a potência pode ser estimada a partir da frequência.

A disponibilidade da ligação está directamente relacionada com o equipamento, e o calculo da disponibilidade da ligação pode ser uma forma de prever, ou pelo contrário, garantir a alta qualidade da ligação. Faz-se uso do conceito de ligação fictícia digital, definida na recomendação F.556-1 ITU-R, que consiste numa ligação digital, bidireccional com 2500 *km* de comprimento. A ligação fictícia digital deve ser formada por nove secções radioeléctricas idênticas e incluir, para cada direcção da transmissão, nove conjuntos de equipamento de multiplexagem. A recomendação F.557-4 ITU-R estabelece, para o circuito fictício de referencia (2500 *km*) , a indisponibilidade de 0.3 por cento. A indisponibilidade da ligação é devida principalmente a:

- Equipamento:
  - avaria ou degradação do desempenho do equipamento radioeléctrico, em particular dos moduladores e desmoduladores;
  - avaria do equipamento auxiliar;
  - avaria do sistema de alimentação de energia;
  - avaria em antenas ou linhas de alimentação;
- Propagação:
  - desvanecimentos profundos, de longa duração, associados a condições anormais de propagação como formação de ductos, atmosfera "sub-standard";
  - precipitação muito intensa;
  - desvanecimento rápido, por multi-percurso;
- Interferências;
- Instalações e torres de antenas;
- Actividade humana.

A recomendação F.696-2 ITU-R define várias classes de qualidade da ligação, associadas ao comprimento do circuito fictício. Nesta dissertação é utilizado o comprimento correspondente à classe que define a menor indisponibilidade, ou seja, 280 *km* (*d*) para o circuito fictício, o que utilizando a equação 3.39 obtêm-se o valor de indisponibilidade máxima de  $3,36 \cdot 10^{-4}$ .

$$I_{max} = 0.003 \cdot \frac{d}{2500} \quad (3.39)$$

A indisponibilidade máxima é repartida em 3 diferentes fracções apresentadas nos pontos seguintes :

- Precipitação:  $0.2 \cdot I_{max} \leq I_{ch} \leq 0.1 \cdot I_{max}$ ;
- Equipamento:  $0.4 \cdot I_{max} \leq I_{eq} \leq 0.3 \cdot I_{max}$ ;
- Outras causas:  $I_r = 0.5 \cdot I_{max}$ .

A opção tomada é a de reduzir a dependência de anomalias externas, que não podem ser controladas, como a chuva. Assim a distribuição das indisponibilidades é prevista da seguinte forma:

- Precipitação:  $I_{ch} = 0.1 \cdot I_{max} = 3.36 \cdot 10^{-5}$ ;
- Equipamento:  $I_{eq} = 0.4 \cdot I_{max} = 1.344 \cdot 10^{-4}$ ;
- Outras causas:  $I_r = 0.5 \cdot I_{max} = 1.68 \cdot 10^{-4}$ .

### 3.9 Cálculos para a ligação

Este tópico tem como objectivo fazer o seguimento do capítulo com a apresentação dos resultados teóricos obtidos a partir das equações expostas anteriormente. Para realizar os cálculos teóricos para a ligação, foram fornecidos, pela NAV, alguns dados fundamentais, mostrados na tabela A.46, a ter como base de cálculo, para que nos capítulos posteriores possam ser usados nas comparações com as simulações e as alternativas tomadas. Todos os cálculos efectuados nesta secção foram realizados com base nesses dados fornecidos, como tentativa de espelhar o sistema real. De forma a simplificar, serão substituídos os nomes da localização das antenas por pontos de A a E, como indicado na tabela 3.1 .

Para calcular a atenuação espaço livre utiliza-se a equação 3.5 e obtêm-se os resultados da atenuação apresentados na tabela 3.4, em função da frequência utilizada. Na mesma tabela também é apresentado o comprimento de onda calculado a partir da equação 3.2 para cada frequência.

Na tabela 3.5, estão descritos os resultados teóricos, para o cálculo da atenuação atmosférica nos vários sub-perfis da ligação. Os cálculos são efectuados utilizando a equação 3.8 em função

	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
$\lambda(m)$	0.039732608	0.0389379	0.03892019	0.039714186
A - B	137.4557	137.6312	137.6352	137.4598
B - C	137.5717	137.7472	137.7512	137.5758
C - D	143.6498	143.8253	143.8293	143.6539
D - E	147.7535	147.9290	147.9329	147.7575

Tabela 3.4: Atenuação Espaço Livre (dB)

dos parâmetros  $\gamma_{oO}$  e  $\gamma_{wO}$ .

	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
$\gamma_{oO}(dB/km)$	0.0060607424	0.0060750829	0.0060754121	0.0060610652
$\gamma_{wO}(dB/km)$	0.0349368925	0.0364939824	0.0365298659	0.0349718112
A - B	0.97245	1.00973	1.01058	0.97329
B - C	0.98536	1.02313	1.02400	0.98620
C - D	1.98415	2.06021	2.06196	1.98586
D - E	3.18233	3.30430	3.30712	3.18506

Tabela 3.5: Atenuação atmosférica (dB)

A atenuação provocada por hidrometeoritos é calculada com a interpolação de valores da tabela B.48, o que resulta nos valores apresentados na tabela 3.6. Após o cálculo dos valores de  $\kappa_h, \kappa_v, \alpha_h, \alpha_v$ , obtêm-se os valores de  $\kappa$  e  $\alpha$  com as equações 3.10 e 3.11, respectivamente. No final calcula-se o factor de atenuação de hidrometeoritos  $\gamma_r$ , dado em (dB/km), pela equação 3.8.

Parâmetros da chuva	Frequências (GHz)			
	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
$\kappa_h$	0,0038	0,004	0,004	0,0038
$\kappa_v$	0,0033	0,0035	0,0035	0,0033
$\alpha_h$	1,3293	1,3285	1,3285	1,3293
$\alpha_v$	1,3109	1,3106	1,3106	1,3109
$\kappa$	0,003799995	0,003999995	0,003999995	0,003799995
$\alpha$	1,329299836	1,328499839	1,328499839	1,329299836
$\gamma_R(dB/km)$	0,546472138	0,573516417	0,573516417	0,546472138

Tabela 3.6: Parâmetros para a atenuação devido á chuva

A variação do índice de refração, como já explicado na secção 3.3, é um fenómeno provocado pela atmosfera.

Com a aplicação da equação 3.30, obtêm-se ao ganho para antenas de vários diâmetros do tipo reflector parabólico, obtêm-se os seguintes resultados, visíveis na tabela 3.7. Os resultados

foram obtidos admitindo um rendimento da antena  $\eta$  de 50 %.

Diâmetro (m)	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
0.6	30.5068	30.6823	30.6862	30.5108
1	34.9437	35.1192	35.1232	34.9478
1.2	36.5274	36.7029	36.7068	36.5314
1.5	38.4656	38.6411	38.6450	38.4696
2	40.9643	41.1398	41.1438	40.9684
3	44.4862	44.6617	44.6656	44.4902

Tabela 3.7: Ganho de antenas para vários diâmetros (dBi)

No caso da atenuação de cabos ou guias de ondas, o projecto actualmente utiliza cabos de baixa atenuação, no entanto, como não existem dados relativos ao tipo de cabo, assume-se um tipo de cabo de alta performance que apresenta uma atenuação de  $0.19dB/m$ . Pelas informações fornecidas, os cabos no máximo medem 2 metros, pois o equipamento radio-eléctrico está relativamente próximo da antena. Assim, para o tamanho máximo, resulta na atenuação de  $0.38dB$ . Para os guias de ondas, segue-se a tabela 3.8, que mostra os valores da atenuação, retirados do gráfico A.21, sendo que o guia utilizado é o do tipo EW64. Este tipo de guia é um guia elíptico e a sua atenuação é calculada em função da distancia entre o equipamento rádio-electrico e a antena, ou seja, o comprimento do mastro. Ao comprimentos do mastro é acrescentado uma folga de 10 metros para compensar qualquer tipo de desvio que o guia de ondas possa ter de realizar.

Frequências (GHz)	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
Atenuação (dB)	0.960	0.936	0.934	0.944

Tabela 3.8: Atenuação nos Guias de Ondas Elípticos

Após a demonstração dos resultados teóricos para o ganho e atenuação, pretende-se mostrar de seguida o cálculo e resultado da potência recebida por cada uma das antenas. O cálculo pode ser apresentado como um todo dos ganhos e atenuações ou em condições ideais de propagação, isto é, a atenuação proveniente de situações externas não consta nos cálculos, por exemplo, a atenuação provocada por hidrometeoritos. Utilizando a equação 3.40 calcula-se a potência de recepção, onde  $P_e$  é a potência de emissão,  $A_g$  é a atenuação global, ou seja, o somatório de todas as atenuações, e  $G_{ant}$  é o somatório do ganho das antenas.

$$P_r = P_e - A_g + G_{ant} \quad (3.40)$$

Os resultados apresentados na tabela 3.9, expressos em *dB*, com base na equação 3.40, são o resultado teórico da potência de recepção para cada percurso do sistema. Para saber a potência em cada sentido do percurso, faz-se um cruzamento das frequências entre a tabela A.46 e a tabela 3.9.

Percurso	Frequências ( <i>GHz</i> )			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	-54.6867	-54.9148	-	-
B - C	-	-	-61.1957	-60-8390
C - D	-58.2940	-58.6808	-	-
D - E	-	-	-65.4727	-64.8097

Tabela 3.9: Potência de recepção (dB)

Em Condições Ideais de Propagação (CIP), o resultado melhora consideravelmente como demonstrado na tabela 3.10.

Percurso	Frequências ( <i>GHz</i> )			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	-46.3141	-46.1278	-	-
B - C	-	-	-52.2708	-52.4284
C - D	-47.4992	-47.3518	-	-
D - E	-	-	-52.6944	-52.7678

Tabela 3.10: Potência de recepção CIP (dB)

Em termos teóricos, pode-se verificar que os resultados para a potência de recepção são genericamente aceitáveis, no entanto, existem outros factores e recomendações que o sistema deve seguir para que exista uma ligação estável e regular.

As anomalias refractivas, como é referenciado na secção anterior 3.3, pode-se fazer com que os feixes não efectuem a trajectória prevista, falhando por vários metros o local desejado. Utilizando a equação 3.17 obtém-se o índice de refração em função da pressão atmosférica, temperatura absoluta e pressão parcial do vapor de água. Na tabela seguinte apresenta-se o resultado, por ordem de calculo, do índice de refração calculado com a temperatura  $T = 315.15K$ , cerca de  $42^{\circ}C$ , humidade de 100% e pressão atmosférica de 1030 *hPa*. Estes são os valores que menos favorecem a ligação.

Equação		Resultado
3.19	$e_s$	82.1064
3.20	$e$	82.1064
3.21	$\rho$	56.6098
3.18	$N$	562.18564
3.17	$n$	1.0005622
3.25	$\Delta n$	$-3.29581 \cdot 10^{-7}$
3.27	$k_e$	0.99791

Tabela 3.11: Efeitos refractivos em função de condições meteorológicas

A altitude também tem influência no índice de refração, e pode-se ver na tabela 3.12 o resultado, com indicação de cada equação, utilizando a altitude de 1000 metros.

Equação		Resultado
3.24	$n(h)$	1.00027493
3.25	$\Delta n$	$4.00695 \cdot 10^{-5}$
3.27	$k_e$	1.34257

Tabela 3.12: Efeitos refractivos em função da altitude

Verifica-se, ao analisar os valores calculados de  $k_e$ , que a altitude não tem praticamente influência no índice de refração, no entanto, o índice de refração tem valores diferentes do valor padrão quando sofre alterações das condições meteorológicas. Analisando a equação 3.18 chega-se à conclusão que a percentagem de humidade é a variável que provoca mais variação no índice de refração. Os gráficos A.22(a) e A.22(b) apresentam a variação do índice de refração com a humidade e altitude, respectivamente. Assim, pode-se concluir pelo gráfico 3.8, para o valor de  $k_e$  calculado, que a ligação pode-se encontrar numa "atmosfera sub-standard".

Os cálculos para a análise do feixe hertziano digital foram efectuados com base nos dados reais fornecidos, tabela A.46, em que o ritmo binário é  $12.22 \text{ Mbits/s}$ , a largura de banda é  $3.1 \text{ MHz}$  e o número de níveis por palavra é 16, para a modulação QAM. O factor de excesso de banda  $\beta$  (fracção de banda usada em excesso relativamente à banda de mínima) é usualmente igual a 0,142. Utilizando a equação 3.41 e a equação 3.42 obtêm-se os resultados, apresentados na tabela 3.13, para a banda mínima e banda radio-freqüência, respectivamente:

$$b_{min} = \frac{fb}{\log n} \quad (3.41)$$

, em que  $n$  é o número de níveis por palavra.

$$b_{orf} = (1 + \beta) \cdot b_{min} \quad (3.42)$$

Ritmo binário (Mbps)	12.22
Banda mínima	3.055
Banda rádio-frequência	3.48881
Ruído térmico (293 K)	-109.1498879

Tabela 3.13: Feixe Digital

A relação portadora/ruído em condições ideais de propagação é dada pela equação 3.43, em que  $N$  é o ruído nos terminais do desmodulador à temperatura  $T = 293K(Kelvin)$ , equação 3.44. Para estes cálculos foi considerado nulo o factor de ruído de Nyquist.

$$\frac{C}{N_{CIP}} = Pr_{cip} - N_{rudo} \quad (3.43)$$

$$N_{rudo} = -174 + 10 \cdot \log (b_{min} \cdot 10^6) \quad (3.44)$$

O resultado para a relação portadora/ruído é mostrado na tabela 3.14.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	62.8358	63.0221	-	-
B - C	-	-	56.8791	56.7215
C - D	61.6506	61.7981	-	-
D - E	-	-	56.4555	56.3821

Tabela 3.14:  $\frac{C}{N_{CIP}}$  (dB)

De acordo com as recomendações F.1189-1 e P.530-8 da ITU-R e G.826 da ITU-T, os critérios de qualidade são cumpridos, caso as cláusulas SESR, BBER e ESR sejam cumpridas. O valor é calculado com o valor usual de  $X = 0.08$  e utilizando a tabela 3.15. Na última linha da tabela

apresenta-se o cálculo para o ritmo binário utilizado no sistema real.

Ritmo binário (Mbits/s)	ESR	SESR	BBER
1.5 - 5.0	$0.04 \cdot X$	$0.002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$
5.0 - 15.0	$0.05 \cdot X$	$0.002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$
15.0 - 55.0	$0.075 \cdot X$	$0.002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$
55.0 - 160.0	$0.16 \cdot X$	$0.002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$
12.22	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$

Tabela 3.15: Recomendações ITU

Para calcular a margem selectiva do sistema serão efectuados os cálculos, como descrito anteriormente, com base na recomendação ITU-R F.1093-1 Método B. Começando pelo cálculo do tempo por símbolo, equação 3.33, o resultado depende do ritmo binário e do número de níveis por palavra. Assim, para o ritmo binário de 12.22 *Mbps* e 16 níveis por palavra, obtém-se o resultado  $T_s = 3.27 \cdot 10^{-7}$ , constante para qualquer ponto da ligação. O cálculo do atraso médio do eco 3.34 também é de calculo simples, apenas depende da distância e do valor *n*, compreendido entre 1.3 e 1.5. Para os valores apresentados, na primeira tabela do conjunto de cálculos auxiliares B.49, foi usado o valor médio de *n*, 1.4. Na mesma tabela encontra-se também o resultado do calculo da equação 3.35, que também é utilizado para o calculo da margem selectiva do sistema. O factor de ocorrência de desvanecimento profundo é calculado com a equação 3.31, com  $p_o = p_n$ , demonstrado na segunda tabela do conjunto B.49. Por fim, a última tabela do conjunto apresenta o calculo do rendimento que depende do factor de ocorrência de desvanecimento profundo.

Após este conjunto de cálculos, pode-se determinar a margem selectiva do sistema, utilizando a equação 3.37, como mostrado na seguinte tabela. A margem selectiva vai permitir calcular a margem real que por sua vez irá permitir calcular a margem de segurança que o sistema deve ter para funcionar.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	107132.62	107679.05	-	-
B - C	-	-	105001.52	104468.79
C - D	27505.28	27651.08	-	-
D - E	-	-	11572.13	11504.61

Tabela 3.16: Margem Selectiva  $m_s$

A margem uniforme é calculada utilizando a equação 3.45 , em que se subtrai a relação portadora/ruído mínima à relação portadora/ruído em condições ideais de propagação. Para a norma SESR, o valor da relação é obtido a partir do valor da tabela 3.15 e do grafico A.23. Apresenta-se assim o resultado para a norma SESR da margem uniforme na tabela 3.17.

$$M_u = \left(\frac{C}{N}\right)_{CIP} - \left(\frac{C}{N}\right)_{min} \quad (3.45)$$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	43.14	43.33	-	-
B - C	-	-	37.18	37.03
C - D	41.96	42.11	-	-
D - E	-	-	36.77	36.70

Tabela 3.17: Margem Uniforme  $M_u$

A margem real é calculada com o recurso à equação 3.46 , utilizando a margem uniforme e a margem selectiva.

$$M_r = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{\frac{1}{m_u} + \frac{1}{m_s}}\right) \quad (3.46)$$

$$M_{rmin} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{k_t}{(c/n)_{sesr}}\right) \quad (3.47)$$

Na norma SESR, a margem real obtida é apresentada na tabela 3.18. É necessário comparar a margem real com a margem real mínima, equação 3.47, que serve para comprovar se a ligação se encontra dentro do limite mínimo recomendado. Como se pode comprovar na tabela 3.19, a norma SESR cumpre os mínimos exigidos, mostrados pela margem de segurança, que é a diferença entre a margem real e a margem real mínima.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	42.38	42.54	-	-
B - C	-	-	36.97	36.82
C - D	40.00	40.10	-	-
D - E	-	-	35.27	35.21

Tabela 3.18: Margem Real  $M_r$

Para as normas BBER e ESR é necessário refazer os cálculos a partir da margem uniforme, pois

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	26.05	26.12	-	-
B - C	-	-	20.36	20.29
C - D	12.83	12.85	-	-
D - E	-	-	0.84	0.87

Tabela 3.19: Margem de Segurança  $M_{seg}$

a relação portadora/ruído para este caso é definida a partir do valor  $r_{ber}$  que vai ditar a qualidade exigida da ligação. Foi utilizado um valor usual de  $10^{-12}$  que resulta na relação portadora/ruído mínima de  $26.4dB$ . A margem uniforme obtida para estas normas é indicada na tabela 3.20.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	36.44	36.63	-	-
B - C	-	-	30.48	30.33
C - D	35.26	35.41	-	-
D - E	-	-	30.07	30.00

Tabela 3.20: Margem Uniforme  $M_u$

Calcula-se também a margem real para estas normas, tabela 3.21.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	36.26	36.44	-	-
B - C	-	-	30.44	30.28
C - D	34.76	34.89	-	-
D - E	-	-	29.70	29.63

Tabela 3.21: Margem Real  $M_r$

Após o cálculo da margem real, é necessário, utilizando as equações 3.48 e 3.49, efectuar estes cálculos para se conseguir determinar a margem absoluta da ligação, equação 3.50. Com a margem absoluta e o  $sesr$  é possível calcular  $bber$  e  $esr$  que vão ditar a qualidade da ligação.

$$P(rber) = \frac{k_t}{m_r^{rber}} \quad (3.48)$$

$$sesr = \frac{k_t}{m_r^{SESr}} \quad (3.49)$$

$$m_{abs} = \left| \frac{\log_{10}(rber) - \log_{10}(ber_{SESr})}{\log_{10}(P(rber)) - \log_{10}(sesr)} \right| \quad (3.50)$$

Os valores obtidos após a aplicação das equações são apresentados nas tabelas 3.22, 3.23 e 3.24.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$1.623 \cdot 10^{-6}$	$1.589 \cdot 10^{-6}$	-	-
B - C	-	-	$6.637 \cdot 10^{-6}$	$6.743 \cdot 10^{-6}$
C - D	$2.785 \cdot 10^{-5}$	$2.755 \cdot 10^{-5}$	-	-
D - E	-	-	$4.757 \cdot 10^{-4}$	$4.738 \cdot 10^{-4}$

Tabela 3.22:  $P(rber)$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$3.973 \cdot 10^{-7}$	$3.908 \cdot 10^{-7}$	-	-
B - C	-	-	$1.474 \cdot 10^{-6}$	$1.496 \cdot 10^{-6}$
C - D	$8.335 \cdot 10^{-6}$	$8.308 \cdot 10^{-6}$	-	-
D - E	-	-	$1.319 \cdot 10^{-4}$	$1.311 \cdot 10^{-4}$

Tabela 3.23:  $sesr$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	12.59	12.63	-	-
B - C	-	-	11.77	11.76
C - D	14.68	14.77	-	-
D - E	-	-	13.80	13.78

Tabela 3.24: Margem Absoluta  $M_{abs}$

Após obter a margem absoluta e o  $sesr$ , vai-se obter o  $bber$  e o  $esr$  com as equações 3.51 e 3.52, respectivamente. Os parâmetros  $\alpha_1 = 30$ ,  $\alpha_2 = 1$  e  $\alpha_3 = 1$  são escolhidos de forma a maximizar os resultados, assim obtém-se o pior caso. O parâmetro  $N_b$  utilizado é 3424 bits por bloco, obtido a partir da recomendação P530-9 ITU-R em função do ritmo binário utilizado, e o parâmetro  $rber$  é  $10^{-12}$ , como já referido anteriormente. O resultado destes cálculos é apresentado na tabela 3.25 para o  $bber$  e na tabela 3.26 para o  $esr$ .

$$bber = sesr \frac{\alpha_1}{2.8 \cdot \alpha_2 (m - 1)} + \frac{N_b \cdot rber}{\alpha_3} \quad (3.51)$$

$$esr = sesr \sqrt[m]{N} + \frac{N \cdot N_b \cdot rber}{\alpha_3} \quad (3.52)$$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$3.708 \cdot 10^{-7}$	$3.635 \cdot 10^{-7}$	-	-
B - C	-	-	$1.470 \cdot 10^{-6}$	$1.493 \cdot 10^{-6}$
C - D	$6.531 \cdot 10^{-6}$	$6.467 \cdot 10^{-6}$	-	-
D - E	-	-	$1.104 \cdot 10^{-4}$	$1.099 \cdot 10^{-4}$

Tabela 3.25: *bber*

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$7.575E \cdot 10^{-6}$	$7.561 \cdot 10^{-6}$	-	-
B - C	-	-	$9.660 \cdot 10^{-6}$	$9.703 \cdot 10^{-6}$
C - D	$2.084 \cdot 10^{-5}$	$2.075 \cdot 10^{-5}$	-	-
D - E	-	-	$2.356 \cdot 10^{-4}$	$2.344 \cdot 10^{-4}$

Tabela 3.26: *esr*

Caso o sistema utilize diversidade será necessário calcular o factor de multiplicação que provocará uma melhoria no sistema. O sistema actual utiliza diversidade no espaço, o que faz com que seja calculado o factor de melhoria  $i_{div}$  com a equação 3.53 e resultados na tabela 3.27. A distância entre antenas  $d_c$  utilizada é indicada na tabela A.46. A nova margem selectiva é calculada multiplicando a margem selectiva anterior com o factor de melhoria, como mostrado na equação 3.54 e resultados na tabela 3.28.

$$i_{div} = 1.21 \cdot 10^{-3} \frac{d_c^2 \cdot f}{d} \quad (3.53)$$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	1030.888166	1057.294182	-	-
B - C	-	-	1017.962281	992.5488222
C - D	129.7174795	133.0666651	-	-
D - E	-	-	34.73750699	33.84435825

Tabela 3.27: Factor de melhoria para a diversidade

$$m_{sei}(div) = m_s \cdot i_{div} \quad (3.54)$$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	110441751.9	113848437.9	-	-
B - C	-	-	106887589.4	103690370.6
C - D	3567916.129	3679437.177	-	-
D - E	-	-	401987.0478	389366.0604

Tabela 3.28: Margem Selectiva com diversidade

Após o calculo da nova margem selectiva, são feitos todos os cálculos como na ligação sem diversidade. Apenas são apresentados os resultados para a margem de segurança  $M_{seg-div}$  da norma SESR , tabela 3.29, e os resultados de  $bber$  e  $esr$ , tabela 3.30 e 3.31, respectivamente.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	26.81	26.91	-	-
B - C	-	-	20.57	20.50
C - D	14.77	14.83	-	-
D - E	-	-	2.28	2.29

Tabela 3.29: Margem de Segurança com diversidade,  $M_{seg-div}$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	3.441E-07	3.365E-07	-	-
B - C	-	-	1.439E-06	1.462E-06
C - D	5.439E-06	5.365E-06	-	-
D - E	-	-	9.610E-05	9.580E-05

Tabela 3.30: *bber* com diversidade

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	7.494E-06	7.480E-06	-	-
B - C	-	-	9.570E-06	9.615E-06
C - D	1.717E-05	1.702E-05	-	-
D - E	-	-	1.896E-04	1.890E-04

Tabela 3.31: *esr* com diversidade

Ficam assim terminados todos os cálculos teóricos essenciais para uma ligação por feixe hertzianos entre dois pontos terminais. As conclusões relativamente aos cálculos e alternativas que podem ser utilizadas são apresentadas no capítulo seguinte.

## Capítulo 4

# Simulação do Feixe Hertziano

### 4.1 Comparação dos resultados teóricos com os resultados simulados e reais

O presente ponto do capítulo 4 tem como objectivo demonstrar os resultados das várias simulações e comparar com os resultados teóricos, obtidos no capítulo anterior, e com os dados reais fornecidos. As simulações foram realizadas com o programa Mathematica, utilizando o script Feixer, script este que é utilizado numa das disciplinas do ramo de telecomunicações do curso de Engenharia Electrotécnica e Computadores, nomeadamente a disciplina de Sistemas de Telecomunicações Via Rádio. As simulações também poderiam ser efectuadas no programa *PathLoss*, no entanto, a sua licença é muito dispendiosa para ser apenas aplicada na dissertação.

Este ponto é dividido em duas secções, uma primeira onde é feita referência e comparando os elementos de propagação e uma segunda onde está descrita a parte digital do feixe, onde estão incluídas as clausulas ITU, ritmo binário, largura de banda e número de níveis por palavra.

#### 4.1.1 Elementos de Propagação

São aqui comparados os elementos de propagação como os ganhos, atenuações e outro tipo de fenómenos que possam comprometer a ligações em termos de propagação.

A tabela seguinte apresenta os resultados para o ganho das antenas, com dois diâmetros diferentes, que são os utilizados no sistema real.

Diâmetro (m)	Frequências (GHz)			
	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
0,6	30,5128	30,6883	30,6922	30,5168
1,2	36,5334	36,7089	36,7128	36,5374

Tabela 4.32: Ganho de antenas para vários diâmetros simulado(dBi)

Pode-se comprovar, entre os cálculos teóricos, tabela 3.7, e o simulado, tabela 4.32, que a diferença é mínima, ao nível da centésima, o que não irá comprometer a ligação. Ao comparar os resultados com os dados fornecidos, tabela A.46, verifica-se que as diferenças são um pouco maiores. Tais diferenças devem-se ao facto de o rendimento das antenas teóricos e simulados,  $\eta = 0.5$ , não serem iguais aos do sistema real, cerca de  $0.6 < \eta < 0.7$ . O rendimento utilizado irá favorecer a optimização do sistema, no final da análise, relativamente ao sistema real.

Quanto às atenuações da ligação, começa-se por analisar a atenuação de valor mais elevado, a atenuação espaço livre. Ao comparar os valores simulados da tabela 4.33 com os valores teóricos da tabela 3.4, comprova-se, tal como os ganhos, que a diferença é mínima e não terá influência na potência de recepção, já que o valor da atenuação espaço livre é muito elevado.

$\lambda(m)$	Frequências (GHz)			
	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
$\lambda(m)$	0.0397326	0.0389379	0.0389202	0.0397142
A - B	137,503	137,679	-	-
B - C	-	-	137,797	137,622
C - D	143,698	143,873	-	-
D - E	-	-	147,980	147,805

Tabela 4.33: Atenuação Espaço Livre Simulada(dB)

Os resultados da atenuação espaço livre, tal como a atenuação atmosférica e da chuva, não são apresentados visto que não existe forma de os medir fisicamente, apenas existem métodos que permitem estimar a atenuação, utilizando dados físicos, o que acaba por ser a demonstração teórica, como apresentado no capítulo 3. Em termos de atenuação atmosférica, foram utilizados dados iguais aos dos cálculos teóricos, e são apresentados na tabela 4.34.

	Frequências (GHz)			
	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
$\gamma_{oO}$ (dB/km)	0,006162	0,00618	0,006181	0,006162
$\gamma_{wO}$ (dB/km)	0,033978	0,035495	0,03553	0,034012
A - B	0,952106	0,988542	-	-
B - C	-	-	1,00251	0,965568
C - D	1,94264	2,01698	-	-
D - E	-	-	3,23773	3,11842

Tabela 4.34: Atenuação atmosférica Simulada (dB)

A simulação para a atenuação nos guias de ondas faz referência ao guia elíptico EW64, tabela 4.35, tal como já referenciado no capítulo anterior. Existem diferenças mínimas entre os cálculos teóricos e os simulados, devido ao facto de os resultados teóricos serem estimados pelo gráfico A.21, não obtendo precisão suficiente. Na simulação são usados guias com o comprimento dos mastros, mais um acrescento de 10 metros de folga.

Frequências (GHz)	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
Atenuação EW64 (dB)	0.944147	0.935101	0.934889	0.943944

Tabela 4.35: Atenuação nos Guias de Ondas Elípticos Simulada

Para a ligação actual, utilizam-se cabos coaxiais, visto que a antena está muito próxima do equipamento radio-eléctrico. A simulação para o caso dos cabos coaxiais não é realizada pois o simulador não permite; no entanto, não deve variar muito em relação aos cálculos teóricos. Comparando os dois tipos de transporte, pode-se concluir que para distâncias pequenas compensa utilizar o cabo, visto que possui um custo muito inferior aos guias, mas para distância como a simulada, é vantajoso utilizar os guias pois utilizar o cabo duplicaria a atenuação.

No final dos cálculos, obtém-se a potência de recepção em condições ideais de propagação. Em comparação entre as tabelas 3.10 e 4.36, verifica-se que a diferença entre os cálculos teóricos e simulados não é significativa, e deve-se simplesmente ao arredondamento dos cálculos em cada umas das equações.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
A - B	-46,2977	-46,1405	-	-
B - C	-	-	-52,2852	-52,4418
C - D	-47,4618	-47,3425	-	-
D - E	-	-	-52,6623	-52,7365

Tabela 4.36: Potência de recepção CIP Simulada (dB)

## 4.1.2 Feixe Hertziano Digital

Os cálculos para a análise do feixe hertziano digital foram efectuados com base nos dados reais fornecidos, tabela A.46, em que o ritmo binário é 12.22 Mb/s, a largura de banda é 3.1 MHz e o número de níveis por palavra ( $n$ ) é 16, para a modulação QAM. O factor de excesso de banda  $\beta$  (fracção de banda usada em excesso relativamente à banda de mínima) é usualmente igual a 0,142. Com estes valores, calcula-se a banda mínima e banda radio-freqüência, utilizando como referência as equações 3.41 e 3.42. Obtêm-se valores idênticos ao teórico da tabela 3.13, no entanto o valor do ruído térmico é ligeiramente diferente, devido a arredondamentos, cerca de  $N_{ruído} = -109,08$ .

O resultado da simulação da relação portadora/ruído em condições ideais de propagação é mostrado da tabela 4.37. Verifica-se que os valores são muito idênticos, o que leva a comprovar que os resultados até esta fase estão correctos.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
A - B	62,7827	62,9398	-	-
B - C	-	-	56,7951	56,6285
C - D	61,6186	61,7378	-	-
D - E	-	-	56,4181	56,3439

Tabela 4.37:  $\frac{C}{N_{CIP}}$  Simulado (dB)

Com o script utilizado é possível estimar a fiabilidade do equipamento e relacioná-la com as recomendações ITU-R que o equipamento necessita de cumprir para que a ligação seja estável em termos de avarias. Consideram-se os tempos médios entre avarias MTBF apresentados na tabela 4.38. Estes tempos são valores de referência geralmente utilizados neste tipo de sistemas. O tempo médio para a detecção, reparação e reposição de uma avaria MTFF é cerca de 6 horas

	MTBF	Tempo (h)
Emissor		120000
Desmodulador		140000
Modulador		200000
Receptor		200000

Tabela 4.38: Tempos Médios entre Avarias

A partir deste ponto, o simulador utilizado não consegue efectuar mais cálculos para o ritmo

binário da ligação. O simulador está restringido a ritmos binários específicos que não englobam os  $12.22Mbps$ , no entanto, são de seguida mostrados os resultados, utilizando como referência o ritmo binário de  $6Mbps$ , pois é o ritmo binário do simulador mais proximo em termos de características. Utilizando este ritmo binário, obtêm-se os parâmetros apresentados na tabela 4.39, e a relação portadora/ruído mostrada na tabela 4.40.

Ritmo binário (Mbps)	6.0
Banda mínima	1.5
Banda rádio-frequência	1.713
Ruído térmico (293 K)	-112.2390874

Tabela 4.39: Feixe Digital

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	67.4555	67.6126	-	-
B - C	-	-	61.4679	61.3114
C - D	66.2914	66.4107	-	-
D - E	-	-	61.0909	61.0167

Tabela 4.40:  $\frac{C}{N_{CIP}}$  (dB)

Para cumprir com as recomendações ITU, utilizam-se valores iguais aos utilizados para o ritmo binário de  $12.22 Mbps$ , como na tabela 3.15. Obtêm-se assim os valores de  $sesr$ ,  $bber$  e  $esr$  nas tabelas 4.41 , 4.42 e 4.43, respectivamente.

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$2.48524 \cdot 10^{-6}$	$2.44045 \cdot 10^{-6}$	-	-
B - C	-	-	$1.03252 \cdot 10^{-5}$	$1.05135 \cdot 10^{-5}$
C - D	$4.25549 \cdot 10^{-5}$	$4.21555 \cdot 10^{-5}$	-	-
D - E	-	-	$7.79122 \cdot 10^{-4}$	$7.78426 \cdot 10^{-4}$

Tabela 4.41:  $sesr$

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$2.06148 \cdot 10^{-6}$	$2.02436 \cdot 10^{-6}$	-	-
B - C	-	-	$8.55549 \cdot 10^{-6}$	$8.71151 \cdot 10^{-6}$
C - D	$3.52091 \cdot 10^{-5}$	$3.48777 \cdot 10^{-5}$	-	-
D - E	-	-	$6.44947 \cdot 10^{-4}$	$6.44374 \cdot 10^{-4}$

Tabela 4.42: bber

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$1.11355 \cdot 10^{-5}$	$1.10582 \cdot 10^{-5}$	-	-
B - C	-	-	$2.46625 \cdot 10^{-5}$	$2.49874 \cdot 10^{-5}$
C - D	$8.02262 \cdot 10^{-5}$	$7.95365 \cdot 10^{-5}$	-	-
D - E	-	-	$1.3507 \cdot 10^{-3}$	$1.3495 \cdot 10^{-3}$

Tabela 4.43: esr

Verifica-se que os valores das normas SESR e BBER, para os percursos  $C - D$  e  $D - E$ , não cumprem com as recomendações, ficando acima do valor máximo da norma.

Neste caso, para cumprir as recomendações ITU será necessário utilizar diversidade. O simulador permite utilizar diversidade espacial ou em frequência. No caso da diversidade espacial, é necessário que a antena principal e secundária estejam distanciadas em 5 metros, no caso do percurso  $C - D$  e 61 metros em  $D - E$ . Para a diversidade em frequência, é necessário que a separação entre as frequências portadoras seja superior a 100 MHz no percurso  $C - D$  e 450 MHz no percurso  $D - E$ . Os resultados obtidos para os dois tipos de diversidade são apresentados em anexo B.3.

Apenas são apresentados os valores para os dois percursos com maior distância, pois apenas estes necessitam de diversidade e a utilizam na realidade.

Também em anexo é apresentada a tabela A.47, entre o dia 7 de Maio de 2011 e 15 de Junho de 2011, datas onde tem sido frequente a ocorrência de erros no percurso  $D - E$ . Com esta tabela, comprova-se que os resultados teóricos e simulados estão de acordo com o que realmente acontece, pois existem dias em que os valores das normas não são cumpridos, provocando assim erros e perdas de dados na transmissão.

## 4.2 Análise e Explicação das Discrepâncias Verificadas

Sob forma de analisar e explicar os erros da ligação, são apresentados os possíveis motivos para a ocorrência de erros. Começando pelos erros provocados por anomalias atmosféricas, realizou-se uma compilação de dados, resultante de várias estações meteorológicas amadoras, pois o Instituto de Meteorologia (IM) não forneceu os dados pretendidos. As estações meteorológicas foram escolhidas de forma a se localizarem o mais próximo do percurso do feixe. Como demonstra a figura B.29, existem apenas 4 estações possíveis, Barreira de Água (13), Lousã (15), Mirando do Corvo (16) e Tomar (17). A compilação de dados foi realizada para as datas entre o dia 7 de Maio de 2011 e 15 de Junho de 2011 e também, especificamente, para o dia 15 de Junho de 2011. Obtevem-se os gráficos B.26 e B.27, para duas localidades próximas do percurso  $D - E$ , no período de 40 dias. Para o mesmo percurso, e especificamente para o dia 15 de Junho de 2011, obteve-se o conjunto de gráficos B.28, em três localidades próximas.

Comprova-se, após análise dos gráficos, que a humidade relativa tem grande influência no sinal, reparando-se que sempre que existem picos em que a humidade é maior que 90% o sinal sofre interrupções. A humidade presente nestes locais é determinante para a formação de nevoeiro ou camadas de atmosfera fechadas, diferentes do habitual, provocando alterações na trajectória do feixe ou mesmo no transporte do feixe para zonas fora do alcance da antena de recepção.

Os dados utilizados das várias estações não são os mais correctos, pois para além da fraca precisão existe o facto de que o feixe se localiza a uma altura superior na atmosfera, não se sabendo o que acontece ao nível do feixe; no entanto, é apresentada de seguida a tabela 4.44 que mostra uma estatística para a ocorrência de interrupções na ligação.

	Barreira de Água			
	Médias utilizadas	Dias c/alarme	Total dias	Percentagem
Humidade Max.	99%	20	34	58.82%
Humidade Média	80%	12	19	63.16%
Temperatura Max.	23°C	11	24	45.83%
Temperatura Média	17°C	12	23	52.17%
Temperatura Mínima	11°C	11	20	55.00%
	Miranda do Corvo			
	Médias utilizadas	Dias c/alarme	Total dias	Percentagem
Humidade Max.	90%	15	25	60.00%
Humidade Média	74%	10	14	71.42%
Temperatura Max.	26°C	12	23	52.17%
Temperatura Média	19°C	13	26	50.00%

Tabela 4.44: Estatística

Após a análise, consegue-se concluir que na maioria das vezes em que as médias utilizadas

são igualadas ou ultrapassadas existem interrupções no feixe. No caso da temperatura mínima, 55% das vezes em que a temperatura é menor ou igual a 11°C, ocorrem interrupções. Este nível de temperatura(fria) juntado com a humidade(saturada) provoca camadas de nevoeiro que são prejudiciais à continuidade de serviço do feixe.

Outra situação que pode diferenciar os resultados teóricos e os resultados reais é o facto de na realidade não se conseguir chegar a CIP. Existem sempre factores, como a já explicada meteorologia, que não é controlável, e também os materiais utilizados nas antenas, cabos e material radio-eléctrico. Em todos os cálculos teóricos foram utilizados guias de ondas em vez dos cabos coaxiais, que são utilizados na realidade, isto porque um guia de ondas garante menos perdas, sendo no entanto, muito mais dispendioso e difícil de manusear. Na teoria utilizam-se fórmulas que seguem modelos para estimar os vários parâmetros, que por vezes podem conter erros no arredondamento.

Os parâmetros de normas de qualidade utilizados também não são iguais aos utilizados na realidade, são parâmetros médios que usualmente se utilizam para os cálculos.

### **4.3 Proposta para Assegurar a Qualidade da Ligação**

Para garantir a qualidade de ligação será necessário aumentar a relação sinal/ruído em cerca de  $10.5dBm$ . Este ganho pode ser obtido incrementando a potência de emissão, principalmente para o percurso  $D - E$ , ou também para o mesmo percurso podem ser utilizadas antenas com mais 1 metros de diâmetro, ou seja, 2.2 metros, que vai perfazer os  $10.5dBm$  de incremento na relação sinal/ruído.

Por outro lado, podem ser feitas alterações na configuração da diversidade utilizada. Actualmente, é utilizada a diversidade espacial, e em tempos foi utilizada a diversidade em frequência, mas nenhuma destas conseguiu obter a qualidade da ligação esperada. Pode ser alterada a configuração para diversidade quádrupla, de espaço e frequência, realizando assim uma solução que aumenta a qualidade de ligação e reduz as interrupções de sinal do feixe. Para este tipo de configuração seria necessário, para a diversidade espacial, distanciar as antenas 20 metros uma da outra e, para a diversidade em frequência, separar as portadoras em  $300 MHz$ . Assim, conseguem-se obter os resultados suficientes para cumprir todas as normas e garantir a qualidade da ligação.

Qualquer uma das opções é sempre muito dispendiosa. Os valores médios, disponíveis na internet, são apresentados na tabela 4.45.

	Quantidade	Preço Unitário	Total
Aumentar diametro das antenas	4	4000€	16000€
Alterar para torres auto soportadas 30 metros	2	8200€	16400€
20 metros de guia de ondas elíptico	2	1365€	2730€

Tabela 4.45: Preços para alteração de configurações

Estes valores, apesar de médios, seriam os custos-base para alteração do sistema, de forma a melhorar a qualidade da ligação, principalmente no ultimo percurso  $D - E$ . A opção mais viável será a alteração das antenas para um diâmetro maior, conseguindo-se assim garantir um ganho de  $10.5dBm$  na ligação.



## Capítulo 5

# Conclusões

### 5.1 Conclusão e perspectivas de trabalho futuro

Esta dissertação de mestrado teve como principal objectivo contribuir e clarificar toda a envolvente de uma ligação por Feixe Hertziano utilizada pela NAV, com o propósito de dimensionar o sistema para que este seja exemplar na qualidade e quantidade de informação transportada.

Começou-se por realizar uma apresentação histórica da evolução dos sistemas por feixes hertzianos nos seus vários aspectos, como os canais utilizados, frequências e modulações. Indicou-se os vários sistemas utilizados pelos controladores de tráfego aéreo que fazem uso dos sistemas por feixes hertzianos. Justificou-se assim o tão importante que é que haja uma ligação constante, sem inoperâncias e o impacto que pode existir no caso de falhas no sistema.

Apresentou-se de um modo geral todas equações ou temas que incidem no dimensionamento de um sistema desta envergadura, seguindo-se de os cálculos realizados.

Os resultados teóricos obtidos demonstram que o sistema, de quatro saltos, é fiável nos primeiros dois saltos do sistema. No terceiro salto a ligação é minimamente estável e no último salto o sistema apresenta anomalias que provocam fragilidade na ligação, apresentando várias perdas de sinal, que põem em causa a qualidade desejada.

Após análise teórica realizaram-se simulações, com recurso ao script feixer e utilização do programa mathematica. As simulações para o cálculo do perfil resultaram na confirmação, em parte, dos resultados obtidos na análise teórica. O script é limitado à introdução de certos parâmetros

para o feixe hertziano digital. Realizou-se uma comparação lógica recorrendo outros parâmetros para se compreender o que pode ser melhorado no sistema de feixe hertziano para que todas as recomendações ITU fossem cumpridas. Foi necessário recorrer a dados fornecidos de várias estações meteorológicas amadoras para conseguir realizar um estudo mais aprofundado que abrangesse todas as condições meteorológicas e desse modo compreender a interferência que essas condições atmosféricas exercem sobre o sistema feixe hertziano.

Os cálculos teóricos foram realizados com um pequeno simulador em excel, desenvolvido por mim, de forma a facilitar os cálculos no decorrer da análise teórica e também no momento de efectuar alterações num ou noutro parâmetro.

A comparação entre o desempenho teórico, simulado e real, do sistema por feixe hertziano, que é actualmente utilizado pela NAV, permitiu visualizar discrepâncias e propor algumas soluções com fundamento teórico que podem ser adoptadas a fim de melhorar a qualidade de serviço da ligação.

Como complemento da dissertação realizada, seria positivo efectuar medições em cada uma das estações, a fim de obter resultados exactos do que acontece na realidade. Também seria interessante efectuar, a nível experimental, várias alterações de alguns parâmetros e visualizar o impacto que o sistema sofre com as pequenas alterações.

Adoptar as soluções demonstradas vai permitir a NAV prestar um melhor serviço, sem falhas, para uma sociedade cada vez mais moderna e dependente da aviação.

Foram também dadas como contribuições originais uma folha de cálculo desenvolvida ao logo desta dissertação bem como uma pequena base de dados com valores de estações meteorológicas amadoras. A folha de calculo permite substituir praticamente o simulador e assim efectuar todos os cálculos necessários para uma ligação deste tipo. Os dados de estações meteorológicas foram utilizados para obter estimativas muito úteis para tentar perceber a situação actual do sistema.





## Apêndice A

# Materiais em Anexo

### A.1 Imagens do Perfil



Figura A.12: Marcação da antena no Aeroporto de Lisboa



Figura A.13: Marcação da antena na Serra de Montegordo



Figura A.14: Marcação da antena na Serra de Montejunto



Figura A.15: Marcação da antena na Serra d'Aire e Cadeiros



Figura A.16: Marcação da antena na Serra da Lousã

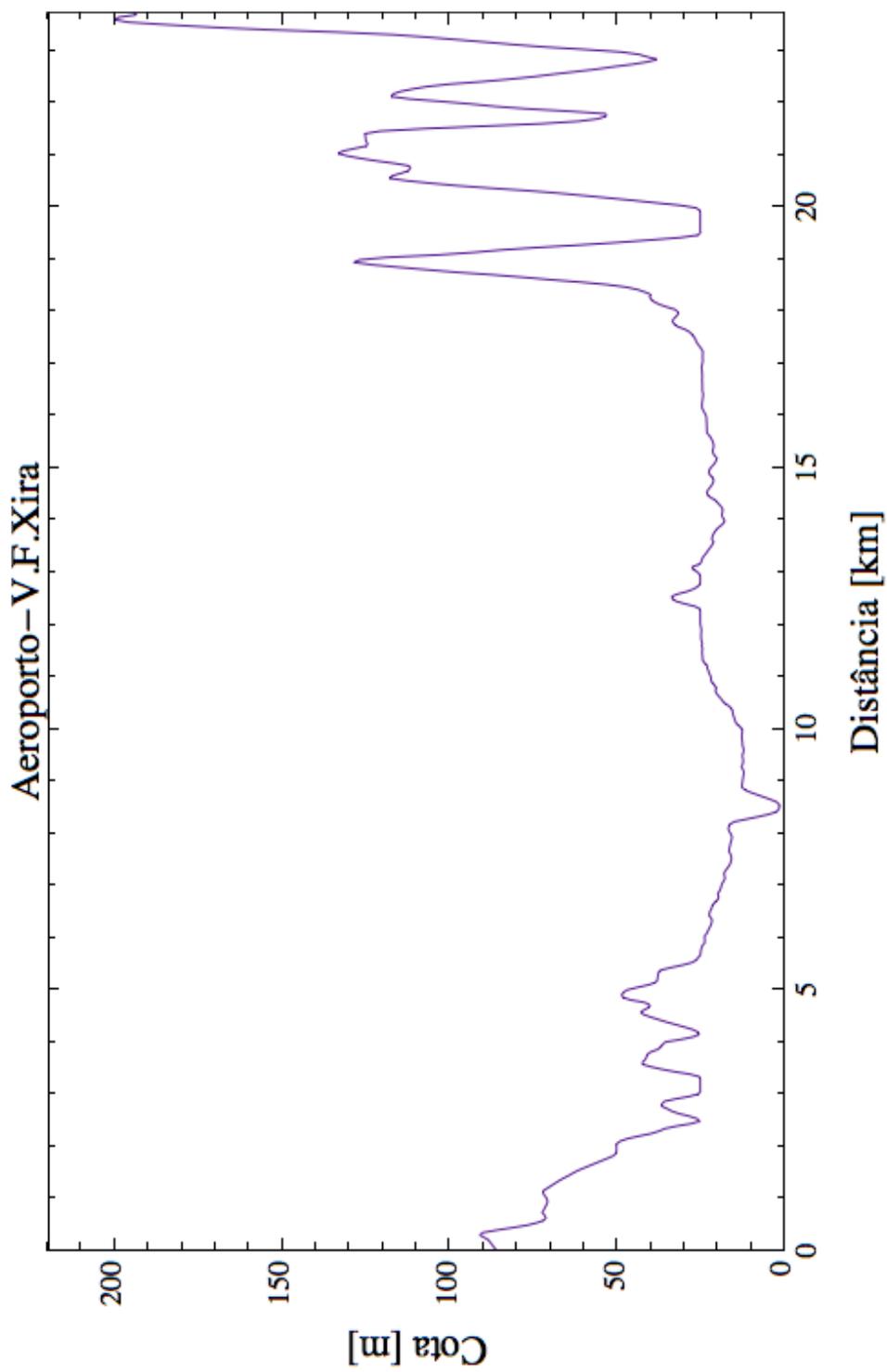


Figura A.17: Subperfil entre o Aeroporto de Lisboa e a Serra de Montegordo (23.720 km)

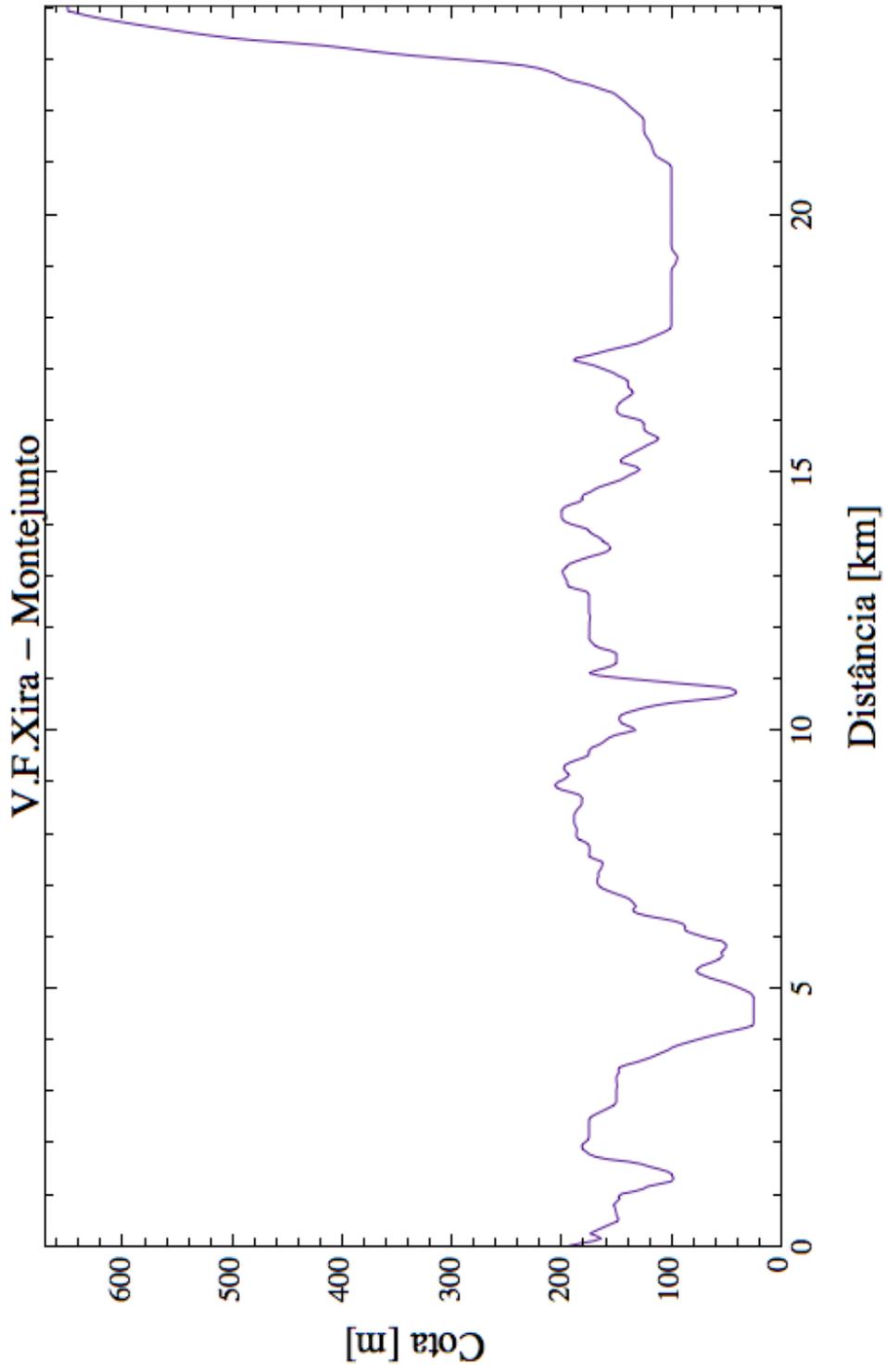


Figura A.18: Subperfil entre a Serra de Montegordo e a Serra de Montejunto (24.035 km)

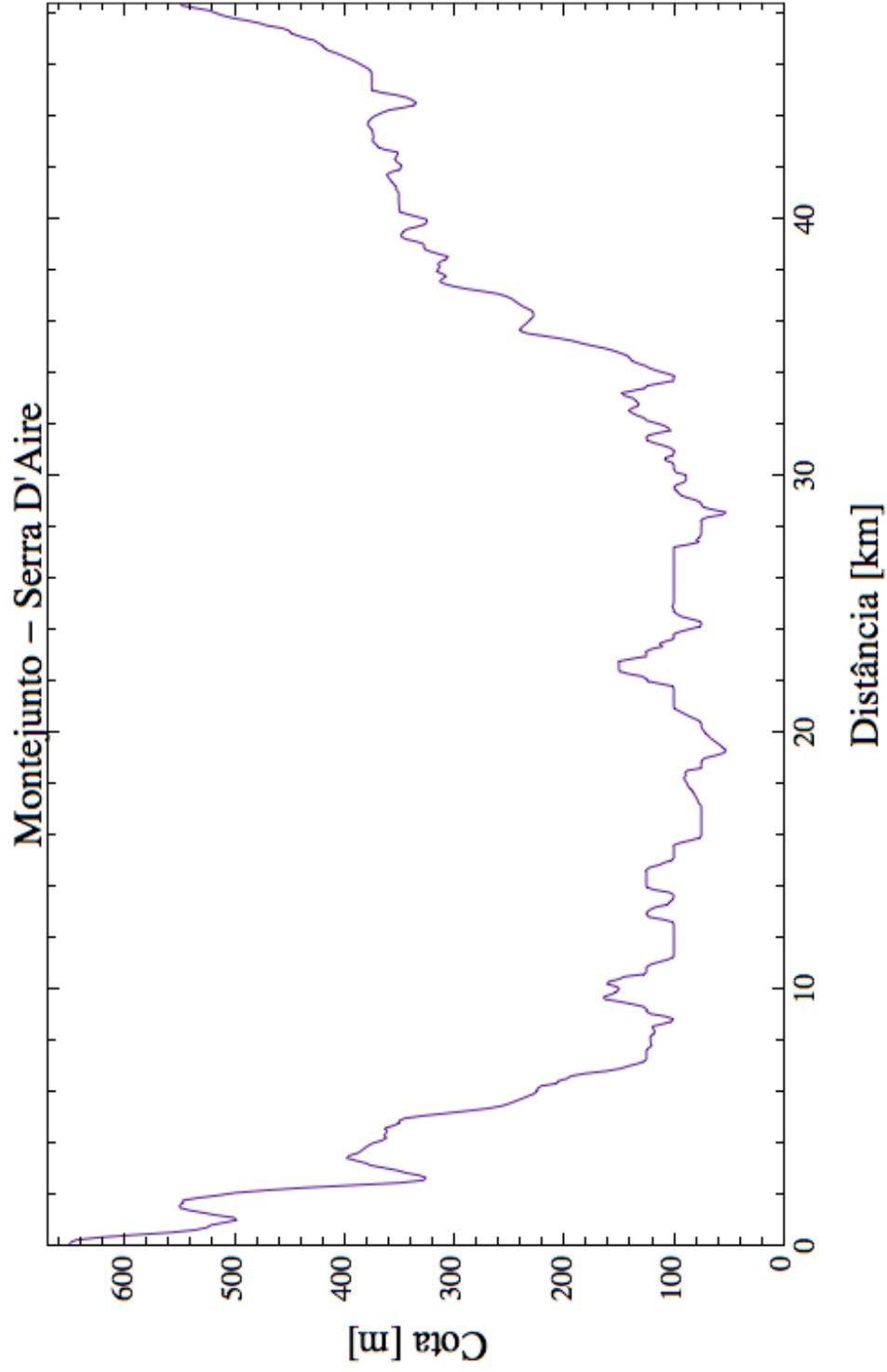


Figura A.19: Subperfil entre a Serra de Montejunto e a Serra d'Aire e Cadeeiros (48.397 km)

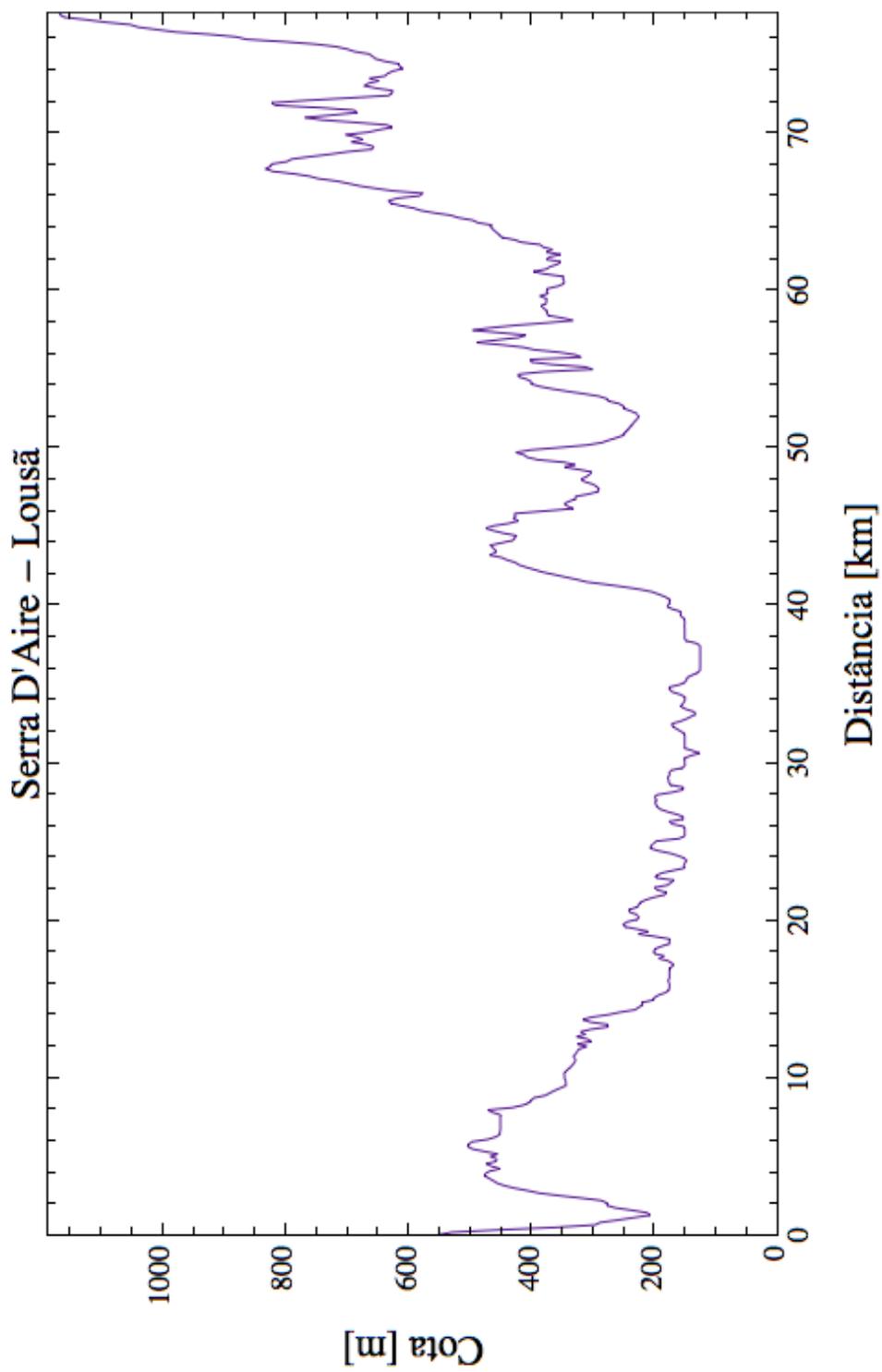


Figura A.20: Subperfil entre a Serra d'Aire e Cadeeiros e a Serra da Lousã (77.222 km)

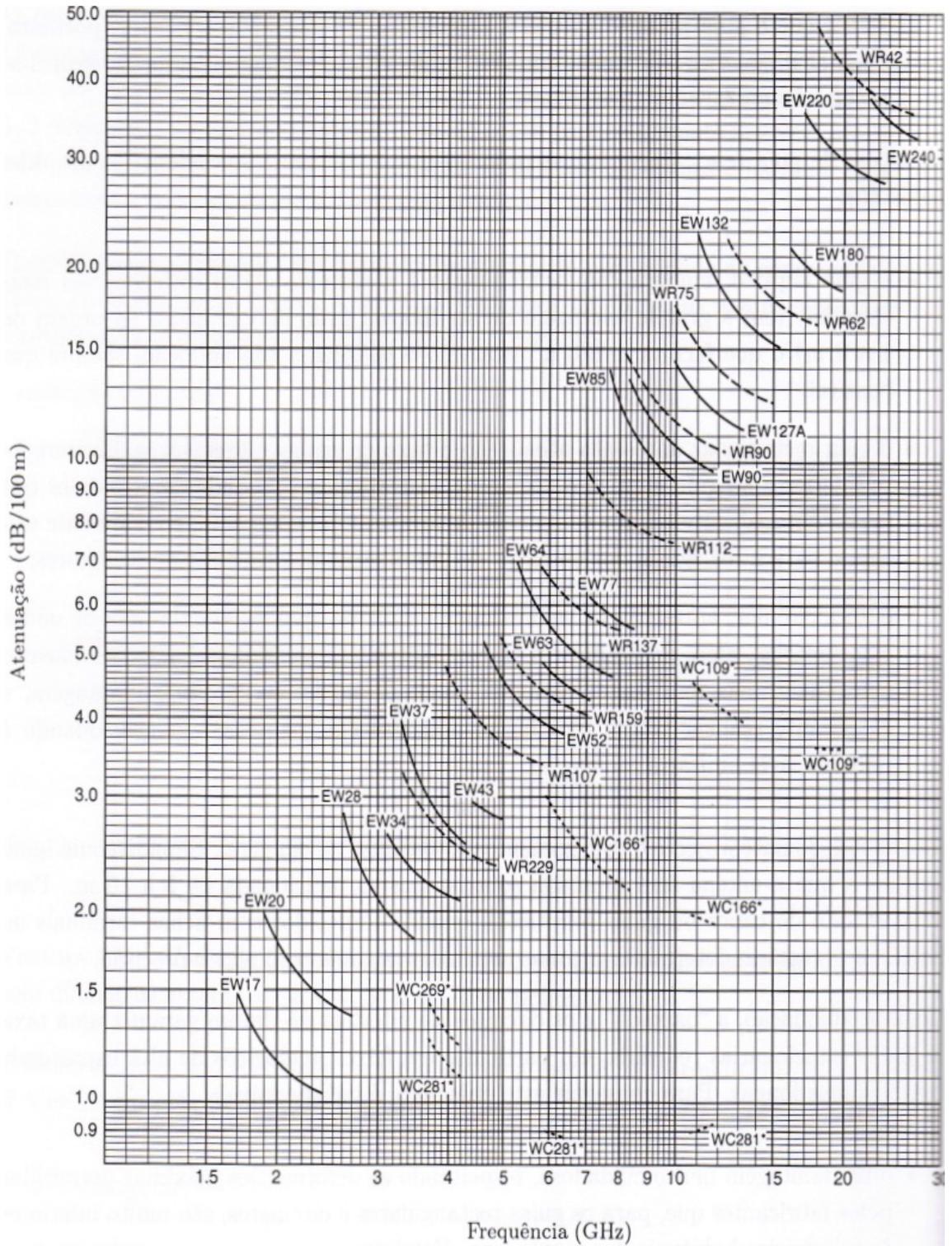
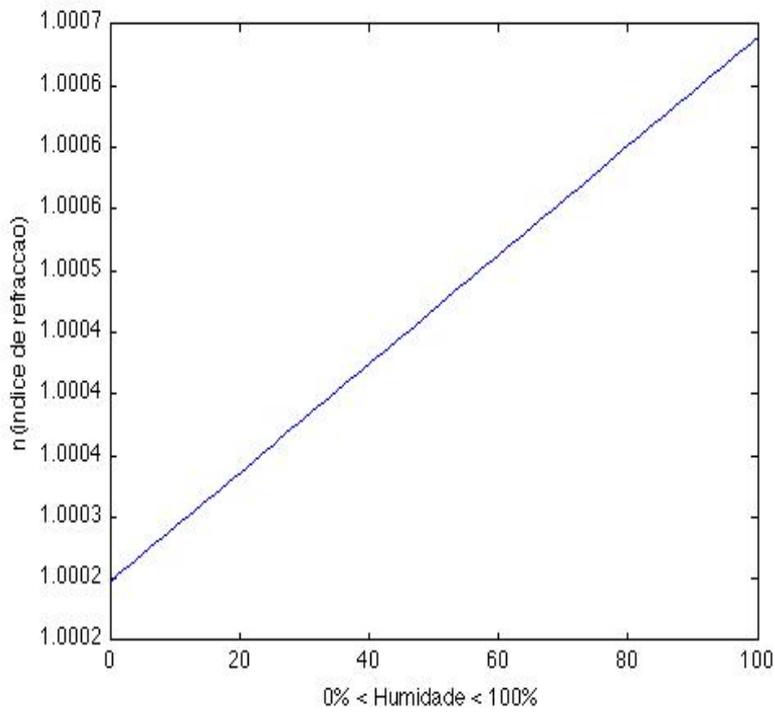
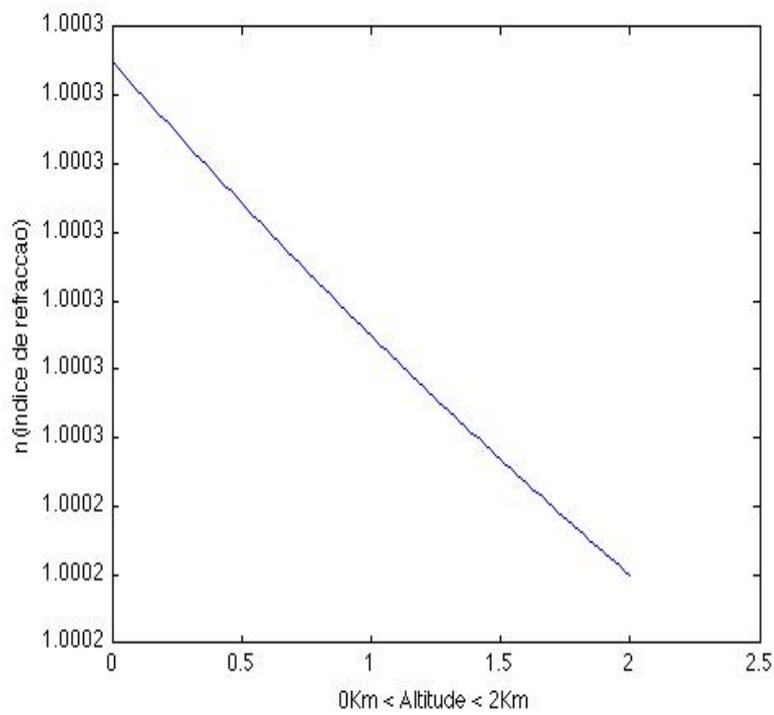


Figura A.21: Gráfico de atenuações para guias de ondas, ref (livro)



(a) Humidade



(b) Altitude

Figura A.22: variações do índice de refração

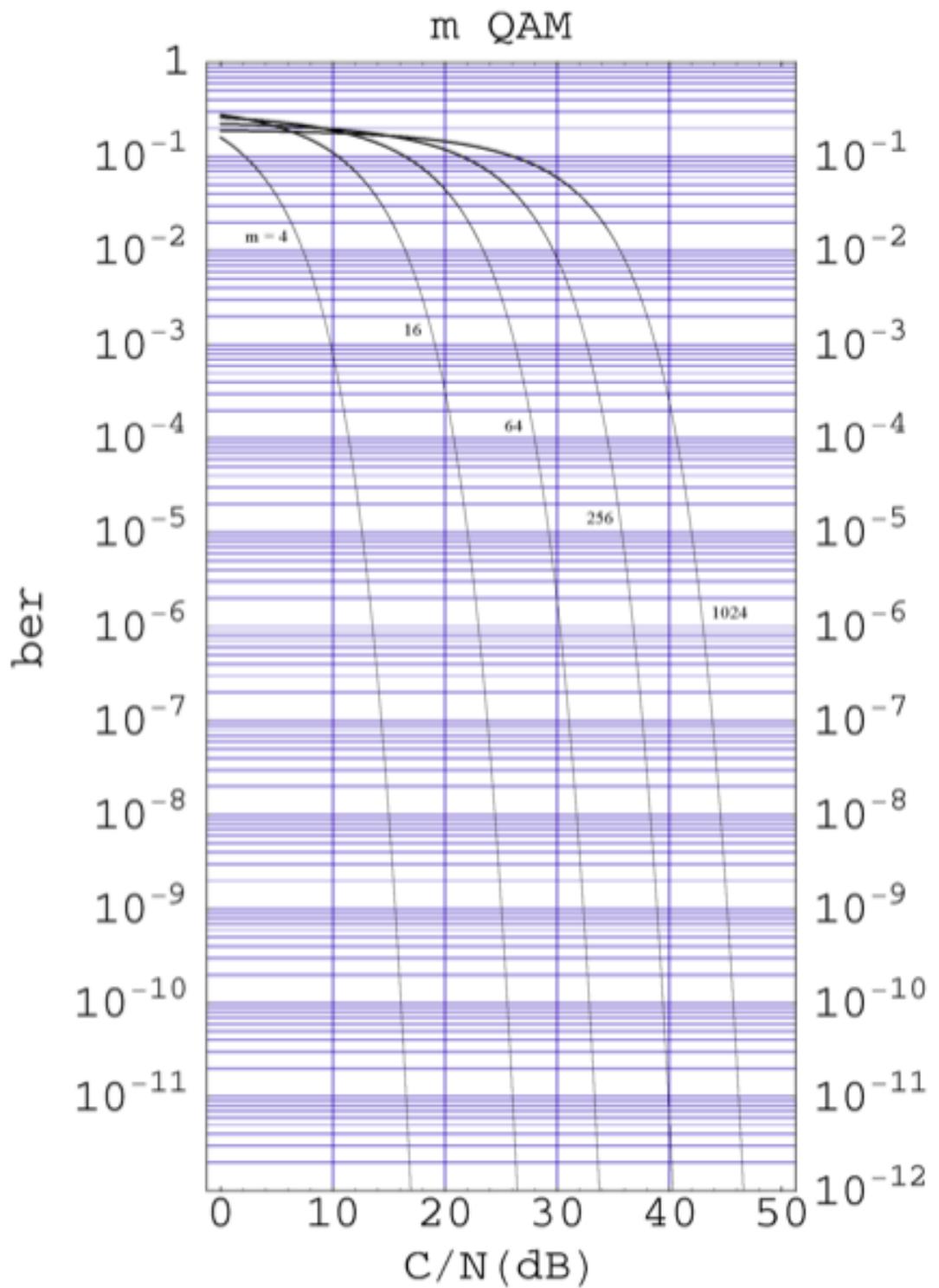


Figura A.23: Gráfico ber para QAM

## A.2 Elementos Fornecidos

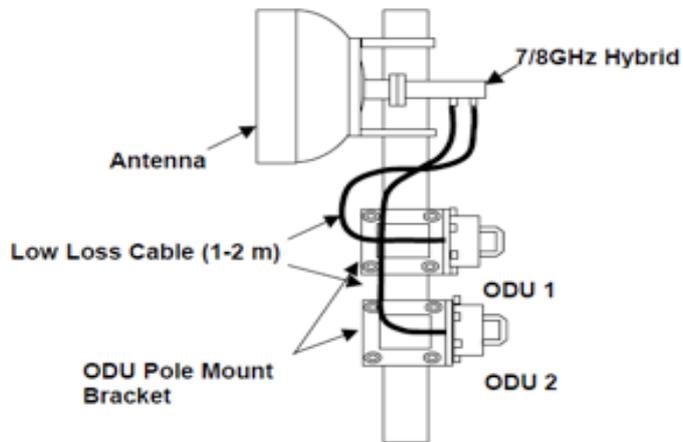


Figura A.24: Montagem 1+1 ODU com combinador híbrido

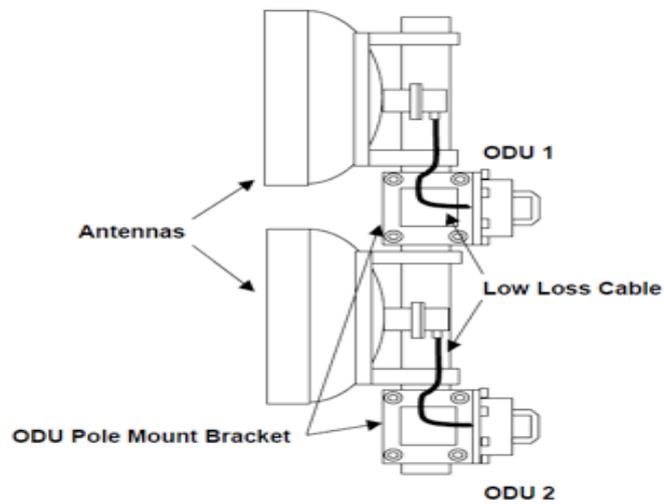


Figura A.25: Montagem 1+1 ODU para duas antenas

	A	B	B	C	C	D	D	E
Frequência de Transmissão (GHz)	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875	7,54525	7,69925	7,70275	7,54875
Sentido de transmissão	→	←	→	←	→	←	→	←
Polarização	Vertical	Vertical	Horizontal	Horizontal	Vertical	Vertical	Horizontal	Horizontal
Ritmo Binário (Mbps)				12220				
Largura de banda (MHz)				3100				
Diâmetro Antenas (m)	1,2	0,6	0,6	0,6	1,2	1,2	1,2	1,2
Ganho das Antenas (dBi)	37,5	30,9	30,9	30,9	37,5	37,5	37,5	37,5
Distancia entre Antenas - RX SD (m)	-	-	-	-	3,5	5	5	5
Guias de Onda				Não utilizado				
Relação Sinal Ruído 1E-3 (dBm)				87,5				
Modulação				16-QAM				
Potência de emissão (dBm)				27				

Tabela A.46: Dados fornecidos

Date	SES	BBE	ES
7/5/11	0	0	0
8/5/11	0	0	0
9/5/11	0	0	0
10/5/11	0	0	0
11/5/11	0	7	2
12/5/11	0	0	0
13/5/11	0	10	5
14/5/11	0	320	37
15/5/11	0	0	0
16/5/11	4	11020	127
17/5/11	0	0	0
18/5/11	0	0	0
19/5/11	0	0	0
20/5/11	0	0	0
21/5/11	0	269	21
22/5/11	0	0	0
23/5/11	0	342	14
24/5/11	0	67	19
25/5/11	0	0	0
26/5/11	0	5	2
27/5/11	0	0	0
28/5/11	0	0	0
29/5/11	0	1	1
30/5/11	0	10	4
31/5/11	0	14	5
1/6/11	0	0	0
2/6/11	0	0	0
3/6/11	0	0	0
4/6/11	0	0	0
5/6/11	0	0	0
6/6/11	0	1	1
7/6/11	0	0	0
8/6/11	0	3	1
9/6/11	0	2	1
10/6/11	0	2	1
11/6/11	1	50	21
12/6/11	6	1047	68
13/6/11	1	574	23
14/6/11	2	363	52
15/6/11	1	3292	130

Tabela A.47: Dias em que ocorreram erros





## Apêndice B

# Outros Materiais em Anexo

### B.1 Detalhe Atenuação Atmosférica

O calculo dos parâmetros da equação 3.7 é realizado com o método explicado de seguida.

Para frequências inferiores ou iguais a 57 GHz, calcula-se  $\gamma_o$  da seguinte forma:

$$\gamma_o = \left[ \frac{7.34 \cdot r_p^2 \cdot r_t^3}{f^2 + 0.36 \cdot r_p^2 \cdot r_t^3} + \frac{0.3429 \cdot b \cdot \gamma'_o(54)}{(54 - f)^a + b} \right] \cdot f^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{B.55})$$

em que os vários parâmetros são calculados com as seguintes expressões,

$$\gamma'_o(54) = 2.128 \cdot r_p^{1.4954} \cdot r_t^{1.6032} \cdot e^{-2.5280(1-r_t)} \quad (\text{B.56})$$

$$a = \frac{\log_e \frac{\eta_2}{\eta_1}}{\log_e 3.5} \quad (\text{B.57})$$

$$b = \frac{4^a}{\eta_1} \quad (\text{B.58})$$

$$\eta_1 = 6.7665 \cdot r_p^{-0.5050} \cdot r_t^{0.5106} \cdot e^{1.5663(1-r_t)} - 1 \quad (\text{B.59})$$

$$\eta_2 = 27.8843 \cdot r_p^{-0.4908} \cdot r_t^{-0.8491} \cdot e^{0.5496(1-r_t)} - 1 \quad (\text{B.60})$$

$$r_p = \frac{p}{1013} \quad (\text{B.61})$$

$$r_t = \frac{288}{273 + T} \quad (\text{B.62})$$

O parâmetro  $\gamma_w$  é calculado com a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \gamma_w = & 3.13 \cdot 10^{-2} \cdot r_p \cdot r_t + 1.76 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot r_t^{8.5} + r_t^{2.5} \cdot \left[ \frac{3.84 \cdot \chi_{w1} \cdot g_{22} \cdot e^{2.23(1-r_t)}}{(f - 22.235)^2 + 9.42 \cdot \chi_{w1}^2} \right. \\ & \frac{10.48 \cdot \chi_{w2} \cdot e^{0.7(1-r_t)}}{(f - 183.31)^2 + 9.48 \cdot \chi_{w2}^2} + \frac{0.078 \cdot \chi_{w3} \cdot e^{6.4385(1-r_t)}}{(f - 321.153)^2 + 6.29 \cdot \chi_{w3}^2} + \frac{3.76 \cdot \chi_{w4} \cdot e^{1.6(1-r_t)}}{(f - 325.153)^2 + 9.22 \cdot \chi_{w4}^2} \\ & + \frac{26.36 \cdot \chi_{w5} \cdot e^{1.09(1-r_t)}}{(f - 380)^2} + \frac{17.87 \cdot \chi_{w5} \cdot e^{1.46(1-r_t)}}{(f - 448)^2} + \frac{883.7 \cdot \chi_{w5} \cdot g_{557} \cdot e^{0.17(1-r_t)} \cdot (f - 557)^2}{(f - 557)^2} \\ & \left. + \frac{302.6 \cdot \chi_{w5} \cdot g_{752} \cdot e^{0.41(1-r_t)}}{(f - 752)^2} \right] \cdot f^2 \cdot \rho \cdot 10^{-4} \quad (\text{B.63}) \end{aligned}$$

$$\chi_{w1} = 0.9544 \cdot r_p \cdot r_t^{0.69} + 0.0061\rho \quad (\text{B.64})$$

$$\chi_{w2} = 0.95 \cdot r_p \cdot r_t^{0.64} + 0.0067\rho \quad (\text{B.65})$$

$$\chi_{w3} = 0.9561 \cdot r_p \cdot r_t^{0.67} + 0.0059\rho \quad (\text{B.66})$$

$$\chi_{w4} = 0.9543 \cdot r_p \cdot r_t^{0.68} + 0.0061\rho \quad (\text{B.67})$$

$$\chi_{w5} = 0.955 \cdot r_p \cdot r_t^{0.68} + 0.006\rho \quad (\text{B.68})$$

$$g_{22} = 1 + \frac{(f - 22.235)^2}{(f + 22.235)^2} \quad (\text{B.69})$$

$$g_{557} = 1 + \frac{(f - 557)^2}{(f + 557)^2} \quad (\text{B.70})$$

$$g_{752} = 1 + \frac{(f - 752)^2}{(f + 752)^2} \quad (\text{B.71})$$

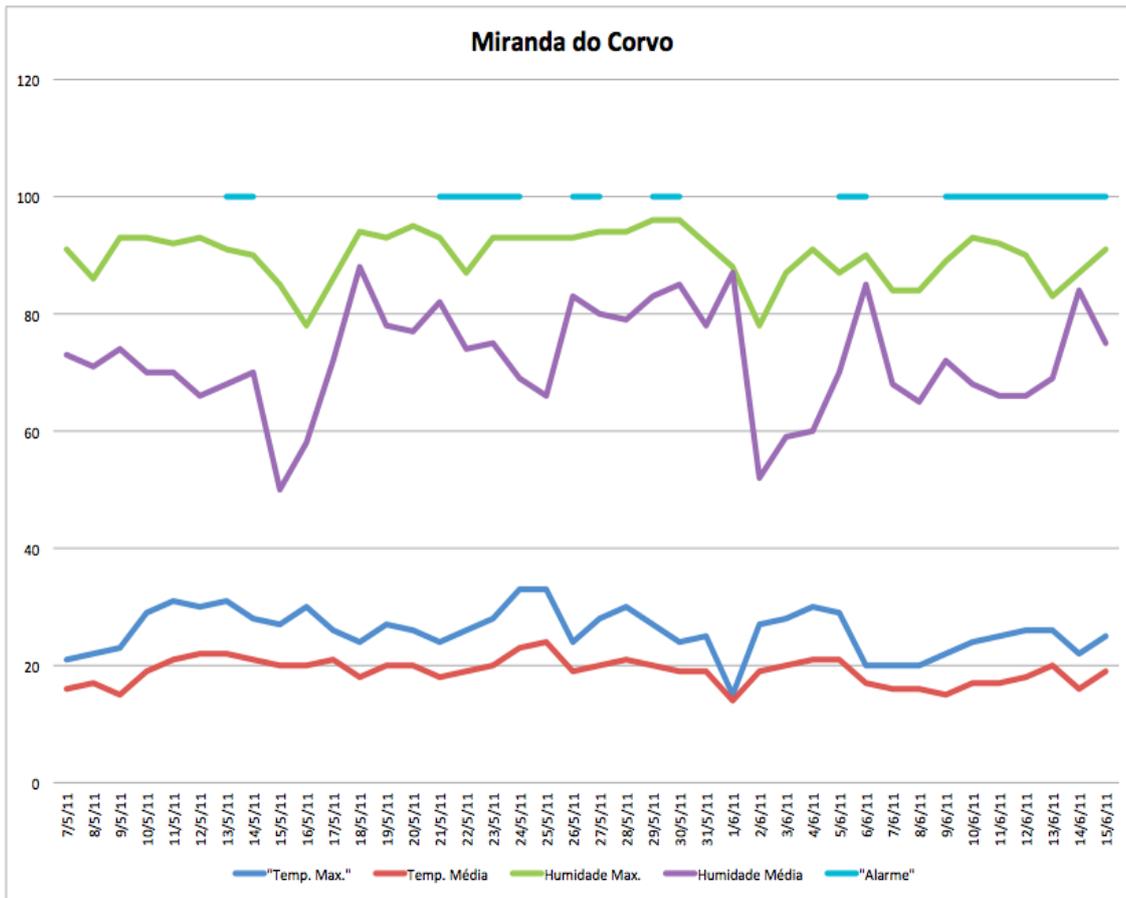


Figura B.26: Gráfico Dados Meteorológicos em Miranda do Corvo

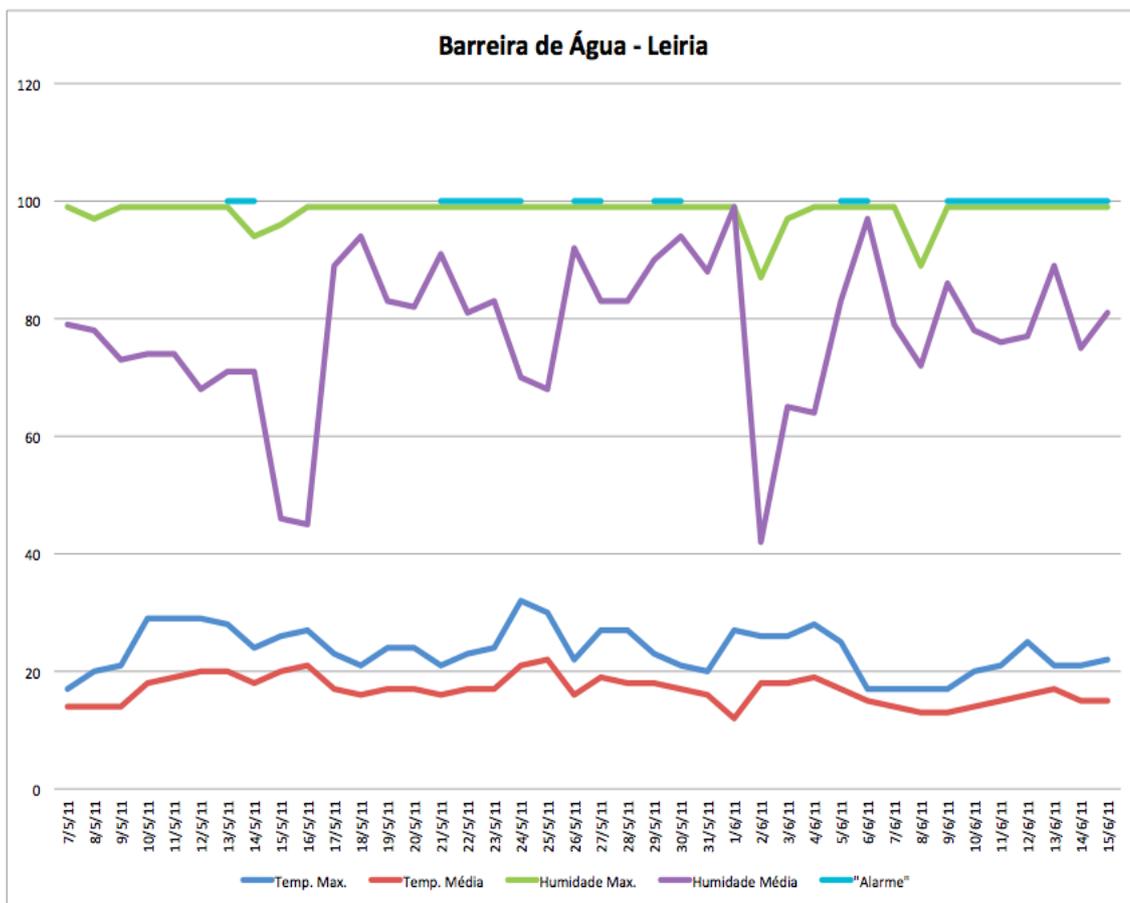


Figura B.27: Gráfico Dados Meteorológicos em Barreira de Água

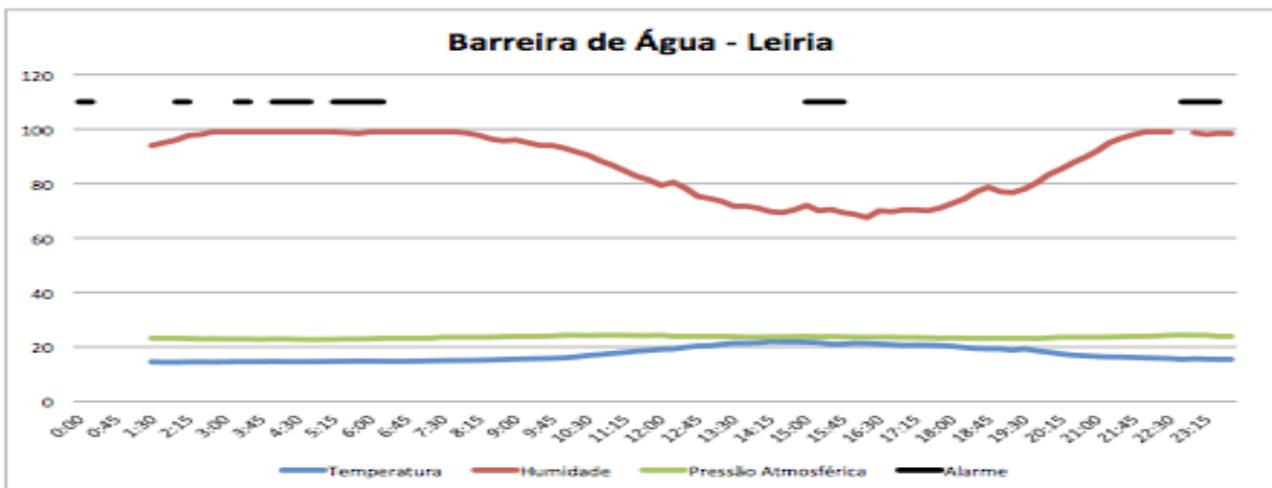
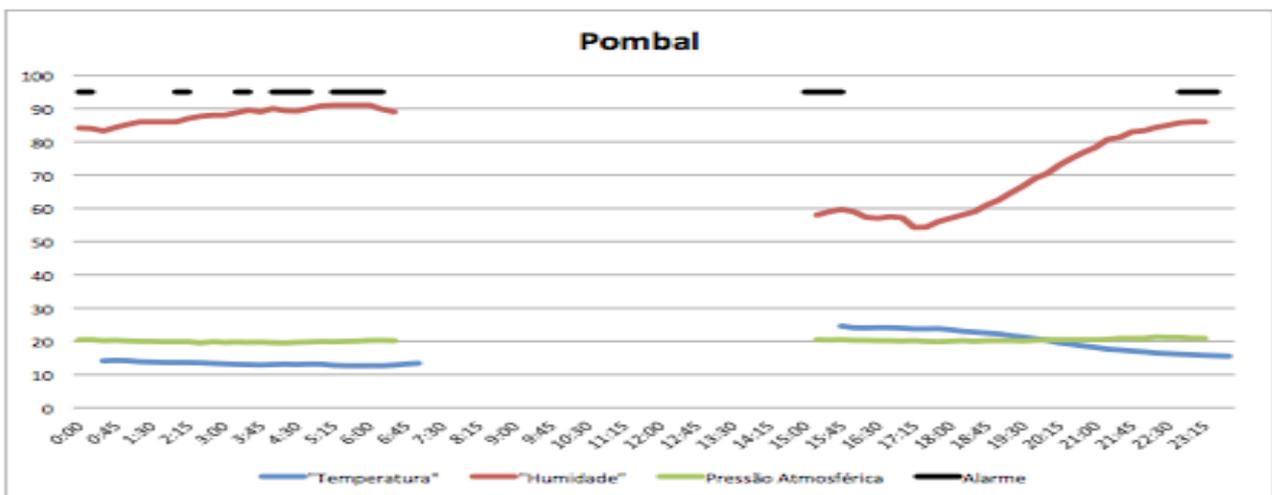
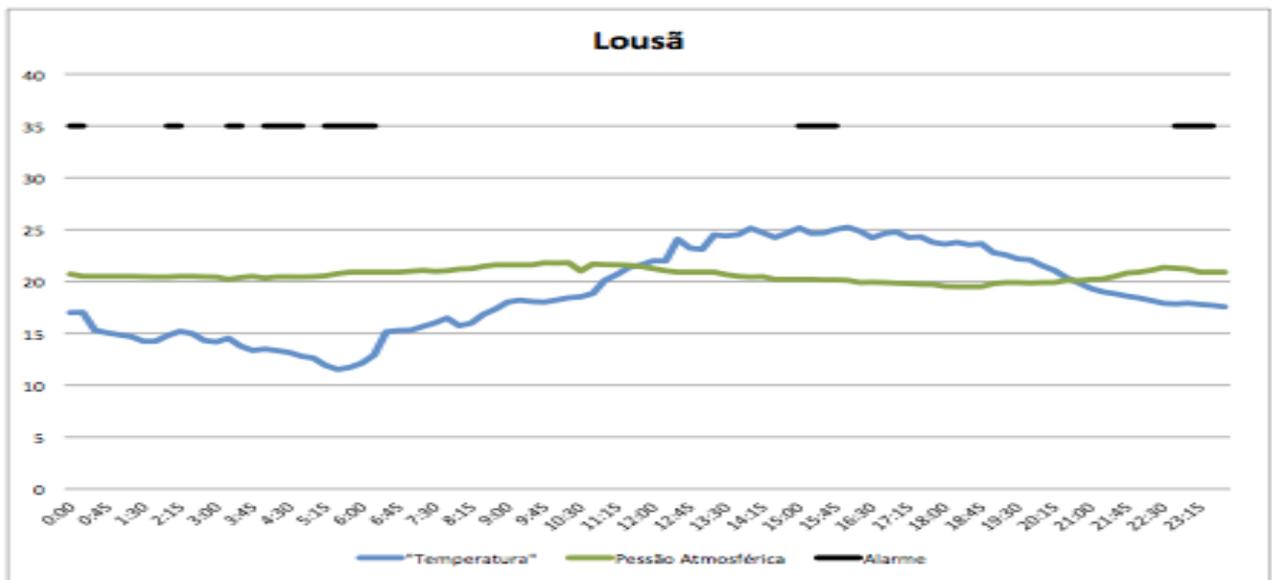


Figura B.28: Gráfico Dados Meteorológicos para o dia 15 de Junho de 2011

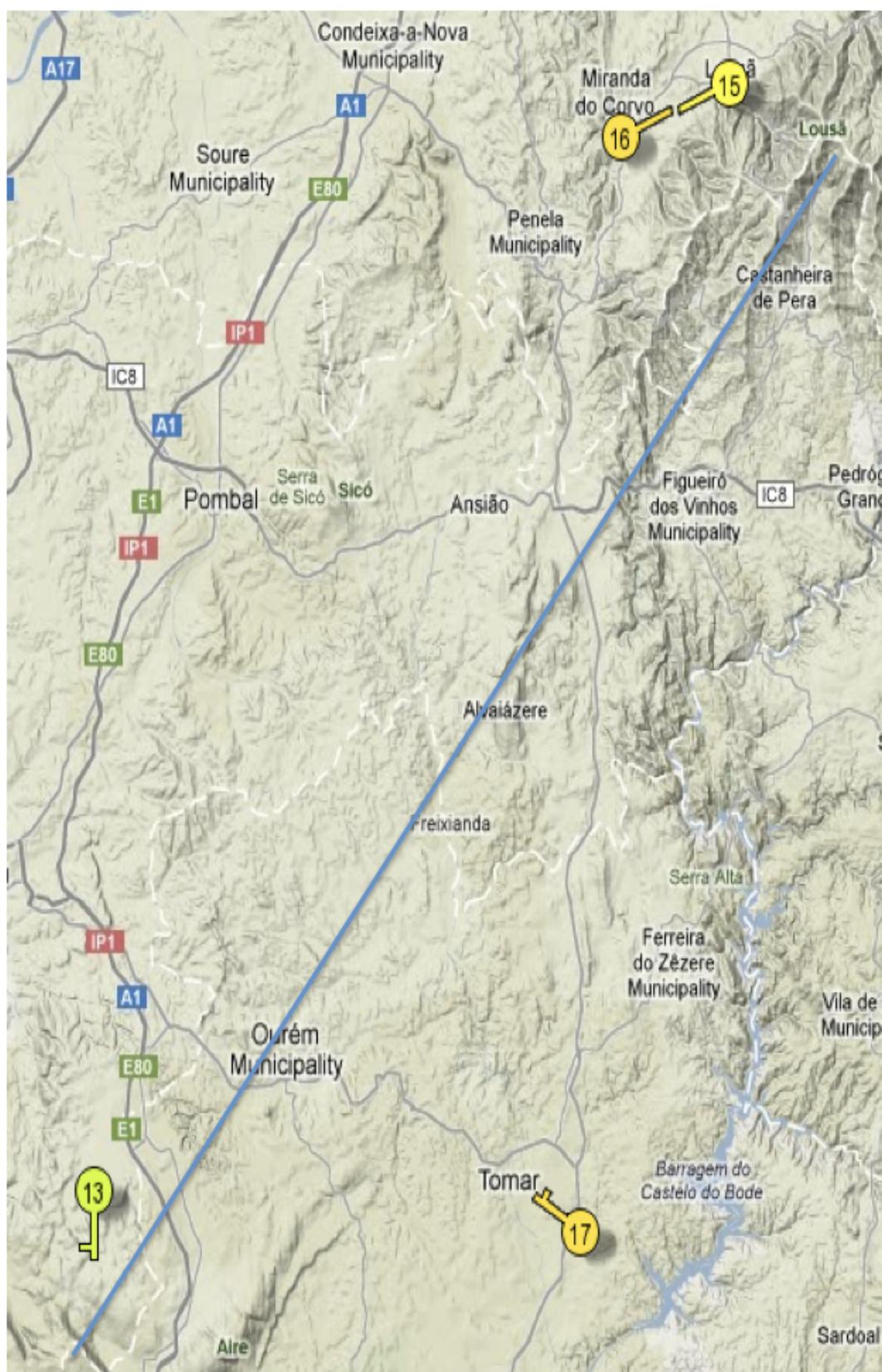


Figura B.29: Localização de Estações Meteorológicas Amadoras

## B.2 Detalhe Atenuação da Chuva

Frequency (GHz)	$k_H$	$k_V$	$\alpha_H$	$\alpha_V$
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744
120	1.18	1.13	0.731	0.732
150	1.31	1.27	0.710	0.711
200	1.45	1.42	0.689	0.690
300	1.36	1.35	0.688	0.689
400	1.32	1.31	0.683	0.684

Tabela B.48: Coeficientes de atenuação da chuva para polarização horizontal e vertical

Percurso	Atraso Médio do Eco ( $\tau_m$ )	$P_{s/mp}$
A - B	0.246429617	$1.35 \cdot 10^{-5}$
B - C	0.251020484	$1.40 \cdot 10^{-5}$
C - D	0.668780097	$9.92 \cdot 10^{-5}$
D - E	1.295747443	$3.72 \cdot 10^{-4}$

Calculo do Factor de Ocorrência de Desvanecimento Profundo				
Frequências (GHz)	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	$6.8657 \cdot 10^{-3}$	$7.0058 \cdot 10^{-3}$	-	-
B - C	-	-	$7.3400 \cdot 10^{-3}$	$7.1933 \cdot 10^{-3}$
C - D	$8.3303 \cdot 10^{-2}$	$8.5003 \cdot 10^{-2}$	-	-
D - E	-	-	$4.4435 \cdot 10^{-1}$	$4.3547 \cdot 10^{-1}$

Calculo do Rendimento $\eta$				
Frequências (GHz)	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
A - B	0.004758909	0.004831397	-	-
B - C	-	-	0.005002808	0.00492779
C - D	0.030535726	0.030994673	-	-
D - E	-	-	0.103133951	0.10167

Tabela B.49: Cálculos Auxiliares para Margem Selectiva

### B.3 Cálculos em Diversidade

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
C - D	$2.68904 \cdot 10^{-7}$	$2.64675 \cdot 10^{-7}$	-	-
D - E	-	-	$7.79123 \cdot 10^{-4}$	$7.78427 \cdot 10^{-4}$

Tabela B.50: sesr - diversidade espacial

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
C - D	$4.86232 \cdot 10^{-7}$	$4.7864 \cdot 10^{-7}$	-	-
D - E	-	-	$6.44948 \cdot 10^{-4}$	$6.44375 \cdot 10^{-4}$

Tabela B.51: bber - diversidade espacial

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
C - D	$7.54525 \cdot 10^{-6}$	$7.63594 \cdot 10^{-6}$	-	-
D - E	-	-	$1.3507 \cdot 10^{-3}$	$1.3495 \cdot 10^{-3}$

Tabela B.52: esr - diversidade espacial

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
C - D	$3.93291 \cdot 10^{-7}$	$3.94661 \cdot 10^{-7}$	-	-
D - E	-	-	$8.86636 \cdot 10^{-6}$	$8.65447 \cdot 10^{-6}$

Tabela B.53: sesr - diversidade em frequência

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
C - D	$7.09565 \cdot 10^{-7}$	$7.12025 \cdot 10^{-7}$	-	-
D - E	-	-	$1.59227 \cdot 10^{-5}$	$1.55423 \cdot 10^{-5}$

Tabela B.54: bber - diversidade em frequência

Percurso	Frequências (GHz)			
	7.54525	7.69925	7.70275	7.54875
C - D	$8.01883 \cdot 10^{-6}$	$8.2291 \cdot 10^{-6}$	-	-
D - E	-	-	$3.32434 \cdot 10^{-5}$	$3.26126 \cdot 10^{-5}$

Tabela B.55: esr - diversidade em frequência



# Bibliografia

- [1] *Recommendations and reports of the CCIR*, volume 5-7. ITU, 1982.
- [2] ANACOM. *Serviço Fixo - Faixas de frequências atribuídas*.
- [3] Sérgio Valente Armando Barbosa. *Sistemas de localização aérea via rádio*.
- [4] *Sistemas de Telecomunicações Via Rádio*, editor. *Formulário Feixes Hertzianos*. IST, 2008.
- [5] Roger L. Freeman. *Radio System Design for Telecommunications*. A John Wiley Sons, INC, 3 edition, 2007.
- [6] Christopher Haslett. *Essentials of Radio Wave Propagation*. Cambridge Wireless Essentials Series, 2008.
- [7] <http://www.wunderground.com/>. Estações meteorológicas amadoras.
- [8] ITU. Availability objectives for real digital radio-relay links forming part of a high-grade circuit within an integrated services digital network. *Rec. ITU-R F.695*, 1990.
- [9] ITU. Radio-frequency channel arrangements for radio-relay systems operating in the 7 ghz band. *Rec. ITU-R F.385-6*, 1994.
- [10] ITU. Effects of multipath propagation on the design and operation of line-of-sight digital radio-relay systems. *Rec. ITU-R F.1093-1*, 1997.
- [11] ITU. Error performance and availability objectives for hypothetical reference digital sections forming part or all of the medium-grade portion of an integrated services digital network connection at a bit rate below the primary rate utilizing digital radio-relay systems. *Rec. ITU-R F.696-2*, 1997.
- [12] ITU. The radio refractive index: Its formula and refractivity data. *Rec. ITU-R P.453-7*, 1997.
- [13] ITU. Attenuation in vegetation. *ITU-R P.833-2*, 1999.

- [14] ITU. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. *Rec. ITU-R P.838-1*, 1999.
- [15] ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. *Rec. ITU-R P.530-10*, 2001.
- [16] ITU. Characteristics of precipitation for propagation modelling. *Rec. ITU-R P.837-5*, 2007.
- [17] ITU. Propagation by diffraction. *ITU-R P.526-12*, 2012.
- [18] Trevor Manning. *Microwave Radio Transmission Design Guide*. 2 edition.
- [19] Zoya Popovic and Edward F. Kuester. *Principles of RF and Microwave Measurements*. University of Colorado, Electromagnetics Laboratory Department of Electrical and Computer Engineering Campus Box 425, Boulder, Colorado 80309-0425, 2009.
- [20] David M. Pozar. *Microwave Engineering*. John Willey Sons, INC, 2 edition, 1998.
- [21] R.W. Hubbard R.E. Skerjanec. *Aircraft Obstruction of Microwave Links*. U.S. Department of Commerce, 1979.
- [22] M Relmy. System signature prediction model. Radiocommunications Agency, 2002.
- [23] Iulian Rosu. Basics of radio wave propagation.
- [24] Carlos Salema. *Feixes Hertzianos*. IST Press, 2 edition, 2002.
- [25] H. Sizun. *Radio Wave Propagation for Telecommunication Application*. Springer, <http://www.springer.com/engineering/electronics/book/978-3-540-40758-4>, 2005.