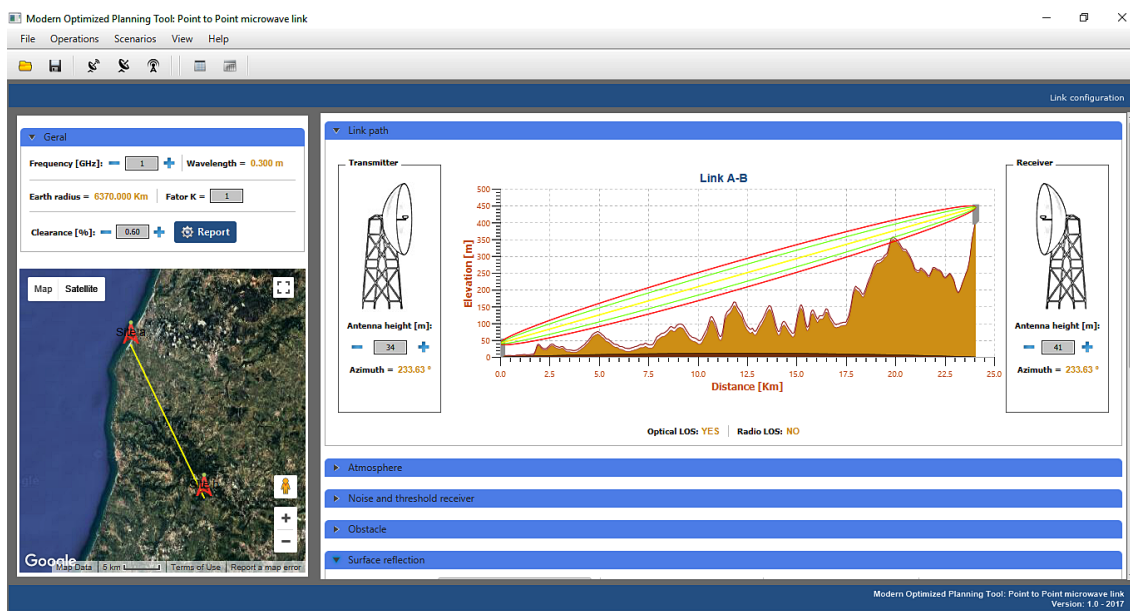


Modern and optimized planning tool for point-to-point microwave link



Jocelino Varela Rodrigues

(Licenciado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Eletrónica e Telecomunicações

Orientador: Prof. Doutor Pedro Renato Tavares de Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Pereira Vestias

Vogais:

Prof. Doutor Nuno Borges Carvalho

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares de Pinho

Dezembro, 2017

Agradecimentos

A entrega desta Dissertação de Mestrado constitui o último passo de uma etapa difícil e que foi conseguida com muita dedicação, esforço e empenho. Porém, tudo isso só foi possível com a ajuda e atenção das pessoas que me acompanharam neste percurso e que deram um importante contributo para o sucesso alcançado, e que aproveito desde já para agradecer profundamente.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha profunda gratidão ao Professor Doutor Pedro Renato Tavares de Pinho pela confiança que depositou em mim ao ter aceitado orientar a minha Dissertação de Mestrado. Foi uma pessoa sempre presente, atenciosa e disponível para esclarecer as inúmeras dúvidas e problemas que surgiram. Para ele um enorme obrigado.

Aos meus pais Isabel Rodrigues e Manuel Rodrigues, a quem devo tudo o que sou, e que estiveram sempre presentes. Foram e certamente continuarão a ser a fonte onde encontro toda a força para alcançar os meus objetivos. Estarei eternamente agradecido por todo o amor e orientação que me deram em toda a minha vida, e por toda a educação, princípios e valores que sempre me transmitiram.

Aos meus irmãos Emanuel Rodrigues e Hideury Rodrigues e à minha irmã Idalina Rodrigues pelo apoio incondicional e carinho demonstrado.

Ao meu tio Joaquim Varela pelos conselhos e por toda a força, ocupando sempre o lugar de um 2º pai. Um muito obrigado.

Aos meus tios e primos e à minha namorada também uma sentida palavra de agradecimento por todo o carinho e incentivo que sempre me deram.

Aos meus amigos que tive o privilégio de conhecer no meu percurso académico, em especial: Elisandro Carvalho, António Oliveira, Nuno Cascalho, Edjaley Assunção, Milton Barbosa, Bruno Varela, Alexandre Tacate, Paulo Lopes, Paulo Borges, Ruben Aniceto e Alexandra Mourato. Um muito obrigado pela amizade, camaradagem e espírito de união ao longo destes anos.

Por fim, dedico esta Dissertação à memória dos meus avós já falecidos, que nunca serão esquecidos e que teriam certamente muito orgulho em presenciar o final deste importantíssimo capítulo na minha vida.

Resumo

Apesar da tecnologia do sistema de FH (Feixes Hertzianos) ter perdido peso face à crescente evolução da tecnologia da fibra ótica que tem vindo a conquistar um papel cada vez mais relevante no transporte de informações, os sistemas de FH continuam ainda a ser utilizados pelos operadores por ser uma solução de baixo custo e de rápida implementação nos casos onde os terrenos são irregulares e a implantação dos cabos no terreno é difícil. Estes sistemas são projetados de modo a que normalmente se preserve a linha de vista. Esta condição implica que o raio direto esteja acima de quaisquer irregularidades do terreno e obstáculos onde quaisquer efeitos de difração são considerados insignificantes. Contudo, existem fenómenos associados à propagação tais como as reflexões, atenuação devido aos componentes da atmosfera e condições de refração anómalas que degradam a intensidade do sinal limitando assim a distância das ligações bem como a sua qualidade.

No processo do projeto de uma ligação por FH é importante um estudo prévio destes fenómenos, assim como a análise do perfil do terreno, suportados por ferramentas desenvolvidas para estes fins. Muitas ferramentas desenvolvidas não são abertas e são específicas de um determinado fabricante. Outras são abertas ao mercado, mas não tiram proveito das enormes e importantes funcionalidades que o GM (*Google Maps*) dispõe atualmente e não acompanham as constantes atualizações das recomendações feitas pelo ITU-R (*International Telecommunication Union Radiocommunication*).

Neste sentido, durante esta dissertação desenvolveu-se uma *software*, na versão mais recente da linguagem Java e com base nas últimas normas e recomendações do ITU-R, que através dos seus resultados é possível analisar qual é o impacto que os fenómenos de propagação irão ter numa ligação. A integração direta do GM na ferramenta constitui uma das grandes vantagens, pois permite a escolha de forma fácil e precisa da localização dos sites assim como a aquisição real dos dados relativos ao terreno sem a necessidade de recorrer a ficheiros de mapas. Com o *software* desenvolvido foi realizado um conjunto de testes e cenários de modo a obter os resultados e comparar com resultados obtidos em outras ferramentas existentes, nomeadamente o *Pathloss*.

Finalmente foram apresentadas as conclusões e algumas sugestões de trabalhos futuros.

Palavra-chave: Propagação, Feixes Hertzianos, ITU-R, *Google Maps*, Java.

Abstract

Even though the microwave radio relay links technology has been losing its importance due to the constant growth of the fiber optics technology in transmitting information, it is still being used by the service providers due to the fact that it is a low-cost solution and of fast implementation where the soil is unstable, and the cable deployment is proven difficult. These links are designed to maintain the line of sight. This condition implies that the direct ray should be above any soil surface irregularities and obstacles where any diffraction effects are considered insignificant. However, there are phenomena associated with the propagation, such as reflections, decrease due to atmospheric components and anomalous refraction conditions that degrade the intensity of the signal thus limiting the length of the connections as well as their quality.

During the process of the project of a connection through microwave radio relay links technology it is important to study these phenomena beforehand as well as to analyze the typology of the soil, using specific tools for that purpose. Many of those tools are not of direct access and are specific to a given manufacturer. Others are of direct access, but they do not take advantage of the many and important functionalities *GM (Google Maps)* currently has and do not keep track of the constant update of the recommendations of the ITU-R (*International Telecommunication Union Radio Communication*).

Therefore, a *software* in the most recent Java language has been developed throughout this dissertation, taking the latest rules and recommendations of the ITU-R into account. Its results proved that it is possible to analyze the impact that the propagation phenomena will have in the connection. The direct integration of GM in the tool comes as a great advantage, since this makes the choice of sites easier and more accurate as well as enables the real acquisition of data about the soil without using map files. Several tests and scenarios have been done with the developed *software* to obtain results and compare them with others issued by different tools, such as *Pathloss*.

Finally, conclusions have been presented and suggestions of future projects have been made.

Keywords: Propagation, microwave radio relay links, ITU-R, Google Maps, Java.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xv
Acrónimos.....	xvii
Capítulo 1.....	1
1. Introdução	1
1.1. Historia da evolução dos feixes hertzianos.....	2
1.2. Perspetiva futura do FH	5
1.3. Campos de aplicação	7
1.4. Objetivos.....	9
1.5. Organização do documento	9
1.6. Contribuição originais deste trabalho	10
Capítulo 2.....	11
2. Feixes hertzianos - Estudo teórico	11
2.1. Fenómenos associados à propagação	11
2.1.1. Atenuação em espaço livre.....	11
2.1.2. Refração na troposfera	12
2.1.2.1. Índice de refração e refratividade	12
2.1.2.2. Gradiente de refratividade e condições da troposfera.....	14
2.1.2.3. Encurvamento do raio: conceito do Raio efetivo da terra	17
2.1.3. Perdas por difração no terreno: conceito da zona de Fresnel e horizonte de rádio	
2.1.4. Atenuação devido à vegetação.....	20

2.1.5.	Atenuação devido ao oxigénio e ao vapor de água	28
2.1.6.	Atenuação devido à precipitação	31
2.1.6.1.	Metodo ITU-R.....	32
2.1.6.2.	Metodo Crane	34
2.1.7.	Reflexão.....	37
2.1.8.	Difração devido a obstáculos.....	43
2.1.8.1.	Método ITU-R P.526-13	44
2.1.8.1.1.	Obstáculo em lamina isolado	44
2.1.8.1.2.	Obstáculo arredondado.....	47
2.1.8.1.3.	Dois obstáculos	48
2.1.8.1.4.	Múltiplos obstáculos isolados	51
2.1.8.2.	Método Deygout	55
2.1.8.3.	Método de Epstein-Petterson	57
2.1.8.4.	Comparação dos métodos	58
2.2.	Link budget	59
2.2.1.	Cálculo do link budget.....	60
2.2.2.	Desvanecimento devido ao multipercurso	63
2.2.3.	Ruído	65
2.2.4.	Margem de desvanecimento e potência limiar do recetor	68
2.3.	Considerações gerias do projeto de feixes hertzianos.....	70
2.3.1.	Representação do perfil terreno e clearance.....	71
2.3.2.	Topologia das redes	74
2.3.3.	Antenas e repetidores.....	75
2.4.	Qualidade: Disponibilidade e performance de erro	76
2.4.1.	Objetivos de performance de erro	77
2.4.1.1.	Baseados na recomendação ITU-T G.821.....	78
2.4.1.2.	Baseados na Recomendação ITU-T G.826 e ITU-T G.828	79
2.4.2.	Disponibilidade	82
Capítulo 3.....		85

3.	Implementação do software	85
3.1.	Modern and optimized planning tool for point-to-point microwave link	85
3.1.1.	Módulos do software	85
3.1.1.1.	Modulo mapa	85
3.1.1.2.	Modulo de serviço de elevação	86
3.1.1.3.	Modulo de gestão de unidades	87
3.1.1.4.	Modulo de gestão de link	89
3.1.1.5.	Modulo de configuração de link	91
3.1.1.6.	Modulo de relatório de link budget	98
3.1.1.7.	Modulo para cálculos	99
3.1.1.7.1.	Função para calcular a atenuação em espaço livre	100
3.1.1.7.2.	Função para analisar o perfil do terreno	100
3.1.1.7.3.	Função para calcular as perdas por difração	103
3.1.1.7.4.	Função para calcular a reflexão no terreno	103
3.1.1.7.5.	Função para calcular as atenuações na atmosfera	103
3.1.1.7.6.	Função para calcular o desvanecimento multipercurso	105
3.1.1.7.7.	Função de cálculos gerais	105
Capítulo 4		107
4.	Dimensionamento de uma ligação utilizando o software e comparação dos resultados obtidos com os resultados obtidos pelo Pathloss	107
4.1.	Software desenvolvido: Percurso direto	108
4.2.	Software desenvolvido: Percurso alternativo	111
4.2.1.	Percurso 1: Ligação entre o ISEL e o recetor de Malveira	112
4.2.2.	Percurso 2: Ligação entre o transmissor de Malveira e Torres Vedras	120
4.3.1.	Rádio Mobile	125
4.4.2.	Pathloss	126
4.4.2.1.	Pathloss: Percurso direto	127
4.4.2.2.	Pathloss: percurso alternativo	130
4.4.2.2.1.	Percurso 1: Ligação entre o ISEL e o recetor de Malveira	130

4.4.2.2.2. Percurso 2: Ligação entre o transmissor de malveira e Torres Vedras	135
Capítulo 5.....	141
5. Conclusões e trabalho futuro.....	141
5.1. Conclusões	141
5.2. Trabalhos futuros	144
Referências	145
Anexos	149
Anexo A. Tabela de dados do ITU-R.....	149
Anexo B. Características do equipamento NEC 3000 Series	153
Anexo C. Características da antena Andrew HSX4-74	155
Anexo D. Report do percurso 1 obtido no PL.....	157
Anexo E. Report do percurso 2 obtido no PL.	159

Índice de Figuras

Figura 1 - Backhaul media distribution (excluding China, Japan, Korea and Taiwan) [3].	6
Figura 2 – Bandas de frequências utilizadas atualmente [3].	6
Figura 3 - Aplicações dos sistemas de FH [3].	7
Figura 4 - Horizonte de rádio para sistemas de FH.	20
Figura 5 - Trajeto representativo na zona vegetativa [8].	22
Figura 6 – Atenuação específica na vegetação [8].	23
Figura 7 - Componente difratada pela parte superior da vegetação [7].	24
Figura 8 - Componentes difratados em torno da vegetação [7].	25
Figura 9 - Componente difratada no solo [7].	25
Figura 10 – Atenuação específica devido aos gases atmosféricos, calculada com intervalos de 1 GHz, para uma pressão atmosférica de 1013 hPa, uma temperatura de 15 °C e uma concentração de vapor de água de 7.5 g/m ³ [9].	31
Figura 11 – Sinal refletido numa superfície completamente plana [19].	37
Figura 12 – Reflexões em terrenos rugosos [19].	38
Figura 13 - Proteção da antena contra reflexão [9].	42
Figura 14 – Proteção da antena contra reflexão após mover o ponto de reflexão [6].	43
Figura 15 – Geometria da difração sobre obstáculo em lamina isolado [10].	45
Figura 16 – Perdas por difração devido ao obstáculo em lâmina em função do parâmetro v [10].	46
Figura 17 – Geometria da difração sobre obstáculo arredondado [10].	47
Figura 18 – Perfil com dois obstáculos isolados com clearance semelhantes [6].	49
Figura 19 - Perfil com dois obstáculos com clearance diferente [6].	49
Figura 20 – Geometria de obstáculos múltiplos em forma de cilindro [10].	51
Figura 21 – Detalhes da geometria de obstáculos múltiplos em forma de cilindro [10].	52
Figura 22 – Geometria de um obstáculo multiponto [10].	52
Figura 23 - Representação gráfica do modelo de <i>Deygout</i> [14].	55
Figura 24 - Ilustração para cálculo de fatores de correção do método <i>Deygout</i> [16].	57
Figura 25 – Representação gráfica do método de <i>Epstein-Petterson</i> com três obstáculos [19].	57
Figura 26 – Diagrama do sistema de feixes hertzianos para o cálculo do link budget.	60
Figura 27 – Modelo geral do sistema recetor para cálculo do ruído.	67
Figura 28 – Representação do perfil da ligação baseada no modelo da Terra fictícia.	72
Figura 29 – Optical LOS e radio LOS [23].	74

Figura 30 – Topologias das redes de FH.....	75
Figura 31 – Repetidor passivo 40x60 [24].....	76
Figura 32 – Circuito fictício de referencia.	78
Figura 33 - Ligação hipotética de referência.	80
Figura 34 – Ligação hipotética de referência, parte nacional.	80
Figura 35 – GM com duas ligações representadas.....	86
Figura 36 - Formulário para registo de um transmissor.....	88
Figura 37 - Formulário para registo de um recetor.....	88
Figura 38 – Tabela com as caraterísticas de duas unidades.	89
Figura 39 – Tabela de links com duas ligações criadas.	91
Figura 40 - Representação do perfil do terreno do percurso de uma ligação.	91
Figura 41 - Gráfico geral da ligação.....	92
Figura 42 - Gráfico geral da ligação com o 1º elipsoide de Fresnel obstruído.....	93
Figura 43 - Parâmetros gerais da ligação.	94
Figura 44 - Ligação com uma curvatura da terra correspondente a um fator $k = - 0.1$	94
Figura 45 - Possível área da reflexão especular.	95
Figura 46 - Parâmetros para configurar a atmosfera.....	96
Figura 47 - Porções do perfil terreno que representam obstáculos.	96
Figura 48 - Obstáculos representados em forma de lâminas.	97
Figura 49 – Tabela com obstáculos extraídos a partir do perfil terreno.....	97
Figura 50 - Métodos disponíveis para cálculos de difração nos obstáculos.	98
Figura 51 – Secção para cálculo da sensibilidade do recetor.....	98
Figura 52 – Secção com resultados dos parâmetros relativo às unidades e à atmosfera.	99
Figura 53 - Troço de ligação com 3 obstáculos.	101
Figura 54 - Troço de ligação com 1 obstáculo.....	102
Figura 55 – Obstáculo arredondado extraído a partir do perfil de terreno.....	102
Figura 56 - Atenuação específica devido aos gases, calculada com intervalos de 1 GHz, recorrendo ao modulo do software.....	104
Figura 57 - Representação dos sites e da ligação sobre o mapa do Google.....	108
Figura 58 - Perfil terreno da ligação ISEL-Torres Vedras.....	109
Figura 59 - Representação gráfica da ligação entre Lisboa, ISEL e Torres Vedras.	109
Figura 60 – Obstáculos existentes ao longo do percurso.	110
Figura 61 - Ligação com altura ideal das torres para alcançar a linha de vista.....	111
Figura 62 – Sites e ligações do percurso alternativo representados no GM.	112
Figura 63 – Perfil terreno ligação entre ISEL e recetor de Malveira.	113
Figura 64 – Ligação percurso 1 sem obstrução.....	114

Figura 65 - Possível área de reflexão especular.	115
Figura 66 - Possível zona de reflexão especular.....	116
Figura 67 - Perfil terreno ligação entre transmissor de Malveira e torres Vedras.....	120
Figura 68 – Ligação percurso 2 sem obstrução.	120
Figura 69 – Representação da ligação do percurso 2 a operar a 1 GHz.....	121
Figura 70 – Reflexão especula no percurso 2.....	121
Figura 71 – Interface gráfica do Radio Mobile com uma ligação ponto a ponto [42].	125
Figura 72 - Funcionalidade do Pathloss [48].	127
Figura 73 - Perfil terreno do percurso direto.	128
Figura 74 - Configuração do algoritmo de difração pathloss.	129
Figura 75 - Altura ideal das antenas para percurso direto.....	130
Figura 76 - Perfil terreno percurso 1 com informações da ligação.	131
Figura 77 - Perfil terreno percurso 2 com informações da ligação.	136
Figura 78 - Caraterísticas do NEC 3000S: 128-QAM.....	153
Figura 79 - Caraterísticas da antena Andrew HSX4-74	155

Índice de Tabelas

Tabela 1- Valor dos coeficientes da equação 2.4 [11].	14
Tabela 2 - Valor fator K para diferentes condições de refração.	18
Tabela 3 - Erro médio dos modelos [12].	59
Tabela 4 - Desvio padrão médio do erro dos modelos [12].	59
Tabela 5 - Recomendações para as varias taxas de transmissão e equipamentos.	77
Tabela 6 - Objetivos	79
Tabela 7 – Objetivos de performance de erro para FH de acordo com a recomendação ITU-T G.828.	81
Tabela 8 - Objetivos de performance de erro para FH de acordo com a recomendação ITU-T G.826.	82
Tabela 9 – Parâmetros	83
Tabela 10 - Condutividade e permitividade relativa para vários tipos de solo [3.4].	95
Tabela 11 - Localização dos sites.	108
Tabela 12 – Atenuação devido aos dois obstáculos, calculado através do método de Petterson e Deygout, causado pelas irregularidades do terreno.	110
Tabela 13 – Localização dos sites do percurso alternativo.	112
Tabela 14 – Parâmetros percurso 1 (simplificado).	113
Tabela 15 – Atenuação atmosférico percurso 1.	114
Tabela 16 – Parâmetros para efeito de cálculo de reflexão no solo.	115
Tabela 17 – Parâmetros calculados associados à reflexão especular.	116
Tabela 18 - Valores utilizados para calcular o valor teórico da sensibilidade do recetor.	117
Tabela 19 - Tabela resumo do link budget da ligação entre o transmissor do ISEL e o recetor de Malveira.	117
Tabela 20 - Tabela resumo do link budget da ligação entre o transmissor de Malveira e o recetor de Torres Vedras.	122
Tabela 21 - Algoritmos de difração disponíveis no PL.	128
Tabela 22 - Perdas devido à difração associado a cada algoritmo do PL.	129
Tabela 23 - Elevações na localização do transmissor e recetor obtidas no PL e no software.	130
Tabela 24 - Parâmetros percurso 1 utilizados no PL (Simplificado).	131
Tabela 25 - Valores obtidos no software e no PL para o percurso 1.	133
Tabela 26 – Valores obtidos no software e no PL para o percurso 2.	136
Tabela 27 - Dados espectroscópicos para a atenuação devido ao vapor de água [7].	149

Tabela 28 - Dados espectroscópicos para a atenuação devido ao oxigénio [7].	150
Tabela 29 – Valores das constantes para cálculo dos coeficientes K_H e K_V [10].	151
Tabela 30 - Valores dos coeficientes de Boersma [13].	152

Acrónimos

AIS	Alarm Indication Signal
AR	Availability Ratio
ATT	American Telegraph and Telephone Corporation
BBE	Background Block Error
CDED	Canadian Digital Elevation Data
DAV	Data Above Voice
DAVID	Data Above Video
DD	Degrees Decimal
DMS	Degrees Minute Seconds
DTED	Digital Terrain Elevation Data
DUV	Data Under Voice
EB	Errored Block
ECMWF	European Centre for MediumRange Weather Forecast
ES	Errored second
ESR	Errored Second Ratio
FH	Feixe Hertziano
FM	Frequency Modulation
FO	Fibra Ótica
FTTH	Fibre To The Home
FWA	Fixed Wireless Access
GE	Google Earth
GM	Google Maps
HRP	Hypothetical Reference Path

HRX	Hypothetical Reference Connection
IT	Instituto de Telecomunicações
ITT	International Telegraph and Telephone Corporation
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication
LCT	Laboratoire Central des Télécommunications
LOS	Line Of Sight
MO	Mean Time Between Outage
MTI	Moving Target Indication
NED	National Elevation Data
OI	Outage Intensity
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PL	Pathloss
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SES	Severly errored second
SERS	Severly Errored Second Ratio
STM	Synchronous Transport Module
STRM	Space Shuttle Radar Terrain Mapping Mission
TDT	Televisão Digital Terrestre
USGS	United States Geological Survey

Capítulo 1

1. Introdução

Os Feixes Hertzianos (FH) são utilizados em diversas aplicações, nomeadamente nas redes de transporte de televisão entre os centros de produção e os principais emissores e nas ligações aos estúdios móveis, nas redes *Backhaul* de sistemas móveis e em outras aplicações que requerem ligações fixas sem cabos. Atualmente, esta tecnologia tem vindo a perder peso para os sistemas de fibra ótica (FO) que oferecem maior largura de banda. Entretanto, as ligações por fibras óticas têm como desvantagem o custo elevado da instalação e da manutenção, assim como o longo tempo que a sua implementação tem. Por outro lado, o FH apesar das suas limitações, nomeadamente a largura de banda disponível que é bastante menor quando comparado com a da fibra ótica, possui características atrativas começando pelo custo da instalação e manutenção e pelo tempo da implementação que é bastante menor comparando com a fibra ótica. Outra vantagem do FH é o facto de ser mais resiliente aos desastres naturais tais como terremotos, incêndios florestais e as inundações, com um tempo de recuperação mais rápido, fato pelo qual muitas vezes são utilizados como *backup* dos sistemas de comunicação baseados em fibras óticas.

Porém, o projeto dos sistemas de FH é um processo metódico e sistemático que inclui um conjunto de etapas onde diversos fenómenos de propagação devem ser considerados. O cálculo das atenuações, das margens de desvanecimento, das interferências e da qualidade são alguns exemplos, e estes podem ser altamente complexos caso não se recorra a ferramentas auxiliares para o seu correto dimensionamento. A maioria das ferramentas que auxiliam o projeto de FH são desenvolvidos pelos próprios fabricantes dos equipamentos e portando são tendenciosas aos próprios equipamentos dos fabricantes, ou por vezes são específicas de um determinado proprietário e não abertas ao mercado. Existem algumas ferramentas independentes e disponíveis no mercado, como é o caso do PL (*Pathloss*) que provavelmente é uma das melhores e mais complexa, e que já vai na sua 5ª versão [1].

1.1. Historia da evolução dos feixes hertzianos

O surgimento dos sistemas de telecomunicações baseados em FH remonta a 1931, data em que André Clavier e o seu grupo, trabalhando sob a direção de Mourice Deloraine, no *Laboratoire Central des Télécommunications* (LCT) em Paris, estabeleceram experimentalmente a primeira ligação por FH entre Calais sito em França e St.Margarets Bay em Inglaterra, atravessando o Canal da Mancha. A capacidade da ligação era para um canal telefónico com frequência de operação de 1.7 GHz, com modulação em amplitude, emissores de 1 W e antenas parabólicas com diâmetro de 3 m. Durante o sucesso desta experiência, Clavier observou que os navios ao atravessarem o FH, interferiam com a transmissão de tal forma que a dimensão do navio poderia ser conhecida a partir da onda refletida. Mais tarde, este efeito foi investigado e os resultados permitiram o desenvolvimento da tecnologia *moving-target-indication* (MTI), atualmente designado de radar [1]. Mais tarde, em 1934, o sistema foi posto em operação comercial entre o aeroporto de Lympne na Inglaterra e St. Inglevert em França, cuja distância era de 56 Km, atravessando o Canal da Mancha. As autoridades de aviação civil de Inglaterra e França utilizaram os primeiros sistemas comerciais por FH para coordenar o tráfego aéreo entre Paris e Londres, transportando um canal de telefone e um canal telegráfico simultaneamente. Porém, esta operação viria a ser interrompida em 1940 devido à segunda guerra mundial.

Paralelamente, na Alemanha, C. Lorenz começou experiências com equipamentos de FH na Alemanha. Em 1932 instalou o seu primeiro sistema experimental com uma distância acima dos 60 Km entre a torre Ullstein em Berlin e Furstenwalde, com equipamentos a operar a 500 MHz e com potência de emissão de 0.1 W. Em 1937 C.Lorenz e Telefunken desenvolveram e fabricaram equipamentos capazes de transportar dois canais operando a 500 MHz.

Tanto C. Lorenz como Telefunken que tinham instalado seus primeiros sistemas experimentais em 1935 entre GroB-Ziethen e Wiesenburg perto de Berlin, melhoraram de forma significativa a qualidade de transmissão, recorrendo ao uso da modulação em frequência, que foi desenvolvida e patenteado pelo American Major Edwin Howard Armstrong em 1933.

Em 1936, Telefunken produziu um sistema de canal único com modulação FM a 500 MHz enquanto C. Lorenz começou o desenvolvimento e a produção dos primeiros equipamentos de 10 canais com modulação FM a 1.3 GHz em 1939 e 1940, respetivamente. Entretanto, o equipamento de canal único do Telefunken foi substituído em 1942 por um equipamento de 10 canais, enquanto C. Lorenz melhorou em 1944, o seu sistema de 10 canais utilizando um gerador que produzia sinais com potência de 10 W.

Em 1937, no Reino Unido, foi inaugurado o segundo sistema comercial de FH, de 65 Km, entre Stranraer na Escócia e Belfast no Norte da Irlanda, com uma transmissão simultânea de nove canais

telefônicos. Este sistema foi o primeiro sistema multicanal de FH, com modulação de amplitude e a operar a 65 MHz [2].

No ano de 1944 foi desenvolvido um sistema de 12 canais com modulação FM, operando a 3 GHz e foi instalada uma ligação experimental entre duas estações em Paris. Dois anos depois, em 1946, foi instalada a primeira ligação comercial entre Paris e Montmorency utilizando o mesmo equipamento. Em agosto de 1947, foi instalada uma ligação que ligava França com a ilha Corsica, cobrindo cerca de 205 Km.

Na Espanha, em 1935, foi instalada uma ligação conectando Barcelona com a ilha de Majorca e daí com a ilha de Minorca. Apesar das escassas publicações, esta ligação foi a primeira ligação mundial que incluía uma estação repetidora. O equipamento foi desenvolvido pelos engenheiros Maurice Deloraine e Alec H. Reeves.

Em Itália, foram feitas experiências com equipamentos em modulação de amplitude, de seis e nove canais, em 1939, que posteriormente foram utilizados durante a segunda guerra mundial.

Nos Estados Unidos, em 1930, a Bell Laboratories iniciou investigações em transmissões utilizando ondas ultracurtas com frequências acima dos 30 MHz. Oito anos depois, em 1938, iniciou um estudo cuja duração foi de dois anos, onde tentou perceber o comportamento da propagação de uma ligação experimental de 63 Km entre Beer's Hill e Lebanon em New Jersey com equipamentos a operar a 80 e 160 MHz. Durante este estudo fez ensaios da propagação sobre diferentes tipos de terrenos e sobre a água, de entre os quais um caminho cuja extensão era de 110 Km sobre a água, ao longo da costa atlântica, entre Atlantic Highlands em Nova Jersey e East Moriches no Long Island. Uma outra ligação experimental foi instalada pela Bell Laboratories em 1941, com um equipamento a operar a 160 MHz com modulação de amplitude, entre Cape Charles e Norfolk na Virgínia, atravessando a Baía de Chesapeake. Depois da guerra mundial, com o objetivo de continuar os testes, foi instalada uma ligação de 65 Km entre a Nova York e Neshanic na Nova Jersey, com frequências entre 700 MHz e 20 GHz. Os testes então feitos permitiram obter informações extremamente importantes que ajudaram na compreensão da relação que existia entre a frequência, a reflexão no solo e o desvanecimento [2].

Depois da 2ª guerra mundial, em 1947, a ATT (*American Telegraph and Telephone Corporation*) e ITT (*International Telegraph and Telephone Corporation*) colocaram em operação um sistema com modulação de frequência a 4 GHz entre Nova York e Boston. Esta ligação consistia em dez estações transportando televisão de Nova York para Boston com 480 canais de telefone multiplexados em ambas as direções, o que tornou a primeira ligação comercial por FH nos Estados Unidos. Entretanto, o ITT desenvolveu um sistema que usava a modulação de pulso e que para além de figurar bastante vantajoso para sistemas de baixa capacidade, com 24 canais, era bastante económico.

Na Alemanha, durante o ano de 1945 e 1946, as forças de ocupação dos Estados Unidos instalaram uma ligação com cerca de 1200 Km, entre Bremen e Munich com equipamentos que operavam a 500 e 600 MHz. Porém, esta rede foi oficialmente cedida à administração Germânica em agosto de 1947.

Depois da 2ª guerra mundial, as transmissões por FH foram amplamente utilizadas com o objetivo de restabelecer ligações das redes destruídas durante a guerra. Na Europa, por volta do ano de 1950, os equipamentos foram produzidos para operar principalmente a 2GHz para transmissões de 24, 60 e 129 canais de voz.

A forte expansão dos sistemas de transmissão por FH, nomeadamente sistemas com portadoras na faixa de 2 a 20 GHz, que permitiram modulação de sinais de TV de banda larga, contribuíram para a emergência da televisão por volta do ano de 1950, já que a transmissão de sinais de vídeo, cuja largura de banda típica era de 4 MHz para sinais de vídeo preto e branco e 6 MHz para sinais de vídeo a cores, não era possível nos cabos de pares simétricos e era de elevado custo nos cabos coaxiais.

Por volta de 1960, o surgimento da tecnologia da eletrônica do estado sólido (*all-solid-state*), permitiu tanto a redução do consumo do equipamento, como a sua dimensão, e subsequentemente reduziu o custo e a dimensão da fonte de alimentação primária. Assim, a transmissão por FH tornou-se o meio mais flexível e económico para transmissões de baixas, médias e altas capacidades.

O crescente avanço da eletrônica, nomeadamente o surgimento da tecnologia dos semicondutores em 1970, permitiu paralelamente o avanço das comunicações, pois ela revolucionou o progresso dos computadores assim como dos equipamentos de telecomunicações.

No início da era digital, as fibras óticas ainda não estavam disponíveis para transmissões, enquanto que a transmissão digital através do cabo coaxial requeria o uso de repetidores em intervalos extremamente curtos, tornando assim a rede muito pouco económica. No entanto, devido as variadas vantagens da transmissão digital face a transmissão analógica, a transmissão por feixes hertzianos digitais tornou-se a solução tanto para redes públicas como para redes privadas. Rapidamente apareceu no mercado equipamentos de FH digitais em 1970 e gradualmente foi suspensa a produção dos equipamentos analógicos [2].

Em 1969, no Japão, entrou em operação o primeiro sistema de FH com um equipamento que operava na banda dos 20 GHz e com uma capacidade de transmissão de 17 Mbps, correspondente a 240 canais de telefone.

A dupla conversão, analógica-digital e digital-analógica numa rota foi eliminada em 1970, pela introdução de equipamentos capazes de inserir fluxo de dados digitais para além da banda base

analógica existente nos sistemas de FH analógicos. Estes equipamentos foram batizados de DUV (*Data Under Voice*), DAV (*Data Above Voice*) e DAVID (*Data Above Vídeo*).

Entretanto, em 1980, estes equipamentos não seriam mais necessários, pois surgiram equipamentos de alta capacidade para transmissões de 34 e 140 Mbps na Europa e 45, 90, 135 e 270 Mbps nos Estados Unidos, Canada e Japão. Desde então, sistemas de FH digitais operando na banda de 2, 6, 7, 11, 13, 15, 18, 23, 38, 42, 59 e 60 GHz foram introduzidos mundialmente.

O sucesso da implementação da transmissão através da fibra ótica em 1980, o rápido aumento da capacidade de transmissão e dos intervalos de repetição e especialmente a introdução da tecnologia SDH trouxeram novos desafios para a engenharia dos FH. Não obstante, os engenheiros aceitaram os desafios e desenvolveram novas tecnologias relacionadas com os FH. De entre essas tecnologias, a técnica de cancelamento da interferência da polarização cruzada permitindo assim a utilização em simultâneo de polarização horizontal e vertical na mesma portadora, duplicando deste modo a capacidade de transmissão; esquemas de modulação com altas eficiências espectrais capazes de acomodar altas capacidades numa dada largura de banda; transmissão multiportadora com dois ou quatro portadoras RF por transmissor e recetor, aumentando assim a capacidade de transmissão.

Em 1990, como consequência destas novas tecnologias, foram introduzidos sistemas de feixes hertzianos para transmissão de SDH a 155-Mbps (STM-1), 2 ×155-Mbps e 622-Mbps (STM-4). O objetivo dos novos desenvolvimento tecnológicos nos últimos anos evoluiu para um aprimoramento progressivo da eficiência espectral, seguindo a mesma tendência da crescente demanda por banda larga. Atualmente, o foco concentra-se no aumento da capacidade, mantendo o desempenho, em termos de disponibilidade e qualidade, bem como uma melhor exploração dos recursos do espectro.

1.2. Perspetiva futura do FH

Um dos principais objetivos dos operadores de telecomunicações é fornecer serviços com o melhor desempenho e qualidade da experiencia (QoE) possível de forma mais económica. Deste modo, as redes de FH são ingredientes vitais dos operadores para alcançar esse objetivo, e por essa razão continuarão a ser uma das principais tecnologias *backhaul* no futuro.

As crescentes necessidades de capacidade levaram à crença que a FO é um requisito obrigatório, mas na realidade, a tecnologia backhaul de FH é capaz de lidar com 100% das necessidades de capacidade de todos os sites de acesso rádio, onde no futuro evoluirá de tal forma a suportar capacidades multi-gigabit em bandas de frequências tradicionais para além de 10 gigabits na onda milimétrica [3].

Em 2020, excluindo a China, Japão, Coréia do Sul e Taiwan, 65% dos sites serão conectados com soluções micro-ondas, onde a principal chave para o alcance de altas capacidades é a utilização da banda E (70/80 GHz) [3].

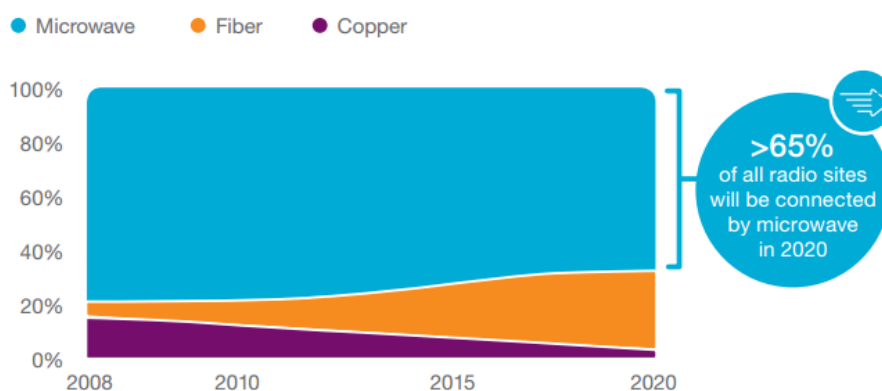


Figura 1 - Backhaul media distribution (excluding China, Japan, Korea and Taiwan) [3].

A banda E até alguns anos atrás não foi utilizada. Porém, o mercado está crescendo rapidamente e a pegada do micro-ondas é sólida. A vantagem da banda E é a seu largo espectro e canais que permitem altas capacidades. Entretanto é importante referir que a banda 6-13 GHz continuará a ser utilizada principalmente para distâncias de ligações elevadas devido à sua baixa sensibilidade à chuva, principalmente em zonas geográficas onde a intensidade de precipitação é alta, bem como a banda 15-23 GHz que é a banda mais utilizada atualmente a nível global, tal como mostra a figura x, e que continuará certamente a ser muito importante nos próximos anos.

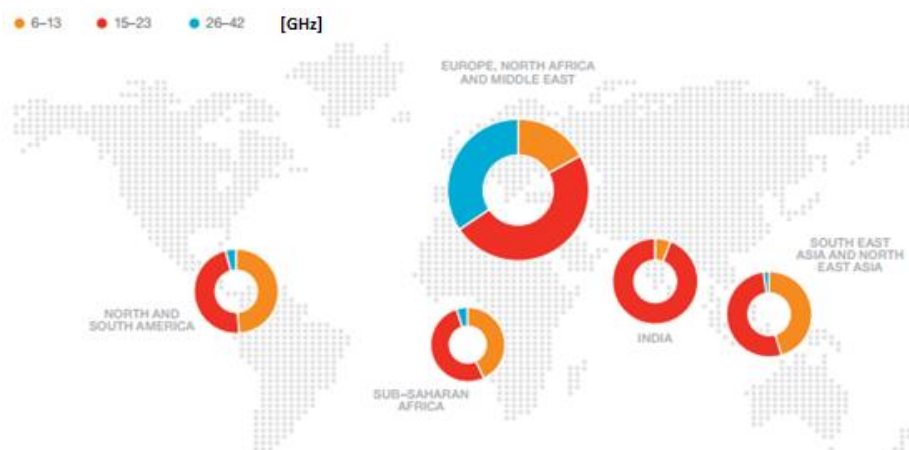


Figura 2 – Bandas de frequências utilizadas atualmente [3].

Uma das aplicações dos sistemas de FH na banda E é a extensão das ligações por FO. As soluções modernas de micro-ondas permitirão expandir as redes de FO existentes para ter um alcance de 2 a 3 Km utilizando equipamentos de banda E. Estas soluções são muito robustas mesmo para

intensidade de chuvas elevadas (35-50 mm/hora), e, portanto, têm uma disponibilidade de ritmo de transmissão equiparado ao da FO, com a vantagem de serem de rápida implementação e de baixo custo.

Os sistemas de FH continuarão a ser utilizados também como sistemas de redundância. Por exemplo, em Portugal, após o incêndio ocorrido na região de Pedrogão Grande (17-22 de junho 2017), foi feito um estudo do funcionamento da rede SIRESP por parte do IT (Instituto de Telecomunicações) onde foram propostas duas soluções de redundância sendo ambas baseadas na utilização de sistema de FH.

1.3. Campos de aplicação

Apesar do avanço tecnológico dos sistemas de comunicações por FO (Fibras Óticas), devido à necessidade cada vez mais de serviços que suportam altas taxas de dados, os sistemas de FH tiveram e continuam a ter um papel importante no fornecimento de serviços de comunicações de banda larga de alta qualidade. Deste modo, os sistemas de FH são utilizados nas redes de telecomunicações em diversas aplicações tais como: nas redes de transporte, nas redes *Backhaul* de sistemas móveis (*Mobile backhaul networks*), nos sistemas de acesso fixo via Rádio (FWA) e também como suporte de redes temporárias.

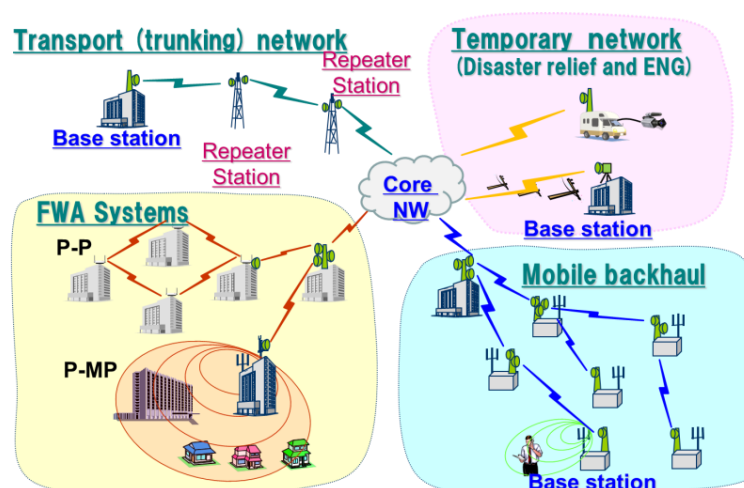


Figura 3 - Aplicações dos sistemas de FH [3].

Nas redes de transporte, os sistemas de FH operam normalmente com bandas de frequência abaixo dos 15 GHz e com uma distância que varia entre 30 e 50 Km. Nesta situação, a capacidade destes sistemas é no máximo de 24 Mbps. Contudo, devido à elevada procura de tráfego por parte dos clientes, os fornecedores de serviços desenvolveram e continuam a desenvolver redes suportadas por fibras óticas de forma a substituir estes tipos de sistemas de FH utilizados nas redes de transporte, pelo facto de a FO suportar maiores capacidades o que permite transportar um grande

fluxo de informações. Porém, nas áreas onde a implantação de fibras óticas é difícil, quer por razões geográficas ou mesmo económicas, os sistemas de FH continuam a ser utilizados para garantir o transporte de informação.

Nas redes *Backhaul* de sistemas móveis, o transporte de dados entre as estações base do sistema GSM, ou o equivalente em 3G e 4G, assim como entre os nós de ordem superior, por vezes é suportado por sistemas de FH. Muitas vezes, quando este sistema é instalado nas estações base, há um aproveitamento das torres e das infraestruturas das estações base, e os equipamentos do sistema e da rede de acesso móvel passam a partilha-las. Nestas situações, o uso dos sistemas FH é muitas vezes uma alternativa à fibra ótica especialmente em áreas rurais ou áreas urbanas densas onde não seria fisicamente ou economicamente viável a implantação da fibra ótica. Geralmente as ligações operam na banda de 42-52 GHz, 57-64 GHz, 71-76 GHz e 81-86 GHz [4].

Outra aplicação do sistema de FH é nas redes de Metro-Ethernet, isto é, a rede baseada no padrão de rede Ethernet que permite o fornecimento de serviços de conectividade LAN-TO-LAN. Nesta situação o sistema é utilizado como alternativa de ligações de fibras óticas nos casos onde as autorizações para obras civis para a implantação dos cabos atrasam, como ligações redundantes que permitem o transporte de informações em caso de falhas ou interrupção do anel ou como alternativa para alcance de locais fora dos limites das áreas urbanas. Devido à distância das ligações que são geralmente curtas e à alta capacidade que requerem os serviços suportados pelas redes de Metro-Ethernet, os sistemas de FH utilizados nestas redes são geralmente projetados para operar com bandas de frequência altas.

Os sistemas de FH também são utilizados como alternativas aos cabos, para suporte dos sistemas de acesso fixo via Rádio, que asseguram ligações entre uma estação e um terminal fixo. Os sistemas FWA (*Fixed Wireless Access*) operam com bandas acima de 17 GHz, o que possibilita o fornecimento de taxas de dados semelhantes ao FTTH (*Fibre To The Home*) devido à extensa largura de banda disponível nestas bandas de frequência.

Igualmente, os sistemas FH também são utilizados para conectar edifícios ou instalações de empresas de segurança privada, serviços uteis ou outras indústrias, dentro de uma área, assim como em instalações temporárias para eventos ou operação de socorro tais como desastres naturais onde o requisito é a rápida implementação da rede. Um bom exemplo é o incêndio florestal de Pedrogão Grande ocorrido em Portugal, onde a FO que assegurava o funcionamento da rede de emergência foi consumida pelas chamas e houve então a necessidade de assegurar o funcionamento da rede a partir dos FH.

1.4. Objetivos

Esta dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta, na versão mais recente da linguagem Java, que permita avaliar e compreender as condições de propagação das ondas rádio em sistemas de FH e nas aplicações em que são utilizados. Todos os cálculos e procedimentos da ferramenta serão baseados na mais moderna e recente versão das normas e recomendações do ITU-R. Os resultados apresentados pelo simulador não se limitarão apenas aos aspetos da intensidade do sinal, também será dada atenção à qualidade do mesmo e à sua variação consoante os cenários em questão. De entre as diversas funcionalidades, para que o utilizador tenha uma perspetiva do perfil do terreno que está envolvido na propagação e desta forma os resultados se tornem mais próximos da realidade, o *software* a ser desenvolvido terá a capacidade de interagir diretamente com o GM, sem a necessidade de utilização de mapas em ficheiros e das suas respetivas atualizações.

Com o *software* desenvolvido, será realizada simulações no programa PL de forma a comparar os resultados obtidos em ambos os *softwares*.

1.5. Organização do documento

Este documento apresenta-se estruturado em 6 capítulos, organizados da forma que se segue:

- **Capítulo 1: Introdução** – Neste capítulo é feita a introdução do trabalho, uma breve resenha histórica do surgimento e evolução dos sistemas de FH, bem como a sua perspetiva futura e os campos de aplicações, são definidos os objetivos, apresentada as contribuições originais deste trabalho e a organização do mesmo.
- **Capítulo 2: Feixes hertzianos - Estudo teórico** – Neste capítulo é introduzida a teoria necessária à compressão e contextualização do presente trabalho. São apresentados os fenómenos associados à propagação do sinal na troposfera e o procedimento para efetuar o link budget. São também abordados os aspetos a ter em consideração no projeto de uma ligação por FH, assim como os critérios de qualidade do sinal.
- **Capítulo 3: Implementação do *software*** – Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento do *software* e as principais decisões tomadas. Também é descrita toda a funcionalidade do mesmo.
- **Capítulo 4: Teste e comparação entre o *software* desenvolvido e os existentes** – Na sequência do *software* desenvolvido, neste capítulo são descritos os testes efetuados e os resultados obtidos pelo mesmo, e é efetuada uma comparação com os resultados obtidos pelo PL.

- **Capítulo 5: Conclusão** – Por fim, neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho e são apresentados alguns tópicos para desenvolvimento no futuro.

1.6. Contribuição originais deste trabalho

Com este trabalho será submetido um artigo à um *Special Issue on Radio Wave Propagation* da revista IEEE Transactions On Antennas & Propagation.

Também, com este trabalho é possível, através do software desenvolvido, efetuar o dimensionamento de um sistema de FH, o que permite a nível académico uma melhor compreensão, por parte dos alunos da cadeira de Radio Comunicações, sobre os fenómenos que ocorrem durante a propagação de ondas eletromagnéticas em ligações por FH.

Capítulo 2

2. Feixes hertzianos - Estudo teórico

Neste capítulo é feito um estudo da fundamentação teórica que servirá de base para a implementação do *software*. Começa-se com o estudo dos fenómenos associados à propagação do sinal na troposfera sendo analisado os algoritmos que servem de base para a quantificação das perdas devido aos mesmos. Parte-se depois para o estudo do *link budget* de ligações por feixes hertzianos incluindo o ruído e a margem de desvanecimento. Seguidamente são abordadas as principais considerações a ter no projeto de um sistema de FH, as etapas que compõem todo o projeto, incluindo os critérios da escolha do percurso, das antenas e dos equipamentos. Por último é abordado os aspetos da performance e da qualidade do sinal.

2.1. Fenómenos associados à propagação

Esta secção descreve os fenómenos mais relevantes associados à propagação do sinal de um sistema de FH na troposfera. A propagação na troposfera é um processo que depende de diversos fatores, incluindo a própria característica da troposfera. Para além da descrição destes fenómenos, esta secção descreve ainda os procedimentos assim como os algoritmos utilizados para quantificar as perdas devido a estes fenómenos. É importante referir que, a maioria dos algoritmos aqui descritos estão relacionados com as recomendações fornecidas pelo ITU-R.

2.1.1. Atenuação em espaço livre

Em condições normais da troposfera, isto é, na ausência de hidrometeoros ou condições de refração anómalas, e desde que o sistema seja projetado de forma a garantir uma *clearance* (distância entre o sinal e o terreno ou qualquer outro obstáculo) adequada acima dos obstáculos do

terreno, a perda básica de propagação do sistema é igual ao valor da perda de propagação em espaço livre, que representa a maior parte da atenuação causada pelos efeitos da propagação das ondas.

Define-se então espaço livre a região do espaço completamente desobstruída e afastada do solo de modo a que não existam quaisquer obstáculos ou superfícies capazes de influenciar a propagação da onda eletromagnética. O modelo de propagação em espaço livre, é governado pela fórmula de *Friss* que é válido para distâncias na zona distante da radiação da antena transmissora, é utilizado para prever a intensidade do sinal recebido quando o transmissor e o recetor possuem uma linha de vista desobstruída entre eles, sendo dado em função do comprimento de onda através da equação (1).

$$L_{FS} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad [dB] \quad (1)$$

onde,

λ = comprimento de onda (m)

d = distância de propagação (m)

A equação (1) pode ser escrita em função da frequência através da equação (2).

$$L_{FS} = 92.45 + 20 \log f + 20 \log d \quad [dB] \quad (2)$$

onde,

f = frequência (GHz)

d = distância de propagação (Km)

2.1.2. Refração na troposfera

A troposfera não é um meio homogéneo, ela é formada por camadas, cuja composição, distribuição, altura e a própria duração são variáveis. Deste modo, um sinal ao propagar num meio estratificado, tal como enuncia a lei de Snell, sofrerá refração fazendo com que não siga uma trajetória reta, mas sim um percurso cuja curvatura depende da variação do índice de refração ao longo do mesmo.

2.1.2.1. Índice de refração e refratividade

A relação entre a velocidade de propagação do sinal no vazio e na troposfera é dada pelo índice de refração cujo valor é variável ao longo da mesma. Porém, essa variação é sempre muito pequena

com valores quase sempre perto da unidade. Contudo, o fenómeno da refração não depende do índice de refração, mas sim na sua variação.

Pelo facto do seu valor absoluto ser muito próximo da unidade, a sua gama de variação varia entre 2×10^{-6} e 3×10^{-6} , e foi proposto fazer uma modificação na variável por forma a facilitar os cálculos. O índice de refração da atmosfera que pode ser utilizado para todas as frequências, de acordo com a recomendação ITU-R P.453-12 [5], é dado pela equação (3) em que N é denominado por refratividade, sendo dado pela equação (4).

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (4)$$

onde,

N_{dry} = refratividade seco

N_{wet} = refratividade húmido

T = temperatura (°K)

e = pressão do vapor de água (mb)

P = pressão atmosférica (mb)

A relação entre a pressão do vapor de água e a humidade relativa do ar é dada pela equação (5).

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (5)$$

em que e_s é a pressão de vapor de saturação à uma dada temperatura, sendo dada pela equação (6).

$$e_s = EF \cdot a \cdot e^{\frac{(b-t)}{t+c}} \quad [mb] \quad (6)$$

com,

$$EF = 1 + 10^{-4} [7.2 + P \cdot (0.0320 + 5.9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)] \quad \text{para água}$$

$$EF = 1 + 10^{-4} [2.2 + P \cdot (0.0383 + 6.4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)] \quad \text{para gelo} \quad (7)$$

onde,

H = humidade relativa (%)

P = pressão atmosférica (mb)

t = temperatura (°C)

O valor dos coeficientes a , b , c e d utilizados na equação (6) estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1- Valor dos coeficientes da equação 2.4 [11].

	Temperatura [°C]	a	b	c	d
Água	-40 a 50	6.1121	18.678	257.14	234.5
Gelo	-80 a 0	6.1115	23.036	279.82	333.7

A pressão do vapor de água pode ser obtida a partir da densidade do vapor de água, cujos valores representativos são dados na recomendação ITU-R P.836-5, utilizando a seguinte equação (8).

$$e = \frac{\rho \cdot T}{216.7} \quad [mb] \quad (8)$$

onde,

ρ = densidade do vapor de água (g/m³)

2.1.2.2. *Gradiente de refratividade e condições da troposfera*

Para o projeto de um sistema de FH, não é relevante o exato valor da refratividade numa determinada localização, mas sim a sua variação com a altura, denominado de gradiente de refratividade e dado pela equação (9).

$$\Delta N = \frac{\partial N(h)}{\partial h} \quad (9)$$

O gradiente de refratividade varia com a altura de acordo com a variação vertical das condições meteorológicas tais como a pressão, a temperatura e a pressão do vapor de água. As variações destas três grandezas atmosféricas com a altura são obtidas a partir do modelo fornecido na recomendação ITU-R P.835-5 [6]. A recomendação ITU-R P.453-12 que é baseada no referido modelo, contém a expressão que permite calcular diretamente a variação da refratividade com a altura utilizando valor de referência ao nível do mar, sendo dada pela equação (10).

$$N(h) = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{h_s}{h_0}\right) \quad (10)$$

onde,

N_0 = valor médio da refratividade extrapolado ao nível do mar

h_0 = altura para fins de normalização (m)

h_s = altura acima do nível do mar (m)

Tanto N_0 como h_0 dependem das características climáticas de cada região e por isso podem ser determinados estatisticamente para diferentes climas, recorrendo à recomendação ITU-R P453-12. Entretanto, para fins de referência, uma média global do perfil de altura da refratividade pode ser definida por $N_0 = 315$ e $h_0 = 7.35$ Km.

De acordo com o valor do ΔN , a troposfera pode ser classificada como uma troposfera normal, troposfera “Sub-refractiva” e troposfera “Super-refractiva”. Uma troposfera normal ou standard é uma troposfera com um gradiente de refratividade igual a -39 units/Km e é geralmente associado à maioria dos locais na terra por ser um valor mediano.

A troposfera “Sub-refractiva” é associado à troposfera cujo valor do gradiente de refratividade está perto de zero ou é sempre positivo. De acordo com as estatísticas fornecidas pelo ITU-R [5], as condições para uma troposfera “Sub-refractiva” são possíveis em qualquer local ou área geográfica para uma percentagem anual inferior a 10% do tempo. Na maioria dos países o valor não excedido a 99% da média anual é de 30 N units/km.

Tanto os gradientes de temperaturas negativos e os gradientes de pressão de vapor de água positivos, são as condições atmosféricas que causam “Sub-refração”. Em áreas onde a temperatura superficial é superior a 30°C e a humidade relativa é menor que 40%, tais como as regiões desertas, o aquecimento solar produz uma camada superficial quase homogénea que muitas vezes chegam a centenas de metros de espessura. Uma vez que esta camada é instável, as convecções atmosféricas resultantes tendem a concentrar humidade perto do topo da camada, fazendo com que o gradiente vertical do índice de refração seja positivo. Nas áreas onde as temperaturas superficiais variam em média entre 10 e 30°C e a humidade relativa é superior a 60%, as camadas “Sub-refractivas” podem formar durante a noite e madrugada devido ao deslocamento da massa de ar quente e húmida no sentido horizontal, sobre uma superfície relativamente mais fria e seca.

Por outro lado, as condições de “Super-refração” são consideradas se o gradiente de refratividade for menor do que -100 N units/Km. Estas condições são geralmente associadas às variações de temperatura do ar e ao gradiente negativo do vapor de água, que por sua vez estão associadas à advecção, subsidência e fenómenos de radiação, assim como, à formação de largas camadas de evaporação em grandes volumes de água. A advecção pode gerar gradientes de temperaturas negativos fazendo com que ocorra “Super-refração”, por exemplo quando uma massa de ar frio se move sobre um volume de ar quente. A subsidência gera uma inversão do gradiente da temperatura. Esta situação ocorre por exemplo quando o estratocúmulo (nuvem escura, com base ondulada, situada a uma altitude média de 2Km) está situado sobre uma inversão de anticiclone e o vapor de

água cria gradientes de refração muito negativos. As condições de “Super-refração” podem ser verificadas em grandes áreas do globo, porém ela é comum nos trópicos, no Mar Vermelho, no Golfo Árabe ou no Mar Mediterrâneo [7].

Os ductos são regiões da troposfera que derivado aos valores anormais do gradiente de refratividade, mantém o sinal confinado entre duas camadas da troposfera, ou entre uma camada e a superfície da Terra. Os ductos são responsáveis por alcances anormalmente elevados, suscetíveis de provocar interferências indesejáveis noutros sistemas que operem na mesma gama de frequência. Existem dois tipos de ductos. Caso a base do ducto formado esteja na superfície terrestre, o ducto é designado de ducto superficial. Normalmente, estes ductos formam-se quando o ar na camada superior da troposfera é excepcionalmente quente e seco em comparação com o ar na camada inferior da troposfera. Por exemplo, os ductos superficiais podem ser devidos à advecção do ar continental quente e seco para a superfície de água mais fria do mar provocando uma inversão de temperatura. Para além disso, através da evaporação pode ser adicionada humidade ao ar, produzindo um gradiente de humidade que possibilita o fortalecimento do gradiente na camada onde forma o ducto. Os ductos superficiais tendem a estar mais no lado sotavento de massas de terra e podem ocorrer durante o dia ou à noite, e estenderem-se sobre o mar por várias centenas de quilómetros e serem muito persistentes. Já, os ductos elevados podem variar de algumas centenas de metros acima da superfície terrestre na parte oriental dos oceanos tropicais até vários milhares de metros na parte ocidental. Entretanto as condições meteorológicas necessárias para a formação dos ductos elevados são as mesmas dos ductos superficiais, e quando os ductos elevados são formados sobre os mares tropicais, estes são chamados de ductos de evaporação.

É importante referir que a propagação no ducto é difícil de caracterizar quantitativamente, porém, a recomendação do ITU-R 453-12 definiu um novo parâmetro denominado de índice de refração modificado, de modo a fornecer um modelo simples de refração nos casos em que o gradiente de refratividade é menor do que -157 N units/Km . O índice de refração modificado é dado pela equação (11).

$$M(h) = N(h) + 10^6 \cdot \frac{h}{r_0} \quad (11)$$

de donde substituindo o r_0 pelo seu valor, o índice de refração modificado é dado pela equação (12).

$$M = N + 157 \cdot h \quad (12)$$

onde,

h = altura acima da superfície da terra (Km)

2.1.2.3. *Encurvamento do raio: conceito do Raio efetivo da terra*

O trajeto seguido pela frente de onda na troposfera depende do valor da refratividade. Uma vez que a refratividade depende da altura, e supondo que o sinal de propagação é uma frente de onda plana, a velocidade de propagação da mesma frente não será constante em diferentes pontos. Deste modo, dependendo do sinal e do valor do gradiente de refratividade, o raio tende a encurvar para cima ou para baixo.

Em condições atmosféricas normais, onde o gradiente de refratividade é perto de -39 N units/Km, o raio de curvatura do raio da frente de onda é maior do que o raio ótico. No caso da ocorrência de “Sub-refração”, o raio da frente de onda será curvado severamente e o raio da trajetória seguida pelos sinais é menor do que o associado ao raio ótico, e, portanto, o radio horizonte é menor do que o horizonte ótico. Por outro lado, caso ocorram condições de “Super-refração”, a trajetória da frente de onda afasta-se da curvatura da Terra. Nestas condições, para valores negativos do gradiente de refratividade menor do que -150 N units/Km, os ductos normalmente são formados e perturbações severas podem ocorrer no sistema.

Porém, para fins práticos e de modo a simplificar, é ignorada o facto de o gradiente não ser constante ao longo do percurso entre o transmissor e o recetor. Assume-se então em projetos reais que o sinal segue uma trajetória curva com um raio cujo valor depende do valor médio do gradiente ao longo da trajetória. Aplicando a lei de Snell, o raio do percurso é dado pela equação (13).

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\sin \varphi}{n} \frac{dn}{dh} \quad (13)$$

onde,

ρ = raio de curvatura da trajetória da onda

n = índice de refração

$\frac{dn}{dh}$ = gradiente vertical do índice de refração

φ = ângulo medido em relação ao raio horizontal

Uma vez que na maioria dos casos, o ângulo de lançamento da antena do transmissor é zero e o índice de refração é praticamente igual a um, o raio de curvatura da trajetória da onda é através da equação (14).

$$\rho = \frac{1}{R} = \frac{\partial n(h)}{\partial h} \quad (14)$$

Incluindo a relação entre o índice de refração e a refratividade na equação (14), o raio de curvatura da trajetória da onda é dado através da equação (15).

$$\Delta N = \frac{\partial n(h)}{\partial h} = -10^6 \frac{1}{R} = -10^6 \rho \quad (15)$$

Existem diferentes modelos geométricos utilizados para representar o percurso da onda e a altura do terreno da Terra. Porém, o modelo amplamente utilizado e o mais comum é o modelo baseado no chamado raio efetivo da Terra. Este modelo consiste na representação do raio como uma linha reta entre o emissor e o receptor e compensa a curvatura da Terra com a real trajetória de propagação seguida pelo sinal. Assim, o novo raio da Terra é designado de raio efetivo da Terra. Neste modelo, um fator K é definido, e representa a razão entre o raio real da Terra e o tal raio efetivo da Terra. Este fator K é calculado em função do gradiente de refratividade e do raio real da terra, através da equação (16).

$$k = \frac{1}{1 + R_0 \Delta N \times 10^{-6}} = \frac{157}{157 + \Delta N} \quad (16)$$

Deste modo, de acordo com as diferentes condições de refração já mencionadas, a relação entre os valores do fator K e as condições da troposfera é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Valor fator K para diferentes condições de refração.

Condições da troposfera	ΔN (N units/Km)	K
Normal	$0 \leq \Delta N < -39$	$1 \leq k < \frac{4}{3}$
Sub-refractivo	$\Delta N > 0$	$0 \leq k < 1$
Super-refractivo	$\Delta N < -39$	$k > \frac{4}{3}$
Ductos	$\Delta N \leq -157$	$k \text{ inf}$

O valor do fator K é de 4/3 para condições normais de propagação. Este valor é obtido através da média dos valores ao longo de um período de tempo, que geralmente é de um ano.

2.1.3. Perdas por difração no terreno: conceito da zona de Fresnel e horizonte de rádio

Como já foi descrito, em condições anormais de propagação, como é o exemplo da “Sub-refração”, o sinal tende a encurvar para baixo podendo até interseccionar obstáculos existentes ao longo do percurso ou mesmo a própria superfície terrestre. A difração nestes obstáculos ou na própria superfície terrestre é analisada tendo em conta o conceito do elipsoide de *Fresnel*. O elipsoide de *Fresnel* está relacionado com o princípio de *Huygen* e pela teoria desenvolvida pelo *Fresnel*. O princípio de *Huygen* sustenta que uma onda esférica é originada a partir de um ponto de uma frente de onda plana, e que a junção de todas as ondas esféricas formadas a partir de vários pontos da frente de onda plana origina uma nova frente de onda plana a uma distância r denominado de raio do elipsoide. Tendo em conta este princípio, *Fresnel* demonstrou que existe um número infinito de elipsoides entre o emissor e o recetor que podem contribuir de forma positiva ou negativa para a potência recebida.

O raio de cada um dos elipsoides numa determinada localização do percurso entre o emissor e o recetor depende somente da frequência do sinal sendo expressa pela equação (17).

$$R_n = 17.3 \sqrt{\frac{n \cdot d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} \quad [m] \quad (17)$$

onde,

R_n = raio do n ésimo elipsoide de *Fresnel*

n = Ordem do elipsoide

d_1 = distância do emissor (Km)

d_2 = distância do recetor (Km)

f = frequência (GHz)

d = distância total da ligação (Km)

Para projetos de sistemas de feixes hertzianos, as perdas devidas à refração são consideradas apenas para o primeiro elipsoide de *Fresnel*, uma vez que é nela que contém a maioria da energia do sinal, e, portanto, a contribuição da energia contida nos restantes elipsoides, para a potência total recebida decresce com a ordem dos elipsoides. Para a maioria das aplicações, é suficiente ter no mínimo 60% do primeiro elipsoide de *Fresnel* desobstruído para que se garanta que a propagação é feita em espaço livre.

O horizonte radio é um fator bastante importante para os sistemas de FH, principalmente se a distância de ligação for grande. O horizonte radio neste contexto, tal como mostra a Figura 4,

consiste no lugar geométrico dos pontos nos quais os raios diretos de uma antena são tangentes à superfície da Terra.

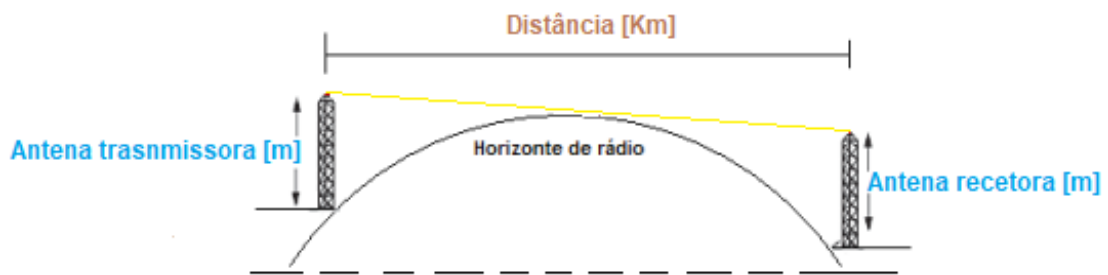


Figura 4 - Horizonte de rádio para sistemas de FH.

Assumindo a não existência de anomalias na atmosfera e uma terra perfeitamente esférica, a distância máxima teórica entre as duas antenas que garante a linha de vista é dada pela equação (18).

$$D = 3.569 \times \sqrt{h_1} + .569 \times \sqrt{h_2} \quad [m] \quad (18)$$

2.1.4. Atenuação devido à vegetação

Devido à variedade de situações relacionadas com fenômenos tais como desvanecimento, despolarização e espalhamento de sinais, causados pela vegetação, é extremamente difícil prover um modelo matemático que permita obter resultados precisos da atenuação devido à vegetação. Assim, é uma boa prática que, num projeto de sistema de feixes hertzianos, qualquer tipo de degradação do sinal devido à presença da vegetação seja evitado, passando pela escolha cuidadosa da localização do emissor e do receptor. Algumas fontes recomendam [7], não como um modelo matemático, mas sim como uma advertência, um acréscimo das alturas das torres de emissão e recepção que permite um acréscimo do afastamento do sinal de qualquer obstáculo ou do próprio terreno, de cerca de 15 metros.

Entretanto, existem alguns modelos capazes de fornecer um valor aproximado da atenuação devido à vegetação. É o caso do modelo de *Weissberger* [8] que é um modelo de propagação capaz de estimar a atenuação provocada pela presença de uma ou mais árvores no percurso da propagação do sinal. Este modelo aplica-se quando a densidade da folhagem é no máximo 400 m e para frequências dos 230 MHz a 95 GHz.

A atenuação devida a vegetação segundo o modelo de *Weissberger* é dada pela equação (19) [9].

$$L = \begin{cases} 1.33 \cdot F^{0.284} \cdot d_f^{0.588}, & 14 < d_f \leq 400 \text{ m} \\ 0.45 \cdot F^{0.284} \cdot d_f, & 0 < d_f \leq 14 \text{ m} \end{cases} \quad [dB] \quad (19)$$

onde

d_f = distância de folhagem ao longo do percurso de transmissão (m)

F = frequência (GHz)

Outro modelo que apesar de ser substituído por um modelo mais recente fornecido numa recomendação do ITU é o *Early ITU Vegetation model*, que continua a ser válido e pode ser utilizado devido à sua fácil aplicação, assim como à coerência entre seus resultados e os resultados obtidos a partir do modelo de *Weissberger* [9].

A atenuação dada pelo modelo de *Early ITU Vegetation model* é expressa pela equação (20).

$$L = 0.2 \cdot F^{0.3} \cdot d_f^{0.6} \quad [dB] \quad (20)$$

onde,

d_f = distância de folhagem ao longo do percurso de transmissão (m)

F = frequência (GHz)

Como já foi referido, o modelo *Early ITU Vegetation model* foi substituído por um modelo fornecido na recomendação ITU-R P.833-9 que propõe alguns métodos que permitem calcular a atenuação devida à vegetação na faixa de frequência entre 30 MHz e 100 GHz. Estes métodos dependem da banda de frequência e da geometria da vegetação [10].

Neste modelo considera-se duas situações distintas. Na primeira situação, ilustrada na Figura 5, a obstrução é causada por uma floresta onde um dos terminais está dentro da mesma. Nesta situação a atenuação provocada pela vegetação é caracterizada por dois parâmetros, a taxa atenuação específica devido principalmente à dispersão de energia fora do percurso de propagação do sinal e a atenuação adicional máxima total devida à vegetação num trajeto limitada pelo efeito de outros mecanismos, tais como, a propagação das ondas de superfície por cima do meio vegetal e a dispersão dentro do mesmo.

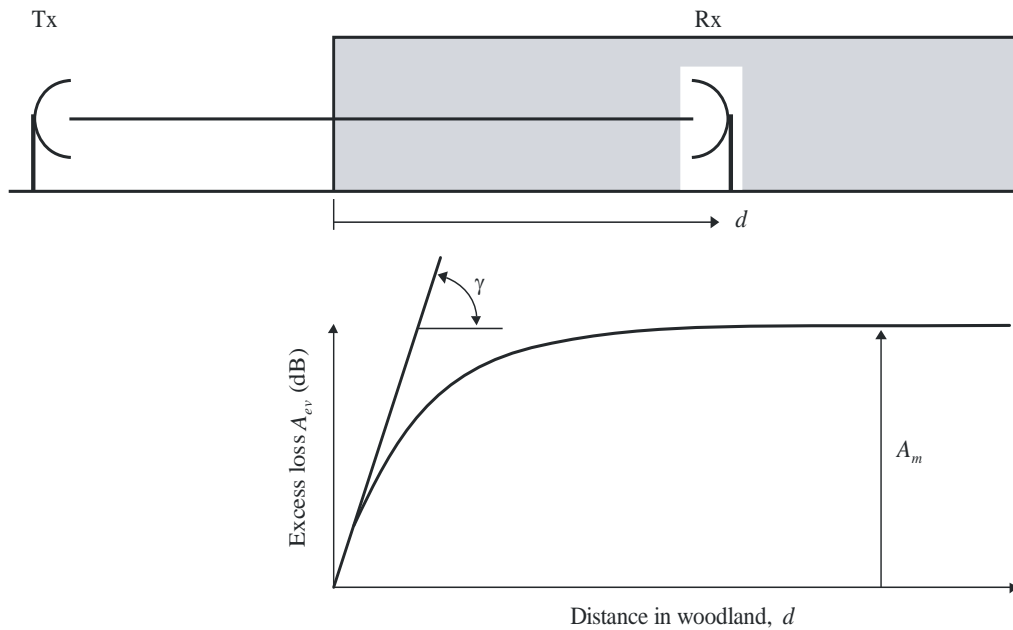


Figura 5 - Trajeto representativo na zona vegetativa [8].

A atenuação excessiva devido à presença da vegetação é dada pela equação (21) .

$$A_{ev} = A_m \left[1 - e^{-\frac{d\gamma}{A_m}} \right] \quad [dB] \quad (21)$$

onde,

d = distância do percurso na floresta (m)

γ = atenuação específica para percursos vegetativos muito curtos (dB/m)

A_m = atenuação máxima para um terminal dentro de um tipo específico de vegetação assim como a sua profundidade (dB)

O valor da atenuação específica depende da espécie e da densidade da vegetação. Deste modo, a mesma recomendação fornece valores aproximados em função da frequência que podem ser observados na Figura 6. Porém, é importante referir que a atenuação devida a vegetação varia amplamente devida a natureza irregular do meio e da grande variedade de espécies, densidades e condições de humidade que se obtém na prática [10]. Deste modo, os valores que são apresentados na Figura 6 devem ser encarados unicamente como exemplos.

Por outro lado, o valor da atenuação máxima é limitado pela dispersão da onda de superfície sendo dependente da espécie e da densidade da vegetação, bem como da do diagrama de radiação

da antena do terminal que se encontra dentro da vegetação e da distância vertical entre a antena e o ponto mais alto da vegetação [10].

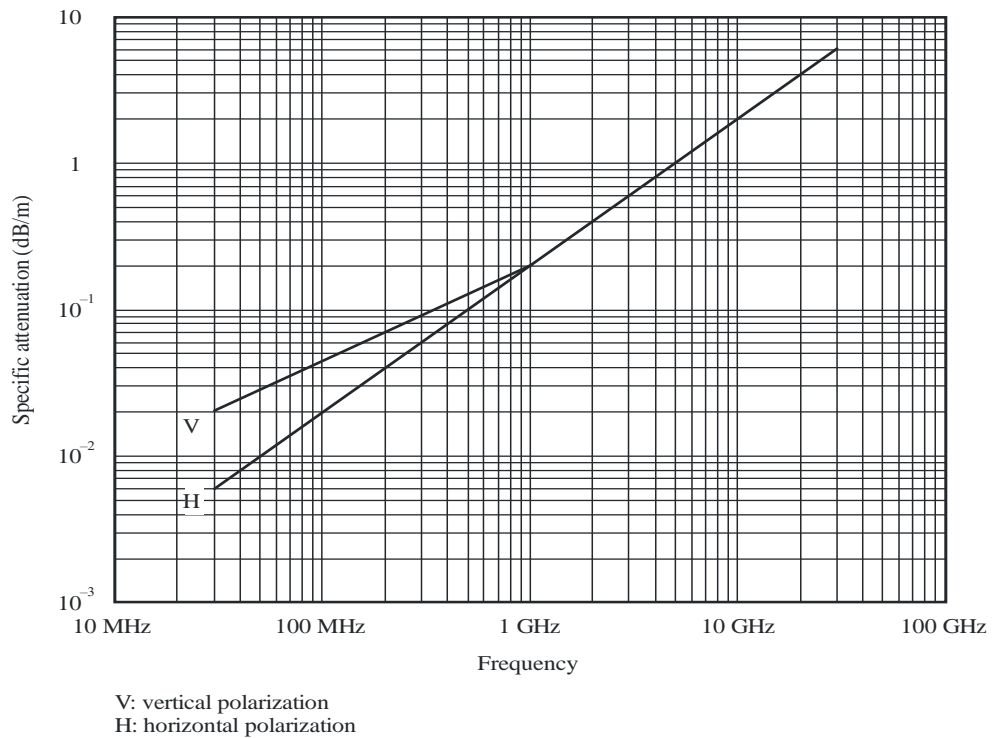


Figura 6 – Atenuação específica na vegetação [8].

Na segunda situação considera-se a obstrução devido a um único obstáculo vegetal com ambos os terminais fora do meio vegetal. A recomendação divide a atenuação devido à vegetação nesta situação em duas condições. A primeira condição é para propagação de sinais com frequência até 1 GHz. Nesta condição a atenuação devida à vegetação é dada pela equação (21).

$$A_{et} = d \cdot Y \quad [dB] \quad (22)$$

onde,

d = distância do percurso no dossel da árvore (m)

Y = atenuação específica para percursos vegetativos muito curtos (dB/m)

com o A_{et} menor ou igual ao excesso de atenuação mais baixo para outros trajetos. Esta restrição para o valor máximo de A_{et} é necessária uma vez que se a atenuação específica for suficientemente alta, existirá um trajeto com menor perda que rodeia a zona de vegetação [10].

Para propagação de sinais acima de 1 GHz, é necessário que se faça uma estimativa do campo total, calculando primeiramente as componentes de difração, das reflexões no solo e das dispersões pela vegetação e posteriormente as suas combinações.

A componente difratada é composta por aquelas que são difratadas pela parte superior da vegetação e por aquelas que são difratadas pela parte lateral da vegetação. A componente difratada pela parte superior, cuja geometria está apresentada na Figura 7, é calculada através da equação (23).

$$L_{top} = L_{top-diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad [dB] \quad (23)$$

onde,

G_{Tx} = perdas devidas ao ângulo da onda emitida (dB)

G_{Rx} = perdas devidas ao ângulo da onda difratada que chega ao recetor (dB)

$L_{top-diff}$ = perdas totais da difração calculada a partir do método fornecido na recomendação ITU-R P.526-13 [11] para bordas duplamente isoladas.

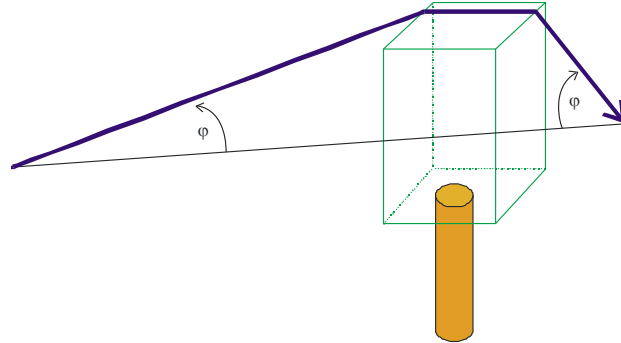


Figura 7 - Componente difratada pela parte superior da vegetação [7].

O cálculo da componente difratada pela lateral é baseada na geometria da Figura 8. As perdas são calculadas a partir das equações (24) e (25).

$$L_{sidea} = L_{diff-sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad [dB] \quad (24)$$

$$L_{sidea} = L_{diff-sidea} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b) \quad [dB] \quad (25)$$

onde,

$G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ = perdas devidas ao ângulo da onda difratada que é emitida (dB)

$G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ = perdas devidas ao ângulo da onda difratada que chega ao recetor pelo lado a ou b (dB)

$L_{diff-sidea}$ = perdas totais da difração em torno de cada lado, calculada a partir do método fornecido na recomendação ITU-R P.526-12 para duas arestas isoladas.

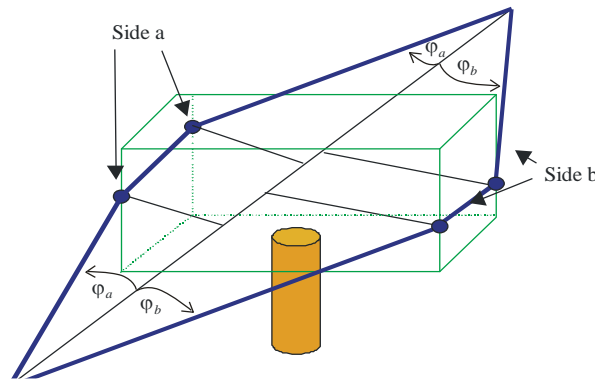


Figura 8 - Componentes difratados em torno da vegetação [7].

Para calcular a componente refletida no solo recorrer-se à geometria ilustrada na Figura 9, onde é possível determinar o coeficiente de reflexão, R_0 , do sinal refletido no solo com um determinado ângulo θ_g .

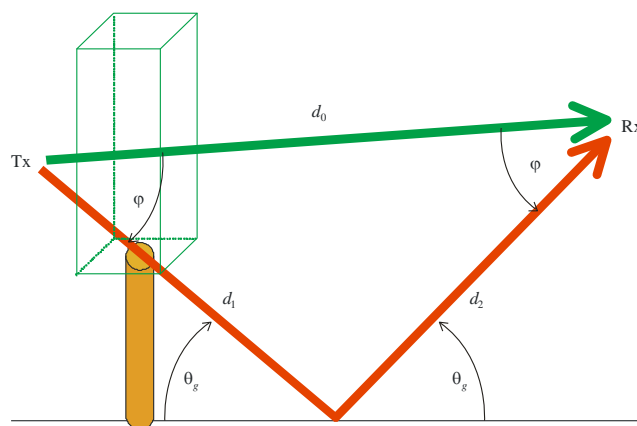


Figura 9 - Componente difratada no solo [7].

Este método é um método normalizado e descrito na recomendação UIT-R P.1238-9 [12], em que os valores da permissividade e da condutância são obtidos a partir da recomendação ITU-R P.527 [13]. A perda devido ao solo é dada através da equação (26).

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad [dB] \quad (26)$$

em que,

$G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ = perdas devidas ao ângulo da onda refletida que é emitida (dB)

$G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ = perdas devidas ao ângulo da onda refletida que é recebida (dB)

A componente devida à dispersão pela vegetação é dada pela equação (27).

$$L_{scat} = -10 \log_{10} \left(\begin{array}{l} e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \cdot \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \cdot \bar{q}_M + e^{-\tau} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\bar{q}_m - \bar{q}_M] \} \\ + \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \cdot \{ -e^{-\hat{\tau}} \cdot \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N [A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\mu_N}{s_k}}] \} \end{array} \right) \quad (27)$$

onde,

α = razão entre a potência espalhada para frente e a potência total espalhada

β = largura de banda em função da fase (°)

Σ_τ = coeficiente combinado de absorção e dispersão

W = coeficiente de reflexão (albedo)

D = distância à vegetação (m)

$\Delta\gamma_R = 0.6 \cdot \Delta\gamma_{3dB}$ = largura de feixe a meia potência da antena recetora

m = ordem do primeiro termo I_1

$\tau = (\sigma_a + \sigma_s) \cdot Z$ = densidade ótica em função da distância Z

com,

$$\bar{q}_m = \frac{4}{\Delta\gamma_R^2 + m\beta_S^2} \quad (28)$$

$$\beta_S = 0.6 \cdot \beta \quad (29)$$

$$P_N = \sin^2\left(\frac{\pi}{2N}\right) \quad (30)$$

$$P_N = \sin^2\left(\frac{\pi}{2N}\right) \quad (31)$$

Os coeficientes de atenuação S_k determinam-se de acordo com equação (32).

$$\frac{\hat{W}}{2} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{P_n}{1 - \frac{\mu_n}{S}} = 1 \quad (32)$$

onde,

$$P_n = \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{N}\right), (n = 1, \dots, N-1) \quad \text{e} \quad \hat{W} = \frac{(1-\alpha)W}{1-\alpha W} \quad (33)$$

Os fatores de amplitude, A_k , determina-se através do sistema de equações lineares (34).

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_n}{S_K}} = \frac{\delta_n}{P_N} \quad \text{para} \quad n = \frac{N+1}{2} \dots N \quad (34)$$

onde,

$$\mu_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right)$$

$$\delta_n = 0 \quad \text{para} \quad n \neq N \quad (35)$$

$$\delta_n = 1 \quad \text{para} \quad n = N$$

Por fim, a combinação, das componentes de difração, das reflexões no solo e das dispersões pela vegetação, que resulta na atenuação total devida à vegetação é dada pela equação (36).

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\} [dB] \quad (36)$$

2.1.5. Atenuação devido ao oxigénio e ao vapor de água

Nos primeiros quilómetros, a atmosfera é constituída maioritariamente pelo oxigénio (O₂), nitrogénio (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água (H₂O). Os sinais dos sistemas de feixes hertzianos ao se propagarem na troposfera interagem com as moléculas destes elementos, e devido à frequência com que operam, apenas o oxigénio e o vapor de água são relevantes e podem degradar os sinais.

A recomendação ITU-R P.676-11 fornece métodos que permitem estimar a atenuação provocada pelos gases, nomeadamente o oxigénio e o vapor de água. Os métodos são válidos para frequências até 1000 GHz e requerem o conhecimento dos dados meteorológicos tais como a pressão, a temperatura e densidade do vapor de água [14].

A atenuação específica devido aos gases é dada pela equação (37).

$$Y = Y_o + Y_w = 0.1820f \left(N''_{Oxygen}(f) + N''_{WaterVapour}(f) \right) \quad [dB/km] \quad (37)$$

onde,

Y_o = atenuação específica devido ao oxigénio (dB/Km)

Y_w = atenuação específica devido ao vapor de água (dB/Km)

f = frequência (GHz)

em que,

$$N''_{Oxygen}(f) = \sum_{i(oxygen)} S_i F_i + N''_D(f) \quad [dB/km] \quad (38)$$

e

$$N''_{WaterVapour}(f) = \sum_{i(waterVapour)} S_i F_i \quad [dB/km] \quad (39)$$

O S_i é o valor na i-ésima linha do oxigénio ou vapor de água é dado através da equação (40)

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} \cdot p \cdot \theta^3 \cdot e^{[a_2(1-\theta)]} \quad \text{para oxigenio} \\ S_i &= b_1 \times 10^{-1} \cdot e \cdot \theta^{3.5} \cdot e^{[b_2(1-\theta)]} \quad \text{para vapor de água} \end{aligned} \quad (40)$$

onde,

p = pressão do ar seco (hPa)

e = pressão parcial do vapor de água (hPa)

$\Theta = 300/T$

T = temperatura (K)

O F_i é fator de forma de linha e calcula-se a partir da equação (41).

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (41)$$

em que Δf é a largura da linha, sendo calculada pela equação (42).

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} \cdot (p \cdot \Theta^{(0.8-a_4)} + 1.1e\Theta) \quad \text{para oxigénio} \\ \Delta f &= b_3 \times 10^{-4} \cdot (p \cdot \Theta^{b_4} + b_5 e \Theta^{b_6}) \quad \text{para vapor de água} \end{aligned} \quad (42)$$

Tendo em conta o efeito de *Doppler*, o Δf modificado é dado através da equação (42).

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}} \quad \text{para oxigénio} \\ \Delta f &= 0.535\Delta f + \sqrt{0.217\Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\Theta}} \quad \text{para vapor de água} \end{aligned} \quad (43)$$

O fator de correção δ introduz-se devido aos efeitos de interferência nas linhas do oxigénio, sendo dado pela equação (44).

$$\begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6\Theta) \times 10^{-4} (p + e)\Theta^{0.8} \quad \text{para oxigénio} \\ \delta &= 0 \quad \text{para vapor de água} \end{aligned} \quad (44)$$

O conteúdo espectral do ar seco proveniente do espectro de oxigénio não ressonante de Debye, abaixo de 10 GHz, e a atenuação de nitrogénio induzida pela pressão acima de 100 GHz é dada pela equação (45).

$$N_D''(f) = f \cdot p \cdot \theta^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (45)$$

em que d é o parâmetro de largura de banda do espectro de Debye, dado pela equação (46).

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad (46)$$

O cálculo total das atenuações devido ao oxigênio e ao vapor de água ao longo da ligação é calculada a partir da atenuação específica já referida e a distância de ligação. A expressão é dada pela equação (47).

$$A = \gamma d = (\gamma_0 + \gamma_w) \quad [dB] \quad (47)$$

onde,

$$d = \text{distância de ligação (Km)}$$

No gráfico da Figura 10 é apresentada a atenuação específica devido aos gases atmosféricos para uma pressão atmosférica de 1013 hPa, uma temperatura de 15°C e uma concentração de vapor de água de 7.5 g/m³, calculada com intervalos de 1 GHz. Pode-se verificar que a atenuação é mínima numa janela que se estende entre 1 e aproximadamente 10 GHz. Na banda mais inferior, até 2 GHz, a atenuação pode até ser desprezável, exceto se a distância de ligação for muito longa.

Pode-se utilizar frequências até aos 50 GHz para percursos inferiores a 20 Km, principalmente se forem aceitáveis eventuais interrupções devidos à chuva muito intensa. Para ligações ainda mais curtas, até cerca de 2 Km, é interessante utilizar frequências entre 300 e 1000 THz [15].

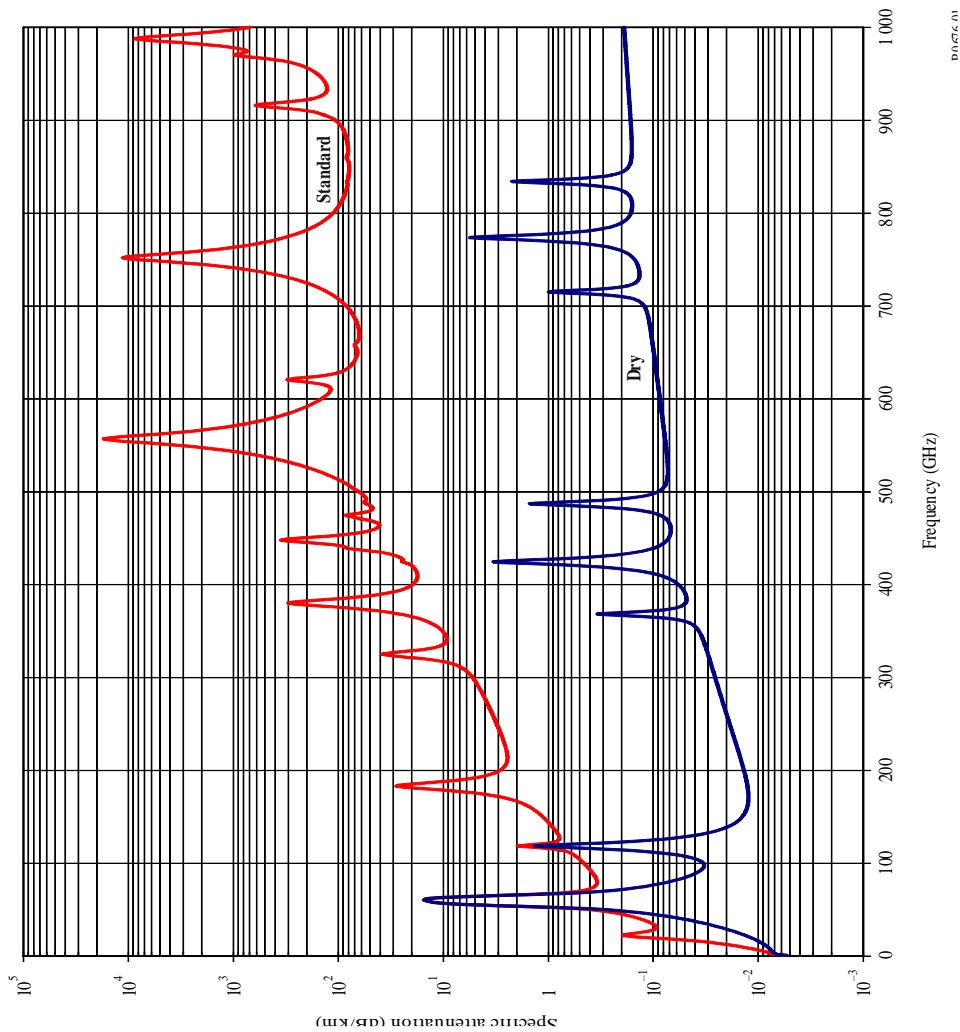


Figura 10 – Atenuação específica devido aos gases atmosféricos, calculada com intervalos de 1 GHz, para uma pressão atmosférica de 1013 hPa, uma temperatura de 15 °C e uma concentração de vapor de água de 7.5 g/m³ [9].

2.1.6. Atenuação devido à precipitação

A precipitação, as nuvens, os nevoeiros e a neve que constituem o ar atmosférico, são também fatores que influenciam o desempenho de uma ligação por FH. Porém, devido à sua estatística de ocorrência, a precipitação é o fator mais relevante no que toca à perda da potência do sinal ao longo da sua trajetória. É importante referir que, a chuva não absorve muito a energia do sinal. Ao contrário, devido à presença de grande quantidade de partículas condutoras que a compõem, o sinal é refletido fazendo com que a potência com que chegue ao recetor seja reduzida. Deste modo, associados a estes hidrometeoros, existem duas perturbações que afetam o sinal. Primeiro é a absorção e o espalhamento do sinal devido às gotas de água ou partículas de gelo. Segundo, estas partículas devido às suas formas não esféricas causam um efeito de rotação da polarização que depende da forma, dimensão e distribuição destas partículas.

A literatura descreve diversos métodos, muitos desenvolvidos especificamente para uma certa região, que permitem o cálculo da atenuação devido à precipitação. O método de Rice e Holmberg de 1973 e o método de Lin's de 1980 foram amplamente utilizados no passado. Entretanto, atualmente apenas dois métodos estão a ser utilizados maioritariamente pelos projetistas de sistemas de FH: o método de Crane utilizado maioritariamente nos Estados Unidos e o método fornecido nas recomendações ITU-R P.530-16 [16] e ITU-R P.838-3 [17], que é um método utilizado a nível internacional [5]. Estes dois métodos são diferentes tanto na metodologia como na filosofia. Embora ambos são baseados em representações de ajustes de curva dos dados da chuva, o método de Crane ajusta estes dados para um modelo baseado em processos físicos, nomeadamente a chuva estratificada e convectiva, o que lhe permite não ter limitações relacionadas com a percentagem da intensidade de precipitação. Outra diferença entre estes dois métodos é o facto de o método de Crane não considerar o efeito da polarização.

2.1.6.1. Metodo ITU-R

Embora a atenuação devido à chuva pode ser ignorada para frequências abaixo de 5 GHz, ela dever ser incluída no cálculo do link budget para frequências mais elevadas. O método fornecido em [16], descreve passo a passo a técnica que deve ser utilizada para a estatística da atenuação devido à chuva a longo prazo, para frequências até 1000 GHz e ligações no máximo de 60 Km, sendo válido para qualquer localização do planeta.

1º passo: obter a intensidade da precipitação $R_{0.01}$ (mm/h), excedida durante 0.01% do tempo (referente a um ano), com um tempo de integração de 1 min. Caso não se dispõe dos dados a partir das fontes locais de medidas a longo prazo, pode-se utilizar as estimativas obtidas a partir da recomendação ITU-R P.837-6 [18].

2º passo: calcular a atenuação específica de acordo com a intensidade de precipitação de interesse. A atenuação específica, cuja expressão é dada pela equação (48), depende da frequência, polarização e da intensidade de precipitação, sendo calculada tendo em conta o procedimento indicado na recomendação ITU-R P.838-3.

$$Y_R = kR^\alpha \quad [dB] \quad (48)$$

onde,

$$\text{Log}_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (49)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (50)$$

em que,

f = frequência (GHz)

k = coeficiente tanto para a polarização horizontal K_H como para vertical k_V .

α = coeficiente tanto para a polarização α_H horizontal como para vertical α_V

Para outras polarizações os coeficientes K e α podem ser calculados a partir das equações (51) e (52).

$$k = \frac{[k_H + K_v + (k_H - k_V) \cos^2 \Theta \cos 2\tau]}{2} \quad (51)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + K_v \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \Theta \cos 2\tau]}{2k} \quad (52)$$

onde,

Θ = ângulo de elevação do trajeto (°)

τ = ângulo de inclinação da polarização em relação à horizontal (°)

OS valores dos coeficientes para as diferentes polarizações são dados na Tabela 29 [9].

3º passo: calcular a distância efetiva do trajeto a partir da equação (53).

$$d_{eff} = d \cdot r \quad [km] \quad (53)$$

onde,

$$r = \frac{1}{0.477 d^{0.633} R_{0.01}^{0.073} \alpha f^{0.123} - 10.579(1 - \exp(-0.024d))} \quad (54)$$

em que,

f = frequência (GHz)

α = coeficiente calculado a partir da equação (52) e utilizado na equação (48).

d = distância do trajeto (km)

Caso o valor de r seja maior do que 2.5 deve-se considerar $r = 2.5$.

4º passo: calcular a estimativa da atenuação do trajeto excedida durante 0.01% do tempo a partir da equação (55).

$$A_{0.01} = Y_R \cdot d_{eff} \quad [dB] \quad (55)$$

5º passo: calcular a atenuação excedida durante outras percentagens de tempo p no intervalo de 0.001% a 1% através da equação (56).

$$A_p = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \cdot A_{0.01} \quad [dB] \quad (56)$$

com C_1 , C_2 e C_3 dados pelas equações (57), (58) e (59) respetivamente.

$$C_1 = (0.07^{C_0}) [0.12^{1-C_0}] \quad (57)$$

$$C_2 = 0.855C_0 + 0.546(1 - C_0) \quad (58)$$

$$C_3 = 0.139C_0 + 0.043(1 - C_0) \quad (59)$$

onde C_0 é dado pela equação (60).

$$C_0 = \begin{cases} 0.12 + 0.4 \left[\log \left(\frac{f}{10} \right)^2 \right] & \text{para } f \geq 10GHz \\ 0.12 & \text{para } f < 10GHz \end{cases} \quad (60)$$

2.1.6.2. Metodo Crane

O método de Crane que já conta com três versões, 1980, 1996 e 2003 é baseado na intensidade de precipitação tal como o método do ITU-R. A primeira versão de 1980, Crane definiu que a

atenuação devido à precipitação é calculada a partir do produto entre a atenuação específica de um determinado ponto e o fator de conversão ponto para percurso. A atenuação específica de um determinado ponto é calculada a partir da equação (61).

$$Point\ rain\ attenuation = \alpha R_p^\beta \quad [dB] \quad (61)$$

onde α e β estão relacionados com a frequência e a polarização. Porém, nesta versão a indústria utilizava os fatores k e α do modelo ITU-R em vez do α e β , respetivamente [16]. Assim como o ITU-R, nesta versão, Crane utilizava letras do alfabeto para denominar as zonas com intensidade de precipitação específicas. O fator de conversão ponto para percurso nesta versão era uma função da intensidade de precipitação e da distância da trajetória do sinal. Na segunda versão, de 1996, Crane renomeou os fatores α e β para k e α , respetivamente, de modo a que o modelo ficasse em conformidade com o modelo do ITU-R. Também atualizou os valores da intensidade de precipitação das zonas e introduziu mais duas zonas, B1 e B2. A formula para calcular o fator de conversão ponto para percurso sofreu também uma pequena modificação. Na terceira versão, 2003, a grande mudança foi a introdução da intensidade de precipitação R para uma localização específica e que pode ser determinada a partir dos valores da latitude e da longitude.

Baseada na ultima versão, a atenuação não excedida com uma percentagem de $p\%$ do tempo é dada pela equação (62).

$$A_p = Y_R \cdot d_{eff} \quad [dB] \quad (62)$$

onde a atenuação específica é dada pela equação (63).

$$Y_R = KR_p^\alpha \quad [dB] \quad (63)$$

em que,

R_p = intensidade de precipitação não excedida a $p\%$ do tempo (mm/h)

k = mesmo coeficiente k do modelo ITU-R.

α = mesmo coeficiente α do ITU-R.

O método de Crane considera que a atenuação do percurso é influenciada por dois fatores: *intense rain cells* e *to more diffused debris rain*. Estes dois fatores são incorporados no cálculo da

atenuação do percurso em dois componentes. Primeiramente é calculado a distância efetiva do percurso, bem como o seu limite exterior, devido ao primeiro componente a partir da equação (64) e (65), respetivamente.

$$G_1 = \frac{e^{U\alpha d} - 1}{U\alpha} \quad [km] \quad (64)$$

$$G_{1L} = \frac{e^{U\alpha D} - 1}{U\alpha} \quad [km] \quad (65)$$

Depois calcula-se a distância efetiva do percurso e o seu limite exterior, devido ao segundo componente, a partir da equação (66) e (67), respetivamente, para o segundo componente.

$$G_2 = \frac{e^{w\alpha}(e^{c\alpha d} - e^{c\alpha D})}{c\alpha} \quad [km] \quad (66)$$

$$G_{2L} = \frac{e^{w\alpha}(e^{c\alpha(22.5)} - e^{c\alpha D})}{c\alpha} \quad [km] \quad (67)$$

onde,

d = distância do trajeto (Km)

$$b = \frac{2.3}{R_p^{0.17}}$$

$$w = \ln(b) = 0.83 - 0.17 \ln(R_p)$$

$$c = 0.026 - 0.03 \ln(R_p)$$

$$U = \frac{[\ln(b e^{cD})]}{D} = \left[\frac{\ln(b)}{D} \right] + c = \left(\frac{w}{D} \right) + c$$

$$e^{w\alpha} = b^\alpha$$

em que D é o diâmetro da célula da chuva sendo dada pela equação (68).

$$D = 3.8 - 0.6 \ln(R_p) \quad [km] \quad (68)$$

A distância efetiva do percurso, é calculada a partir da equação (69).

$$d_{eff} = \begin{cases} G_1 & \text{para } 0 < d \leq D \\ G_{1L} + G_2 & \text{para } D < d \leq 22.5 \\ G_{1L} + G_{2L} & \text{para } d > 22.5 \end{cases} \quad (69)$$

2.1.7. Reflexão

Aa antenas utilizadas para a transmissão do sinal por mais diretivas que sejam, emitem sempre parte da energia do sinal para outras direções devido aos seus lobos secundários. O sinal ao propagar-se junto à superfície terrestre está sujeito a encontrar obstáculos. Muitas vezes, e o mais comum, é o obstáculo ser a própria superfície terrestre, o que faz com que o sinal se reflita. O efeito da combinação do sinal refletido e do sinal direto pode ser tanto construtivo assim como destrutivo, dependendo de alguns fatores tais como a própria característica da superfície terrestre e a localização das antenas.

Existem três tipos de superfícies terrestres onde o sinal pode ser refletido, a superfície plana, a rugosa e a muito rugosa. Se a superfície for perfeitamente plana, assim como mostra a Figura 11, o ângulo de incidência do sinal será igual ao ângulo do sinal refletido, o que torna o caminho do sinal refletido e o caminho do sinal refletido simétricos. A este tipo de reflexão dá-se o nome de reflexão coerente num determinado ponto especular.

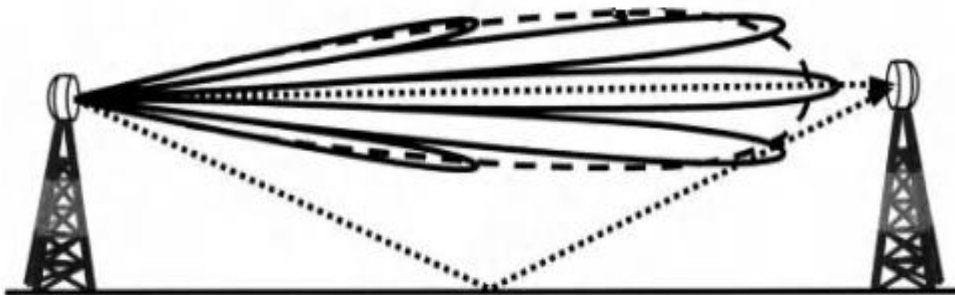


Figura 11 – Sinal refletido numa superfície completamente plana [19].

Porém, à medida que a superfície se vai tornando mais rugosa, como se pode observar na Figura 12, parte da energia do sinal vai ser espalhada para outras direções com ângulos de reflexão diferentes do ângulo de incidência, perdendo assim a tal simetria mencionada acima. As perdas do sinal espalhado são desprezáveis e a potência do sinal refletido é então uma função da divergência e da reflexão. O critério para definir a transição de uma reflexão plana para rugosa não é bem

definida, entretanto, algumas fontes sugerem que a reflexão numa superfície plana ocorre quando a altura da irregularidade do terreno é menor que $\frac{\lambda}{8 \sin \theta}$ ou $\frac{\lambda}{16 \sin \theta}$, segundo Ishimaru, Long e Reed, Russell, respetivamente, sendo que λ é o comprimento de onda e θ é o *grazing angle* [19].

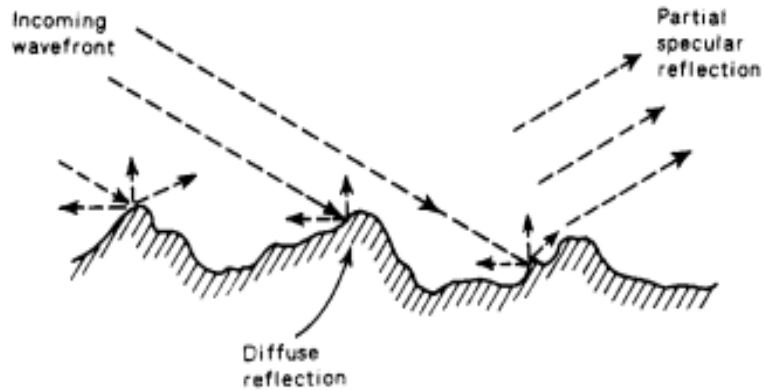


Figura 12 – Reflexões em terrenos rugosos [19].

A energia do sinal refletido é calculada a partir do coeficiente de reflexão que depende da condutividade e da constante dielétrica do solo, da frequência, do ângulo de incidência e também da curvatura efetiva da terra. Estes parâmetros são difíceis de estimar e por esta razão a determinação de um valor preciso é extremamente complexo.

Porém, a recomendação ITU-R 530-16 diz que o coeficiente de reflexão efetivo numa determinada zona de reflexão especular pode ser determinado tanto por medição assim como pelo cálculo. O cálculo faz-se mediante um conjunto de procedimentos que serão descritos a seguir.

1º passo: calcula-se a constante dielétrica complexa da superfície terrestre nas proximidades da zona de reflexão da superfície, de acordo com a equação (70).

$$\eta = \epsilon_r - \frac{j18\sigma}{f} \quad (70)$$

onde,

f = frequência (GHz)

ϵ_r = constante dielétrica relativa

σ = condutividade (S/m)

Os valores da constante dielétrica relativa e da condutividade podem ser estimados a partir das informações fornecidas na recomendação ITU-R P.527.

2º passo: calcula-se o *grazing angle* a partir da equação (71).

$$\varphi = \frac{(h_1 + h_2)}{d} [1 - m(1 + b^2)] \quad (71)$$

em que,

h_1 = altura da antena do transmissor (m)

h_2 = altura da antena do recetor (m)

d = distância da ligação (Km)

Os valores de m e b são dados pelas equações (72) e (73), respetivamente.

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \times 10^3 \quad (72)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m} \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right]} \quad (73)$$

em que,

a_e = raio efetivo da terra para um específico fator k (Km)

3º passo: determina-se o coeficiente de reflexão da superfície através da equação (74).

$$\rho = \frac{|\sin \varphi - \sqrt{C}|}{|\sin \varphi + \sqrt{C}|} \quad (74)$$

onde a constante C é dada pela equação (75) ou (76), dependendo da polarização.

$$C = \eta - \cos \varphi^2 \quad \text{para polarização horizontal} \quad (75)$$

$$C = \eta - \frac{\cos \varphi^2}{\eta^2} \quad \text{para polarização vertical} \quad (76)$$

A distância entre o transmissor e um possível ponto de reflexão, d_1 , e a distância entre o possível ponto de reflexão e o receptor, d_2 , é dada pela equação (77) e (78), respetivamente.

$$d_1 = \frac{d(1+b)}{2} \quad [km] \quad (77)$$

$$d_2 = \frac{d(1-b)}{2} \quad [km] \quad (78)$$

4º passo: determina-se o fator de divergência de modo a ter em conta o efeito da reflexão especular numa superfície esférica. O fator de divergência D , é calculada a partir da equação (79).

$$D = \sqrt{\frac{1 - m(1 + b^2)}{1 + m(1 + b^2)}} \quad (79)$$

Se a superfície de reflexão for completamente especular, está-se perante a reflexão especular, pelo que o coeficiente de reflexão efetivo é calculado a partir da equação (80).

$$\rho_{eff} = \rho \cdot D \quad (80)$$

Caso a reflexão seja especular, é necessário adicionar o fator de redução associado com o tipo de reflexão na superfície. Deste modo, é preciso recorrer ao cálculo prévio da superfície de interseção do primeiro elipsoide de *Fresnel* com a superfície terrestre na área de reflexão, no passo 5.

5º passo: calcula-se o comprimento, paralelo ao caminho de propagação, do primeiro elipsoide de *Fresnel* sobre a superfície através da equação (81) e a sua largura, perpendicular ao caminho, a partir da equação (82).

$$L_1 = d \sqrt{1 + \frac{4fh_1h_2 \times 10^{-2}}{3d}} \cdot \left[1 + \frac{f(h_1 + h_2)^2 10^{-2}}{3d^2} \right]^{-1} \quad [km] \quad (81)$$

$$W_1 = \sqrt{\frac{3 \times 10^{-4}d}{f}} \quad [km] \quad (82)$$

6º passo: se a superfície for rugosa, o sinal refletido terá duas componentes, a componente especular e a componente de dispersão difusa, cujo amplitude e fase seguem uma distribuição de Rayleigh. A rugosidade da área pode ser estimada, para a maioria dos casos, através do parâmetro de rugosidade de Rayleigh, a partir da equação (83).

$$g = \frac{f 40 \pi \sigma_h \sin \varphi}{c} \quad (83)$$

onde,

f = frequência (GHz)

c = velocidade da luz no vácuo (m/s)

σ_h = valor médio quadrático (RMS) da altura da superfície terrestre (m)

φ = *grazing angle* do sinal incidente (°)

Assim, o fator de rugosidade é dado pela equação (84).

$$R_r = \frac{1 + \left(\frac{g^2}{2}\right)}{1 + 2.35 \left(\frac{g^2}{2}\right) + 2\pi \left(\frac{g^2}{2}\right)^2} \quad (84)$$

7º passo: caso exista uma ou mais porções do primeiro elipsoide de *Fresnel* associado à reflexão especular, o fator de redução da reflexão especular R_s , deve ser utilizado. O factor R_s é determinado a partir da equação (85).

$$R_s = \frac{f(h_1 + h_2)^4 (\Delta x)^2 10^{-2}}{3h_1h_2d^2} \quad (85)$$

onde,

Δx = comprimento da porção (Km)

h_1 = altura da antena do transmissor (m)

h_2 = altura da antena do recetor (m)

Assim, o coeficiente de reflexão efetivo, tendo em conta os dois fatores é dada pela equação (86).

$$\rho_{eff} = \rho \cdot D \cdot R_r \cdot R_s \quad (86)$$

Existem algumas técnicas descritas em [15], que permitem reduzir os efeitos das reflexões na superfície terrestre. Uma das técnicas, como mostra a Figura 13, consiste no aproveitamento das colinas, montanhas ou edifícios que se localizam ao longo do caminho, de forma a proteger a antena de possíveis reflexões devido à superfície. As colinas e as montanhas, de maneira ideal, devem estar cobertas de vegetação de modo a reduzir o nível de sinal que será refratado.

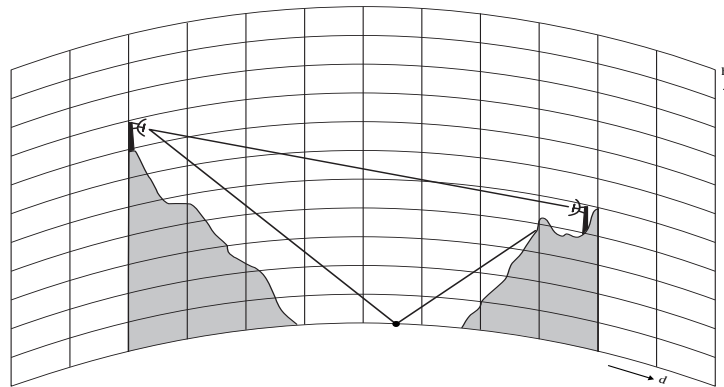


Figura 13 - Proteção da antena contra reflexão [9].

Outra técnica consiste em mover o ponto de reflexão para uma superfície menos refletora, tal como uma superfície rugosa ou com vegetação. A alteração do ponto de reflexão é conseguida mediante o ajustamento da altura de uma ou ambas as antenas, sendo que, o ponto de reflexão afasta-se sempre da antena cuja altura vai-se diminuindo e aproxima-se da antena cuja altura vai-se aumentando.

Uma outra técnica que se aplica em distâncias suficientemente curtas, consiste em ajustar as alturas das antenas de modo que nenhuma reflexão se interfira de modo destrutivo com o sinal direto, isto é, é

possível determinar alturas ótimas das antenas tal que, as interferências das ondas refletidas sejam construtivas na antena recetora.

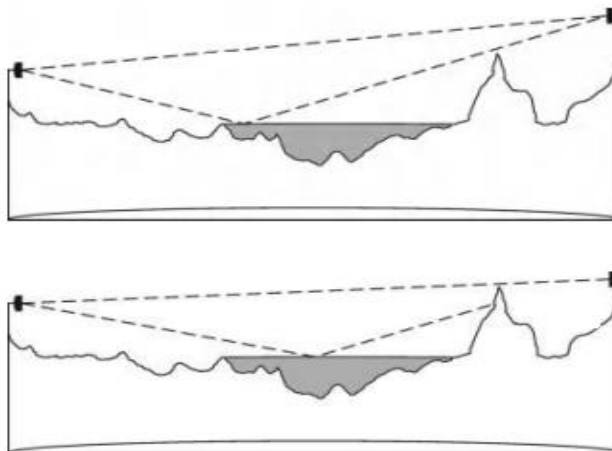


Figura 14 – Proteção da antena contra reflexão após mover o ponto de reflexão [6].

2.1.8. Difração devido a obstáculos

A difração devido a um obstáculo acontece quando o raio direto ou o primeiro elipsoide de *Fresnel* é obstruído por qualquer tipo de irregularidade do terreno ou por qualquer tipo de construção artificial. A atenuação devido à difração nos obstáculos varia com o tempo uma vez que ela depende da variação do gradiente da refratividade, pelo que, é importante ter o conhecimento estatístico da camada mais baixa da atmosfera, até no máximo 100 m, para que seja feita a quantificação desta variabilidade. Porém, na ausência de dados estatísticos de um determinado local, a recomendação ITU-R P.453-12 fornece previsões globais do gradiente da refratividade nos primeiros 100 m da troposfera.

A difração nos obstáculos é avaliada de acordo com o parâmetro clearance. Segundo a recomendação ITU-R P.530-16, a teoria de difração indica que o trajeto direto entre o emissor e o recetor deve estar livre de obstáculos, com uma clearance no mínimo 60% do primeiro raio de *Fresnel*. Geralmente os sistemas de feixes hertzianos são projetados de modo a que não haja nenhuma obstrução ao longo do caminho, para a maioria das condições de propagação. Entretanto, ocasionalmente, se a perda devido à obstrução for tolerável, é possível projetar o sistema mesmo com um pequeno trecho de obstrução.

Existem diferentes modelos para estimar a atenuação causada pela difração nos obstáculos, tais como o método de *Bullington*, de *Deygout*, o método de *Longley-Rice*, o método de *Epstein-Peterson* e o método descrito na recomendação ITU-R P.526-13. Todos estes métodos são baseados em modelos que dependem de fatores tais como a existência de um obstáculo isolado ou um conjunto

de obstáculos existentes ao longo do caminho, a existência do obstáculo dominante em caso da existência de diversos obstáculos e a geometria do obstáculo. Um obstáculo é considerado isolado se não existe a interação entre ele e a área circundante e a clearance é de pelo menos 0.6 R1. Nesta situação, a atenuação devido á difração é causada apenas pelo obstáculo e a área circundante não contribuirá para a atenuação.

2.1.8.1. Método ITU-R P.526-13

Uma vez que durante a propagação o sinal pode encontrar um obstáculo ou vários obstáculos separados, é importante proceder aos cálculos das perdas que estes introduzem. Para realizar estes cálculos é importante idealizar a forma destes obstáculos, que podem ser tantos como lâminas de espessura desprezável assim como cilíndricos de espessura finita e topos arredondados de curvatura constante. Contudo, é importante referir que os obstáculos reais têm formas muito mais complexas, pelo que as indicações dadas neste método são consideradas como uma aproximação onde os resultados devem ser utilizados com precaução uma vez que a sua validade depende fortemente do grau da aproximação entre o obstáculo real e o modelo utilizado.

2.1.8.1.1. Obstáculo em lamina isolado

O procedimento para o cálculo da atenuação devido ao obstáculo em lâmina isolado é baseado na geometria da Figura 15. Todos os parâmetros são combinados de forma a caracterizar o obstáculo por um único parâmetro adimensional normalmente denotado por v , sendo que a sua expressão é dada pela equação (87).

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (87)$$

onde,

h = altura do obstáculo acima (sinal positivo) ou abaixo (sinal negativo) do raio direto entre a antena de emissão e receção (m)

d_1 e d_2 = distância desde os extremos do trajeto até o topo do obstáculo (m)

λ = comprimento de onda (m)

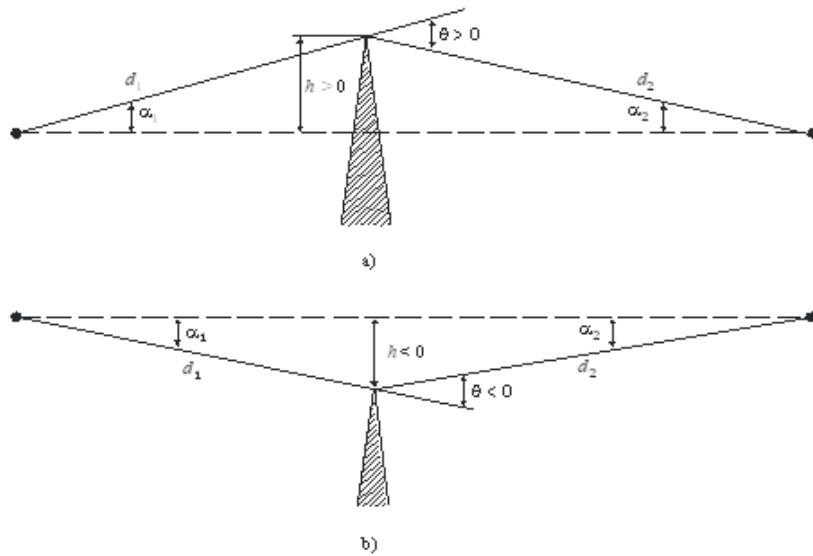


Figura 15 – Geometria da difração sobre obstáculo em lamina isolado [10].

A atenuação suplementar devido ao obstáculo é dada pela equação (88).

$$J(v) = -20 \log \left(\sqrt{\frac{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}{2}} \right) \quad (88)$$

onde $C(v)$ e $S(v)$ são as partes real e imaginária, respetivamente, da função integral complexa de *Fresnel* definida pela equação (89).

$$F_c(v) = C(v) + jS(v) \quad (89)$$

em que o cosseno integral $C(v)$ e o seno integral $S(v)$ são dados pelas equações (90) e (91), respetivamente.

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi S^2}{2}\right) ds \quad (90)$$

$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi S^2}{2}\right) ds \quad (91)$$

O integral complexo de *Fresnel* pode também ser calculado mediante as equações (92) e (93), onde na maioria dos casos proporcionam precisão suficientes para valores positivos de v .

$$F_c(v) = e^{jx} \sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n - j b_n) \left(\frac{x}{4}\right)^n \right] \text{ para } 0 \leq x < 4 \quad (92)$$

$$F_c(v) = \left(\frac{1+j}{2}\right) + e^{jx} \sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n - j d_n) \left(\frac{4}{x}\right)^n \right] \text{ para } x > 4 \quad (93)$$

em que x é calculado a partir da equação (94).

$$x = 0.5 \cdot \pi \cdot v^2 \quad (94)$$

Os valores dos coeficientes de *Boeresma* a_n , b_n , c_n e d_n são dados na Tabela 30 do Anexo A. Para valores de v superiores a -0.78 um valor aproximado da atenuação suplementar devido ao obstáculo em lamina pode ser obtido a partir da equação (94).

$$J(v) = -20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad [dB] \quad (95)$$

A Figura 16 representa as perdas $J(v)$ em função do parâmetro v .

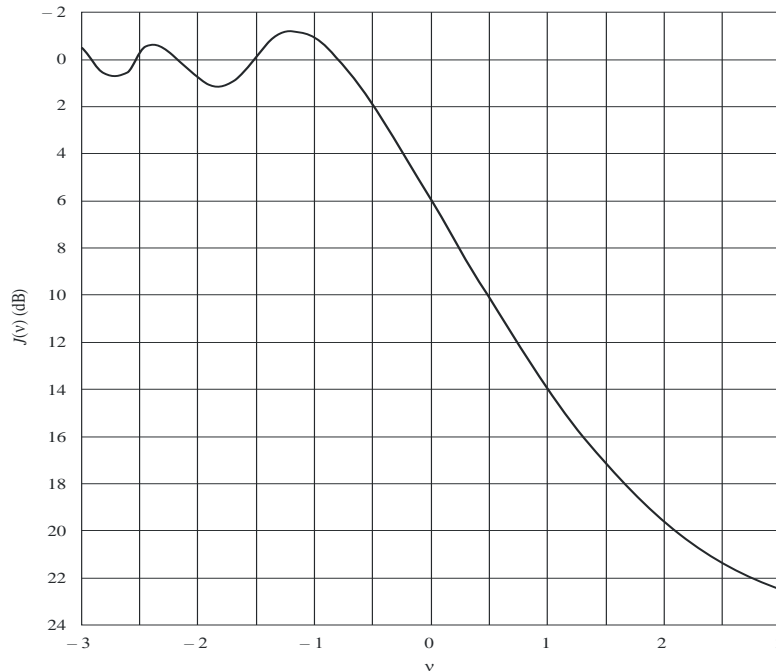


Figura 16 – Perdas por difração devido ao obstáculo em lâmina em função do parâmetro v [10].

2.1.8.1.2. Obstáculo arredondado

Quando a aproximação de um obstáculo real por um obstáculo equivalente em lâmina não for adequada, é possível recorrer a um modelo cujo obstáculo é arredondado, cuja a geometria está ilustrada na Figura 17.

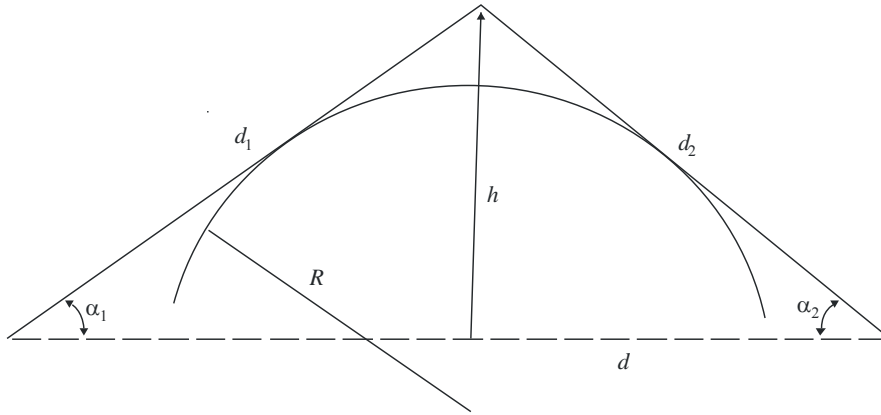


Figura 17 – Geometria da difração sobre obstáculo arredondado [10].

A atenuação devido à difração no obstáculo para esta geometria é calculada a partir da equação (96).

$$A = J(v) + T(m, n) \quad [dB] \quad (96)$$

onde $J(v)$ representa a perda de *Fresnel-Kirchoff*, sendo equivalente à atenuação suplementar devido ao obstáculo em lâmina calculada a partir da equação (95), que depende do parâmetro adimensional v .

A atenuação adicional devido à curvatura do obstáculo $T(m, n)$ é obtida através da equação (97), para $nm \leq 4$, ou através da equação (98), para $nm > 4$.

$$T(m, n) = 7.2m^{\frac{1}{2}} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{\frac{3}{2}} - 0.8m^2 \quad [dB] \quad (97)$$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log(nm) + 7.2m^{\frac{1}{2}} - (2 - 17n)m + 3.6m^{\frac{3}{2}} - 0.8m^2 \quad [dB] \quad (98)$$

Os parâmetros m e n , são calculados a partir das equações (99) e (100), respetivamente.

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] / \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (99)$$

$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{\frac{2}{3}} / R \quad (100)$$

em que,

h = altura do obstáculo acima (sinal positivo) ou abaixo (sinal negativo) do raio direto entre a antena de emissão e recepção (m)

d_1 e d_2 = distância desde os extremos do trajeto até o topo do obstáculo (m)

λ = comprimento de onda (m)

R = raio do obstáculo (m)

Pode-se verificar que quando o raio do obstáculo tende para zero, a atenuação adicional $T(m, n)$ também tende para zero, e deste modo a atenuação devido ao obstáculo arredondado dada pela equação (96) reduz-se para a atenuação devido ao obstáculo em lamina dada através da equação (88) ou (94).

2.1.8.1.3. Dois obstáculos

Este método, que também é válido para dois obstáculos arredondados, consiste em aplicar sucessivamente a teoria da difração em obstáculo em lâmina isolado ou em obstáculo arredondado sobre os dois obstáculos, onde a parte superior do primeiro obstáculo atua como fonte de difração sobre o segundo obstáculo. O método é baseado na geometria ilustrada na Figura 18 ou da Figura 19 (dependendo do valor da clearance nos dois obstáculos), onde são calculadas duas atenuações, a atenuação devido à difração no primeiro obstáculo, L_1 , e a atenuação devido à difração no segundo obstáculo, L_2 , ambas utilizando o método descrito na secção 2.1.8.1.1

Dependendo do valor da clearance nos dois obstáculos duas formas para proceder os cálculos são indicadas. No primeiro caso, onde os valores da clearance nos dois obstáculos são semelhantes, de forma a ter em conta a separação entre os dois obstáculos, calcula-se um termo de correção a partir da equação (101), que será adicionada à atenuação total, e que só é válida quando ambas as atenuações L_1 e L_2 são superiores a 15 dB.

$$L_c = 10 \log \left[\frac{(a + b) + (b + c)}{b(a + b + c)} \right] \quad [dB] \quad (101)$$

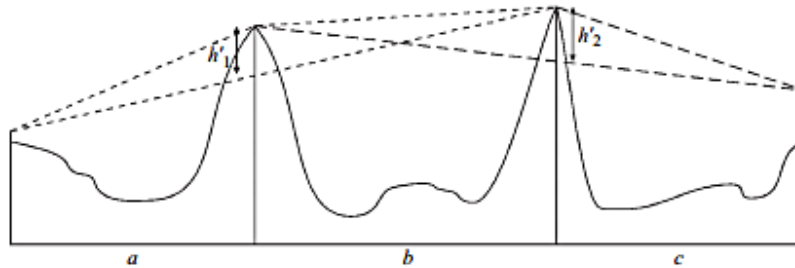


Figura 18 – Perfil com dois obstáculos isolados com clearance semelhantes [6].

A atenuação total devido aos dois obstáculos é dada pela equação (102).

$$L = L_1 + L_2 + L_c \quad [dB] \quad (102)$$

Caso um dos obstáculos é predominante, o primeiro trajeto de difração é definido pelas distâncias a e $b + c$ a altura h_1 , enquanto que o segundo trajeto é definido pelas distâncias b e c e a altura h_2 .

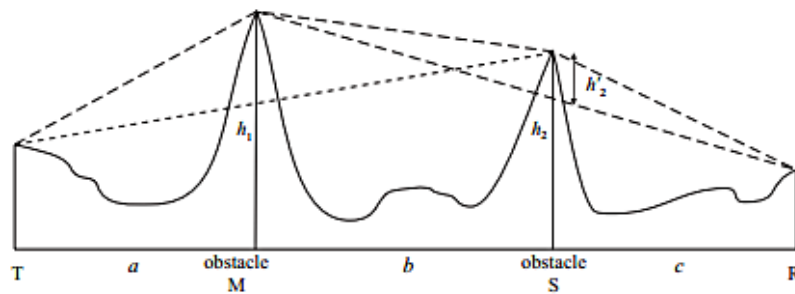


Figura 19 - Perfil com dois obstáculos com clearance diferente [6].

Assim como anteriormente, nesta situação também é aplicada sucessivamente a teoria da difração em obstáculo em lâmina isolado sobre os dois obstáculos. Primeiramente é necessário proceder à determinação do obstáculo principal, isto é, o obstáculo que produz maior perda. Esta determinação é realizada perante o cálculo da razão entre a altura do obstáculo em relação ao raio direto entre o transmissor e o recetor, h , e o raio do primeiro elipsoide de *Fresnel* calculado a partir da equação (17), sendo que a maior razão irá determinar o obstáculo principal, M. Posteriormente,

utiliza-se a altura do segundo obstáculo h'_2 para calcular as perdas causadas pelo obstáculo secundário. De modo a ter em conta a separação entre os dois obstáculos assim como as suas alturas, o fator de correção, calculado a partir da equação (103), deve ser subtraída na equação total.

$$T_c = \left[12 - 20 \log_{10} \left(2 / \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) \left(\frac{q}{p} \right)^{2p} \right) \right] \quad [dB] \quad (103)$$

onde o parâmetro p , q e α são calculados através das equações (104), (105) e (106), respetivamente.

$$p = \left[\frac{2(a+b+c)}{\lambda(b+c)a} \right]^{\frac{1}{2}} h_1 \quad (104)$$

$$q = \left[\frac{2(a+b+c)}{\lambda(b+c)a} \right]^{\frac{1}{2}} h_2 \quad (105)$$

$$\tan \alpha = \left[\frac{b(a+b+c)}{ac} \right]^{\frac{1}{2}} h_1 \quad (106)$$

em que,

h_1 e h_2 = altura dos obstáculos medidos a partir do raio direto entre o transmissor e recetor (m)

A atenuação total devido aos dois obstáculos é dada pela equação (107).

$$L = L_1 + L_2 - L_c \quad [dB] \quad (107)$$

Esta recomendação indica ainda que, em casos onde o obstáculo que produz difração é um edifício com o teto plano, é insuficiente fazer a aproximação do obstáculo a uma lâmina. Porém, foi demonstrado que, quando não se conhece a forma precisa da refletividade na superfície do telhado e qualquer diferença de altura entre essa superfície e as paredes laterais, uma aproximação válida para uma estimativa preliminar consiste em considerar um modelo de difração com dois obstáculos em lâmina, sem ter em conta a reflexão adicional causada pelo telhado.

2.1.8.1.4. Múltiplos obstáculos isolados

Na existência de múltiplos obstáculos é possível utilizar o método descrito também na recomendação ITU-R P-526-13. Este método é útil para determinar as perdas por difração num terreno irregular com a existência de um ou mais obstáculos, em que cada obstáculo pode ser representado como um cilindro cujo raio é igual ao raio da curvatura da parte superior do obstáculo. Contudo, este método só deve ser aplicado quando se dispõe do perfil detalhado do terreno, em conjunto com o gradiente de refatividade da atmosfera e do respetivo raio efetivo da terra, em que os valores da distância e da altura são descritos como se estivessem armazenados em matrizes com índice de 1 a N, sendo que N é o numero total de amostras do perfil.

Neste método, o primeiro passo é realização de uma análise de "corda esticada", de forma a identificar os pontos que podem entrar em contacto com a corda. Cada ponto da corda identifica-se como o ponto do perfil com o ângulo de elevação mais alto sobre a horizontal local visto desde o ponto da corda anterior, que começa num extremo do perfil e termina no outro.

Visto desde o ponto S, a elevação da i-ésima amostra do perfil é dada pela equação (108).

$$e = \left[\frac{h_i - h_s}{d_{si}} \right] - \frac{d_{si}}{2a_e} \quad [rad] \quad (108)$$

onde,

a_e = raio efetivo da terra

A seguir, é realizado um teste para determinar se um ou mais pontos da "corda" devem representar a mesma obstrução do terreno. Para as amostras separadas por distâncias iguais ou inferiores, quaisquer grupos de pontos consecutivos devem ser tratados como uma única obstrução. Cada obstrução toma a forma de um cilindro, como pode ser observado na Figura 20.

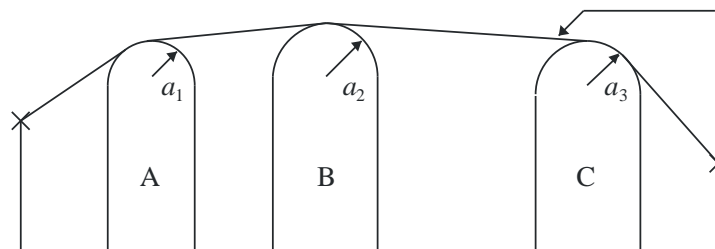


Figura 20 – Geometria de obstáculos múltiplos em forma de cilindro [10].

As distâncias S_1 e S_2 para cada um dos cilindros, representadas na Figura 21, representam como distâncias medidas horizontalmente entre os pontos do vértice, e para os raios quase horizontais estas distâncias se assemelham às distâncias d_1 e d_2 representadas na Figura 17.

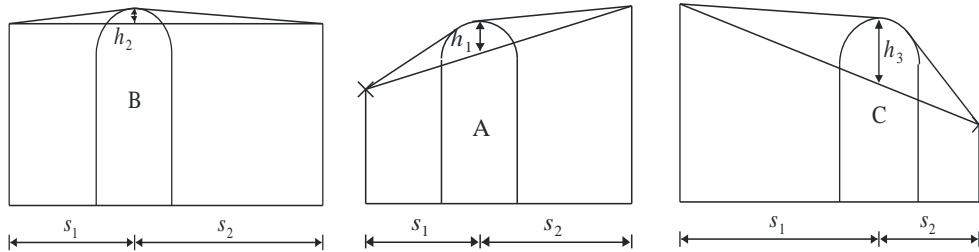


Figura 21 – Detalhes da geometria de obstáculos múltiplos em forma de cilindro [10].

A altura h de cada cilindro mede-se verticalmente desde o seu vértice inferior até a linha reta que une os vértices aos pontos terminais adjacentes, sendo que o valor do h corresponde à altura representada na Figura 17. Para os raios quase horizontais, as alturas do cilindro podem ser calculadas como se fossem verticais, embora os ângulos de radiação mais acentuados poderão ser necessários calcular h nos ângulos retos da base do cilindro.

Na Figura 22 ilustra-se a geometria de uma obstrução composta por mais de um ponto, onde definem-se os seguintes pontos:

- W** – Ponto do obstáculo mais próximo do lado do transmissor que não faz parte da obstrução;
- X** – Ponto do obstáculo mais próximo do lado do transmissor que faz parte da obstrução;
- Y** – Ponto do obstáculo mais próximo do lado do recetor que faz parte da obstrução;
- Z** – Ponto do obstáculo mais próximo do lado do transmissor que não faz parte da obstrução;
- V** – Ponto do vértice que resulta da intersecção dos raios incidentes sobre a obstrução;

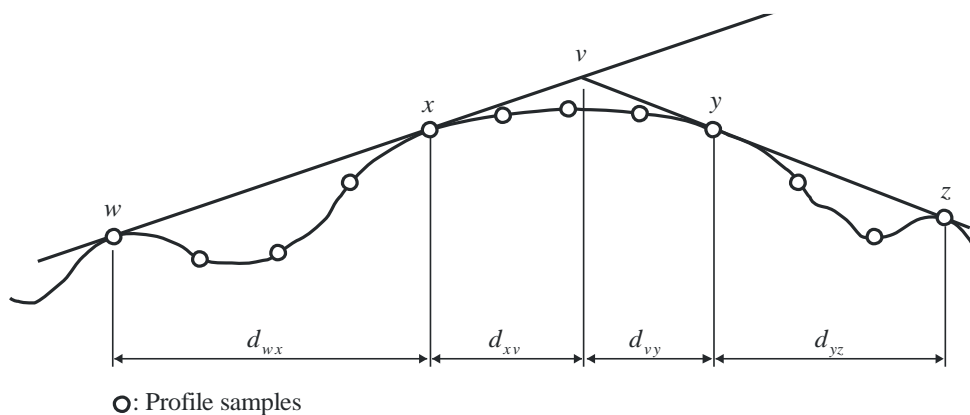


Figura 22 – Geometria de um obstáculo multiponto [10].

Se a obstrução for composta por apenas um ponto, x e y terão o mesmo valor que por sua vez coincidirão com o vértice. No caso da existência de múltiplos cilindros, os pontos y e z de um cilindro corresponderá aos pontos w e x , respetivamente, do próximo cilindro e assim sucessivamente. Tendo os valores dos pontos w , x , y e z , que caracterizam uma obstrução, procede-se aos cálculos para obter os parâmetros do cilindro [11].

Primeiramente calcula-se a altura do obstáculo, a partir da equação (109).

$$h = h_v + \frac{d_{wv}d_{vz}}{2a_e} - \frac{(h_w d_{vz} + h_z d_{wv})}{d_{wz}} \quad [m] \quad (109)$$

Posteriormente, determina-se o raio do cilindro a partir da equação (110).

$$R = \left[\frac{d_{pq}}{t} \right] \cdot [1 - e^{-4v}]^3 \quad [m] \quad (110)$$

onde,

v = parâmetro adimensional utilizado na equação (87).

e t é a diferença de inclinação entre as secções $p - x$ e $y - q$ do perfil calculado através da equação (111).

$$t = \frac{h_x - h_p}{d_{px}} + \frac{h_y - h_q}{d_{yq}} - \frac{d_{pq}}{a_e} \quad [rad] \quad (111)$$

onde as distâncias d_{px} , d_{yq} e d_{pq} são dadas pelas equações (112), (113) e (114), respetivamente.

$$d_{px} = d_x - d_p \quad (112)$$

$$d_{yq} = d_q - d_y \quad (113)$$

$$d_{pq} = d_q - d_p \quad (114)$$

Os pontos p e q são pontos adjacentes a x no lado do transmissor e y no lado do recetor. Deste modo, os índices de perfil p e q são calculados através da equação (115) e (116), respetivamente.

$$p = x - 1 \quad (115)$$

$$q = y + 1 \quad (116)$$

Tendo os parâmetros do cilindro calculado, procede-se ao cálculo das perdas por difração tendo em conta três termos: a soma das atenuações devido às difrações nos cilindros, a soma das difrações entre cilindros ou entre cilindros e os terminais e um fator de correção. A atenuação total é dada então pela equação (117) [11].

$$L_d = \sum_{i=1}^N L'_i + L''(wx)_1 + \sum_{i=1}^N L''(yz)_i - 20 \log C_N \quad [dB] \quad (117)$$

onde,

L'_i = perdas por difração no i -ésimo cilindro calculado a partir do método descrito em 2.4.8.12 (dB)

$L''(wx)_1$ = perdas por difração no sub-trajeto na secção do trajeto que se encontra entre os pontos w e y do primeiro cilindro (dB)

$L''(yz)_i$ = perdas por difração no sub-trajeto na secção do trajeto que se encontra entre os pontos w e y de todos os cilindros (dB)

C_N = fator de correção por se ter em conta as perdas por dispersão devido a difração em cilindros sucessivos (dB)

O fator de correção, C_N , calcula-se através da equação (118).

$$C_N = \left(\frac{P_a}{P_b} \right)^{0.5} \quad (118)$$

onde P_a e P_b calculam-se a partir da equação (119) e (120), respetivamente.

$$P_a = S_1 \prod_{i=1}^N [(S_2)_i] \left(S_1 + \sum_{j=1}^N [(S_2)_j] \right) \quad (119)$$

$$P_b = (S_1)_1 (S_2)_N \prod_{i=1}^N [(S_1)_i + (S_2)_i] \quad (120)$$

2.1.8.2. Método Deygout

O método de *Deygout* [14], cuja representação gráfica está apresentada na Figura 23, é conhecido como método de obstáculo principal pelo facto de considerar que o obstáculo que introduz maior atenção é o obstáculo principal. A primeira etapa deste método é calcular o parâmetro v de cada um dos obstáculos, através da equação (88), como se não existissem outros obstáculos.

Para o obstáculo que tiver maior valor do parâmetro v é então calculada a sua perda através da equação (95). Uma vez concluída esta operação, volta-se a verificar se entre o obstáculo principal e as antenas existe mais algum obstáculo a obstruir a ligação direta ou o elipsoide de *Fresnel*. Em caso afirmativo, o processo pode ser repetido e continuado recursivamente até não existir obstrução do raio direto ou do primeiro elipsoide de *Fresnel*.

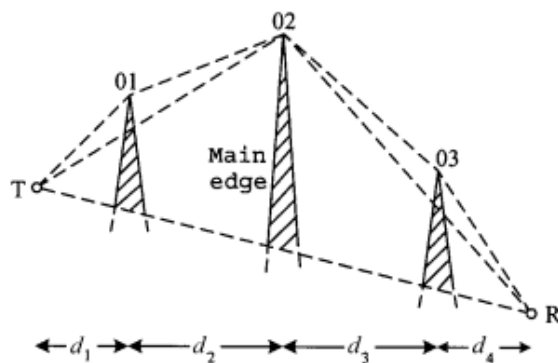


Figura 23 - Representação gráfica do modelo de *Deygout* [14].

Apesar das estimativas de perda utilizando este método demonstrarem grande coerência, com boas aproximações à perda de percurso, existem problemas quando existem vários obstáculos ou quando os obstáculos estão muito próximos. Deste modo, é recomendado que se utilizem no máximo 3 lâminas (principal e um secundário de cada lado) para este cálculo, mesmo que existam mais obstáculos, para evitar que se obtenha um resultado demasiadamente pessimista. Assim, este modelo tem maior precisão quando existe claramente um obstáculo de referência, em relação aos restantes. Porém, é sugerida a utilização de fatores de correção que deverão ser utilizados em simultâneo com a aplicação do modelo em situações práticas. O fator de correção tem em conta o

espaçamento entre os obstáculos e as respectivas alturas, sendo calculado através da equação (121) [21].

$$TC = \left(12 - 20 \log \left(\frac{2}{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \right) \right) \cdot \left(\frac{q}{p} \right)^{2p} \quad (121)$$

onde,

α = ângulo existente entre a superfície da terra e a reta que interliga a antena ao obstáculo (rad)

q = relação entre a altura do primeiro obstáculo e o raio do primeiro elipsoide de *Fresnel* nesse ponto

p = relação entre a altura do primeiro obstáculo e o raio do primeiro elipsoide de *Fresnel* nesse ponto

O cálculo de α , q e p são realizados através das equações (122), (123) e (124), respetivamente, tendo em conta a Figura 24.

$$\tan \alpha = \sqrt{\frac{b(a + b + c)}{ac}} \quad (122)$$

$$p = \frac{h_1}{r_1} \cdot \sqrt{2} \quad (123)$$

$$\tan \alpha = \frac{h_2}{r_2} \cdot \sqrt{2} \quad (124)$$

onde,

a, b e c = distâncias entre obstáculos e antenas (m)

h_1 e h_2 = altura dos obstáculos (m)

r_1 e r_2 = raio do primeiro elipsoide de *Fresnel* no ponto referente a cada um dos obstáculos (m)

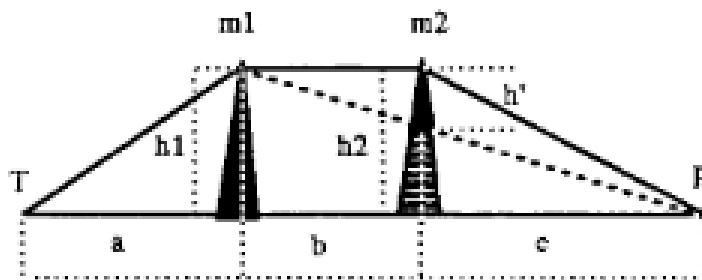


Figura 24 - Ilustração para cálculo de fatores de correção do método *Deygout* [16].

2.1.8.3. Método de Epstein-Petterson

No método de Epstein-Peterson, como se pode observar na Figura 25, o percurso total é subdividido em sub-percursos onde cada um contém um obstáculo. A atenuação total é calculada perante a soma da atenuação devido a cada um dos sub-percursos.

A aplicação do método começa-se pelo desenho de uma linha reta entre o emissor T e o vértice do obstáculo 02. A perda devido ao obstáculo 01, no percurso entre T e o obstáculo 02, é calculada recorrendo à técnica de obstáculo em lâmina, sendo que a altura do obstáculo é dada por h_1 . De forma semelhante, a atenuação devido ao obstáculo 02 é determinada traçando uma linha entre o topo do obstáculo 01 até ao topo do obstáculo 03, sendo que a altura do obstáculo é dada por h_2 . Finalmente, a perda devido ao obstáculo 03 é calculada tendo em conta a linha que une o obstáculo 02 e o recetor R.

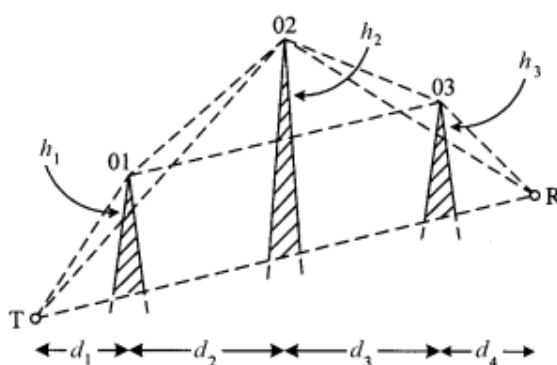


Figura 25 – Representação gráfica do método de *Epstein-Petterson* com três obstáculos [19].

Quando existem dois obstáculos isolados em lâmina bastante próximos entre si a comparação de resultados revela erros por excesso. Desta forma, foi deduzida um fator de correção que deverá ser aplicada quando os parâmetros ν são muito superiores à unidade [20]. Este fator de correção deve ser somado à atenuação total, e ele é calculado através da equação (125).

$$L' = 20 \log(\operatorname{cosec} \alpha) \quad [dB] \quad (125)$$

onde para dois obstáculos 1 e 2 se tem,

$$\operatorname{cosec} \alpha = \left[\frac{(d_1 + d_2)(d_2 + d_3)}{d_2(d_1 + d_2 + d_3)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (126)$$

2.1.8.4. Comparação dos métodos

Os métodos do ITU-R da recomendação P.526-13, o método do *Deygout* e o método de *Epstein-Peterson* descritos anteriormente, juntamente com os métodos de *Bullington* e *Longley_Rice* constituem os métodos mais populares, que permitem quantificar as perdas devido a obstáculos. Todos estes métodos são métodos simplificados, pois, o problema da difração tanto pelos obstáculos como pelas irregularidades do terreno são bastantes complexos de quantificar.

O método de *Bullington* é um método bastante simples, que na maioria das vezes produz resultados demasiados otimistas. Em comparação com o método de *Bullington*, o método de *Epstein-Peterson* produz resultados melhores, mas também os valores são baixos. O método de *Deygout*, por outro lado, apresenta bons resultados na presença de dois obstáculos, mas produz valores demasiados altos nos casos onde os outros métodos apresentam valores demasiados baixos. O método de *Deygout* é um método que é tão pessimista quanto maior for o número de obstáculos, pelo que é recomendável a utilização deste método considerando a existência de no máximo três obstáculos.

O método do ITU-R da recomendação P.526-13 incorpora aspetos do método de *Deygout* e do método de *Epstein-Peterson*.

Segundo [22], Costa e al. (2011) comparou os resultados dos modelos com valores reais medidos em mais de 9000 percursos. Estes valores foram extraídos das bases de dados do *ITU-R Study Group 3* e do *Institute of Telecommunications Sciences*, enquanto que as estimativas dos modelos foram baseadas em perfis de terrenos criados a partir dos dados com resolução de 200 a 300 m.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3 e Tabela 4. Valores positivos indicam que o modelo estimou a perda inferior ao valor medido pela quantidade indicada, enquanto que para valores negativos o modelo estimou a perda superior ao valor medido, também pela quantidade indicada.

Tabela 3 - Erro médio dos modelos [12].

Numero de Obstáculos	0	1	2	3	4	5
Bullington [dB]	6.0	6.6	-8.0	-3.4	-1.5	4.5
ITU-R P.526-9 [dB]	8.4	3.0	12.0	11.5	13.5	15.0
Epstin-Peterson [dB]	6.0	6.6	4.5	-2.4	-7.5	-16.3
Longley-Rice [dB]	8.0	1.3	6.1	7.6	9.2	10.1
Deygout [dB]	6.0	6.6	4.6	3.5	6.0	4.0

Tabela 4 - Desvio padrão médio do erro dos modelos [12].

Numero de Obstáculos	0	1	2	3	4	5
Bullington [dB]	10.5	11.9	17.5	16.1	14.3	13.7
ITU-R P.526-9 [dB]	10.5	13.6	16.6	16.1	13.7	13.3
Epstin-Peterson [dB]	10.5	11.9	12.6	13.1	13.6	16.1
Longley-Rice [dB]	10.8	13.4	14.3	15.4	12.2	12.4
Deygout [dB]	10.5	11.9	12.8	13.5	13.2	16.7

2.2. Link budget

Uma das principais etapas do projeto de FH é a análise do link budget. O link budget é o cálculo que envolve o ganho e os fatores de perda associados às antenas, transmissores, recetores, linhas de transmissão, e o ambiente de propagação, de forma a determinar a distância máxima na qual o transmissor e o recetor podem operar, de acordo com a potência de transmissão e a sensibilidade do recetor. Através do link budget é possível relacionar a potência disponível na entrada do recetor com a potência transmitida. Na Figura 26 está representado o diagrama de blocos incluindo todos os elementos associados com o transmissor e com o recetor. No lado do transmissor temos o equipamento transmissor (TX), o circuito de acoplamento que inclui os *feeders* e os *multiplexers*, o circuito da antena e a antena transmissora. Do lado do recetor, temos igualmente o equipamento recetor (RX), o circuito de acoplamento e a antena recetora.

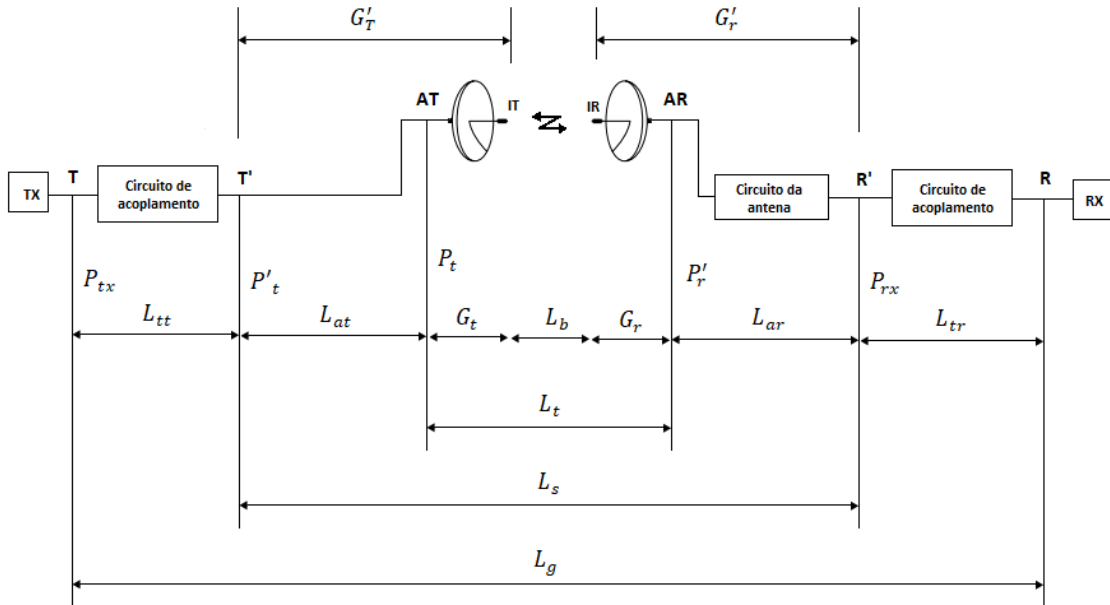


Figura 26 – Diagrama do sistema de feixes hertzianos para o cálculo do link budget.

2.2.1. Cálculo do link budget

Tendo em conta o diagrama, e assumindo que todas as grandezas intervenientes estão expressas em unidades logarítmicas (dB), a potência disponível na entrada do recetor é dada através da equação (127).

$$P_{rx} = P_{tx} - L_{tt} + G_t - L_b + G_r - L_{tr} \quad [dBm] \quad (127)$$

onde,

P_{rx} = potência disponível na entrada do recetor (dBm)

P_{tx} = potência entregue pelo transmissor à antena (dBm)

L_{tt} = perdas no circuito de acoplamento (entre a interface T e T') (dB)

L_{tr} = perdas no circuito de acoplamento (entre a interface R e R') (dB)

L_b = perdas básicas de propagação, em função da distância, frequência e mecanismos de propagação (dB)

G_t = ganho da antena transmissora (dB_i)

G_r = ganho da antena recetora (dB_i)

As perdas associadas aos circuitos da antena transmissora e recetora, L_{at} e L_{ar} , respetivamente, são geralmente relacionadas com a eficiência das antenas, através das equações (128) e (129).

$$L_{at} = 10 \log\left(\frac{100}{\eta_{at}}\right) \quad (128)$$

$$L_{ar} = 10 \log\left(\frac{100}{\eta_{ar}}\right) \quad (129)$$

As perdas de transmissão L_t , as perdas do sistema L_s e as perdas totais L_g , são calculadas a partir da equação (130), (131) e (132), respetivamente.

$$L_t = L_b - G_t - G_r \quad [dB] \quad (130)$$

$$L_s = L_t + L_{at} + L_{ar} \quad [dB] \quad (131)$$

$$L_g = L_s + L_{tt} + L_{tr} \quad [dB] \quad (132)$$

Como já foi referido no subcapítulo anterior, para um sistema projetado com uma clearance acima dos obstáculos adequada, e em condições normais de propagação, a perda básica de propagação é igual a perda total em espaço livre. Contudo, na presença de hidrometeoros, refrações anómalas na troposfera e presença de obstáculos que levam a obstrução do raio direto assim como do primeiro elipsoide de *Fresnel*, a perda básica de propagação pode ser dividida em duas componentes, e calculada a partir da equação (133).

$$L_b = L_{FS} + L_{bexc} \quad [db] \quad (133)$$

onde,

L_{FS} = atenuação em espaço livre calculada através da equação (1) ou (2) (dB)

L_{bexc} = atenuação em excesso à atenuação em espaço livre (dB)

A atenuação em excesso relativamente à atenuação em espaço livre, L_{bexc} , inclui todas as perdas adicionais que o sinal sofre ao longo do percurso e que não podem ser associadas às perdas em espaço livre. Estas perdas são representadas por variáveis estatísticas que dependem

de diferentes fenómenos, tais como, refração, difração, reflexão e espalhamento, que afetam o sinal e que já foram descritos no capítulo 2, secção 2.1. No entanto, do ponto de vista prático, nem todas estas perdas têm uma variação alta suficientemente para serem modeladas como variáveis. Para fins de projeto de sistema, a atenuação em excesso relativamente à atenuação em espaço livre, pode ser dividida em duas componentes, as perdas fixas ou constantes e as perdas variáveis. As perdas geralmente consideradas constantes são as perdas provocadas pelos gases, pelo vapor de água e pela vegetação. Por outro lado, as perdas provocadas pela difração em obstáculos, pela precipitação, pelas condições anómalas de refração, pelas reflexões e consequentemente pelo multipercurso são consideradas perdas variáveis ao longo do tempo, que provocam flutuações acima e abaixo do valor mediano do sinal, geralmente designado por desvanecimento ou na linguagem anglo-saxónica por *fading*.

A atenuação em excesso relativamente à atenuação em espaço livre é calculada a partir da equação (134).

$$L_{bexc} = L_{bexc f} + L_{bexc v} \quad [dB] \quad (134)$$

onde,

$$L_{bexc f} = \text{perdas fixas (dB)}$$

$$L_{bexc v} = \text{perdas variáveis (dB)}$$

$L_{bexc f}$ e $L_{bexc v}$ são calculadas a partir das equações (135) e (136), respetivamente. Contudo, é importante referir que para efeito de cálculo do link budget, nas equações só entram os parâmetros que realmente se justificam.

$$L_{bexc f} = L_{gases} + L_{veg} \quad [dB] \quad (135)$$

$$L_{bexc v} = L_{diff} + L_{scint} + L_{hydro} + L_{multipath} + L_{XPD} + L_{misalignment} \quad [dB] \quad (136)$$

onde,

$$L_{diff} = \text{atenuação devido à difração nos obstáculos (dB)}$$

$$L_{scint} = \text{atenuação devido à cintilação troposférica (dB)}$$

$$L_{hydro} = \text{atenuação devido à precipitação ou outros hidrometeoros (dB)}$$

$L_{multipath}$ = atenuação devido ao multipercurso (dB)

L_{XPD} = atenuação devido à despolarização associado aos hidrometeoros (dB)

$L_{misalignment}$ = atenuação causada pelas condições anómalas de refração (dB)

2.2.2. Desvanecimento devido ao multipercurso

Os mecanismos de desvanecimento causado por camadas extremamente refrativas na atmosfera devem ser levados em consideração no dimensionamento de ligações por FH com alguns quilômetros de distância. A recomendação ITU-R P.526-13 fornece dois métodos que permitem calcular os efeitos de desvanecimento por multipercurso, que serão descritos a seguir.

O primeiro método corresponde a um método para percentagens do tempo reduzidas e com percursos superiores a 5 Km.

1º passo: calcula-se o fator geoclimático K para o mês mais desfavorável médio, a partir de dados estatísticos para a localização do percurso, a partir da equação (137).

$$K = 10^{-4.6-0.0027 dN_1} \quad (137)$$

onde,

dN_1 = gradiente de refratividade pontual da zona geográfica nos 65 metros inferiores da atmosfera não excedida por mais de 1% da média anual. Os valores de dN_1 são fornecidos na recomendação ITU-R P.453-10.

2º passo: a partir da altura das antenas em relação ao nível do mar, calcula-se o módulo de inclinação do percurso a partir da equação (138).

$$|\varepsilon_p| = \frac{|h_r - h_e|}{d} \quad (mrad) \quad (138)$$

onde,

h_e = altura antena do transmissor acima do nível medio do mar (m)

h_r = altura antena do recetor acima do nível medio do mar (m)

d = distância do percurso (Km)

3º passo: calcular a percentagem do tempo p_w que o desvanecimento profundo A é excedido no mês mais desfavorável médio, a partir da equação (139).

$$p_w = kd^{3.4}(1 + |\varepsilon_p|)^{-1.03} f^{0.8} \times 10^{-0.00076h_L - \frac{A}{10}} \quad (\%) \quad (139)$$

onde,

$$h_L = \text{corresponde ao valor menor entre } h_e \text{ e } h_r \text{ (m)}$$

O segundo método corresponde a um método para qualquer percentagem de tempo, e combina um processo empírico de interpolação do desvanecimento pouco profundos de valor decrescente de até 0 dB.

1º passo: calcular o fator de ocorrência de propagação por trajetos múltiplos a partir da equação (140).

$$p_o = kd^{3.4}(1 + |\varepsilon_p|)^{-1.03} f^{0.8} \times 10^{-0.00076h_{L0}} \quad (\%) \quad (140)$$

2º passo: calcular o valor do desvanecimento profundo A_t , através da equação (141), o qual ocorre transição entre a distribuição de desvanecimento profundo e a distribuição de desvanecimento pouco profundo obtido por meio de procedimento de interpolação empírica.

$$A_t = 25 + 1.2 \log p_o \quad (dB) \quad (141)$$

Se $A \geq A_t$

3º passo: calcular a percentagem de tempo, p_w , em que se excede A no mês mais desfavorável médio, a partir da equação (142).

$$p_w = p_o \times 10^{-\frac{A}{10}} \quad (\%) \quad (142)$$

Se $A < A_t$

3ª passo: calcular a percentagem de tempo, p_w , em que se excede A_t no mês mais desfavorável médio, através da equação (143).

$$p_t = p_o \times 10^{-\frac{A}{10}} \quad (\%) \quad (143)$$

4ª passo: calcular q'_a a partir da profundidade de desvanecimento de transição, A_t , e da percentagem de tempo p_t , através da equação (144).

$$q'_a = -20 \log \left\{ -\ln \left[\frac{(100 - p_t)}{100} \right] \right\} / A_t \quad (144)$$

5ª passo: calcular q_t a partir de q'_t , através da equação (145).

$$q_t = (q'_a - 2) / \left[\left(1 + 0.3 \times 10^{-\frac{A_t}{20}} \right) 10^{-0.016A_t} \right] - 4.3 \left(10^{\frac{A_t}{20}} + \frac{A_t}{800} \right) \quad (145)$$

6ª passo: calcular q_a através da equação (146).

$$q_a = 2 + \left[\left(1 + 0.3 \times 10^{-\frac{A}{20}} \right) \right] \left[\frac{10^{-0.016A}}{1} \right] \left[q_t + 4.3 \left(10^{-\frac{A}{20}} + \frac{A}{800} \right) \right] \quad (146)$$

7ª passo: calcular a percentagem de tempo, p_w , que o desvanecimento profundo é excedido, no mês mais desfavorável médio, a partir da equação (147).

$$p_w = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-\frac{q_a A}{20}} \right) \right] \quad (\%) \quad (147)$$

2.2.3. Ruído

A análise do desempenho do sistema de feixes hertzianos não é baseada apenas no estudo do desvanecimento associado aos fenómenos de propagação na atmosfera. O estudo deve ser efetuado tendo em conta a degradação adicional do desempenho causada pelo ruído térmico e pelas

interferências, de forma a serem tomadas medidas que permitem a redução dos seus impactos no desempenho do sistema.

O ruído radioelétrico recebido por um sistema de radiocomunicação é um processo aleatório que está associado aos sinais de ruído radioelétrico que não contém qualquer tipo de informação útil. A recomendação ITU-R P.372-13 [23] fornece dados de referência sobre o ruído radioelétrico, que podem ser tanto naturais como artificiais, e estão classificados de acordo com as seguintes causas: radiação procedentes de descargas elétricas atmosféricas, soma de radiações intencionadas provenientes de máquinas elétricas e cabos de transmissão elétricas, emissões procedentes de hidrometeoros e de gases atmosféricos, solo ou outras obstruções dentro do feixe da antena e radiação proveniente de fontes elétricas celestes.

Qualquer sistema de radiocomunicação sujeito ao ruído tem o seu desempenho limitado. A avaliação da influência do ruído é feita através do cálculo da potência do ruído, geralmente dada pela equação (148).

$$p_n = kT_0bf \quad (148)$$

onde,

$$k = \text{constante de Boltzmann} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$T_0 = \text{temperatura de referência em graus Kelvin, geralmente } 290 \text{ °K}$$

$$b = \text{largura de banda equivalente de ruído do recetor (Hz)}$$

$$f = \text{fator de ruído do sistema recetor}$$

A equação (148) pode ser expressa em unidades logarítmicas, através da equação (149).

$$P_n = F + B - 204 \quad [dBW] \quad (149)$$

onde,

$$P_n = \text{potência de ruído disponível (dBW)}$$

$$B = 10 \log b \text{ (dBHz)}$$

$$-204 = 10 \log kT_0 \text{ (dBW/Hz)}$$

$$F = \text{figura de ruído do sistema recetor (dB)}$$

A figura de ruído do sistema receptor, F , é composto por diversas fontes de ruído em cadeia. Esta cadeia está ilustrada na Figura 27.

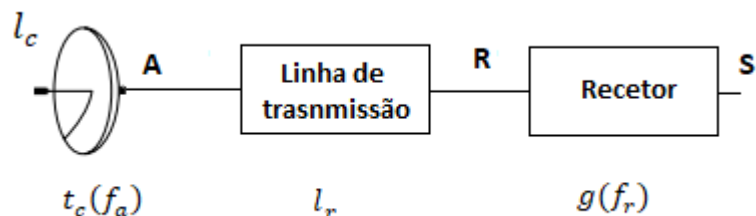


Figura 27 – Modelo geral do sistema receptor para cálculo do ruído.

No modelo existe três interfaces que são relevantes para o processo do cálculo do ruído. A interface **A**, que é a saída da antena, a interface **R**, que é a entrada do receptor e a interface **S** que é a saída do receptor. O ponto de referência para o cálculo do ruído é a entrada da antena. O fator de ruído, f , de um sistema receptor é composto por inúmeras fontes de ruído, e calculado através da equação (150), onde tanto o ruído interno como o ruído externo devem ser considerados.

$$f = f_a + (f_c - 1) + l_c(f_t - 1) + l_c l_t (f_r - 1) \quad (150)$$

onde,

l_c = perdas do circuito da antena

l_t = perdas da linha de transmissão

f_r = fator de ruído do receptor

f_c = fator de ruído associado as perdas do circuito da antena

f_t = fator de ruído associado as perdas da linha de transmissão

f_a = fator de ruído externo calculado através da equação (151).

$$f_a = \frac{p_n}{KT_0 b} \quad (151)$$

onde,

p_n = potência de ruído disponível pela antena

O fator de ruído associado às perdas do circuito da antena e o fator de ruído associado às perdas da linha de transmissão são dados através da equação (152) e equação (153), respetivamente.

$$f_c = 1 + (l_c - 1) \left(\frac{T_c}{T_0} \right) \quad (152)$$

$$f_c = 1 + (l_c - 1) \left(\frac{T_c}{T_0} \right) \quad (153)$$

onde,

T_c = temperatura atual da antena e da superfície circundante (°K)

T_t = temperatura atual da linha de transmissão (°K)

T_0 = temperatura de referência, geralmente 290 °K

No caso da temperatura atual da antena e da temperatura da linha de transmissão sejam iguais à temperatura de referência, o fator de ruído dado pela equação (150) pode ser calculado a partir da equação (154).

$$f = f_a - 1 + f_c f_t f_r \quad (154)$$

2.2.4. Margem de desvanecimento e potência limiar do recetor

De modo a garantir a ligação e conseqüentemente a disponibilidade, mesmo que ocorra os fenómenos de propagação já descritos, o sinal é transmitido com uma potência extra. Esta potência extra é denominada de margem de desvanecimento. A margem de desvanecimento é então a diferença entre a potência nominal recebida, isto é, a potência recebida na ausência do desvanecimento, e a potência limiar do sistema associado a um determinado desempenho. Deste modo, é importante conhecer a potência limiar do recetor. A potência limiar do recetor é a potência mínima à sua entrada associado a um determinado BER, e na presença de perturbações provocadas pelo ruído térmico é dependente do esquema de modulação, do algoritmo de codificação do canal, da taxa de dados (*bitrate*) e do ruído térmico na entrada do mesmo.

O cálculo teórico da potência limiar do recetor, associado a um determinado BER, é baseado na relação entre a energia por bit (e_b) e a densidade espectral de potência do ruído (n_0), e o seu valor pode ser determinado através da equação (155).

$$T_h = w \cdot K T_0 f R \quad (155)$$

onde,

K = constante de Boltzman

T_0 = temperatura de referência em graus kelvin, geralmente 290 °K

f = fator de ruído do recetor

R = taxa de dados (bps)

$$w = \frac{e_b}{n_0}$$

A equação (155) pode ser expressa em unidades logarítmica através da equação (156).

$$T_h = W + F + 10 \log R - 174 \quad [dBm] \quad (156)$$

Só se recorre ao uso do valor teórico da sensibilidade do recetor na ausência de valores fornecidos pelos fabricantes. O valor da sensibilidade do recetor na prática é ligeiramente superior ao valor teórico, pelo fato de os fabricantes já contabilizarem as perturbações que irão afetar o sinal para além do ruído térmico, tais como, distorção, a não linearidade e o ruído de fase na recuperação da portadora. Quando se usa o valor teórico é uma prática comum aumentar esse valor em 5 dB [7].

Uma vez conhecido o valor da sensibilidade do recetor, a margem é calculada a partir da equação (157).

$$M = P_{rx} - T_h \quad (157)$$

onde,

P_{rx} = potência disponível na entrada do recetor, calculada através da equação (127).

T_h = sensibilidade do recetor (dBm)

Normalmente os equipamentos dos sistemas têm alguma capacidade para lidar com o desvanecimento, recorrendo-se à utilização do equipamento de controle de ganho automático (AGC), que pode compensar, pelo menos parcialmente, ocorrências de desvanecimento. O benefício obtido com o AGC dependerá do compromisso de cada fabricante entre a complexidade, o ganho, a largura de banda e o ruído associado e as degradações não lineares que qualquer circuito ativo introduzirá num sistema recetor [7].

2.3. Considerações gerais do projeto de feixes hertzianos

O projeto e o planeamento de uma ligação por feixes hertzianos constituem geralmente tarefas complexas e que envolvem aspetos que na maioria dos casos se inter-relacionam. Normalmente inicia-se com uma abordagem preliminar, onde as decisões vão ser refinadas ao longo das várias etapas até chegar a uma configuração final que será tanto tecnicamente como economicamente, a melhor. De forma muito sumarizada, os projetos de sistemas de FH envolvem três fases:

1. Planeamento inicial onde os parâmetros básicos são determinados. Nesta fase é incluída a informação sobre os nós da rede, o tipo e volume de tráfego e a topologia da rede. Tendo em conta estas informações, será definida a capacidade e a banda da frequência a ser utilizada, sendo feita a seleção dos equipamentos de um ou diferentes fabricantes. A configuração dos equipamentos e das antenas irão depender dos critérios do projeto tais como o tipo de proteção, as bandas da frequência e a máxima distância de cada ligação.
2. Aplicação dos algoritmos que em muitos casos implicam a alteração de um conjunto de parâmetros que foram determinados na fase inicial. Esta fase inclui a análise do percurso, onde são estudadas as alternativas para que se consiga uma linha de vista entre o transmissor e o recetor e uma *clearance* suficiente para que mesmo em condições anómalas de propagação se consiga um desempenho de ligação dentro das especificações mínimas de qualidade e disponibilidade. Esta análise é suportada pelas informações relacionadas com o perfil de terreno. É nesta fase que também se determina a localização de cada nó da rede, incluindo os repetidores, se necessário, a construção das cabines para os equipamentos, das torres caso se justifica, o fornecimento de energia, etc. Durante esta fase aborda-se também aspetos da interferência entre as várias estações, que em muitos casos são derivados aos lobos secundários das antenas ou aos sinais refletidos pelo terreno. A disponibilidade e o desempenho também são analisados nesta fase, em conjunto com a análise do link budget que inclui a estimação da degradação do sinal devido aos vários fenómenos de propagação. É nesta etapa que os *softwares* são extremamente importantes, pois eles suportam a

execução dos cálculos e lidam com as informações do terreno, assim como a base de dados dos equipamentos e das antenas, para os mais complexos.

3. Teste, otimização, operação e manutenção. Esta fase inicia-se a partir do momento em que o sistema está instalado. Depois de obtido as primeiras medidas de teste e validação, os parâmetros podem ser otimizados de forma a se conseguir uma melhoria no desempenho do sistema. Desta forma poderá ser necessário recorrer à fase 2 novamente.

2.3.1. Representação do perfil terreno e clearance.

Tendo os dados da altura do terreno e o percurso expectável do sinal entre o emissor e o recetor é possível efetuar a análise da clearance. Esta análise engloba também o estudo do ponto de reflexão na superfície terrestre descrito na capítulo 2, secção 2.1.7.

O perfil do terreno é composto por um conjunto de amostras da altura do terreno, medidos em relação ao nível do mar. As amostras são equidistantes e a distância entre elas dependem da distância total da ligação. A primeira e a última amostra corresponde à localização da antena transmissora e recetora, respetivamente. O perfil terreno pode ser representado utilizando diferentes modelos, que a seguir serão descritos.

- *Raio real da terra (Real Earth radius)*: onde a curvatura da terra é desenhada utilizando uma linha de natureza parabólica e o percurso do sinal é traçado tendo em conta o caminho real que o sinal segue.
- *Terra plana (Flat Earth)*: a superfície da terra é representada por uma linha reta e o percurso do sinal é traçado tendo em conta a seu encurvamento causado pela refração, bem como a correção pelo fato da terra ser considerada plana.
- *Terra fictícia (Fictitious Earth)*: neste modelo o percurso do sinal é representado por uma linha reta e a curvatura da terra é representada em função não só da sua própria curvatura, mas também do fator relacionado com a refração, de forma a compensar o facto de se considerar que o sinal segue uma linha reta. Assim o raio da terra será modificado, resultando num raio efetivo da terra, que já foi discutido no capítulo 2, secção 2.1.2.3.

Neste documento destaca-se o modelo da terra fictícia, cuja representação gráfica está ilustrada na Figura 28.

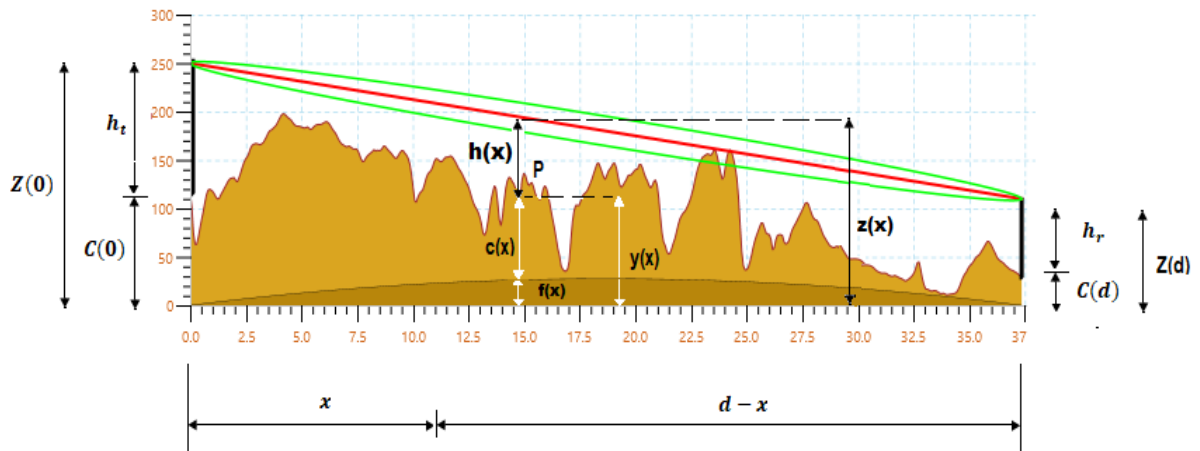


Figura 28 – Representação do perfil da ligação baseada no modelo da Terra fictícia.

$f(x)$ representa a protuberância da terra num determinado ponto, sendo calculada através da equação (158), tendo em conta o fator k que está associado ao fenómeno da refração na troposfera.

$$f(x) = \frac{x(d-x)}{2kR_0} \quad (158)$$

onde,

x = distância entre o transmissor e um ponto específico (m)

d = distância total de ligação (m)

R_0 = raio da terra = 6371000 (m)

K = fator k , calculado a partir da equação (16)

$y(x)$ representa a altura efetiva do terreno, calculada através da equação (159).

$$y(x) = C(x) + f(x) \quad (159)$$

onde,

$C(x)$ = elevação do terreno (m)

A linha reta, $z(x)$, que representa a ligação entre o transmissor e o receptor é calculado através da equação (160).

$$Z(x) = \frac{z(d) - z(0)}{d}x + z(0) \quad (160)$$

$Z(d)$ e $Z(0)$ representam as alturas da antena transmissora e recetora, acima do nível médio do mar, e são calculados através da equação (161) e (162), respetivamente.

$$Z(0) = Y(0) = C(0) + h_t \quad (161)$$

$$Z(d) = Y(d) = C(d) + h_r \quad (162)$$

onde,

h_t = altura da antena transmissora (torre) (m)

h_r = altura da antena recetora (torre) (m)

$h(x)$ representa a clearance num determinado ponto. Ela é calculada a partir da equação (163). Entretanto, para a determinação da existência da obstrução não deve ser apenas considerado o terreno. Obstáculos artificiais também podem contribuir para a obstrução do raio.

$$h(x) = Z(x) - Y(x) \quad (163)$$

Assim como já foi mencionando, a teoria indica que a perda devido à difração nos obstáculos ocorre se o raio direto tiver uma margem acima do obstáculo igual ou inferior 60% do raio do primeiro elipsoide de *Fresnel*, elipsoide no qual se contém a grande percentagem da potência do sinal. Deste modo, existe uma diferença entre o raio direto obstruído e a obstrução tendo em conta o primeiro raio de *Fresnel*. Se a raio direto for obstruído, diz-se que na ligação não existe *visual LOS (line of sight)*. Caso o raio direto não esteja obstruído, mas existe uma obstrução do primeiro elipsoide de *Fresnel*, como mostra a Figura 29, tendo em conta o critério da clearance definido, diz-se que na ligação não existe radio LOS. A não existência de visual LOS implica que não existe radio LOS. Porém, pode existir visual LOS e não existir radio LOS.

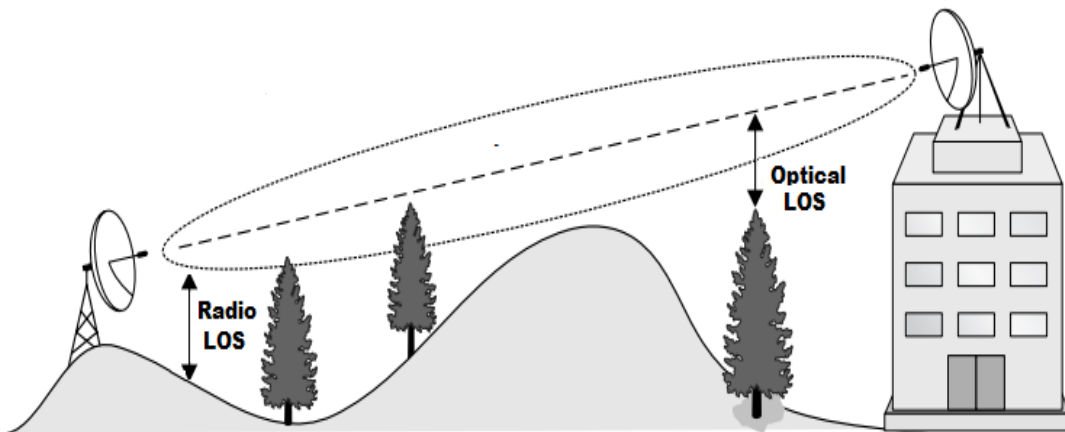


Figura 29 – Optical LOS e radio LOS [23].

2.3.2. Topologia das redes

Uma rede de sistemas de FH, tal como pode ser observado na Figura 30, pode ter diferentes topologias, tais como: ponto a ponto, em linha, em árvore, em anel e em estrela. A topologia ponto a ponto consiste numa ligação que conecta dois terminais e que pode ser tanto unidirecional como bidirecional. Na topologia em linha, cada estação é conectada à outra, exceto os nós que são estações terminais de toda a linha. Esta topologia pode ser vista como uma topologia ponto a ponto em cascata. A topologia em árvore consiste numa hierarquia de estações que seguem uma estrutura semelhante a uma árvore. Cada nó desta topologia é um nó de agregação que concentra o tráfego de todos os links e que serão transmitidos para o próximo ramo da hierarquia.

Na topologia em anel, os nós são conectados com ligação que formam um anel. Nesta topologia qualquer nó de destino pode ser alcançado seguindo o caminho horário ou anti-horário. Na topologia em estrela todos os nós da rede são conectados a um nó central.

Cada secção de ligação entre duas estações (inclui a ligação entre um nó e um repetidor ou entre dois repetidores) é designado de salto. Devido a razões económicas, o número de saltos de uma ligação deve ser o mais baixo possível. Na maioria das aplicações, as ligações são bidirecionais onde cada estação é formada pela secção de transmissão e receção. A secção de transmissão é responsável pelas funções de multiplexagem, correção de erros, modulação, conversão IF para RF, amplificação e filtragem. A secção de receção tem a função de filtragem para banda base, conversão de RF para IF, desmodulação e desmultiplexagem.

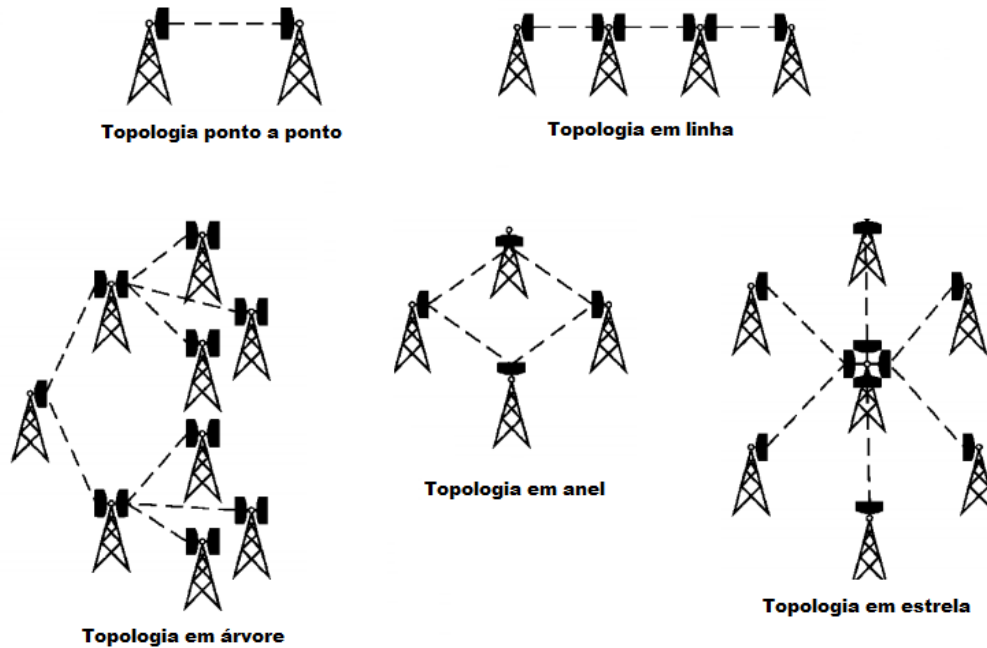


Figura 30 – Topologias das redes de FH.

Devido a falhas que podem ocorrer nos equipamentos e a ocorrência de fenômenos de propagação severos que podem afetar a ligação, é uma boa prática recorrer à instalação de módulos redundantes que garantem uma certa disponibilidade do sistema no caso de eventuais falhas dos equipamentos. No caso dos fenômenos de propagação, seus efeitos podem ser mitigados recorrendo a técnicas de diversidade.

2.3.3. Antenas e repetidores

Um dos principais elementos dos sistemas de FH, assim como de todos os sistemas que envolvem comunicações sem fios é a antena. Existem diversos tipos de antenas que podem ser utilizados nos sistemas de FH e que dependem de requisitos tais como a performance, os métodos de planeamento e os fenômenos associados à propagação. Geralmente, as antenas mais utilizadas nos sistemas de FH são as antenas refletoras. Estas antenas são altamente direcionais, parabólicas e são conectados aos equipamentos de transmissão ou de receção tipicamente através dos guias de onda. Existem também as antenas Yagi que são tradicionalmente utilizadas em algumas aplicações que operam em bandas inferiores a 2.5 GHz, devido aos seus baixos custos [4]. Os principais parâmetros de uma antena a se considerar durante a escolha de uma antena para um sistema de FH são a banda da frequência, o diagrama de radiação, o ganho, o tipo de polarização (simples ou dupla), o isolamento, relação frente-trás, a discriminação da polarização cruzada, a largura de feixe a meia potência e a sua capacidade de resistência a ventos.

Em casos onde é impossível obter uma ligação direta entre dois pontos, é possível estabelecer um percurso alternativo recorrendo ao uso dos repetidores, como o exemplificado na Figura 31. Através dos repetidores é possível redirecionar o sinal para um percurso de modo a contornar um determinado obstáculo que pode degradar o sinal e por em causa o bom funcionamento do sistema.

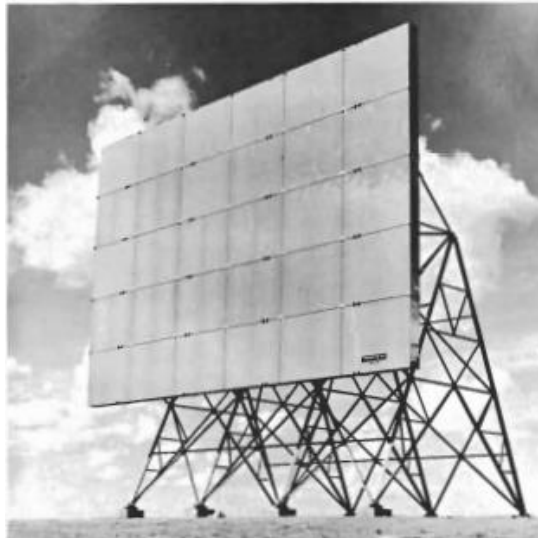


Figura 31 – Repetidor passivo 40x60 [24].

É importante que o percurso entre o transmissor ou recetor e o repetidor esteja claramente desobstruído, isto é, que exista linha de vista entre eles. Existem dois tipos de repetidores: repetidores ativos e repetidores passivos. As estações com repetidores ativos contêm dois terminais ativos (recetor e transmissor) e duas antenas (recetora e transmissora). Nestas estações o sinal é recebido, processado, amplificado e retransmitido. Claramente, esta solução é uma solução economicamente mais cara do que as estações passivas. As estações passivas contêm superfícies refletoras que funcionam como espelhos ou duas antenas colocadas costas com costas e ligadas através de uma linha de transmissão passiva. O sinal aqui não sofre qualquer tipo de processamento, sendo redirecionado para outro percurso de modo a evitar-se a obstrução inicial. Esta solução é muito mais vantajosa em termos não só do custo da implementação, mas também da manutenção.

2.4. Qualidade: Disponibilidade e performance de erro

O ITU-T definiu um conjunto de objetivos de qualidade em sistemas de comunicação ponto a ponto, baseados nos conceitos de disponibilidade e performance de erro. A disponibilidade é a percentagem de tempo em que o sistema de FH encontra-se disponível para transmitir a informação, enquanto que a performance do erro é avaliada em termos da quantidade de erros que ocorrem enquanto ao sistema estiver disponível.

2.4.1. Objetivos de performance de erro

A performance de erro é baseada nas recomendações ITU-T G.821 [26], ITU-T G.826 [27] e ITU-T G.828 [28]. A recomendação ITU-T G.821 define os parâmetros e objetivos da performance de erro para ligações digitais internacionais que funcionam com taxas de transmissão inferiores ao acesso digital com integração de serviços (RDIS) primários (2048 kbits), e que utilizam equipamentos fabricados antes da adoção da recomendação ITU-T G.826. A recomendação ITU-T G.826 define objetivos para sistemas com taxas de transmissão iguais ou superiores ao acesso RDIS primário, exceto para SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) que utilizam equipamentos fabricados depois de março de 2000. Neste caso, aplica-se os objetivos da recomendação ITU-T G.828.

A recomendação ITU-T G.821 baseia-se essencialmente no parâmetro BER, enquanto que as recomendações ITU-T G.826 e ITU-T G.828 baseiam-se no *errored bit block*. Estas recomendações são aplicáveis para qualquer ligação digital, independente do sistema utilizado para transportar a informação. De modo a aplicar os critérios destas recomendações aos sistemas de FH, o ITU-R desenvolveu as recomendações ITU-R F.594 [29], ITU-R F.634 [30], ITU-R F.696 [31] e ITU-R F.697 [32], relativas à recomendação ITU-T G.821 e a recomendação ITU-R F.1668 [33] relativa às recomendações ITU-T G.826 e ITU-T G.828.

A tabela 5 apresenta as recomendações associadas à taxa de transmissão e à data do fabrico dos equipamentos.

Tabela 5 - Recomendações para as varias taxas de transmissão e equipamentos.

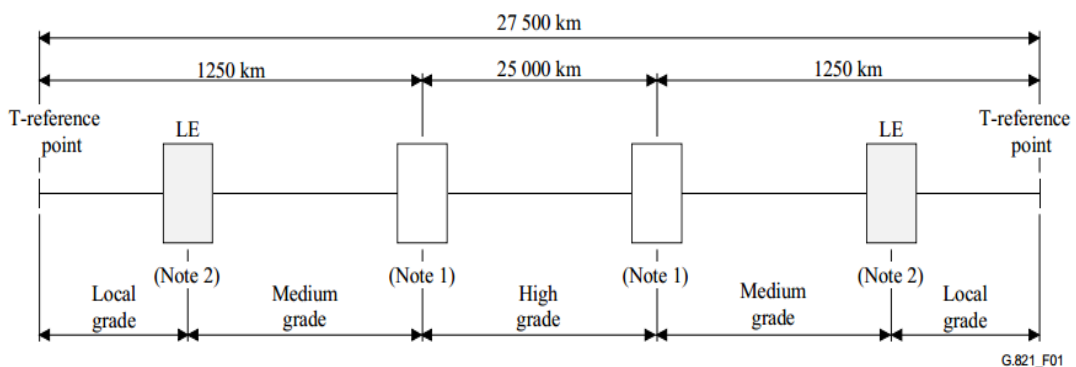
Taxa de transmissão	Data do fabrico do equipamento	Recomendação ITU-T	Recomendação ITU-R
Inferior ao acesso primário	Antes de 14 dezembro de 2002	G.821	F.697, F.696 F.594, F.634
	Depois de 14 dezembro de 2002	G.826	F.1668
Acesso primário ou PDH	Qualquer		
Acesso primário ou SDH	Antes de Março de 2000	G.826	
	Depois de Março de 2000		

2.4.1.1. Baseados na recomendação ITU-T G.821

Nesta recomendação os objetivos baseiam-se em dois eventos, *errored second* (ES) e *severly errored second* (SES), associados ao modelo HRX (*Hypothetical Reference Connection*) definido na recomendação ITU-T G.801 [34], que corresponde a uma ligação hipotética de referência com 27500 km. O ES é o período de um segundo no qual um ou mais bits são errados, ou durante o qual o sinal é perdido ou há um sinal de indicação de alarme (*alarm indication signal* – AIS), enquanto que o SES corresponde ao período de um segundo onde o $BER \geq 10^{-3}$, ou durante o qual o sinal é perdido ou há um sinal de indicação de alarme.

Pa efeitos de determinação dos objetivos de performance de erro, definiu-se dois parâmetros baseado nos eventos ES e SES. Estes parâmetros são o ESR (*errored second ratio*) e SERS (*Severly errored second ratio*). O ESR corresponde à relação entre o ES e o tempo total da disponibilidade, em segundos, durante um intervalo de medição fixa e o SERS corresponde à relação entre o SES e o tempo total da disponibilidade, também em segundos, durante um intervalo de medição fixa.

De modo a fornecer diretrizes de objetivos de qualidade para ligações reais de FH, o ITU-R elaborou as recomendações ITU-R F.594, ITU-R F.634, ITU-R F.696 e ITU-R F.697. Cada uma destas recomendações contém objetivos associados aos diferentes troços constitutivos da HRX. Cada troço, conforme esta representado na Figura 32, está associado a um dos 3 graus que foram estabelecidos para classificar a qualidade (local, média ou alta) representativa dos circuitos reais de transmissão digital, e são independentes do sistema de transmissão utilizado. Os sistemas de FH podem integrar troços de qualquer uma das qualidades. Assim, uma vez definido o troço, a alocação dos objetivos de performance pode ser feita em função da distância.



NOTE 1 – It is not possible to provide a definition of the location of the boundary between the medium and the high grade portions HRX. Note 4 to Table 2 provides further clarification of this point.

NOTE 2 – LE denotes the local exchange or equivalent point.

Figura 32 – Circuito fictício de referencia.

Para ligações de alta qualidade, cujo comprimento L , varia entre 280 e 2500 km, os critérios de performance de acordo com a recomendação F.634 são:

- $BER \geq 10^{-3}$ durante não mais de $\frac{0.054L}{2500}$ % no pior mês, com um tempo de integração de cerca de 1 segundo;
- $BER \geq 10^{-6}$ durante não mais de $\frac{0.4L}{2500}$ % no pior mês, com um tempo de integração de cerca de 1 min;
- ESR não deve exceder $\frac{0.32L}{2500}$ % no pior mês;

Para ligações de qualidade média, os objetivos são especificados na recomendação F.696, e referem-se a ligações unidirecionais a 65 kbit/s. Estas especificações dependem da classe, e estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Objetivos

Parâmetro de performance	Porcentagem do pior mês			
	Classe 1 (280 km)	Classe 2 (280 km)	Classe 3 (50 km)	Classe 4 (50 km)
$BER \geq 10^{-3}$	0.006	0.0075	0.002	0.005
$BER \geq 10^{-6}$	0.045	0.2	0.2	0.5
SR	0.036	0.16	0.16	0.4

Para ligações de qualidade local os objetivos são definidos na recomendação ITU-R F.697, e aplicáveis a cada canal, disponível, de 64 kbit/s, e a cada direção. Esses objetivos são:

- $BER \geq 10^{-3}$ durante não mais de 0.015 % no pior mês, com um tempo de integração de cerca de 1 segundo;
- $BER \geq 10^{-6}$ durante não mais de 1.5 % no pior mês, com um tempo de integração de cerca de 1 min;
- ESR não deve exceder 1.2 % no pior mês;

É importante referir que atualmente os sistemas de FH têm uma taxa de transmissão superiores ao acesso RDIS primário, pelo que estes objetivos dificilmente são aplicados atualmente.

2.4.1.2. Baseados na Recomendação ITU-T G.826 e ITU-T G.828

Uma vez que as especificações da recomendação ITU-T G.821 eram inadequadas para sistemas com taxas de transmissão iguais ou superiores ao acesso RDIS primário, o ITU-T elaborou as recomendações ITU-T G.826 e ITU-T G.828. Os objetivos da recomendação ITU-T G.826 são aplicados

em duas situações: para ligações com taxa inferior ao acesso RDIS primário, baseados em equipamentos fabricados antes de 14 de dezembro de 2002, e para sistemas PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) e SDH, sendo que, relativamente aos sistemas SDH apenas aqueles cujos equipamentos foram fabricados depois de março de 2000. Para sistemas SDH que utilizam equipamentos fabricados antes de março de 2000, aplica-se as especificações da recomendação ITU-T G.828. Assim como a recomendação ITU-T G.821, estas duas recomendações baseiam-se no modelo HRX, em conjunto com o modelo HRP (*Hypothetical Reference Path*) que também foi definido. Estes modelos são ambos constituídos pela parte nacional e internacional, conforme mostra a Figura 33.

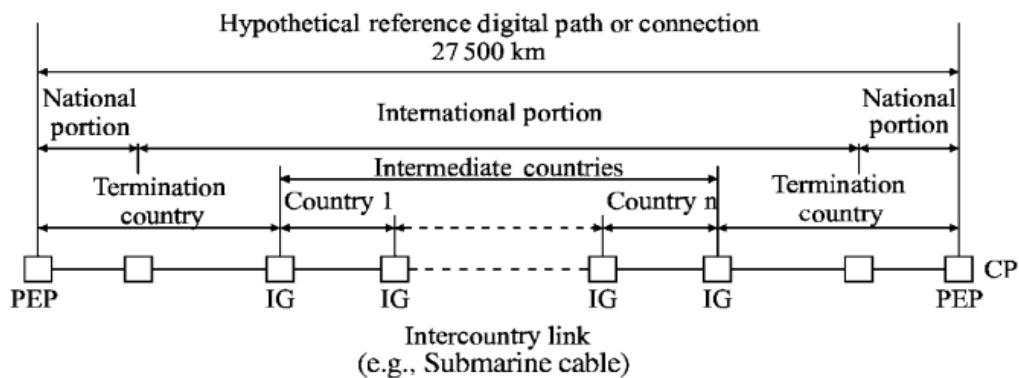


Figura 33 - Ligação hipotética de referência.

A parte nacional, como se pode observar no exemplo da Figura 34, é dividida ainda em três secções: acesso, percurso curto e percurso longo.

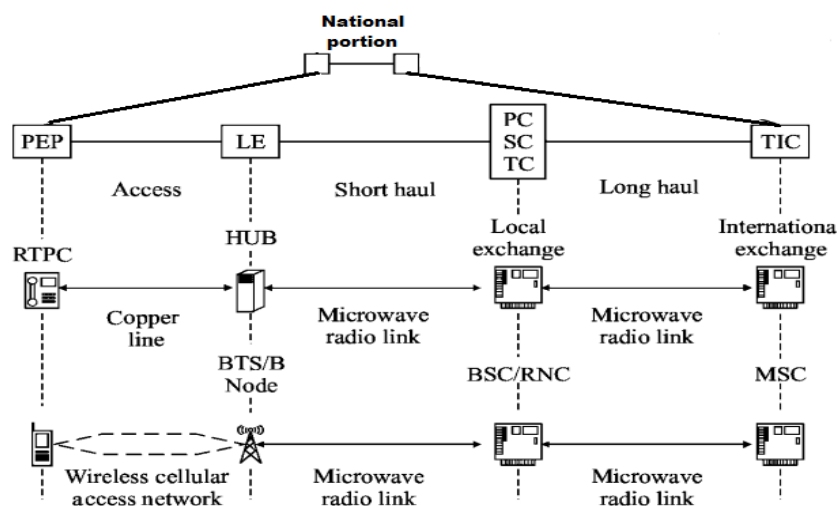


Figura 34 - Ligação hipotética de referência, parte nacional.

Foram definidos os eventos EB (*Errored Block*), ES (*Errored Second*), SES (*Severly Errored Second*) e BBE (*Background Block Error*) baseados no HRP. O EB corresponde a um bloco no qual um ou mais bits estão errados. O ES corresponde ao período de um segundo com um ou mais blocos com erros ou no mínimo com defeitos. O SES é o período que contém mais de 30% de blocos com erros ou pelo menos com defeito. O SES corresponde ao bloco com erro que não faz parte do SES. Um bloco corresponde a um conjunto de bits consecutivos associados ao trajeto, sendo que cada bit só pertence a um único bloco.

De modo a adaptar os critérios da recomendação ITU-T G.826 e ITU-T G.828 aos sistemas de FH, o ITU-R elaborou a recomendação ITU-R F.1668 (substitui as recomendações ITU-R F.1397 e ITU-R F.1491 utilizadas até a data). Os objetivos são definidos em termos dos parâmetros ESR, SESR e BBER, seguindo diferentes critérios de acordo com fatores tais como a posição da ligação no HRP (parte nacional ou internacional) e a tecnologia de transporte (PDH ou SDH).

No contexto de sistemas de FH, onde são projetados na parte nacional, é importante saber a secção onde o link será instalado. A Tabela 7 e a Tabela 8 correspondem aos valores dos parâmetros utilizados para definir os objetivos de performance de erros para sistemas FH projetados de acordo com a recomendação ITU-T G.828 e ITU-T G.826, respetivamente.

Tabela 7 – Objetivos de performance de erro para FH de acordo com a recomendação ITU-T G.828.

	Taxa [Kbit/s]	1664	2240	6848	48960	150336
Longo	ESR	$0.01 \times A$	$0.01 \times A$	$0.01 \times A$	$0.02 \times A$	$0.04 \times A$
	SESR	$0.002 \times A$				
	BBER	$5 \times 10^{-5} \times A$				$1 \times 10^{-4} \times A$
Curto	ESR	$0.01 \times B$	$0.01 \times B$	$0.01 \times B$	$0.02 \times B$	$0.04 \times B$
	SESR	$0.002 \times B$				
	BBER	$5 \times 10^{-5} \times B$				$1 \times 10^{-4} \times B$
Acesso	ESR	$0.01 \times C$	$0.01 \times C$	$0.01 \times C$	$0.02 \times C$	$0.04 \times C$
	SESR	$0.002 \times C$				
	BBER	$5 \times 10^{-5} \times C$				$1 \times 10^{-4} \times C$

Os valores dos parâmetros dependem da taxa de transmissão e dos parâmetros A , B e C , para percurso longo, percurso curto e acesso, respetivamente. Os seus valores são definidos do seguinte modo:

$$A = \frac{(A_1 + 0.002)L_{link}}{100} \quad \text{para } 50 \text{ Km} \leq L_{link} \leq 100 \text{ Km}$$

$$A = A_1 + 2 \times 10^{-5}L_{link} \quad \text{para } L_{link} > 100 \text{ Km}$$

A_1 compreendido entre 0.01 e 0.02

B compreendido entre 0.075 e 0.085

C compreendido entre 0.075 e 0.085

Tabela 8 - Objetivos de performance de erro para FH de acordo com a recomendação ITU-T G.826.

	Taxa [Mbit/s]	< TP	1.5 a 5	>5 a 15	>15 a 55	>55 a 160	>160 a 400
Longo	ESR	0.04A	0.04A	0.05A	0.075A	0.16A	NA
	SESR	0.002A	0.002A	0.002A	0.002A	0.002A	0.002A
	BBER	NA	$2A \times 10^{-4}$	$2A \times 10^{-4}$	$2A \times 10^{-4}$	$2A \times 10^{-4}$	$1A \times 10^{-4}$
Curto	ESR	0.04B	0.04B	0.05B	0.075B	0.16B	NA
	SESR	0.002B	0.002B	0.002B	0.002B	0.002B	0.002B
	BBER	NA	$2B \times 10^{-4}$	$2B \times 10^{-4}$	$2B \times 10^{-4}$	$2B \times 10^{-4}$	$1B \times 10^{-4}$
Acesso	ESR	0.04C	0.04C	0.05C	0.075C	0.16C	NA
	SESR	0.002C	0.002C	0.002C	0.002C	0.002C	0.002C
	BBER	NA	$2C \times 10^{-4}$	$2C \times 10^{-4}$	$2C \times 10^{-4}$	$2C \times 10^{-4}$	$1C \times 10^{-4}$

2.4.2. Disponibilidade

O ITU define a indisponibilidade como a percentagem de tempo em que a ligação está fora de serviço devido a falhas de equipamentos ou perturbações na propagação com duração significativa, devido aos fenómenos já descritos. Nas recomendações ITU-T G.821, ITU-T G.826 e ITU-T G.828 para além dos critérios de objetivos de performance de erro descritos anteriormente, definem também os critérios de disponibilidade e indisponibilidade.

Para ligações reais de sistemas de FH projetados antes de 2005, o ITU elaborou as recomendações ITU-R F.557 [35], ITU-R F.695 [36], ITU-R F.696 [37] e ITU-R F.697 [38] que fornecem objetivos de disponibilidade. Para os sistemas projetados depois de 2005, a recomendação ITU-R F.1703 [39] deve ser utilizada. Uma vez que atualmente a maioria dos sistemas (ou todos os sistemas) são baseadas na recomendação ITU-R F.1703, neste documento descreve-se apenas os objetivos de disponibilidade de acordo com a mesma. A recomendação baseia-se no mesmo modelo HRDP já descrito e os objetivos aplicam-se a qualquer sistema de FH que faz parte deste circuito. Como já foi

descrito, este modelo divide o circuito em duas partes, internacional e nacional, sendo que a parte nacional é composta por três secções: acesso, percurso curto e percurso longo.

Os objetivos são especificados tendo em conta os três parâmetros definidos: AR (*availability ratio*), MO (*mean time between outage*) e OI (*outage intensity*). Os valores dos parâmetros AR e MO são dados através das equações (164) e (165), respetivamente.

$$AR = 1 - \left(B_j \frac{L_{link}}{L_R} + C_j \right) \quad (164)$$

$$MO = \frac{1}{D_j \frac{L_{link}}{L_R} + E_j} \quad (165)$$

em que:

L_{link} = distância de ligação (km), sendo que para percurso superior a 50 km considera-se $L_{link} = 50 \text{ km}$

$$L_R = 2500 \text{ Km}$$

B_j, C_j, D_j e E_j são valores que se obtém da tabela Tabela 9.

em que j depende da parte no HRDP onde o link é projetado. Para a parte nacional, onde os FH são implementados tem-se:

$$j = 5 \text{ para o acesso}$$

$$j = 6 \text{ para percurso curto}$$

$$j = 7 \text{ para percurso longo}$$

Os valores dos parâmetros B, C, D e E estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 9 – Parâmetros

Acesso		Percurso curto		Percurso longo	
D_5	E_5	D_6	E_6	D_7	E_7
0	100	0	120	100 para $250 \leq L_{link} < 2500 \text{ Km}$	55 para $250 \leq L_{link} < 2500 \text{ Km}$
				150 para $50 \leq L_{link} < 250 \text{ Km}$	50 para $50 \leq L_{link} < 250 \text{ Km}$

Capítulo 3

3. Implementação do software

Neste capítulo é descrito o processo de implementação do *software* onde são apresentados os módulos que o compõe, a funcionalidade de cada módulo e a interface gráfica.

3.1. Modern and optimized planning tool for point-to-point microwave link

A primeira versão deste *software* denominado *Modern and optimized planning tool for point-to-point microwave link* foi desenvolvido na linguagem Java, o que facilita o seu contínuo melhoramento e modernização bem como a sua utilização em diferentes plataformas tais como o Windows, o Linux e o Mac. O *software* está dividido em vários módulos (componentes gráficas e bibliotecas utilitários) permitindo assim que qualquer programador possa criar novos módulos com a finalidade de acrescentar novas funcionalidades ao *software* ou modificar módulos já existentes. A interface gráfica é toda desenvolvida em JavaFX, que é uma plataforma de *software* multimídia desenvolvida pela Oracle baseada em Java para a criação e disponibilização de aplicação rica para internet que pode ser executada em vários dispositivos diferentes.

3.1.1. Módulos do software

3.1.1.1. Módulo mapa

O módulo mapa foi implementado utilizando a biblioteca GMapsFX disponível em [40], que permite a adição do GM nas aplicações *JavaFX*. O utilizador dispõe assim do GM diretamente nas janelas do *software*, excluindo deste modo a necessidade de recorrer a qualquer browser ou ao GE (*Google Earth*) para visualizar o mapa do Google. Este módulo é reutilizado em várias janelas da

aplicação, e para além de permitir a visualização do mapa suporta ainda as seguintes funcionalidades:

- Escolher a localização de uma determinada unidade (site);
- Visualização de todas as unidades criadas e das ligações estabelecidas entre as unidades, como é exemplificado na Figura 35.

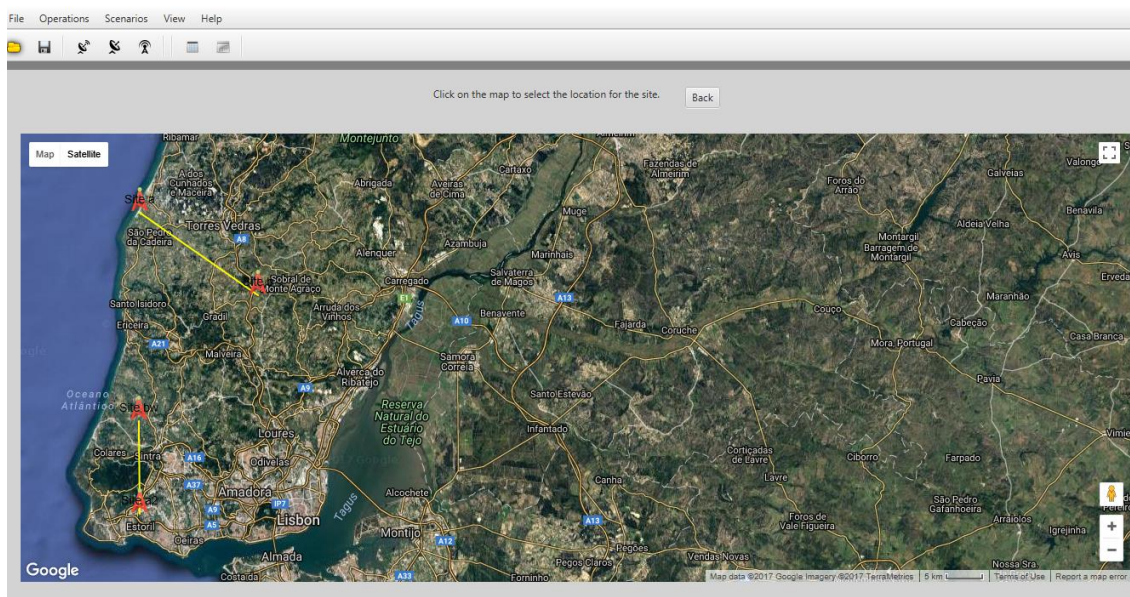


Figura 35 – GM com duas ligações representadas.

Caso o utilizador pretenda especificar a localização de uma determinada unidade através do mapa, o GM é disponibilizado na janela em modo de edição de localização, permitindo que a localização seja feita através do click com o ponteiro do rato em cima do ponto de interesse. Automaticamente é criado um marcador com o nome escolhido para unidade sobre o mapa na localização escolhida pelo utilizador.

3.1.1.2. Modulo de serviço de elevação

Neste modulo utiliza-se uma biblioteca utilitária implementada com base na biblioteca *The Java Client for Google Maps Services* acessível em [41]. Deste modo, é possível aceder ao *Google Elevation API Web Services* e obter a elevação do terreno. Para utilizar o *Google Maps JavaScript API* foi necessária efetuar uma autenticação obrigatória o que permite a obtenção de uma chave. A chave utilizada para o desenvolvimento deste projeto é uma chave para utilizadores da API padrão, e, portanto, a utilização do *Web Service* contém algumas limitações, tais como o número máximo de amostras do perfil terreno e o número máximo de carregamentos de mapas a cada 24 horas que são

de 512 amostras e 25.000 solicitações, respetivamente. Por exemplo, para uma ligação típica, com uma distância de 50 km, a distância entre cada amostra é de aproximadamente 97 metros.

Ao solicitar o serviço e caso este seja bem-sucedido (é obrigatório ter uma ligação à internet), uma lista de objetos *ElevationResult* é disponibilizado em forma de *array*. Esses objetos contêm os seguintes elementos: um elemento *location* (contendo objetos LatLng com o par latitude e longitude) da posição para a qual os dados de elevação são calculados, um elemento *elevation* indicando a elevação da localização em metros e um valor *resolution*, indicando a distância máxima entre os pontos de dados entre os quais a elevação foi interpolada, em metros. Toda a informação sobre o serviço da elevação do GM está devidamente documentada e pode ser consultada em [42].

3.1.1.3. *Modulo de gestão de unidades*

Este modulo foi criado para suportar as seguintes funcionalidades:

- Registrar unidades no sistema;
- Alterar os parâmetros das unidades;
- Visualizar todas as unidades registadas no sistema;
- Apagar qualquer unidade registada;

Uma unidade é a representação do transmissor ou do recetor sendo constituída pelos seguintes elementos:

- **Nome** – é o nome dado ao transmissor ou ao recetor no momento do registo. Nesta versão do *software* cada unidade é identificada por um único nome, pelo que não se permite criar unidades com o mesmo nome de uma unidade já existente.
- **Localização** – corresponde ao par latitude e longitude da unidade.
- **Antena** – é a antena associada a cada unidade. Cada antena é constituída por um conjunto de características tais como: a potência (emissão ou receção, dependendo se a unidade for um transmissor ou um recetor), o ganho, as perdas (inclui as perdas dos conectores e dos cabos), a polarização e a altura em relação ao terreno.
- **Tipo** – Identificação de que tipo de unidade se trata, um transmissor ou um recetor.

O transmissor e o recetor são registados mediante o preenchimento de um formulário, como se pode observar na Figura 36 e Figura 37. A escolha da localização assim como já foi mencionada, pode

ser feita recorrendo ao GM ou indicada diretamente no formulário do registo da unidade. Nesta segunda opção pode-se especificar a localização tanto no formato DMS (Graus, Minutos e Segundos) como no formato DD (Graus decimais). O *software* trabalha apenas com o formato DD, e deste modo, caso a localização seja especificada no formato DMS o sistema encarregue-se de fazer a conversão automaticamente antes de registar a unidade.

Creat transmitter

Name: Site a

Antenna power [dBm]: 10

Antenna gain [dB]: 20

Line losses [dB]: 2.3

Tower Height [m]: 34

Polarization: Single Dual

Select polarization

Decimal degrees Degrees,minutes,seconds

Latitude: 39.10768574604533

Longitude: -9.394683837890625

I will select the location on the map.

Create Cancel

Figura 36 - Formulário para registo de um transmissor.

O utilizador pode optar por não indicar a localização. Se assim optar, o sistema regista a unidade com a localização pré-definida (Latitude = 0; Longitude = 0). Posteriormente o utilizador pode editá-la recorrendo ao mapa do Google. É necessário também indicar o tipo de polarização da antena, que pode ser *single* (horizontal ou vertical) ou *dual*. Os restantes parâmetros também devem ser especificados.

Creat receiver

Name: Site b

Antenna gain [dB]: 17

Line losses [dB]: 1.8

Tower Height [m]: 41

Polarization: Single Dual

Vertical

Decimal degrees Degrees,minutes,seconds

Latitude: 38 54 44.81 N

Longitude: 09 16 27.5 W

I will select the location after on the map.

Create Cancel

Figura 37 - Formulário para registo de um recetor.

Todas as unidades registadas são apresentadas numa tabela onde é possível consultar os valores dos seus parâmetros, assim como é exemplificado na Figura 38. Nesta tabela é possível através do *click* com o botão direito do rato sobre uma determinada unidade aceder a um menu de contexto onde é permitido ao utilizador realizar três ações: alterar o valor dos parâmetros da antena, editar a localização da unidade ou apagar a unidade. Uma unidade pertencente a um ou mais links registados não pode ser apagada do sistema. Para tal, é necessário previamente desvincular a unidade a qualquer link e só depois apaga-la.

Type	Name	Location		Antenna				
		Latitude	Longitude	Power [dBm]	Gain [dB]	Losses [dB]	Tower Heigh [m]	Polarization
Transmitter	Site 1	39.10768574604533	-9.394683837890625	10.0	20.0	2.3	34.0	Horizontal
Receiver	Site 2	38.98076627650163	-9.174957275390625	0.0	17.0	1.8	41.0	Horizontal
Transmitter	Site 3	38.76150833	-9.174957275390625	14.446	10.0	20.0	2.3	Dual
Receiver	Site b	38.91244722	-9.174957275390625	15.557	0.0	17.0	1.8	Vertical

Figura 38 – Tabela com as características de duas unidades.

3.1.1.4. Modulo de gestão de link

As principais funcionalidades implementadas neste modulo são:

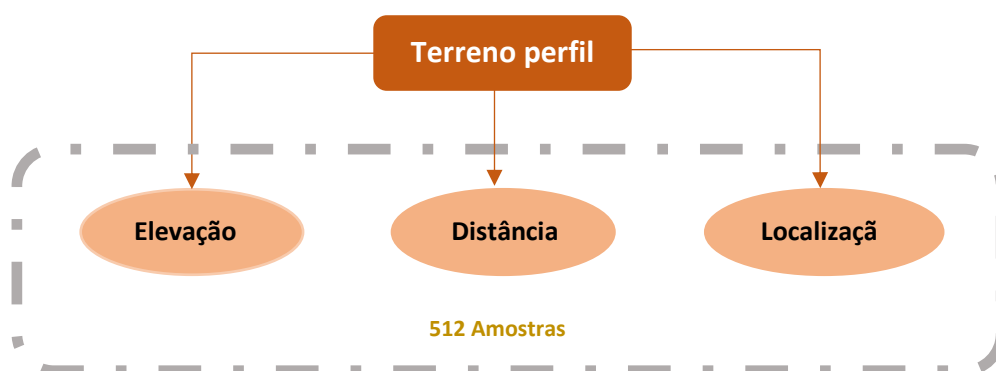
- Registrar um link no sistema;
- Alterar os parâmetros de um link;
- Visualizar todos os links registados no sistema;
- Apagar qualquer link registado no sistema;

Um link é a representação de uma ligação entre um transmissor e um recetor sendo constituído pelos seguintes elementos:

- **Nome** – é o nome dado ao link na altura do registo. Cada link é identificado com um único nome, pelo que, não é permitido que o utilizador crie um link com um nome igual a de qualquer outro link registado.
- **Transmissor** – corresponde à unidade que representa o transmissor;
- **Recetor** – corresponde à unidade que representa o recetor;

- **Distância** – Corresponde à distancia entre o emissor e o recetor, isto é, é a distância total de ligação.
- **Frequência** – Corresponde à frequência de trabalho em que a ligação opera. Está diretamente associado à frequência de trabalho do equipamento transmissor.
- **Comprimento de onda** – Corresponde ao comprimento de onda associado à frequência de trabalho.

Para além desses elementos, um link ainda é constituído por um perfil de terreno que é criado a partir das informações obtidas através do modulo do serviço de elevação. O perfil terreno é representado por uma lista onde contém as elevações do terreno do percurso direto entre a localização do transmissor e do recetor. Cada valor da elevação está associado a uma determinada localização no percurso (latitude e longitude) e a uma determinada distância do transmissor. Deste modo, a primeira localização desta lista corresponde à localização do próprio transmissor e a ultima corresponde à localização do recetor. Tal como já foi mencionado anteriormente, uma vez que a chave do *Google Maps JavaScript API* utilizada corresponde a uma chave de utilizador padrão, o número máximo de amostras de um percurso são 512, pelo que, é este o valor utilizado para qualquer link criado. As distâncias entre cada ponto do percurso são equidistantes e quanto maior for a distância de ligação maior será o espaçamento entre esses pontos.



Tal como as unidades, os links registados são apresentados numa janela onde é possível consultar os valores dos seus parâmetros e as duas unidades que constituem o link. Nesta tabela também é possível através do *click* com o botão direito do rato sobre um determinado link aceder a um menu de contexto, tal como pode ser observado na Figura 39, onde é permitido realizar três ações: ver o perfil terreno da ligação, configurar o link e apagar o link.

Name	Transmitter	Receiver	Distance [Km]	Frequency [GHz]	Wavelength [m]
Link 1	Site a	Site b	21.21	0.5	0.6
Link 2	Site a	Site b3	21.21	1.0	0.3
Link 3	Site d	Site b	21.21		0.3

Figura 39 – Tabela de links com duas ligações criadas.

Antes de efetuar a configuração do link, o utilizador pode visualizar previamente o perfil do terreno do percurso associado ao link através de um gráfico, o que permite obter uma perspetiva do mesmo, tal como se pode observar na Figura 40.

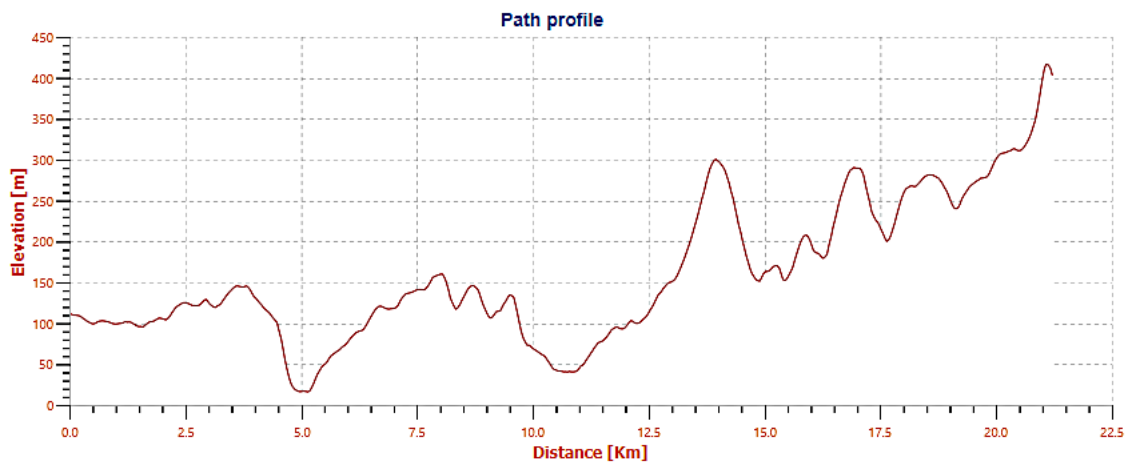


Figura 40 - Representação do perfil do terreno do percurso de uma ligação.

3.1.1.5. Módulo de configuração de link

Este módulo permite que o utilizador configure o link antes de proceder ao cálculo do link budget. Ele tem as seguintes funcionalidades:

- Apresentar o gráfico geral da ligação, de modo a que o utilizador tenha a perspetiva do raio direto bem como do elipsoide de Fresnel;
- Ajustar as alturas das antenas do transmissor e do recetor;
- Ajustar a frequência de operação;
- Ajustar o fator K;
- Ajustar os parâmetros atmosfera;
- Visualizar o ponto especular ou identificar uma possível área de reflexão especular;

- Parametrizar as características do solo na possível área de reflexão;
- Visualizar os obstáculos extraídos pelo sistema e escolher o método para o calculo da difração sobre obstáculos se assim for (melhor);
- Parametrizar parâmetros do ruido e da sensibilidade do recetor;
- Parametrizar parâmetros para cálculos do desvanecimento multipercurso;

O gráfico geral da ligação, tal como pode ser observado no exemplo da Figura 41, contém a representação dos seguintes elementos associados à ligação: curvatura da terra, perfil terreno (considerando a curvatura da terra e considerando a terra plana), antena transmissora, antena recetora, raio direto, primeiro elipsoide de Fresnel e percentagem do primeiro elipsoide de Fresnel de acordo com a clearance definida. Neste exemplo o critério de clearance definido foi de 60%, pelo que o elipsoide que corresponde à percentagem do 1º elipsoide de Fresnel corresponde aos tais 60%. Cada cor do gráfico corresponde a um dos elementos mencionados anteriormente.

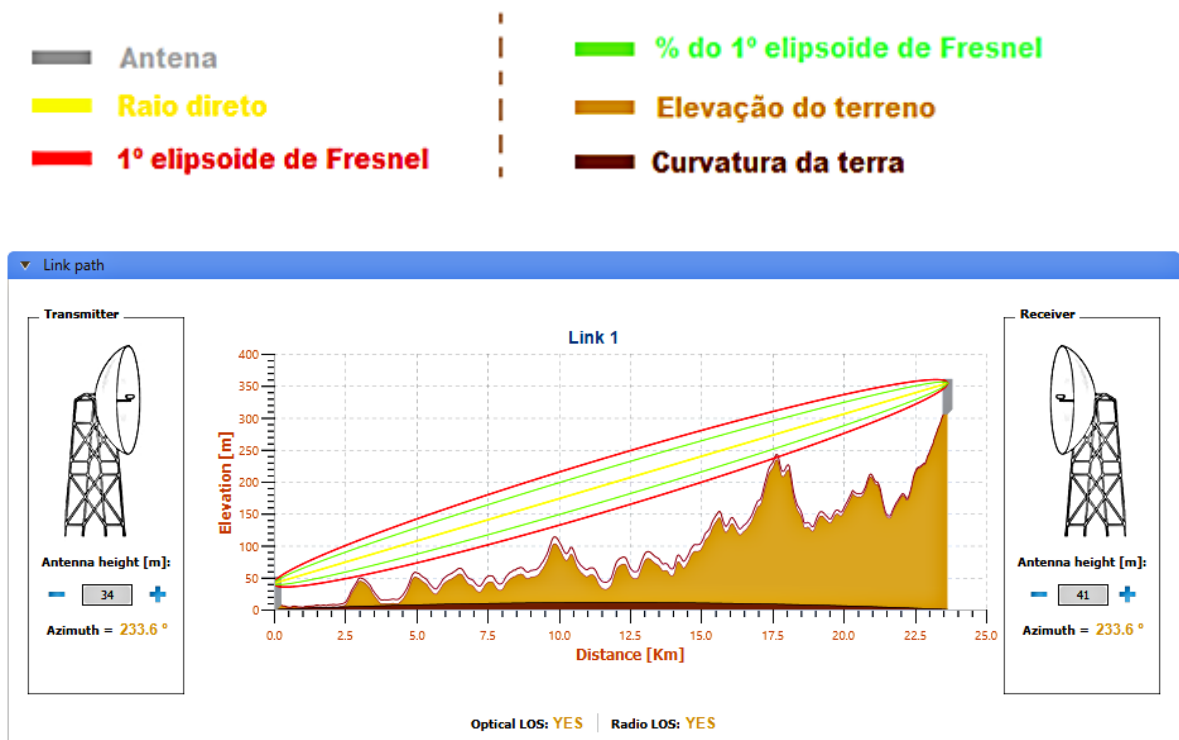


Figura 41 - Gráfico geral da ligação.

É possível ajustar as alturas das antenas de modo a evitar possíveis obstruções que podem ser identificadas visualmente no gráfico ou extraídas automaticamente pelo sistema e colocadas numa

tabela (a extração dos obstáculos será descrita mais à frente). Ao alterar os valores das alturas das antenas o sistema recalcula automaticamente todos os elementos dependentes da altura e atualiza o gráfico para que o utilizador possa ver o impacto desse ajuste. Como exemplo, a altura da antena recetora da ligação apresentada na Figura 41, foi alterada de 41 metros para 21 metros. Através do gráfico da Figura 42, é possível verificar uma maior obstrução do primeiro elipsoide de Fresnel, chegando mesmo a ser maior do que 40% do seu raio, violando assim o critério dos 60% da libertação do primeiro elipsoide de Fresnel que foi definido anteriormente.

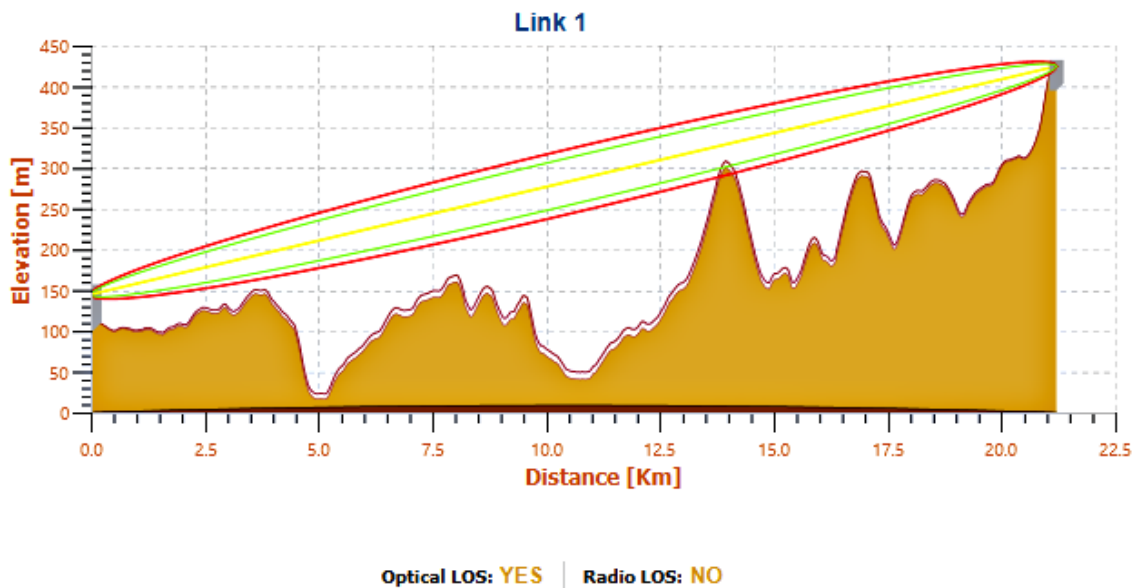


Figura 42 - Gráfico geral da ligação com o 1º elipsoide de Fresnel obstruído.

A frequência e o critério de clearance são definidos recorrendo à secção lateral da janela de configuração, ilustrada na Figura 43. Ao ajustar estes dois parâmetros o sistema recalcula o elipsoide de Fresnel e atualiza o gráfico geral do perfil e a tabela dos obstáculos. Para as mesmas alturas da antena transmissora e recetora, dependendo da frequência e do critério de clearance a ligação pode ou não estar obstruída. Nesta mesma secção pode-se ver o valor do raio equivalente da terra que depende do fator k. O utilizador pode alterar a qualquer momento o fator k e automaticamente o raio efetivo é recalculado.

▼ Geral

Frequency [GHz]: + | Wavelength = 0.300 m

Earth radius = 6370.000 Km | Fator K =

Clearance [%]: +

⚙️ Calculate link budget

Figura 43 - Parâmetros gerais da ligação.

Para definir o fator K o utilizador pode introduzir o valor diretamente ou então pode optar que o sistema, tendo em conta os valores dos parâmetros da atmosfera, nomeadamente o gradiente da refratividade, calcule-o automaticamente. Este fator tal como já foi descrito no capítulo 2, secção 2.1.2.3, permite ajustar a curvatura da terra através do seu raio equivalente. O ajuste da curvatura da terra através da alteração do valor do seu raio é de extrema importância uma vez que o raio direto é representado por uma linha reta, fato que não acontece na realidade, pois, devido à difração do sinal na atmosfera o raio direto tende a se encurvar. Na Figura 44, é exemplificado a curvatura da terra para um $k = -0.1$.

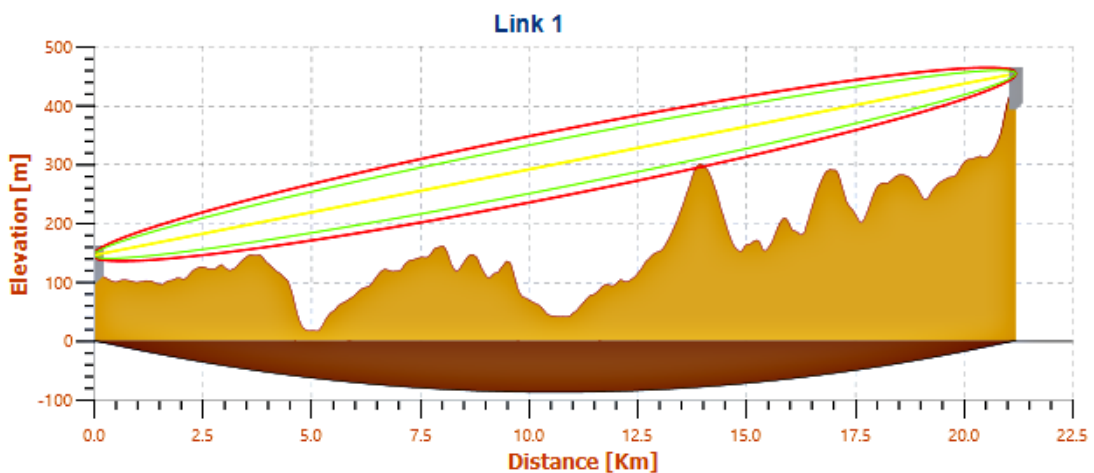


Figura 44 - Ligação com uma curvatura da terra correspondente a um fator $k = -0.1$.

Tal como já foi referido, este modulo permite visualizar uma possível área de reflexão especular. O utilizador poderá de acordo com o elipsoide de Fresnel identificar uma possível área de reflexão. Tendo identificado o ponto especular, o sistema através da biblioteca criada para fins de cálculo de reflexões (será descrito mais a frente) irá proceder aos cálculos relacionados com as reflexões no solo. É possível o utilizador ver o ponto onde o raio incidi no solo, tal como se pode observar no exemplo da Figura 45.

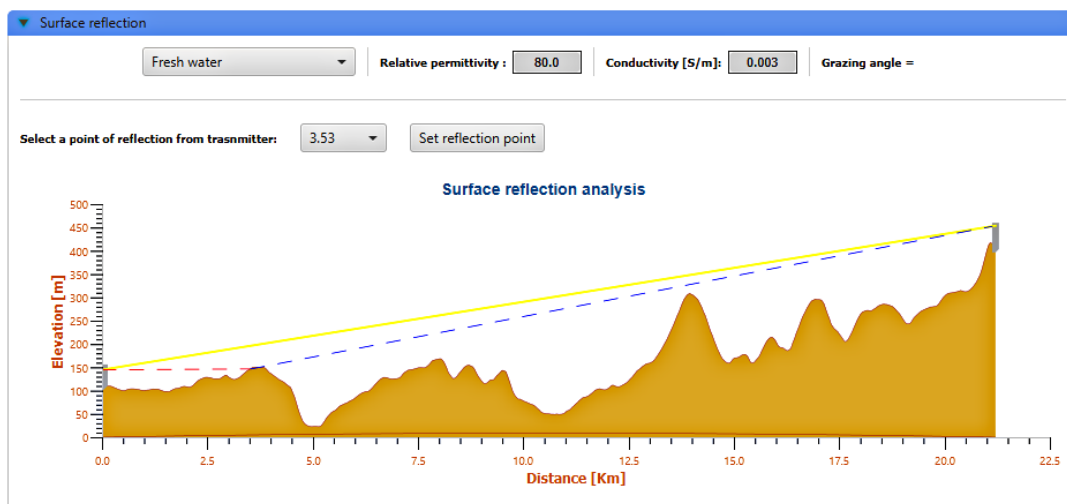


Figura 45 - Possível área da reflexão especular.

O ponto especular está diretamente relacionado com as alturas das antenas e com o perfil médio do terreno. O ponto especular afasta-se sempre da antena cuja altura vai-se aumentando e aproxima-se da antena cuja altura vai-se diminuindo. O perfil médio do terreno é calculado através do MMQ (método dos mínimos quadrados). O utilizador deverá definir qual é o tipo de solo onde ocorre a reflexão, para que, posteriormente, no momento do cálculo do link budget o sistema inclua a influência do sinal refletido na potência do sinal recebido. Para que seja fácil obter as características de um determinado solo, foram definidos 10 tipos de solo cujas características estão apresentadas na tabela 10. Entretanto é possível introduzir outros valores da condutividade e da permitividade relativa do solo caso o utilizador assim pretender.

Tabela 10 - Condutividade e permitividade relativa para vários tipos de solo [3.4].

Tipo de solo	Condutividade	Permitividade relativa
Água salgada com salinidade baixa	1	80
Água salgada com salinidade média	5	80
Água doce	3×10^{-3}	80
Terra	3×10^{-2}	40
Terra molhada	1×10^{-2}	30
Terra seca - medio	1×10^{-3}	15
Terra seca	3×10^{-4}	7
Terra muito seca	1×10^{-4}	3
Água doce gelada, -1°C	3×10^{-5}	3
Água doce gelada, -10°C	1×10^{-5}	3

As informações relacionadas com a atmosfera, nomeadamente a condição meteorológica são indicadas na secção da atmosfera da janela principal de configuração da ligação, assim como pode ser observado na Figura 46. Nesta secção é necessário indicar os valores da temperatura, da humidade, da pressão e densidade do vapor de água, que serão utilizados para efeito de cálculo das atenuações devido aos gases e à precipitação. O sistema é capaz de obter estas informações automaticamente através da conexão ao *Web Service* do *Openweathermap*, sendo que os dados recebidos correspondem aos dados atuais, e a localização corresponde à localização no meio do percurso. O método pretendido para o sistema calcular a atenuação devido à precipitação é indicado nesta secção, sendo que é necessário indicar qual a percentagem de tempo de indisponibilidade e intensidade da precipitação do local. Se não for especificado valores para estes dois parâmetros, o sistema assume valores pré-definidos (serão especificados mais à frente).

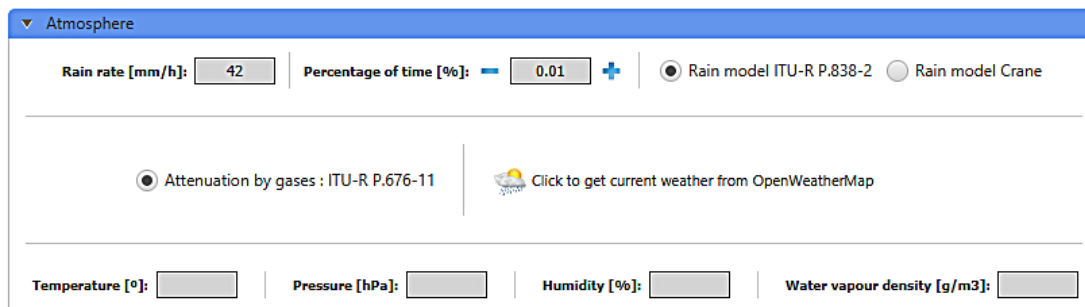


Figura 46 - Parâmetros para configurar a atmosfera.

Este modulo permite ainda a visualização de todos os obstáculos que obstruem ou não o raio direto ou o primeiro elipsoide de *Fresnel*, e que levam o sinal a sofrer atenuação devido à difração nos mesmos. Esta versão do *software* apenas considera os obstáculos devido às irregularidades do terreno excluindo a possibilidade da existência de obstáculos artificiais tais como o edifício. Os obstáculos são representados em duas formas: a primeira corresponde ao formato real da porção do terreno que representa o obstáculo, assim como se pode observar na Figura 47, e a segunda corresponde a uma lâmina cuja altura coincide com o pico do obstáculo real.

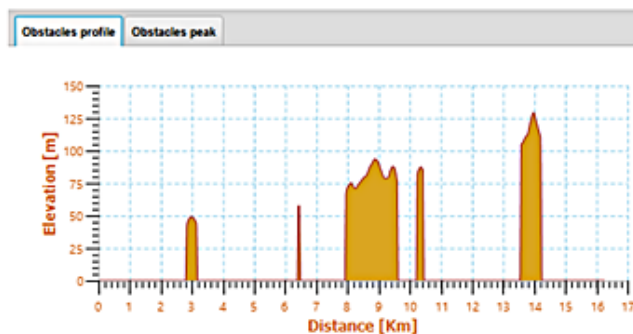


Figura 47 - Porções do perfil terreno que representam obstáculos.

Foi implementada uma função (descrito mais à frente) capaz de lidar com as irregularidades do terreno e extrair possíveis obstáculos. Os obstáculos representados em forma de lâmina têm uma espessura desprezável e o comprimento coincide com o pico da porção do terreno que representa o obstáculo. No exemplo da Figura 48 estão representados 5 obstáculos idealizados em forma de lâminas. Apesar de existir inicialmente 5 obstáculos, o sistema ao proceder ao cálculo da atenuação devido a estes obstáculos, poderá vir a considerar apenas alguns destes obstáculos e descartar os restantes.

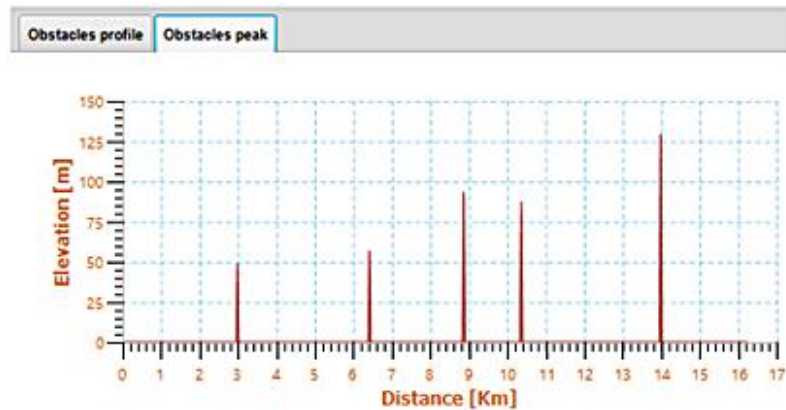


Figura 48 - Obstáculos representados em forma de lâminas.

Todos os obstáculos extraídos pelo sistema a partir função que analisa o perfil terreno são apresentados numa tabela, como se pode observar no exemplo da Figura 49. O número de obstáculos está diretamente relacionado com o critério de clearance, frequência de operação e as alturas das antenas. Caso o utilizador altere o valor de qualquer um destes parâmetros, o sistema procede novamente à extração dos obstáculos tendo em conta os novos valores dos parâmetros e a tabela é atualizada tal como os gráficos que representam os obstáculos.

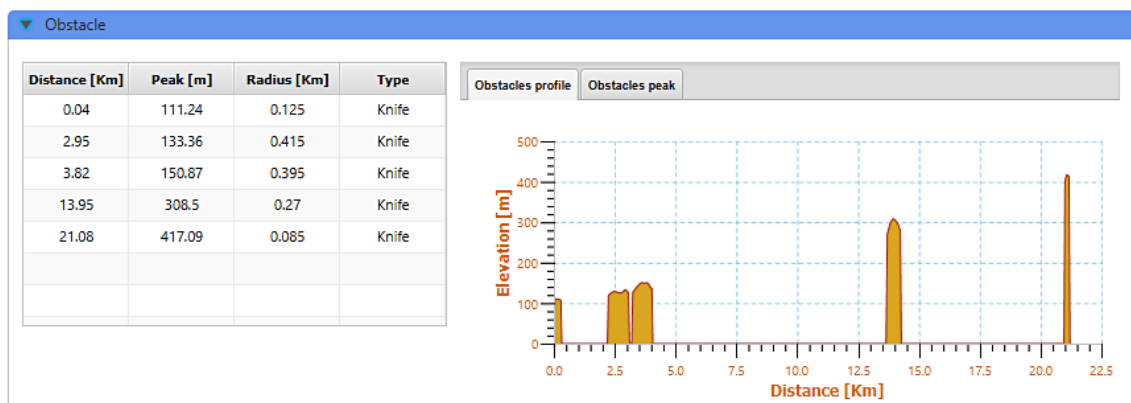


Figura 49 – Tabela com obstáculos extraídos a partir do perfil terreno.

O método pretendido para o cálculo da atenuação devido à difração nos obstáculos é especificado neste módulo. Tal como pode ser observado na Figura 50, nesta versão do *software* existem três métodos, o método ITU P.536-13, Epstein-Petterson e Deygout.

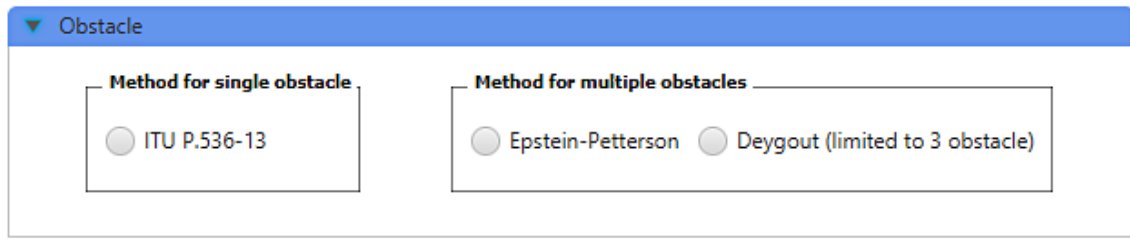


Figura 50 - Métodos disponíveis para cálculos de difração nos obstáculos.

O utilizador poderá também especificar a sensibilidade do recetor associado a um determinado BER neste módulo, tal como se pode observar na Figura 51. Se o valor da sensibilidade do equipamento recetor não for conhecido, o utilizador pode introduzir o valor de alguns parâmetros tais como taxa de transmissão, figura de ruído e relação E_b/N_0 e o sistema irá calcular o valor teórico da sensibilidade. Para tal basta carregar no botão responsável para invocar a função e o resultado do cálculo é disponibilizado na caixa de texto correspondente à sensibilidade.

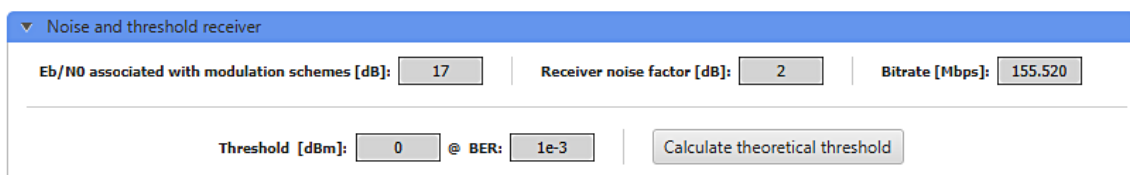


Figura 51 – Secção para cálculo da sensibilidade do recetor.

3.1.1.6. Módulo de relatório de link budget

Este módulo permite visualizar os resultados de todos os cálculos relacionados com o link budget. As informações apresentadas estão divididas em secções e não englobam apenas os resultados, isto é, os parâmetros de entrada também podem ser visualizados em conjunto com os resultados. A título de exemplo, na Figura 52 apresentam-se duas secções da janela principal de relatório de cálculo, que contêm informações relativas às unidades e à atmosfera.

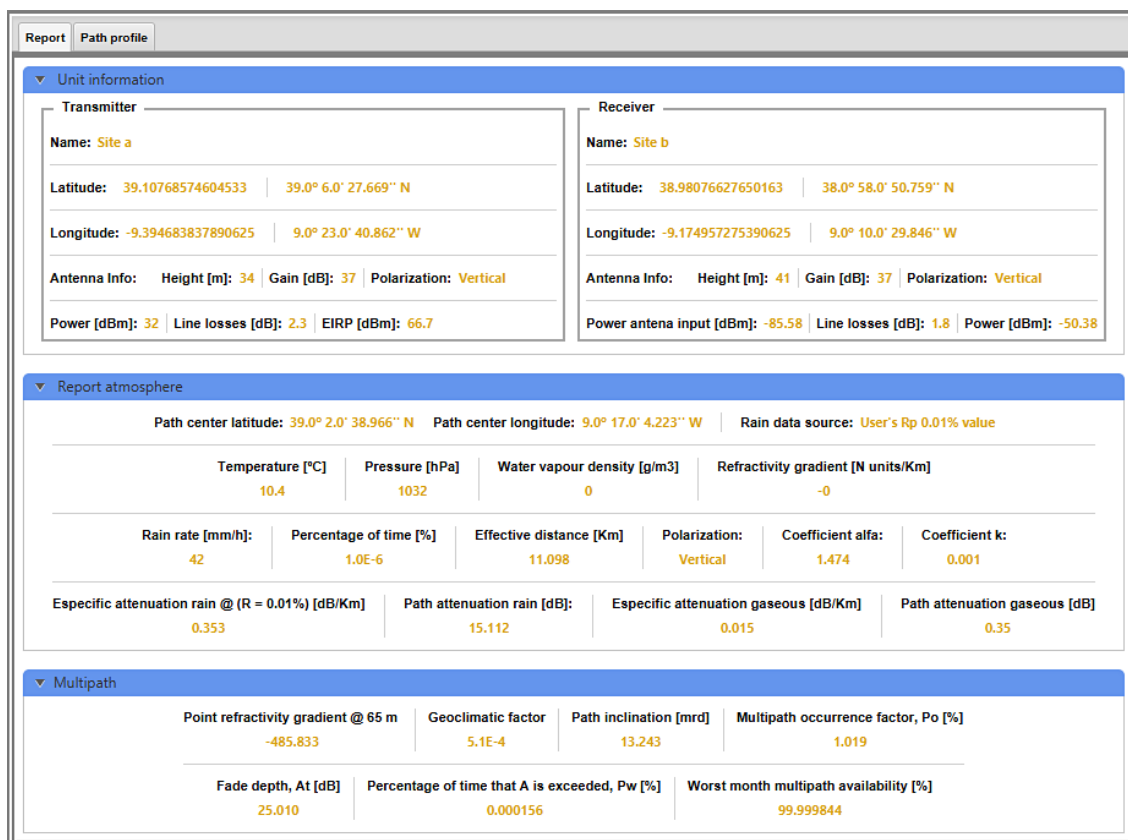
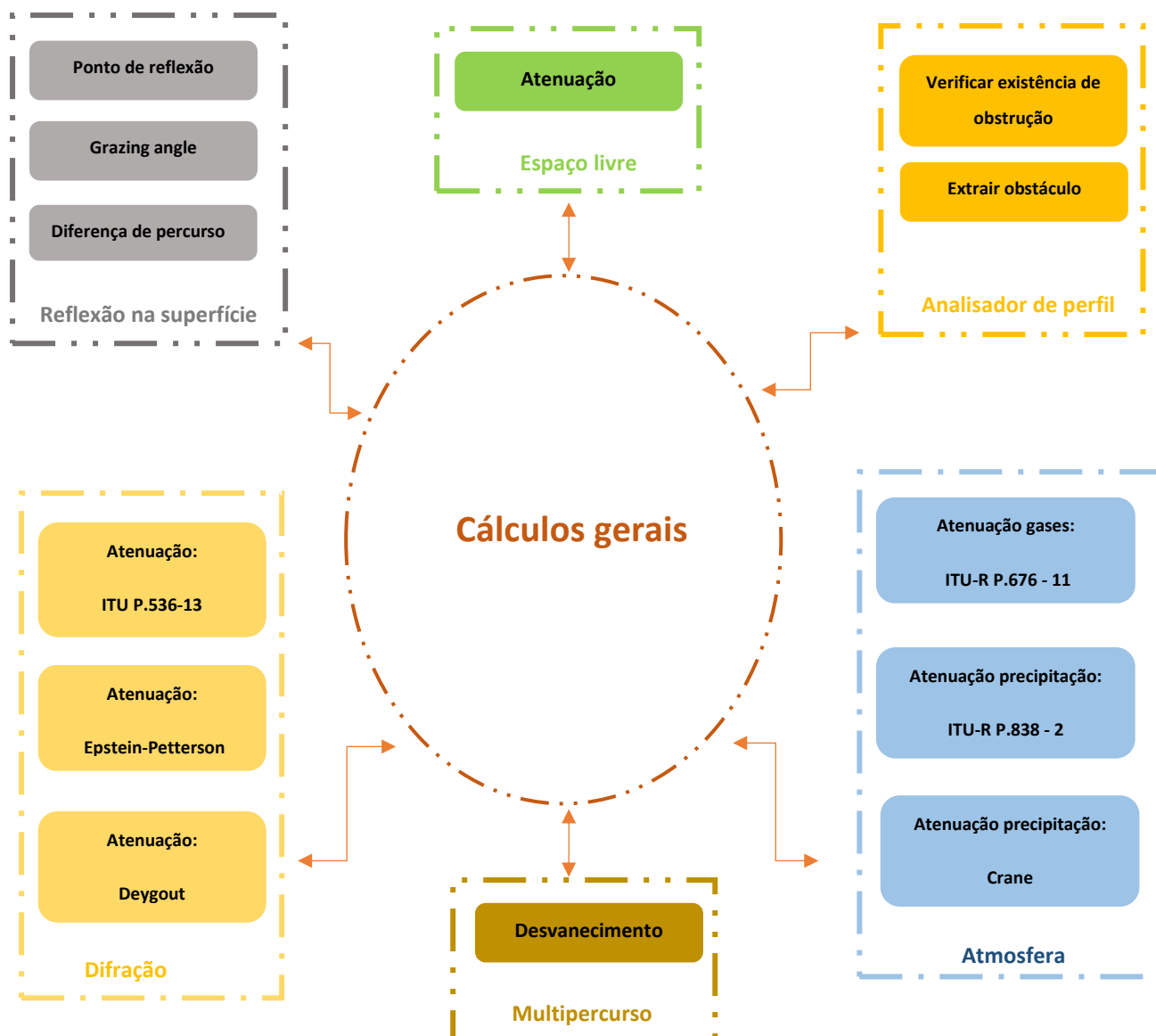


Figura 52 – Secção com resultados dos parâmetros relativo às unidades e à atmosfera.

3.1.1.7. Módulo para cálculos

Este módulo representa o principal módulo onde estão implementados os algoritmos e as funções responsáveis para efetuar os cálculos suportados pelo *software*. O diagrama que se segue, apresenta os principais blocos que compõem este módulo, onde cada bloco é constituído por um ou mais funções que implementam os algoritmos. Os algoritmos implementados são baseados maioritariamente nos métodos das recomendações do ITU-R descritos no capítulo 2.



3.1.1.7.1. Função para calcular a atenuação em espaço livre

Esta função é responsável pelo cálculo da atenuação do sinal em espaço livre dada pela equação (2). A atenuação em espaço livre é dependente da distância e da frequência. A frequência utilizada pelo sistema é a frequência especificada pelo utilizador na configuração da ligação e a distância é a distância calculada a partir das coordenadas geográficas do transmissor e do recetor. Quanto maior for a distância e a frequência maior será a atenuação em espaço livre.

3.1.1.7.2. Função para analisar o perfil do terreno

Esta função, tendo em conta o perfil terreno, localização das unidades, altura das antenas, frequência, fator K e o critério de clearance verifica se as irregularidades do terreno provocam a

obstrução do sinal. Uma ou mais porções do terreno constituem um obstáculo se estes interferirem com o primeiro elipsoide de Fresnel de acordo com o critério definido (normalmente 60 % do raio do primeiro elipsoide de Fresnel). O terreno obstrui a ligação se se verificar uma das seguintes condições:

- A altura da reta que representa o raio direto entre o transmissor e o recetor é inferior à altura do terreno numa determinada posição;
- A altura da reta que representa o raio direto entre o transmissor e o recetor é superior à altura do terreno em todas as posições, mas existem posições onde se verifica a seguinte condição: $h(n) < p \times R_1(n)$, com $h(n)$ altura do raio direto na posição n , p percentagem do elipsoide de Fresnel e $R_1(n)$ raio do primeiro elipsoide de Fresnel.

Uma vez que a altura do raio direto varia com as alturas das antenas do transmissor e do recetor, e o raio do elipsoide de Fresnel varia com a frequência, qualquer alteração dos valores desses parâmetros irá determinar a existência ou não de obstáculos assim como a sua quantidade, bem como o critério de clearance, pois, mantendo os mesmos valores dos restantes parâmetros o sinal poderá ou não estar desobstruído, dependendo do critério que esteja a ser definido. No exemplo da Figura 53, pode-se observar um troço de uma ligação a operar a 3GHz, onde foi definido um critério de clearance de 60%. As alturas das antenas de transmissão e receção são 34 m e 41 m, respetivamente. Pode-se verificar que o sistema através da análise do perfil terreno considerou a existência de três obstáculos.

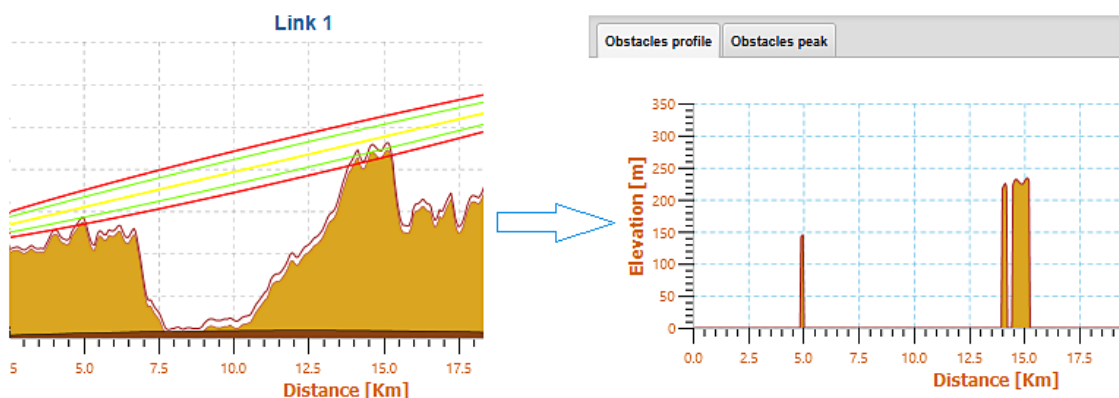


Figura 53 - Troço de ligação com 3 obstáculos.

Mantendo os mesmos valores da frequência e das alturas das antenas, se o critério de clearance for alterado para 20%, pode-se verificar a partir da Figura 54, que o número de obstáculos considerados passa para 1. Isto pelo facto de o sistema considerar que apenas são obstáculos as

porções do terreno que obstruem o elipsoide de Fresnel em mais de 80% do seu raio, pois foi esse o critério utilizado.

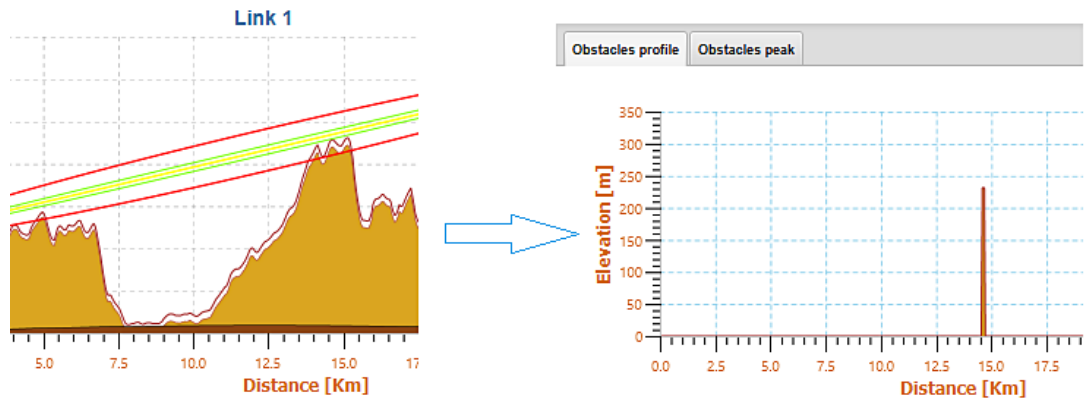


Figura 54 - Troço de ligação com 1 obstáculo.

O sistema considera dois tipos de obstáculos, os obstáculos arredondados e os obstáculos em lâmina. Para tal, foi definida uma extensão de 1 Km. Caso a porção do terreno tenha um diâmetro inferior ao limite é considerado como um obstáculo em lâmina e caso contrário é considerado como um obstáculo arredondado. O diâmetro, tal como se pode observar na Figura 55, corresponde à diferença entre o ultimo ponto cuja elevação é maior ou igual à altura da reta que representa a percentagem do raio do primeiro elipsoide de Fresnel e o primeiro ponto cuja elevação também é maior ou igual à altura da reta que representa a percentagem do raio do primeiro elipsoide de Fresnel.

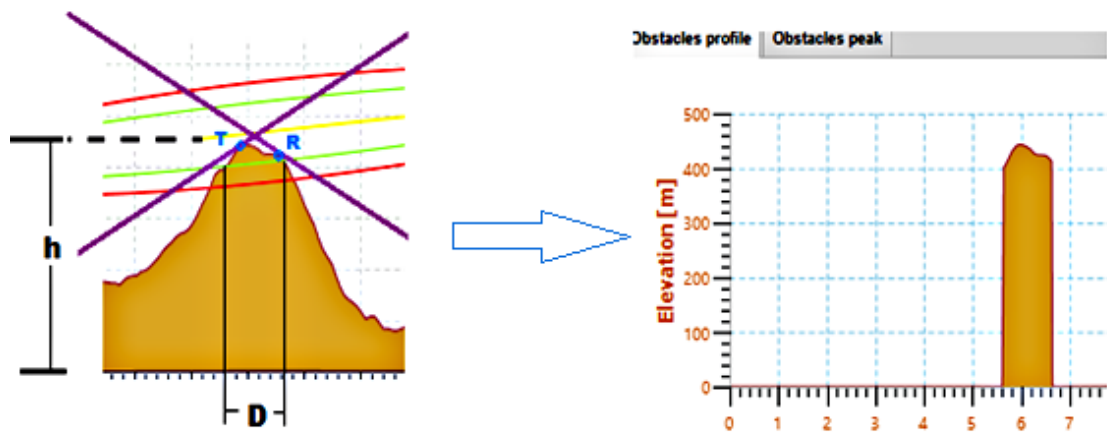


Figura 55 – Obstáculo arredondado extraído a partir do perfil de terreno.

A altura dos obstáculos em lâmina corresponde ao ponto mais elevado da porção do terreno. Para os obstáculos arredondados o sistema calcula duas retas tangentes aos pontos que fazem parte da obstrução e a altura do obstáculo corresponde à interseção entre essas duas retas. As retas são

calculadas tendo em conta o ponto mais próximo do lado do transmissor e do lado do recetor que fazem parte da obstrução, tal como pode ser observado no exemplo da Figura 55 (ponto T e R). Tendo todos os obstáculos identificados o sistema guarda-os numa lista que posteriormente serão utilizados para calcular as perdas por difração.

3.1.1.7.3. Função para calcular as perdas por difração

Esta função é responsável por efetuar os cálculos relacionados com as perdas devido às difrações sobre os obstáculos que foram identificados pela função responsável para identificação dos obstáculos descrito anteriormente. A função implementa três modelos cujos algoritmos foram descritos na secção 2.1.8.

- Método ITU-R P.526 -13 – Este método só é utilizado quando existe apenas 1 obstáculo.
- Método de *Epstein-Petterson* – Este método pode ser utilizado independentemente do número de obstáculos sem qualquer limitação.
- Método de *Deygout* – limitado ao máximo de 3 obstáculos, uma vez que este método tende a apresentar perdas superiores às perdas reais quando o número total de obstáculos for superior a 3. Deste modo, quando o número de obstáculos for superior a 3, mesmo que se escolha o método de *Deygout* o sistema calcula as perdas por difração sobre obstáculos recorrendo ao método de *Epstein-Petterson*.

A razão pela escolha do modelo de *Epstein-Petterson* e *Deygout* é o facto de serem amplamente utilizados como referência no estudo da difração sobre obstáculos. O modelo ITU-R P.526 -13 foi escolhido por utilizar apenas um único obstáculo em todo o percurso, o que facilita o processamento. O *software* dispõe então de 3 modelos tornando possível a comparação dos resultados obtidos por cada um destes métodos.

3.1.1.7.4. Função para calcular a reflexão no terreno

Esta função é responsável pelo cálculo da soma do sinal refletido e do sinal refletido. O sistema considera apenas a existência de um sinal refletido cuja amplitude depende do coeficiente de reflexão, da rugosidade do terreno, da divergência e da diferença de percurso do sinal direto e do sinal refletido. Todo o cálculo é sustentado pelas formulas apresentadas no capítulo 2, secção 2.1.7.

3.1.1.7.5. Função para calcular as atenuações na atmosfera

Esta função é responsável pelo cálculo das atenuações relativas aos fenómenos atmosféricos, e está dividido em dois módulos: o modulo responsável pelo cálculo da atenuação devido aos gases

atmosféricos e o modulo responsável pelo cálculo da atenuação devido à precipitação. No modulo responsável pela atenuação devido aos gases os cálculos das atenuações baseiam-se no método da recomendação ITU-R P.676-11 descrito no capítulo 2, secção 2.1.5. Esta atenuação corresponde à soma da atenuação devido ao vapor de água e devido ao oxigénio, e depende de alguns parâmetros tais como a frequência, temperatura, humidade e polarização do sinal. O *software* utiliza os dados espectroscópicos apresentados na Tabela 27 e Tabela 28 do Anexo A, armazenados em ficheiros, e processa-os em conjunto com os valores dos parâmetros mencionados, disponibilizando valores que correspondem à atenuação especifica devido ao oxigénio, atenuação especifica devido ao vapor de água, atenuação especifica devido aos gases e a atenuação total ao longo da ligação calculada a partir da atenuação especifica devido aos gases e da distância. De modo a verificar o funcionamento do modulo foi calculada, com intervalos de 1 GHz, a atenuação especifica devido aos gases atmosféricos para uma pressão atmosférica de 1013.35 hPa, uma temperatura de 15°C e uma densidade de vapor de água de 7.5 g/m³ (Standard) e 0.0 g/m³ (Dry). Os valores obtidos estão apresentados no gráfico da Figura 56, e como pode ser observado estão em conformidade com os valores apresentados no gráfico da Figura 10, retirado da recomendação ITU-R P.676-10.

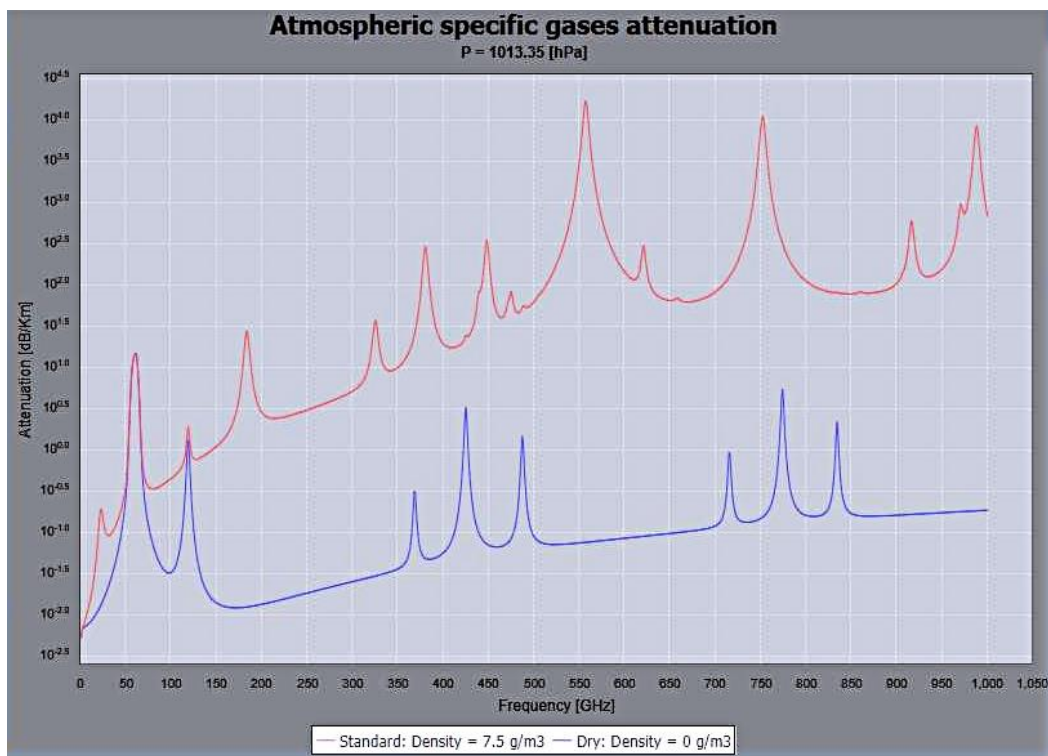


Figura 56 - Atenuação específica devido aos gases, calculada com intervalos de 1 GHz, recorrendo ao modulo do software.

No modulo responsável pela atenuação devido à precipitação os cálculos das atenuações baseiam-se no método do ITU-R fornecido nas recomendações ITU.R P.530 -16 e ITU-R P.838-3 e no método de Crane, todos descritos no capítulo 2, secção 2.1.6. Tal como para a atenuação devido aos

gases, para calcular a atenuação devido à precipitação, relativamente ao método do ITU-R, o *software* utiliza os dados apresentados na Tabela 29 do Anexo A, armazenados em ficheiros, e processa-os em conjunto com os valores dos parâmetros tais como frequência, intensidade de precipitação, percentagem de tempo referente a um ano e distância de ligação. Caso a intensidade de precipitação não seja indicada ou for indicado o valor 0, o sistema procede ao seu cálculo de acordo com o descrito na recomendação ITU-R P.837-6, recorrendo também a dados armazenados em ficheiros que foram obtidos a partir do anexo da mesma recomendação. Estes dados correspondem a dados obtidos através da recolha durante 40 anos pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) a partir dos quais é possível obter a intensidade da precipitação em qualquer localização do planeta, bastando para tal efetuar uma interpolação bilinear, descrita na recomendação ITU-R P.1144, sobre estes ficheiros.

3.1.1.7.6. Função para calcular o desvanecimento multipercuso

Esta função implementa os métodos que permitem prever o desvanecimento devido ao multipercuso. Para tal é necessário obter o valor do gradiente de refratividade pontual da zona geográfica nos 65 metros inferiores da atmosfera não excedida por mais de 1% da média anual. Este valor é calculado a partir de ficheiros armazenados no sistema, que foram obtidos a partir do anexo da recomendação P.453-10. Para tal é necessário efetuar uma interpolação bilinear sobre os ficheiros. A partir desta função é possível calcular o desvanecimento profundo causado pelo multipercuso bem como a percentagem de tempo que este é excedido no mês mais desfavorável médio. Esta função é baseada nos métodos descritos no capítulo 2, secção 2.2.2.

3.1.1.7.7. Função de cálculos gerais

Esta função é responsável pelo cálculo dos restantes parâmetros e interage com as demais funções descritas anteriormente. É nesta função que também se calcula parâmetros tais como margem de desvanecimento, sensibilidade e os demais que serão reportados no resultado final apresentados no módulo do relatório do link budget. As perdas devido aos conectores e cabos também são contabilizadas nesta função.

Capítulo 4

4. Dimensionamento de uma ligação utilizando o software e comparação dos resultados obtidos com os resultados obtidos pelo Pathloss

De forma a testar o funcionamento do *software*, neste capítulo é apresentado um exemplo de dimensionamento de uma ligação por FH utilizando o software. A ligação corresponde a uma ligação digital, por FH, para transmissão de canais TDT (Televisão Digital Terrestre) entre duas estações, que posteriormente serão difundidos por *broadcast* (não abordado nesta dissertação). A distância de ligação é de aproximadamente 40 Km e será realizada entre a zona de Lisboa, mais precisamente o ISEL (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa) e Torres Vedras. A ligação vai operar na banda dos 7GHz e utilizará uma modulação 128 – QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e canal radioelétrico com um débito de 155 Mbps, isto é, os dados serão enviados no primeiro nível hierárquico da hierarquia SDH, em tramas STM-1.

O equipamento rádio considerado é o equipamento da NEC 3000 Series. Este equipamento foi projetado para transmitir sinais STM-1 e OC-3. Opera na banda de frequência de 4 a 11 GHz e utiliza a modulação 68-QAM ou 128-QAM. Todas as características deste equipamento estão apresentadas na Figura 78 do Anexo B.

A antena considerada foi da marca *Andrew Corporation* modelo Andrew HSX4-74. Esta antena possui um ganho de 37 dBi e um diâmetro de 1.2 metros. Trabalha na faixa de frequência entre 7.425 e 7.9 GHz. Todas as características desta antena estão apresentadas na Figura 79 do Anexo C.

Tendo os resultados obtidos, é realizado uma comparação entre os mesmos e os resultados obtidos pelo software PL.

4.1. Software desenvolvido: Percurso direto

As localizações exatas dos dois sites estão apresentadas na Tabela 11. O primeiro site corresponde ao site sito no ISEL e o segundo site situa-se em Torres Vedras.

Tabela 11 - Localização dos sites.

Site	Latitude	Longitude
Lisboa, ISEL	38° 45' 26.59" N	9° 6' 55.72" W
Torres Vedras	39° 6.0' 0.90" N	9° 16' 13.69" W

Recorrendo ao mapa do Google integrado na janela do *software* é possível ver a representação da ligação bem como os sites sobre os dois tipos de mapas disponíveis no GM (Mapa e Satélite), assim como se pode observar na Figura 57.

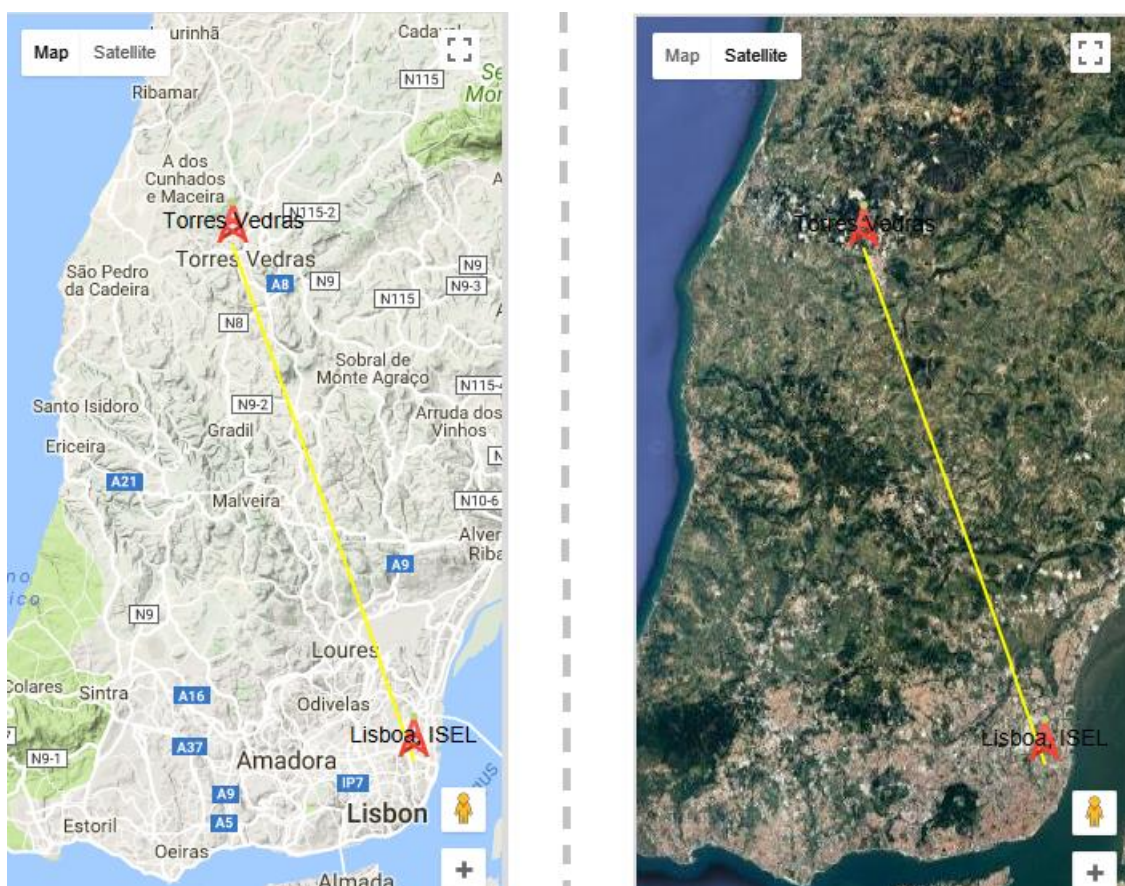


Figura 57 - Representação dos sites e da ligação sobre o mapa do Google.

Tendo em conta o perfil terreno obtido pelo *software*, cuja representação gráfica esta ilustrada na Figura 58 pode-se observar que ao longo do percurso, com cerca de 40.41 Km, o terreno apresenta muitas irregularidades, existindo pontos onde a altura do terreno ultrapassa os 350 metros de altura.



Figura 58 - Perfil terreno da ligação ISEL-Torres Vedras.

Sendo assim, pode-se concluir que, utilizando este percurso, a ligação provavelmente não será estabelecida devido à elevada altitude dos obstáculos que surgem devido às irregularidades do terreno. Nesta condição o mecanismo de propagação dominante será a difração. Pela Figura 59, pode-se observar que não há libertação do primeiro elipsoide de Fresnel e o raio direto está maioritariamente obstruído ao longo do percurso da ligação. Este percurso não oferece nem linha de vista visual nem a linha de vista rádio.

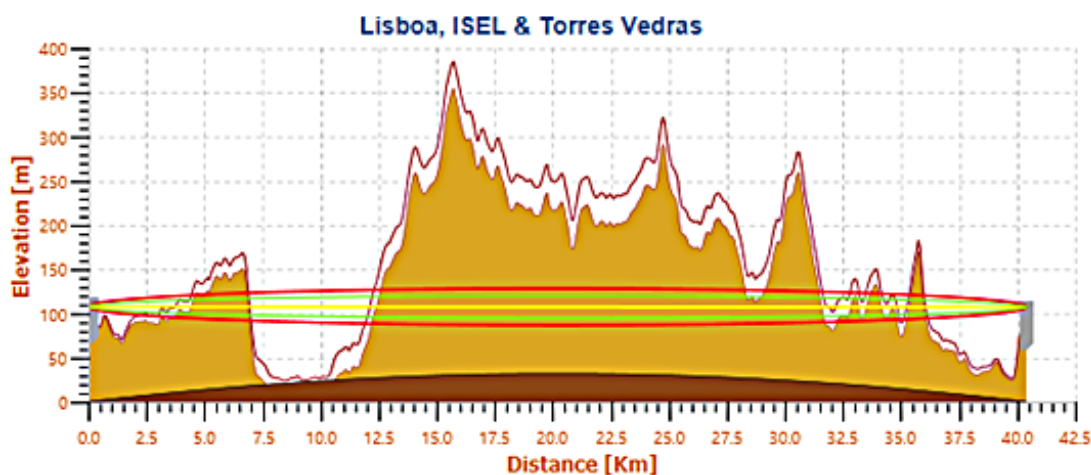


Figura 59 - Representação gráfica da ligação entre Lisboa, ISEL e Torres Vedras.

Para ver o impacto das obstruções provocadas pelas irregularidades do terreno procedeu-se ao cálculo da difração sobre os obstáculos utilizando o *software*. O sistema considerou através da análise do perfil terreno a existência de dois obstáculos, tal como pode ser visto na Figura 59, onde

ambos podem ser idealizados como obstáculos arredondados devido às suas dimensões. O primeiro obstáculo corresponde ao troço de terreno entre 3 e 7 km, aproximadamente, e o segundo obstáculo vai desde 11 km até 36 km, aproximadamente, o que corresponde a mais de 65% da distancia do percurso. O critério de clearance considerado foi de 60%. A Tabela 12 apresenta os resultados das atenuações devido à difração sobre os obstáculos, obtidos pelo *software*, aplicando os métodos de *Epstein-Petterson* e *Deygout* descritos no capítulo 2, secção 2.1.8. Para efeitos de comparação apresenta-se também a atenuação em espaço livre.

Tabela 12 – Atenuação devido aos dois obstáculos, calculado através do método de Petterson e Deygout, causado pelas irregularidades do terreno.

Ligação entre ISEL – Torres Vedras	Difração sobre obstáculos				Espaço livre
	Modelo <i>Epstein-Petterson</i>		Modelo <i>Deygout</i>		Modelo <i>Friis</i>
	Atenuação [dB]	Nº obstáculos considerados	Atenuação [dB]	Nº obstáculos considerados	Atenuação [dB]
	256.23	2	264.51	2	141.47

Para ambos os métodos o sistema considerou a existência de dois obstáculos assim como foi considerada numa primeira fase. Porém, tal como já foi dito, nem sempre o número de obstáculos considerados na altura do cálculo corresponde ao número de obstáculos inicialmente considerados. Isto pelo fato de estes métodos excluïrem os obstáculos que não interferem as sub-ligações que serão criadas à medida que a ligação vai sendo decomposta em duas ligações.

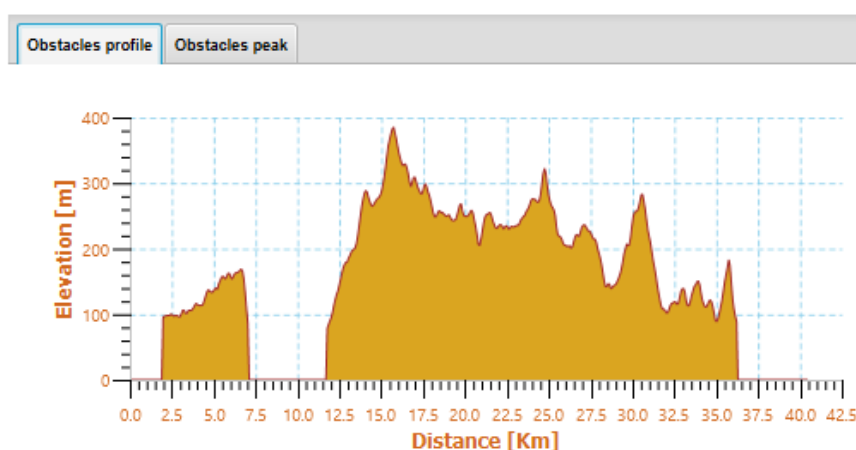


Figura 60 – Obstáculos existentes ao longo do percurso.

Para que nesta ligação existisse linha de vista, considerando um critério de clearance de 60%, tal como se recomenda, as torres de transmissão e receção teriam de ser dimensionadas com uma altura que seria de difícil dimensionamento tanto ao nível dos recursos humanos envolvidos como economicamente. As dimensões máximas das torres normalmente são de 50 metros, valor muito inferior aos 336 e 330 metros, que se verifica neste caso, para o transmissor e o recetor, respetivamente, tal como se pode observar na Figura 61.



figura 61 - Ligação com altura ideal das torres para alcançar a linha de vista.

Uma vez que esta ligação não seria a mais adequada não se procedeu à simulação de outros fenómenos que influenciam a potência do sinal recebido. Estes serão abordados na próxima secção onde a ligação será dividida em duas ligações de modo a oferecer garantias de fiabilidade.

Tal como já foi descrito no capítulo 2, secção 2.3.3, pode-se recorrer ao uso de repetidores em ligações para que seja possível estabelecer um percurso alternativo onde haja a linha de vista. Contudo, nesta versão do *software* não se incluiu os repetidores, e deste modo, as duas ligações serão simuladas e analisadas como se fossem ligações distintas onde cada uma é constituída por um transmissor e um recetor.

A próxima versão deste *software* já irá permitir a utilização dos repetidores para efeitos de simulação bem como as outras funcionalidades, das quais esta primeira versão carece.

4.2. Software desenvolvido: Percurso alternativo

Para assegurar o critério de linha de vista a ligação foi dividida entre em duas ligações. Os sites que constituem cada ligação estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Localização dos sites do percurso alternativo.

Site	Latitude	Longitude
Lisboa, ISEL	38° 45' 41.43'' N	9° 7' 28.54'' W
Malveira	38° 54' 44.81'' N	9° 16' 27.5'' W
Torres Vedras	39° 4' 44.88'' N	9° 14' 51.46'' W

A estação de malveira é composta por um transmissor e um recetor. A representação da ligação e dos sites podem ser vistas na Figura 62.

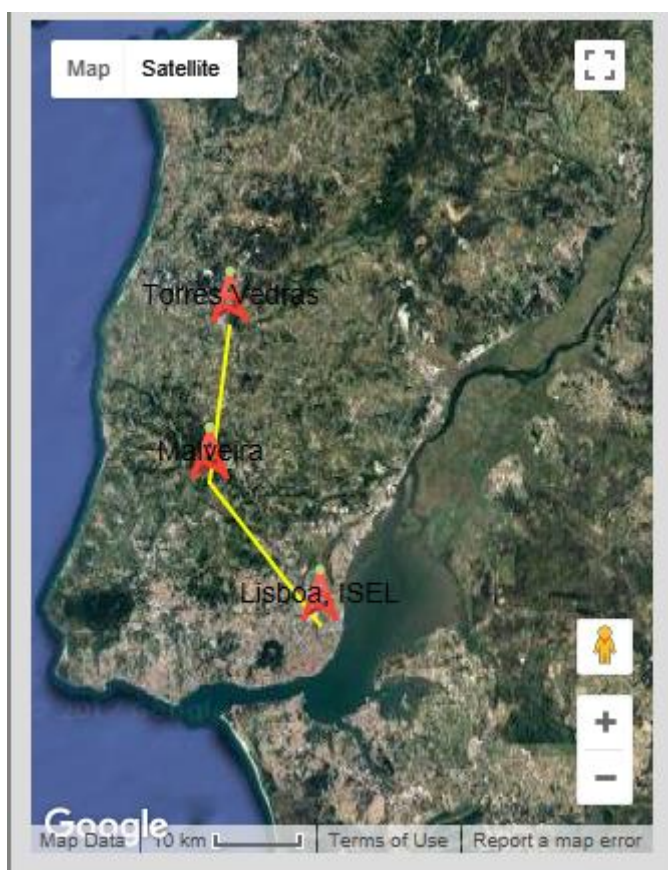


Figura 62 – Sites e ligações do percurso alternativo representados no GM.

4.2.1. Percurso 1: Ligação entre o ISEL e o recetor de Malveira.

O perfil terreno do percurso entre o ISEL e o recetor de Malveira, que por questões de simplificação foi designado de percurso 1, está representado na Figura 63. Este percurso tem uma distância de aproximadamente 21.21 Km.

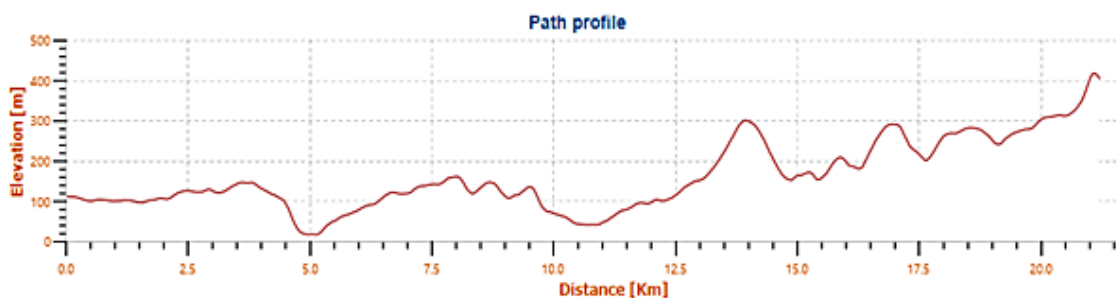


Figura 63 – Perfil terreno ligação entre ISEL e recetor de Malveira.

Para este percurso utilizou-se os parâmetros apresentados na Tabela 14 para efeito do cálculo do link budget.

Tabela 14 – Parâmetros percurso 1 (simplificado).

Parâmetros	
Frequência [GHz]	7
Altura torre ISEL [m]	12
Altura torre Malveira [m]	25
Taxa de precipitação média [mm/h]	42 @ 0.01%
Temperatura [°]	19 (*)
Pressão [hPa]	1020 (*)
Humidade [%]	48 (*)
Densidade vapor de água [g/m ³]	7.5 (*)
Polarização	Vertical
Fator k	1.33
Critério de clearance	60%

(*) Valores obtidos a partir do web service do openweathermap (em 07-11-2017).

Para as alturas das torres de transmissão e receção consideradas e para a frequência de 7 GHz, tal como se pode observar na Figura 64, o sistema determinou que não há qualquer tipo de obstrução ao longo do percurso, existindo assim tanto a linha de vista visual como a linha de vista rádio.

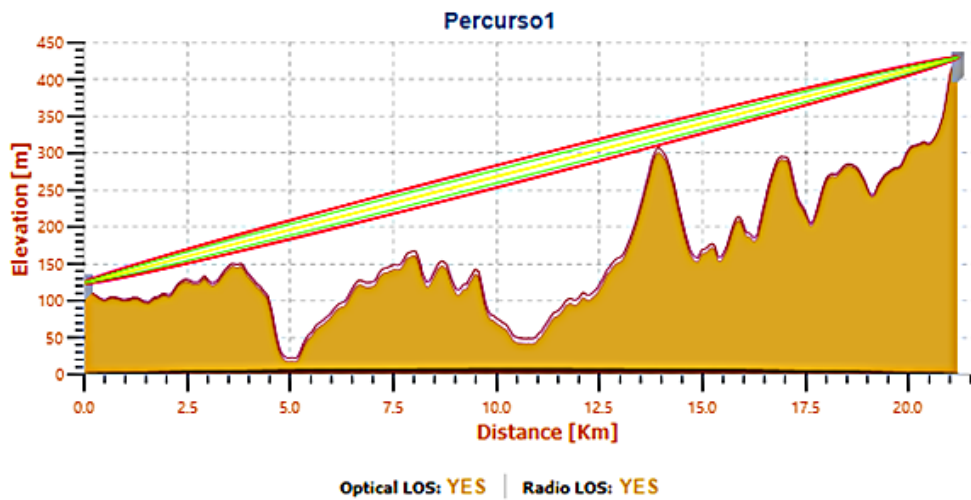


Figura 64 – Ligação percurso 1 sem obstrução.

Porém, é importante referir que com estas alturas das antenas, tendo em conta o perfil terreno, não é possível que a ligação se opere a uma frequência inferior a 7 GHz. Isto porque ao diminuir a frequência o raio do primeiro elipsoide de Fresnel aumenta e uma vez que não existe uma folga significativa entre o terreno e o mesmo, este poderia ser obstruído principalmente a 3,5 e 14 km do transmissor. Uma solução seria aumentar a altura das antenas de modo se conseguir uma folga significativa entre o primeiro elipsoide de Fresnel e qualquer ponto do terreno ao longo de todo o percurso.

Tendo em conta os parâmetros relativamente à atmosfera, os valores da atenuação devido aos gases e da atenuação devido à precipitação obtidos pelo *software* encontram-se apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Atenuação atmosférico percurso 1.

Atenuação devido aos gases e à precipitação		
Precipitação	Atenuação específica não excedida mais de 0.01% do tempo [dB/Km]	0.353
	Atenuação no percurso total não excedida mais de 0.01% do tempo [dB]	3.649
	Atenuação no percurso total não excedida mais de 0.001% do tempo [dB]	7.458
	Atenuação no percurso total não excedida mais de 0.0001% do tempo [dB]	11.920
	Atenuação no percurso total não excedida mais de 0.00001% do tempo [dB]	14.671
Gases	Atenuação específica [dB/Km]	0.013
	Atenuação no percurso total [dB]	0.28

A influência do sinal refletido pelo solo é importante quando este tem uma potência suficientemente elevada capaz de interferir construtivamente ou destrutivamente com o sinal direto de forma significativa. A potência do sinal refletido na antena recetora depende da directividade da antena transmissora, altura das antenas acima da superfície terrestre, natureza da superfície refletora e distância do percurso. De modo determinar um possível ponto de reflexão especular, de acordo com o método descrito em [7], aumentou-se o raio do elipsoide de Fresnel até este tocar a superfície terrestre. Deste modo foi possível verificar que o primeiro ponto mais próximo do transmissor onde o elipsoide toca a superfície terrestre dista a aproximadamente 3.65 km do transmissor, tal como se pode observar na Figura 65.

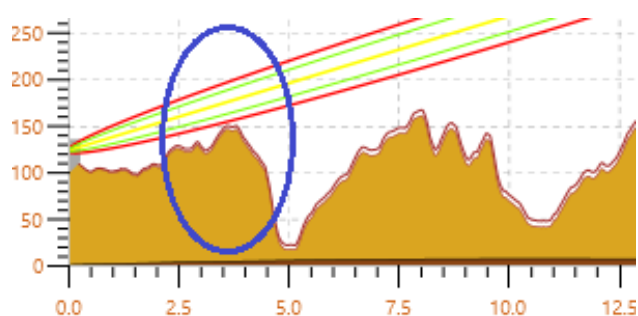


Figura 65 - Possível área de reflexão especular.

Depois da identificação da possível zona de reflexão especular, configurou-se os parâmetros para que o sistema procedesse ao cálculo. O valor dos parâmetros utilizados então representados na Figura 18.

Tabela 16 – Parâmetros para efeito de cálculo de reflexão no solo.

Parâmetros	Valor
Permitividade relativa do solo na área de reflexão	30
Condutividade do solo na área de reflexão	0.01
Distância do ponto de reflexão do transmissor	3.65

O gráfico da Figura 66 permite visualizar que o sinal refletido consegue chegar ao recetor sem sofrer qualquer tipo de obstrução. Uma boa solução será diminuir ligeiramente a altura da antena recetora assim este estaria protegido de possíveis reflexões devido ao pico existente a cerca de 14 km do transmissor.

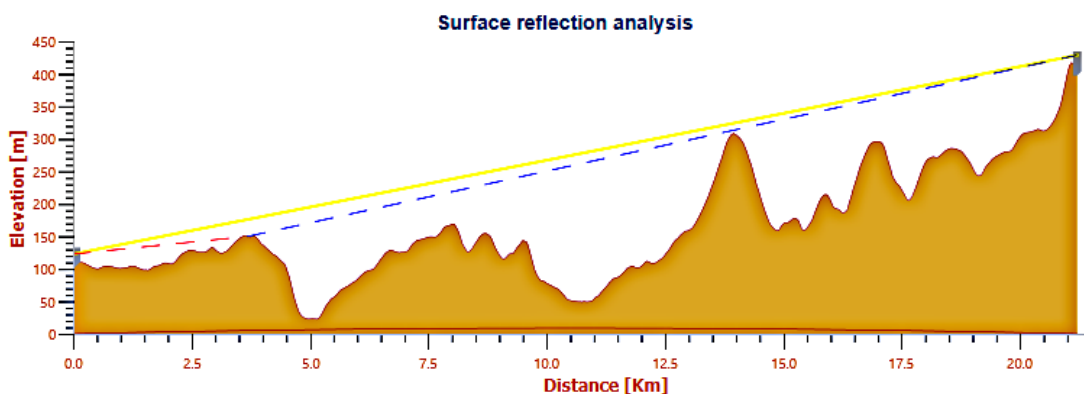


Figura 66 - Possível zona de reflexão especular.

Obteve-se os parâmetros calculados, cujos valores estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros calculados associados à reflexão especular.

Parâmetros	Valor
Grazing angle	0.039 °
Fator de divergência	0.92
Modulo do coeficiente de reflexão	0.29
Coeficiente de reflexão efetivo	0.27
Rugosidade da área	-

Para calcular a margem de desvanecimento é necessário que se conheça a sensibilidade ou a potência limiar do recetor. Esta sensibilidade está associada a um determinado BER tal como já foi descrito no capítulo 2, secção 2.2.3. Tendo em conta o equipamento de rádio que se assumiu que irá ser utilizado na ligação, a margem de desvanecimento irá ser calculada relativamente à sensibilidade deste equipamento. Porém, uma vez que o *software* permite, na ausência de valores de sensibilidade do equipamento rádio, proceder ao cálculo da sensibilidade teórica, foi efetuado o cálculo de modo a que posteriormente se verificasse o impacto de utilizar o valor teórico no cálculo da margem de desvanecimento em vez do valor disponibilizado pelo fabricante. Os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo, a partir dos quais obteve-se uma sensibilidade de -73.08 dBm e -69.08 dBm para o BER = 10^{-3} e BER = 10^{-6} , respetivamente, estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores utilizados para calcular o valor teórico da sensibilidade do recetor.

Parâmetros	Unidade	Valor
E_b/N_0	dB	17 (*)
Fator de ruído do recetor	dB	0.92
Taxa de transmissão	Mbps	0.29

(*) Valor obtido a partir da curva teórica E_b/N_0 vs BER.

Sem entrar em mais pormenores apresentam-se em seguida, aTabela 19 onde constam os valores de todos os parâmetros utilizados para efetuar o cálculo do link budget e os valores dos parâmetros obtidos depois do cálculo.

Tabela 19 - Tabela resumo do link budget da ligação entre o transmissor do ISEL e o recetor de Malveira.

Ligação: Lisboa, ISEL - Malveira	
Transmissor	
Nome do site	Lisboa, ISEL
Latitude	38° 45' 41.43''
Longitude	09° 07' 28.54''
Altura da antena [m]	12.00
Ganho da antena [dBi]	37.00
Perdas total nos cabos e conectores [dB]	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1
Potência emitida [dBm]	32.00
EIRP [dBm]	66.00
Recetor	
Nome do site	Malveira
Latitude	38° 54' 44.81''
Longitude	09° 16' 27.5''
Altura da antena [m]	25.00
Ganho da antena [dBi]	37.00
Perdas total cabos e conectores [dB]	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻⁶	- 70.40
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻³	- 73.20
Potência disponível na entrada da antena [dBm]	-70.15

Potência nominal recebida [dBm]	-36.15
Ligação	
Distância [Km]	21.21
Frequência [GHz]	7.00
Comprimento de onda [m]	0.043
Modulação	128 - QAM
Taxa de transmissão [Mbps]	155.00
Fator k	1.33
Raio equivalente da terra [Km]	8472.13
Obstáculos	
Critério de clearance [%]	60.00
Número de obstáculos	0.00
Método para cálculo de difração	Deygout
Atenuação devido a difração sobre obstáculos [dB]	0.00
Atmosfera	
Taxa de precipitação @ 0.01% [mm/h]	42.00
Gradiente de refratividade [N unit/Km]	-37.44
Porcentagem do tempo para obter intensidade de precipitação [%]	0.01
Atenuação específica devido à precipitação [dB/km]	0.353
Distância efetiva [Km]	10.369
Coefficiente alfa para chuva	1.474
Coefficiente k para chuva	0.001
Polarização	Vertical
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.01% [dB]	3.649
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.001% [dB]	7.458
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.0001% [dB]	11.920
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.00001% [dB]	14.119
Atenuação específica devido ao oxigênio [dB/km]	0.0075
Atenuação específica devido ao vapor de água [dB/km]	0.0056
Atenuação específica devido aos gases [dB/km]	0.013
Atenuação do percurso devido aos gases [dB]	0.28
Atenuação atmosférica [dBm]	14.399

Multipercurso	
Gradiente de refratividade pontual dN_1 [N units]	-417.01
Fator geoclimático K	3.49×10^{-4}
Inclinação do percurso ϵ [mr]	14.42
Desvanecimento profundo requerida, A [dB]	37.33
Fator de ocorrência de propagação por trajetos múltiplos, P_0 [%]	1.019
Desvanecimento profundo de referência, A_t [dB]	25
Fator q'_a	-
Fator q_t	-
Fator q_a	-
Porcentagem de tempo que se excede, M [%]	0.000194
Reflexão no solo	
Distância do ponto reflexão do transmissor, D1 [Km]	3.59
Tipo de solo	Solo molhado
Condutividade do solo	30
Permitividade relativa do solo	0.01
Fator de divergência	0.92
Coefficiente de reflexão efetivo	0.09
Grazing angle [°]	0.22
Diferença de percurso [m]	$9.0e-5$
Geral	
Atenuação espaço livre [dB]	135.87
Margem de desvanecimento @ BER 10^{-6} [dB]	34.25
Margem de desvanecimento @ BER 10^{-3} [dB]	37.33
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10^{-6} [dB]	22.659
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10^{-3} [dB]	25.33
Disponibilidade anual de chuva [%]	100
Disponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [%]	99.999811
Indisponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [seg]	5.2

4.2.2. Percurso 2: Ligação entre o transmissor de Malveira e Torres Vedras

O percurso 2 corresponde à ligação entre o transmissor de Malveira e o recetor de Torres Vedras. Tem uma distância de aproximadamente 18.68 km e a representação do seu perfil terreno está ilustrada na Figura 67.

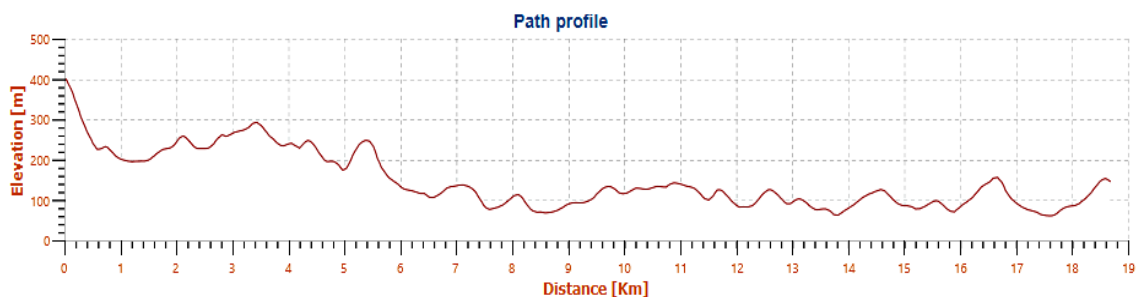


Figura 67 - Perfil terreno ligação entre transmissor de Malveira e torres Vedras.

A antena de transmissão e receção estão a 5 e 10 metros acima do solo, respetivamente, e a frequência de operação é de 7 GHz. Tal como se pode observar no gráfico da Figura 68, nesta ligação há linha de vista visual e linha de vista rádio, pois tanto o raio direto como o primeiro elipsoide de Fresnel estão desobstruídos.

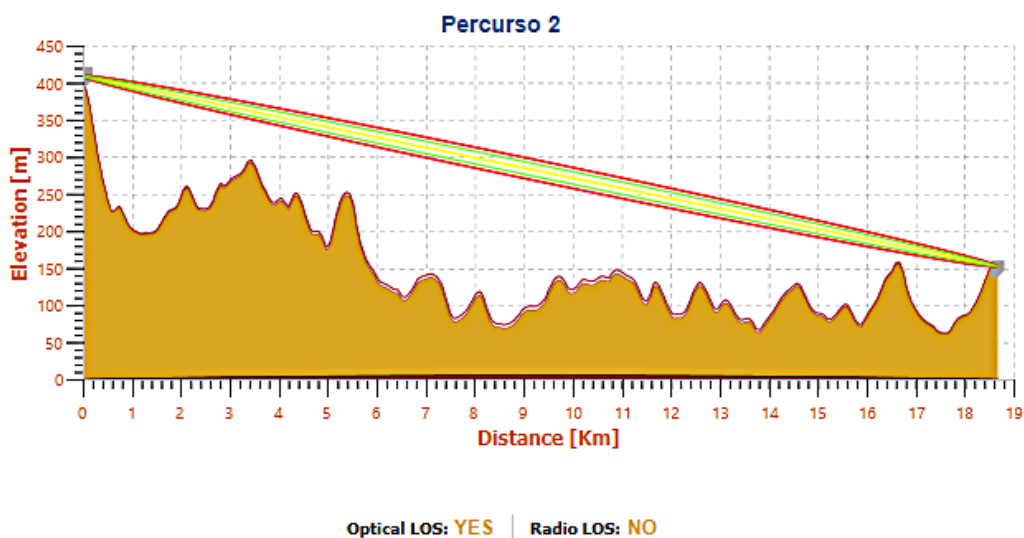


Figura 68 – Ligação percurso 2 sem obstrução.

Ainda pode-se observar claramente que ao contrário do que acontece no percurso 1, o perfil terreno desta ligação permite que a ligação opere mesmo a 1 GHz, garantindo mesmo assim a linha de vista, de acordo com o critério de 60% de libertação do primeiro elipsoide de Fresnel. No exemplo da Figura 69, pode-se observar que para a frequência de 1GHz, a única localização onde o primeiro

elipsidade de Fresnel é obstruído corresponde à distância de 16,67 Km do transmissor. Porém, tendo como critério de obstrução a libertação de pelo menos 60% do raio do primeiro elipse de Fresnel, pode-se concluir que a ligação se encontra em linha de vista.

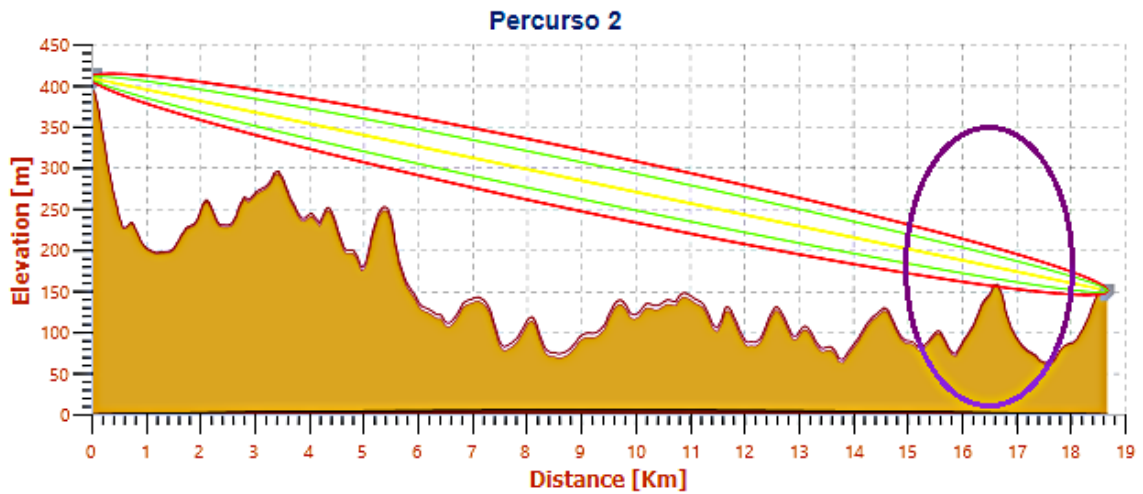


Figura 69 – Representação da ligação do percurso 2 a operar a 1 GHz.

Esta zona, tal como mostra a Figura 70, é uma zona onde provavelmente pode ocorrer a reflexão especular. Para efeitos de cálculos relacionados com a reflexão especular foram utilizados os mesmos valores dos parâmetros apresentados na Tabela 16.

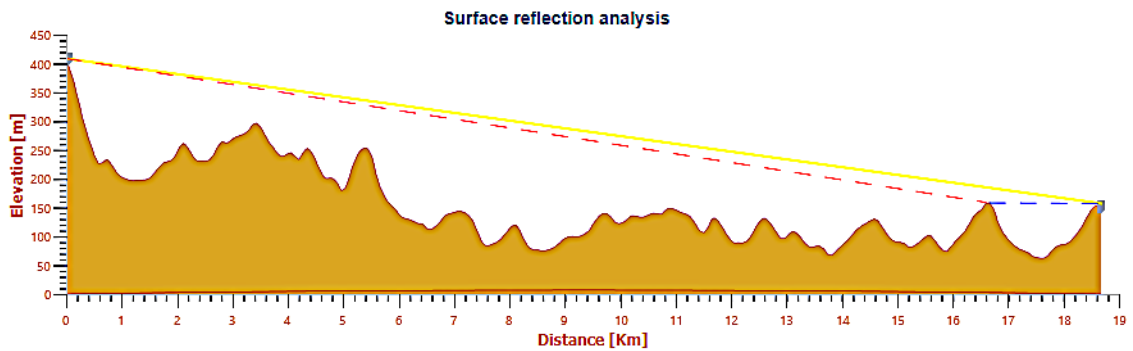


Figura 70 – Reflexão especular no percurso 2.

Os procedimentos para o cálculo geral do link budget deste percurso é o mesmo utilizado no percurso 1 descrito na secção anterior. Desta forma, apresenta-se apenas a Tabela 20 que contém o resumo dos parâmetros de entrada e os parâmetros calculados desta ligação.

Tabela 20 - Tabela resumo do link budget da ligação entre o transmissor de Malveira e o recetor de Torres Vedras.

Ligação: Malveira – Torres Vedras	
Transmissor	
Nome do site	Malveira
Latitude	38° 54' 44.81''
Longitude	09° 16' 27.50''
Altura da antena [m]	5.00
Ganho da antena [dBi]	37.00
Perdas total nos cabos e conectores [dB]	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1
Potência emitida [dBm]	32.00
EIRP [dBm]	66.00
Recetor	
Nome do site	Torres Vedras
Latitude	39° 04' 44.88''
Longitude	09° 14' 51.46''
Altura da antena [m]	10.00
Ganho da antena [dBi]	37.00
Perdas total cabos e conectores [dB]	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻⁶	- 70.40
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻³	- 73.20
Potência disponível na entrada da antena [dBm]	-69.06
Potência nominal recebida [dBm]	-35.06
Ligação	
Distância [Km]	16.68
Frequência [GHz]	7.00
Comprimento de onda [m]	0.043
Modulação	128 - QAM
Taxa de transmissão [Mbps]	155.00

Fator k	1.33
Raio equivalente da terra [Km]	8472.13
Obstáculos	
Critério de clearance [%]	60.00
Número de obstáculos	0.00
Método para cálculo de difração	Deygout
Atenuação devido a difração sobre obstáculos [dB]	0.00
Atmosfera	
Taxa de precipitação @ 0.01% [mm/h]	42.00
Gradiente de refratividade [N unit/Km]	-37.44
Porcentagem do tempo para obter intensidade de precipitação [%]	0.01
Atenuação específica devido à precipitação [dB/km]	0.353
Distância efetiva [Km]	10.369
Coefficiente alfa para chuva	1.474
Coefficiente k para chuva	0.001
Polarização	Vertical
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.01% [dB]	3.354
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.001% [dB]	6.857
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.0001% [dB]	10.90
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.00001% [dB]	13.532
Atenuação específica devido ao oxigênio [dB/km]	0.0075
Atenuação específica devido ao vapor de água [dB/km]	0.0056
Atenuação específica devido aos gases [dB/km]	0.014
Atenuação do percurso devido aos gases [dB]	0.248
Atenuação atmosférica [dBm]	13.78
Multipercurso	
Gradiente de refratividade pontual dN_1 [N units]	-403.28
Fator geoclimático K	3.10×10^{-4}
Inclinação do percurso ϵ [mr]	14.51
Desvanecimento profundo requerida, A [dB]	38.39
Fator de ocorrência de propagação por trajetos múltiplos, P_0 [%]	1.019
Desvanecimento profundo de referência, A_t [dB]	25

Fator q'_a	-
Fator q_t	-
Fator q_a	-
Porcentagem de tempo que se excede, M [%]	0.000146
Reflexão no solo	
Distância do ponto reflexão do transmissor, D1 [Km]	3.59
Tipo de solo	Solo molhado
Condutividade do solo	30
Permitividade relativa do solo	0.01
Fator de divergência	0.92
Coefficiente de reflexão efetivo	0.09
Grazing angle [°]	0.22
Diferença de percurso [m]	9.0e-5
Geral	
Atenuação espaço livre [dB]	134.77
Margem de desvanecimento @ BER 10 ⁻⁶ [dB]	35.38
Margem de desvanecimento @ BER 10 ⁻³ [dB]	38.39
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10 ⁻⁶ [dB]	21.85
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10 ⁻³ [dB]	24.85
Disponibilidade anual de chuva [%]	100
Disponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [%]	99.999852
Indisponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [s]	3.83

4.3. Comparação entre o software desenvolvido e os existentes

Tal como já foi mencionado a simulação é indispensável no dimensionamento de ligações por FH pois, esta permite reduzir o tempo despendido na análise do percurso de propagação bem como o impacto da variação de quaisquer parâmetros.

Nesta secção são descritos de forma resumida dois *softwares* que possibilitam a simulação de ligações por FH.

Posteriormente são realizadas simulações no PL (*Pathloss*) recorrendo aos mesmos parâmetros utilizados nas simulações no software desenvolvido para que posteriormente se proceda à comparação dos mesmos.

4.3.1. Rádio Mobile

O Radio Mobile é um *software* desenvolvido por Roger Coudé de distribuição gratuita que permite simular ligações ponto a ponto e ligações ponto multiponto [43]. Pode ser instalado no PC depois de efetuado o download em [44] ou pode ser utilizado online através de [45]. Relativamente às ligações ponto a ponto, o *software* fornece diversas opções em detalhe tais como a potência do sinal em qualquer ponto do percurso, as perdas por difração em obstáculos, as interferências entre estações etc. De acordo com as localizações das estações, tal como se observa na Figura 71, o *software* constrói automaticamente o percurso entre o transmissor e o recetor no mapa digital, mostra o elipsoide de Fresnel, as alturas das antenas, a tolerância devido à curvatura da terra, o *azimuth* e a elevação entre outras informações relevantes.

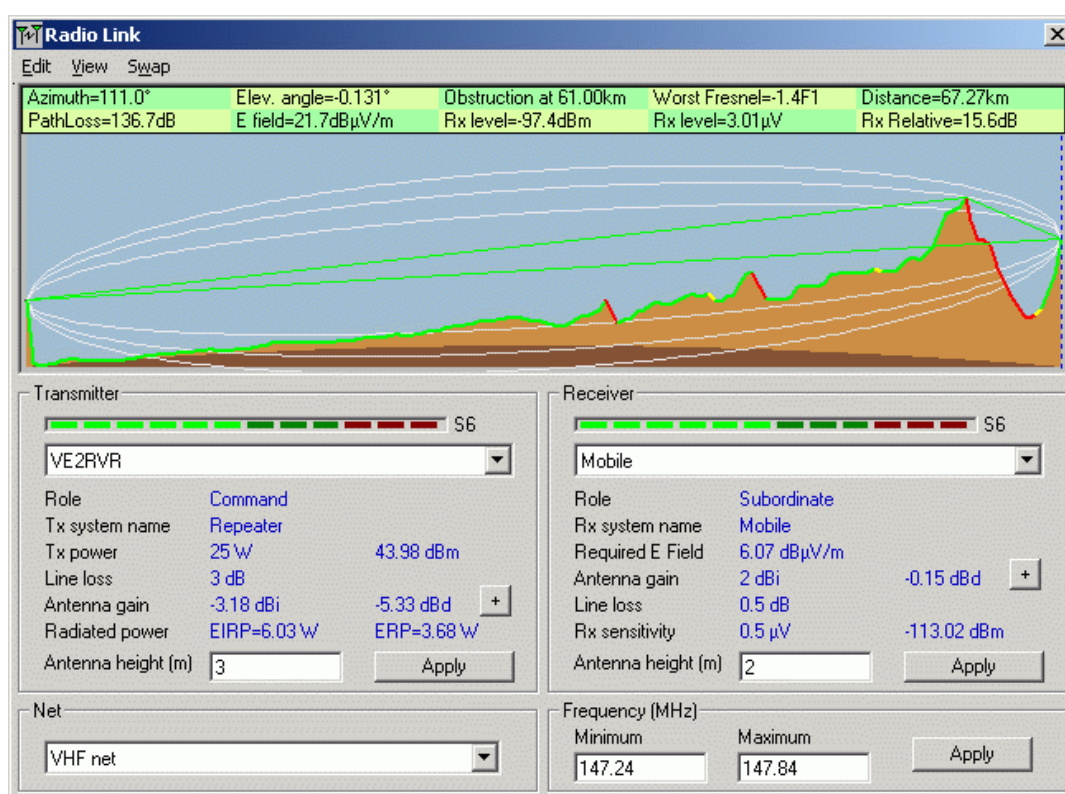


Figura 71 – Interface gráfica do Radio Mobile com uma ligação ponto a ponto [42].

O *software* trabalha com mapas de elevação digitais, STRM (*Space Shuttle Radar Terrain Mapping Mission*) que podem ser adquiridos através de download no site da USGS (*U. S. Geological Survey*) [46]. Uma das vantagens é que depois de efetuar o download não será necessário um acesso

à internet para trabalhar com as informações do terreno. Possibilita também a integração de fotografias e diversos tipos de mapas. A partir de ficheiros Excel o utilizador pode introduzir antenas personalizadas. Em relação à simulação de ligações ponto a ponto, este *software* possui algumas desvantagens uma vez que apenas utiliza o modelo Longley-Rice para efeitos de cálculo de atenuação devido à difração sobre obstáculos, não considera a atenuação devido à precipitação e aos gases.

4.4.2. Pathloss

O PL é um *software* criado pela *Contract Telecommunication Engineering*, no Canadá sendo bastante utilizado pelos operadores de telecomunicações para o planeamento de ligações ponto a ponto e ponto multiponto. Permite simular ligações que operam em frequências que vão desde 30 MHz até 100 GHz. O *software* não tem distribuição gratuita. Segundo [47] o preço do programa ronda os 2800.00 CAD o que equivale a aproximadamente 1800 eur. Em [48], indicam que o suporte para a versão anterior do programa, isto é, o PL 4, é de 350.00 CAD, aproximadamente 233 eur. Na sua versão atual há disponíveis diversas opções de licença tais como: licença de programa básico para ligações ponto a ponto, licença de programa para ligações ponto multiponto, licença de programa para análise de interferências.

Destaca-se aqui o programa básico para ligações ponto a ponto. Este programa permite visualizar uma rede e os recursos de ligação. Apresenta secções de dados do terreno, antenas, difração, análise de transmissão e reflexão. Suporta diversos tipos de mapas digitais tais como *STRM hgt and bill files*, *USGS – NED (United States Geological Survey – national elevation data)*, *DTED (Digital Terrain Elevation Data) Canadian CDED (Canadian Digital Elevation Data) files*. Para o cálculo do link budget utiliza diversos algoritmos associados a cálculos de multipercurso, desvanecimento devido à precipitação, difração, análise de ductos etc. Este *software* é bastante robusto e complexo. A Figura 72 apresenta as 4 possíveis configurações da versão 5 deste *software*.

	Pathloss 5 Basic (PL50B)	Pathloss 5 PTMP & Coverage (PL50C)	Pathloss 5 Interference (PL50I)	Pathloss 5 Total (PL50T)
Network GIS Display	♦	♦	♦	♦
Create PTP Links	♦	♦	♦	♦
Design Links	♦	♦	♦	♦
Edit-Modify Links	♦	♦	♦	♦
Passive Repeaters	♦	♦	♦	♦
Thematic mapping	♦	♦	♦	♦
Clutter graphical backdrop	♦	♦	♦	♦
Vector graphics backdrop	♦	♦	♦	♦
Elevation backdrop	♦	♦	♦	♦
3D Terrain backdrop	♦	♦	♦	♦
Performance reports	♦	♦	♦	♦
ODBC interface	♦	♦	♦	♦
Route Master	♦	♦	♦	♦
Create PTMP-Base stations		♦		♦
Local study display (Heat map for a single site)		♦		♦
Inter and Intra system interference for PTP links			♦	♦
Area study display (Heat map for multiple sites)				♦
Inter and Intra system interference for PTMP links				♦
Standalone link display				
Profile generation	♦	♦	♦	♦
Antenna height calculations	♦	♦	♦	♦
Diffraction analysis	♦	♦	♦	♦
Reflection & Multipath Analysis	♦	♦	♦	♦
Transmission analysis	♦	♦	♦	♦
Detailed reporting	♦	♦	♦	♦

Figura 72 - Funcionalidade do Pathloss [48].

Na próxima secção apresentam-se resultados de simulações efetuados para as ligações descritas na secção anterior utilizando o *software* PL.

4.4.2.1. Pathloss: Percurso direto

Este percurso corresponde ao percurso descrito no capítulo 4, secção 4.1. As localizações dos sites estão apresentadas na Tabela 11. O perfil terreno obtido no PL está representado na Figura 73,

sendo possível observar que o perfil terreno obtido pelo mesmo é igual ao perfil terreno obtido pelo software cuja representação está ilustrada na Figura 59. Tal como se pode observar o raio direto está maioritariamente obstruído ao longo do percurso e não há libertação do primeiro elipsoide de Fresnel.

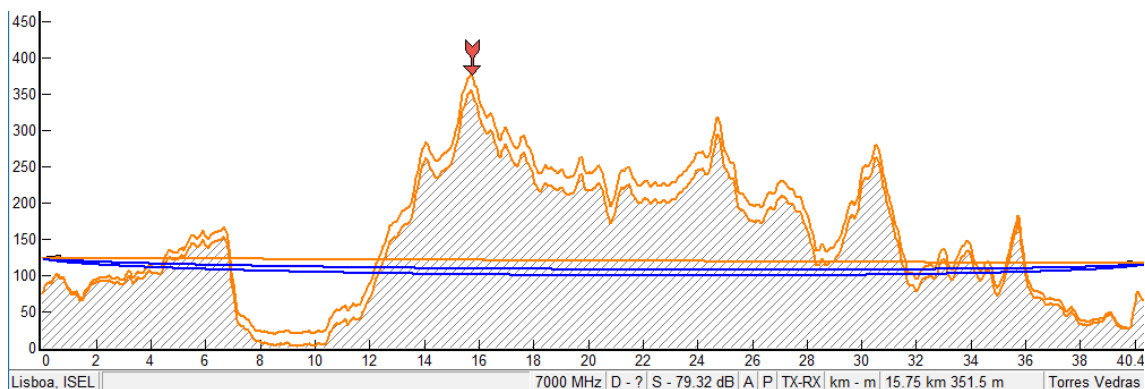


Figura 73 - Perfil terreno do percurso direto.

Uma vez que existem obstáculos ao longo do percurso é necessário determinar a atenuação causada pelos obstáculos. O PL divide os algoritmos de cálculo de difração em dois tipos: algoritmos automáticos onde o cálculo de difração é feito tendo em conta a análise do perfil terreno e um conjunto de regras que determinam quais os algoritmos a serem combinados, e os algoritmos manuais onde o cálculo é feito de forma manual, isto é, o utilizador terá de analisar o perfil terreno e decidir qual algoritmo quer utilizar e em qual localização ao longo do percurso. A Tabela 21 apresenta todos os algoritmos disponíveis no PL para calcular a difração.

Tabela 21 - Algoritmos de difração disponíveis no PL.

Algoritmo	Automático	Manual
Pathloss	✓	
TIREM (National Spectrum Managers Association)	✓	
MSMA (Terrain Integrated Rough Earth Model)	✓	
Knife Edge		✓
Height gain		✓
Longley & Rice Irregular Terrain		✓
Two ray optics		✓
Tree - building loss		✓

O algoritmo *Pathloss* é o algoritmo onde, tal como se pode observar na Figura 74, é possível configurar um conjunto de parâmetros e escolher se é o método de Deygout ou o método de Epstein-Peterson a ser utilizado.

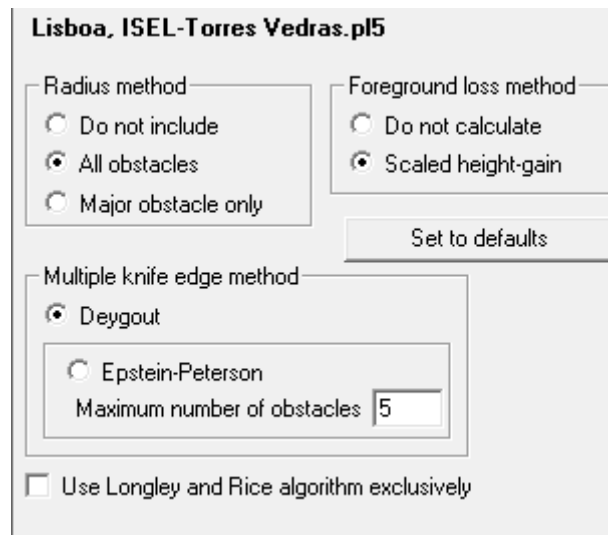


Figura 74 - Configuração do algoritmo de difração pathloss.

Na Tabela 22 apresenta-se o valor da atenuação devido à difração associado a cada um dos métodos.

Tabela 22 - Perdas devido à difração associado a cada algoritmo do PL.

Algoritmo	Atenuação [dB] PL	Atenuação [dB] Software
Pathloss: Deygout	80.66	264.51
Pathloss: Epstein & Peterson	80.66	256.23
TIREM (National Spectrum Managers Association)	68.55	-
MSMA (Terrain Integrated Rough Earth Model)	177	-
Knife Edge	107	-

O PL dispõe de um algoritmo onde é possível calcular a altura ótima da antena de acordo com o critério de clearance. Foi definida o critério de 60% de libertação do elipsoide de Fresnel. Tal como se pode observar na Figura 75, para satisfazer o critério de espaço livre, seria necessário torres de emissão e receção cuja existência não é sustentável.

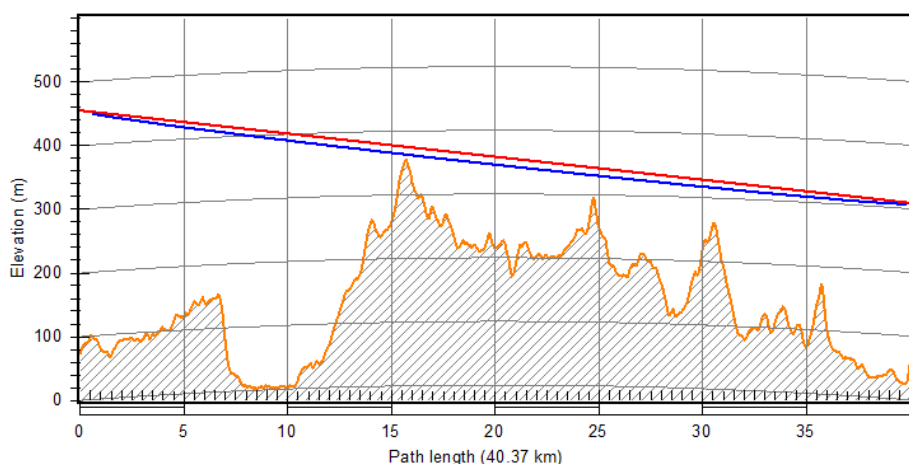


Figura 75 - Altura ideal das antenas para percurso direto.

4.4.2.2. Pathloss: percurso alternativo

Nesta secção apresentam-se as simulações efetuadas no PL relativamente ao percurso alternativo descrito na secção 4.2. As localizações do transmissor e do recetor para este percurso estão apresentadas na Tabela 13.

4.4.2.2.1. Percurso 1: Ligação entre o ISEL e o recetor de Malveira.

O percurso 1 foi simulado recorrendo ao PL, e a representação gráfica da ligação está ilustrada na Figura 76. O perfil terreno obtido está em conformidade com o perfil terreno obtido no *software* desenvolvido e ilustrado na Figura 64. As distâncias obtidas no PL e no *software* são ambas de 21.21 Km. Entretanto em termos de elevações do terreno, os dois softwares apresentaram uma ligeira diferença tal como se pode observar na Tabela 23.

Tabela 23 - Elevações na localização do transmissor e recetor obtidas no PL e no software.

Elevação [m]	PL	Software	Diferença
Transmissor [m]	108.34	110.7	2.7
Recetor [m]	407.20	403	4
Máxima no meio do percurso [m]	302.7 @ 13.96 Km	317.5 @ 13.95 Km	14.8

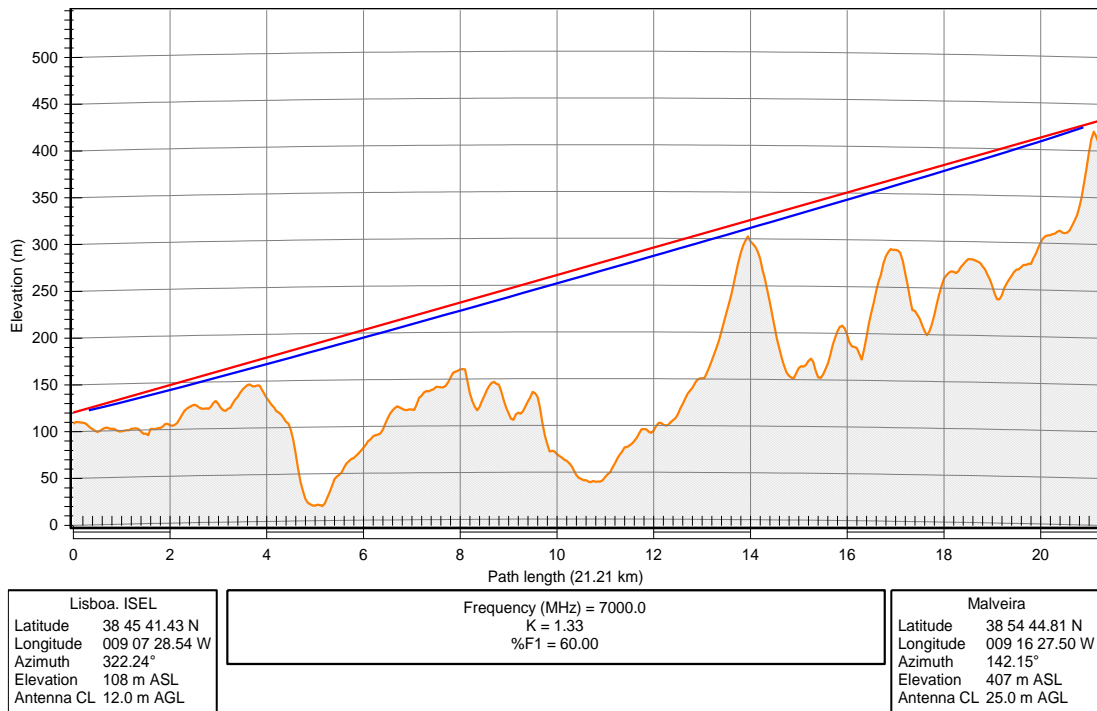


Figura 76 - Perfil terreno percurso 1 com informações da ligação.

Tal como na simulação feita no software desenvolvido, no PL, para o percurso 1, foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Parâmetros percurso 1 utilizados no PL (Simplificado).

Parâmetros	
Frequência [GHz]	7
Altura torre ISEL [m]	12
Altura torre Malveira [m]	25
Taxa de precipitação média [mm/h]	42 @ 0.01%
Polarização	Vertical
Fator k	1.33
Critério de clearance	60%

A Tabela 25 resume os valores obtidos através das simulações efetuadas no software e no PL para o percurso 1. O relatório obtido no PL está apresentado no Anexo D.

Os valores do EIRP da antena transmissora foram iguais em ambos os softwares.

As atenuações em espaço livre são praticamente iguais, com uma diferença de 0,03 dB.

Em relação à atenuação devido à chuva o PL não fornece valores das atenuações devido à chuva não excedida mais do que uma determinada percentagem do tempo. Ao contrário, tendo a margem de ligação calculada o PL determina qual a percentagem de tempo de disponibilidade devido à chuva, o que neste caso foi de 100 %. Seguindo esta lógica, no software desenvolvido a atenuação devido à chuva não excedida mais do que 0.00001 % do tempo é de 14.119 dB. Uma vez que a margem de ligação é de 34, 25 dB e 37.33 dB, para o BER igual a 10^{-6} e 10^{-3} , respetivamente, com esta disponibilidade de 99.99999 % do tempo existe ainda uma margem não afetada de 22.659 dB e 25.33 dB, para o BER igual a 10^{-6} e 10^{-3} , respetivamente. Deste modo, pode-se concluir que, com estas margens a chuva dificilmente irá causar uma atenuação suficiente capaz de interromper a ligação, e, portanto, a disponibilidade devido à chuva é de 100% tal como foi obtido no PL.

As atenuações devido aos gases para ambos os softwares apresentaram valores bastante coerentes. No PL a atenuação devido aos gases é de 0.2 dB enquanto que no *software* desenvolvido é de 0.28 dB. O *software* apresenta valores de atenuações devido aos gases atmosféricos ligeiramente superior, na ordem de 0.8 dB.

Para calcular a disponibilidade da ligação tendo em conta o desvanecimento devido ao multipercurso atmosférico ambos os softwares necessitam determinar o valor do gradiente de refratividade pontual do meio do percurso. No PL o gradiente de refratividade pontual é de -435.36 N/units enquanto que no software desenvolvido é de -417.01. Esta diferença é devido ao facto de os dois *softwares* determinarem as localizações do meio do percurso ligeiramente diferente, e, portanto, ao efetuarem a interpolação sobre os ficheiros os valores obtidos são diferentes. A localização do meio do percurso no PL é de ($1^{\text{og}} = 38^{\circ} 50' 13.12''$ e $1^{\text{og}} = 09^{\circ} 11' 58.02''$) enquanto que no software é de ($1^{\text{og}} = 38^{\circ} 50' 13.84''$ e $1^{\text{og}} = 09^{\circ} 11' 58.36''$). Deste modo, o fator geoclimático obtido em ambos os softwares também são ligeiramente diferentes e consequentemente o fator de ocorrência de propagação por trajetos múltiplos foi de 1.0119 % e 1.505 %, para o software e PL, respetivamente. Tendo em conta a margem de ligação calculada, foi obtida no PL uma disponibilidade no mês mais desfavorável devido ao multipercurso de 99.99971 %, o que corresponde a 6.24 s, ao contrário do software, onde a disponibilidade obtida foi de 5.2 s, o que corresponde a 99.9998 %. Há uma diferença de 1.04 s.

Tabela 25 - Valores obtidos no software e no PL para o percurso 1.

Ligação: Lisboa, ISEL - Malveira		
	Software	Pathloss
Transmissor		
Nome do site	Lisboa, ISEL	Lisboa, ISEL
Latitude	38° 45' 26.59''	38° 45' 26.59''
Longitude	09° 06' 55.72''	09° 06' 55.72''
Altura da antena [m]	12.00	12.00
Ganho da antena [dBi]	37.00	37.00
Perdas total nos cabos e conectores [dB]	3.00	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1	SDH-STM1
Potência emitida [dBm]	32.00	32.00
EIRP [dBm]	66.00	66.00
Recetor		
Nome do site	Malveira	Malveira
Latitude	38° 54' 44.81''	38° 54' 44.81''
Longitude	09° 16' 27.5''	09° 16' 27.5''
Altura da antena [m]	25.00	25.00
Ganho da antena [dBi]	37.00	37.00
Perdas total cabos e conectores [dB]	3.00	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1	SDH-STM1
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻⁶	- 70.40	- 70.40
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻³	- 73.20	- 73.20
Potência disponível na entrada da antena [dBm]	-70.18	-84.31
Potência nominal recebida [dBm]	-36.15	-36.10
Ligação		
Distância [Km]	21.21	21.21
Frequência [GHz]	7.00	7.00
Comprimento de onda [m]	0.043	0.043
Modulação	128 - QAM	128 - QAM
Taxa de transmissão [Mbps]	155.00	155.00
Fator k	1.33	1.33

Raio equivalente da terra [Km]	8472.13	8472.13
Obstáculos		
Critério de clearance [%]	60.00	60.00
Número de obstáculos	0.00	0.00
Método para cálculo de difração	Deygout	Deygout
Atenuação devido a difração sobre obstáculos [dB]	0.00	0.00
Atmosfera		
Taxa de precipitação @ 0.01% [mm/h]	42.00	42.00
Gradiente de refratividade [N unit/Km]	-38.98	-38.98
Porcentagem do tempo para obter intensidade de precipitação [%]	0.01	0.01
Atenuação específica devido à precipitação [dB/km]	0.353	0.353
Distância efetiva [Km]	10.369	-
Coefficiente alfa para chuva	1.474	1.474
Coefficiente k para chuva	0.001	0.0014
Polarização	Vertical	Vertical
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.01% [dB]	3.649	-
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.001% [dB]	7.458	-
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.0001% [dB]	11.920	-
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.00001% [dB]	14.119	-
Atenuação específica devido ao oxigênio [dB/km]	0.0075	-
Atenuação específica devido ao vapor de água [dB/km]	0.0056	-
Atenuação específica devido aos gases [dB/km]	0.013	-
Atenuação do percurso devido aos gases [dB]	0.28	0.20
Atenuação atmosférica [dBm]	14.399	-
Multipercurso		
Gradiente de refratividade pontual dN_1 [N units]	-417.01	-435.36
Fator geoclimático K	3.49×10^{-4}	2.07×10^{-4}
Inclinação do percurso ϵ [mr]	14.42	14.65
Desvanecimento profundo requerida, A [dB]	37.33	37.10
Fator de ocorrência de propagação por trajetos múltiplos, P_0 [%]	1.019	1.505
Desvanecimento profundo de referência, A_t [dB]	25	25

Fator q'_a	-	-
Fator q_t	-	-
Fator q_a	-	-
Porcentagem de tempo que se excede, M [%]	0.000194	0.00090
Reflexão no solo		
Distância do ponto reflexão do transmissor, D1 [Km]	3.59	-
Tipo de solo	Solo molhado	Solo molhado
Condutividade do solo	30	30
Permitividade relativa do solo	0.01	0.01
Fator de divergência	0.92	-
Coefficiente de reflexão efetivo	0.09	-
Grazing angle [°]	0.22	-
Diferença de percurso [m]	9.0e-5	-
Geral		
Atenuação espaço livre [dB]	135.87	135.90
Margem de desvanecimento @ BER 10 ⁻⁶ [dB]	34.25	34.30
Margem de desvanecimento @ BER 10 ⁻³ [dB]	37.33	37.10
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10 ⁻⁶ [dB]	22.659	-
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10 ⁻³ [dB]	25.33	-
Disponibilidade anual de chuva [%]	100	100
Disponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [%]	99.9998	99.99976
Indisponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [s]	5.2	6.24

4.4.2.2.2. Percurso 2: Ligação entre o transmissor de malveira e Torres Vedras

Tal como o percurso 1, o percurso 2 também foi simulado recorrendo ao PL, e a representação gráfica está ilustrada na Figura 77.

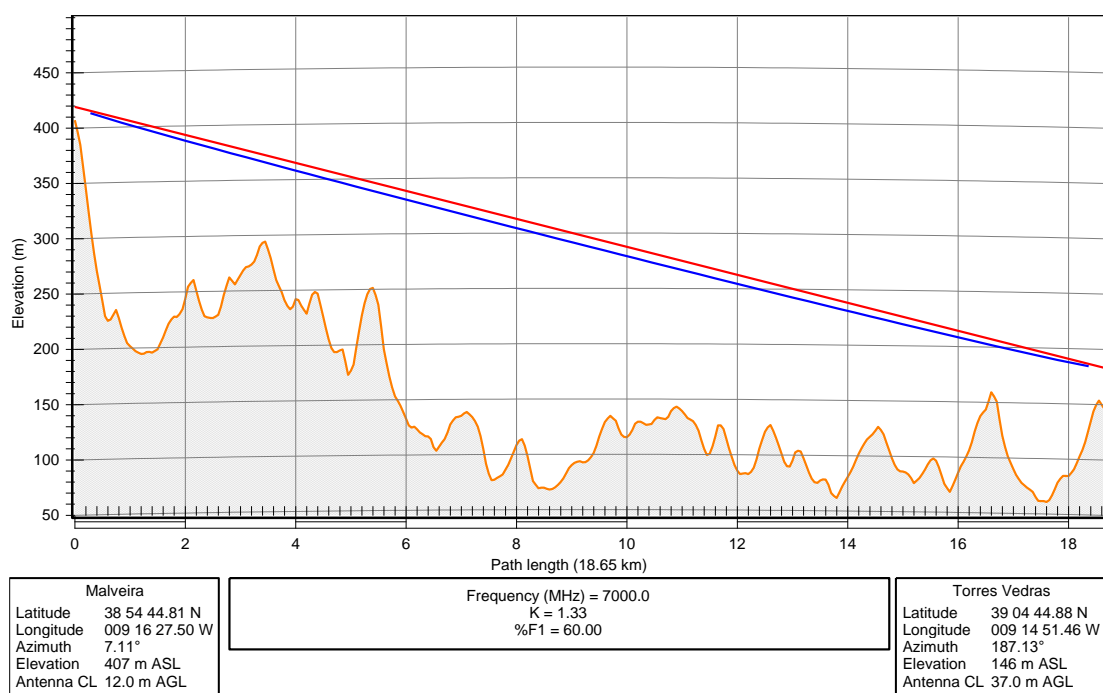


Figura 77 - Perfil terreno percurso 2 com informações da ligação.

A Tabela 26 sumariza os valores obtidos através das simulações efetuadas no software e no PL para o percurso 2. O relatório obtido no PL está apresentado no Anexo E.

Tabela 26 – Valores obtidos no software e no PL para o percurso 2.

Ligação: Malveira – Torres Vedras		
	Software	Pathloss
Transmissor		
Nome do site	Malveira	Malveira
Latitude	38° 54' 44.81''	38° 54' 44.81''
Longitude	09° 16' 27.50''	09° 16' 27.50''
Altura da antena [m]	5.00	5.00
Ganho da antena [dBi]	37.00	37.00
Perdas total nos cabos e conectores [dB]	3.00	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1	SDH-STM1
Potência emitida [dBm]	32.00	32.00
EIRP [dBm]	66.00	66.00
Recetor		
Nome do site	Torres Vedras	Torres Vedras

Latitude	38° 54' 44.81''	38° 54' 44.81''
Longitude	09° 16' 27.5''	09° 16' 27.5''
Altura da antena [m]	10.00	10.00
Ganho da antena [dBi]	37.00	37.00
Perdas total cabos e conectores [dB]	3.00	3.00
Tipo equipamento	SDH-STM1	SDH-STM1
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻⁶	- 70.40	- 70.40
Sensibilidade recetor @ BER 10 ⁻³	- 73.20	- 73.20
Potência disponível na entrada da antena [dBm]	-82.31	-
Potência nominal recebida [dBm]	-35.06	-35.10
Ligação		
Distância [Km]	21.21	21.21
Frequência [GHz]	7.00	7.00
Comprimento de onda [m]	0.043	0.043
Modulação	128 - QAM	128 - QAM
Taxa de transmissão [Mbps]	155.00	155.00
Fator k	1.33	1.33
Raio equivalente da terra [Km]	8472.13	8472.13
Obstáculos		
Critério de clearance [%]	60.00	60.00
Número de obstáculos	0.00	0.00
Método para cálculo de difração	Deygout	Deygout
Atenuação devido a difração sobre obstáculos [dB]	0.00	0.00
Atmosfera		
Taxa de precipitação @ 0.01% [mm/h]	42.00	42.00
Gradiente de refratividade [N unit/Km]	-38.98	-38.98
Porcentagem do tempo para obter intensidade de precipitação [%]	0.01	0.01
Atenuação específica devido à precipitação [dB/km]	0.353	0.353
Distância efetiva [Km]	10.369	-
Coefficiente alfa para chuva	1.474	1.474
Coefficiente k para chuva	0.001	0.001
Polarização	Vertical	Vertical

Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.01% [dB]	3.354	-
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.001% [dB]	6.857	-
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.0001% [dB]	10.90	-
Atenuação do percurso devido à precipitação @ P = 0.00001% [dB]	13.532	-
Atenuação específica devido ao oxigénio [dB/km]	0.0075	-
Atenuação específica devido ao vapor de água [dB/km]	0.0056	-
Atenuação específica devido aos gases [dB/km]	0.014	-
Atenuação do percurso devido aos gases [dB]	0.248	0.2
Perda [dBm]	13.78	-
Multipercorso		
Gradiente de refratividade pontual dN_1 [N units]	-403.28	-436.74
Fator geoclimático K	3.10×10^{-4}	2.070×10^{-4}
Inclinação do percurso ϵ [mr]	13.51	13.73
Desvanecimento profundo requerida, A [dB]	20.09	20.09
Fator de ocorrência de propagação por trajetos múltiplos, P_0 [%]	1.019	0.606
Desvanecimento profundo de referência, A_t [dB]	25	25
Fator q'_a	-	-
Fator q_t	-	-
Fator q_a	-	-
Porcentagem de tempo que se excede, M [%]	0.000150	0.00009
Reflexão no solo		
Distância do ponto reflexão do transmissor, D1 [Km]	3.59	-
Tipo de solo	Solo molhado	Solo molhado
Condutividade do solo	30	-
Permitividade relativa do solo	0.01	-
Fator de divergência	0.92	-
Coefficiente de reflexão efetivo	0.09	-
Grazing angle [°]	0.22	-
Diferença de percurso [m]	$9.0e-5$	-
Geral		
Atenuação espaço livre [dB]	134.77	135.90
Margem de desvanecimento @ BER 10^{-6} [dB]	35.38	35.30

Margem de desvanecimento @ BER 10^{-3} [dB]	38.39	38.10
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10^{-6} [dB]	21.85	-
Margem não afetada pelo desvanecimento devido à precipitação @ P = 0.00001% e BER 10^{-3} [dB]	24.85	-
Disponibilidade anual de chuva [%]	100	100
Disponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [%]	99.99985	99.99999
Indisponibilidade multipercurso para o mês mais desfavorável [s]	3.9	4.62

Capítulo 5

5. Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo são expostas as conclusões finais do presente trabalho e apresentadas algumas propostas relativamente a trabalhos futuros que serão desenvolvidos.

5.1. Conclusões

Esta dissertação de mestrado teve como o principal objetivo o desenvolvimento de um *software* que permite efetuar o dimensionamento de ligações por FH. Para tal, foi feito previamente um estudo profundo da fundamentação teórica servindo como base da implementação do *software*.

O *software* foi desenvolvido em JAVA, e a escolha dessa linguagem para efetuar o desenvolvimento foi acertada, pois permitiu a utilização de algumas bibliotecas externas o que facilitou o desenvolvimento em alguns aspetos, bem como a sua utilização em diversas plataformas. Todo o desenvolvimento foi feito tendo sempre o cuidado de separar toda a parte lógica da parte gráfica. Isto possibilitará a reutilização de vários módulos para o desenvolvimento da aplicação totalmente orientada à WEB na sua 2ª versão.

A divisão do software em diversos módulos foi muito importante pois permitiu também testar a funcionalidade de cada modulo e de todos os métodos associados aos mesmos.

A utilização do Google *maps API's* para aceder às elevações do terreno foi extremamente acertada pelo fato de este permitir a recolha da elevação em qualquer parte do globo terrestre de forma muito rápida, eficaz e com valores bastantes fiáveis, e exclui a necessidade de fazer o download de ficheiros STRM. Contudo, a sua utilização de forma gratuita implica algumas limitações tais como a impossibilidade de solicitar mais de 25000 ponto de elevação diários a partir do mesmo endereço IP e o número máximo de pontos por percurso que é 512.

A interação com o utilizador é feita através de uma interface gráfica amigável e organizada em secções.

OS resultados obtidos pelo *software* são bastantes satisfatórios, embora, fosse bastante importante confrontar estes resultados com dados reais de forma a verificar a validade dos valores teóricos simulados. Entretanto, os resultados foram comparados com resultados obtidos no PL e as conclusões.

Em termos de dados relativamente ao perfil terreno o *software* desenvolvido apresenta diversas vantagens visto que para simular no PL é necessário configurar o modulo GIS (*Geographic information system*) e fazer o download de dezenas de ficheiros STRM. Ao contrário do PL, no *software* desenvolvido o utilizador apenas terá de assegurar que o computador tenha acesso à internet.

Em termos de atenuação relativamente ao espaço livre os dois *softwares* apresentam resultados semelhantes.

Em relação às perdas por difração o PL dispõe de mais algoritmos para calcular as perdas por difração. Apesar disso, o algoritmo recomendado no PL para ligações ponto a ponto é o algoritmo *pathloss*. Este algoritmo implementa tanto o método de *Deygout* como o método *Epstein-Petterson* implementados também no *software* desenvolvido. Em ambos os *softwares* o resultado obtido através do método de *Deygout* e *Epstein-Petterson* são praticamente iguais, entretanto, o resultado obtido em cada um destes *softwares* apresentam algumas diferenças. Por exemplo, no percurso direto apresentado no capítulo 4, secção 4.1, os valores obtidos para as perdas devido à difração são de 256.23 dB e 264 dB, utilizando o método de *Epstein-Petterson* e *Deygout*, respetivamente, no *software* desenvolvido, enquanto que no PL obteve-se 80.66 dB tanto para *Epstein-Petterson* como para *Deygout*. Porém, quando o percurso é composto por apenas um único obstáculo os resultados obtidos no PL e no *software* são bastantes coerentes.

As atenuações devido aos gases obtidas em ambos os *softwares* estão em conformidade. Por exemplo, para o percurso alternativo apresentado no capítulo 4, secção 4.2, as perdas devido aos gases são 0.28 dB e 0.20 dB, respetivamente para o *software* desenvolvido e para o PL.

Para calcular as atenuações devido à precipitação o *software* desenvolvido baseia-se nos métodos das recomendações ITU-R P.530-16, ITU P.838-3 e ITU P.837-6 enquanto que o PL baseia nas recomendações ITU-R P.530-7, ITU P.838-3 e ITU P.837-1. Apesar destas recomendações serem iguais as recomendações utilizadas no *software* desenvolvido correspondem às recomendações atuais até a data. Na recomendação ITU-R P.530-7 a distância efetiva é calculada de forma totalmente diferente do que na recomendação ITU-R P.530-16, e daí os resultados serem diferentes. As intensidades de precipitação obtidas a partir dos ficheiros com dados estatísticos de precipitação

em todo o globo apresentam valores idênticos. No percurso alternativo apresentado no capítulo 4, secção 4.2, foi obtido no *software* desenvolvido uma atenuação devido à precipitação não excedida em mais de 0.01% e 0.000001% de tempo de 3.656 e 14.11 dB, respetivamente. No PL não é possível obter o valor da atenuação devido à chuva não excedida mais do que uma determinada percentagem de tempo. Ao contrário, é calculada apenas a disponibilidade de ligação devido à atenuação provocada pela chuva tendo em conta a margem de ligação.

O *software* desenvolvido prevê o desvanecimento multipercurso de acordo com os métodos fornecidos na recomendação ITU-R P.526-13. A interpolação sobre os ficheiros de gradiente de refratividade pontual da zona geográfica incorporados no programa, apresenta resultado muito satisfatório, quando comparado com os exemplos existentes na mesma recomendação e com os valores obtidos no PL. No *software* desenvolvido, para o percurso alternativo apresentado no capítulo 4, secção 4.2, obteve-se um gradiente de refratividade pontual de -417 não excedida em mais de 1% da média anual enquanto que no PL obteve-se -435. Essa ligeira diferença é devido ao facto de os dois programas considerarem localizações a meio de percurso ligeiramente diferentes. Essa diferença no valor do gradiente de refratividade pontual implicou assim uma ligeira diferença nos valores do fator geoclimático que foram de 3×10^{-4} e 2.1×10^{-4} , para o *software* desenvolvido e para o PL, respetivamente. A inclinação do percurso obtido no *software* e no PL são ambos de 14.4 mr. O fator de ocorrência de propagação por trajetos múltiplos obtidos no *software* para o mesmo percurso alternativo foi de 2.05% enquanto que no PL foi de 1.5%. É possível concluir que os valores estão próximos, com uma diferença de 0.5% praticamente em todas as simulações feitas.

Os parâmetros relativamente às reflexões não foram comparados com o PL uma vez que o programa apresentava alguma limitação devido à licença utilizada. Deste modo não foi possível efetuar a simulação das reflexões no terreno no programa PL. Contudo, no *software* existe alguma limitação no cálculo da potência do sinal refletido que chega ao recetor.

Em suma, o desenvolvimento deste *software* requereu um estudo profundo dos conceitos teóricos envolvidos nas ligações por FH. Esta primeira versão do *software* já permite simular diversos fenómenos associados à propagação do sinal de FH, e poderá ser utilizada pelos alunos de Radio Propagação no auxílio dos estudos. Contudo, seria importante obter dados reais, medidos em sistemas reais de modo a confrontar os resultados do *software* com esses dados reais. O trabalho permitiu também a familiarização com mais um *software* de simulação, o PathLoss 5.0. Este *software* é bastante complexo e requereu um estudo profundo de toda a sua documentação.

5.2. Trabalhos futuros

A entrega desta dissertação não implica o término deste projeto, pois o seu principal objetivo é o desenvolvimento de um software de simulação de ligações por FH robusto e capaz de competir com os demais existentes. Deste modo, o software desenvolvido até a data constitui uma primeira versão, sendo que no futuro será dada a continuidade ao trabalho de modo a obter uma segunda versão do software. De entre várias temáticas, apresenta-se a seguir algumas mais revelantes:

- Acrescentar módulos que permitem enriquecer as funcionalidades do cálculo do link budget;
- Desenvolver módulos que lidam com a qualidade da ligação;
- Permitir a existência de uma base de dados de um conjunto de antenas e equipamentos mais utilizados nos sistemas de FH, de modo a que o utilizador se limitar apenas na seleção do equipamento e da antena, sem se preocupar com os demais parâmetros relacionado aos mesmos;
- Acrescentar módulos que permite a análise das interferências;
- Por fim, como um grande desafio, desenvolver a mesma aplicação orientada totalmente à Web;

Referências

- [1] “http://www.pathloss.com/pwiki/index.php?title=Pathloss_5_Basic_program_information”. [Acedido em 02 05 2017]
- [2] Huurdeman, Anton A. (2003) *The Worldwide History of Telecommunications*. NY, John Wiley & Sons.
- [3] Ericsson, Sep 2015, *Microwave Towards 2020 Report*
- [4] ITU-R Recommendations, Fixed service use and future trends, ITU-R F.2323-0, Geneva, 2015.
- [5] ITU-R. P.453-12, “The radio refractive index: its formula and refractivity data” Recommendation ITU-R. P.453-12, Geneva, 2016.
- [6] ITU-R. P.835-5, “Reference standard atmospheres” Recommendation ITU-R. P.453-5, Geneva, 2013.
- [7] P.Angueira, J.A. Roma, *microwave Line Of Sight Link Engineering*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- [8] M.A.Weissberger, “An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees,” Maryland, 1981.
- [9] J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [10] ITU-R Recommendations, Attenuation in vegetation, ITU-R P.833-9, Geneva, 2016.
- [11] ITU-R. P.526-13, “Propagation by diffraction,” Recommendation ITU-R. P.526-13, Geneva, 2013.
- [12] ITU-R. P.1238-9, “Propagation data prediction methods for planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in frequency range 300 MHz to 100 GHz,” Recommendation ITU-R. P.1238-9, Geneva, 2017.
- [13] ITU-R. P.527-4, “Electrical characteristics of the surface of the Earth,” Recommendation ITU-R. P.527-4, Geneva, 2017.
- [14] ITU-R. P.676-10, “Attenuation by atmospheric gases,” Recommendation ITU-R P.676-11, Geneva, 2016.
- [15] C. Salema, *Feixes Hertzianos*, Lisboa, Portugal: IST Press, 1998.
- [16] ITU-R P.530-16, “Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems,” Recommendation ITU-R P.530-16, Geneva, 2016.

- [17] ITU-R. P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," Recommendation ITU-R. P.838-3, Geneva, 2005.
- [18] ITU-R. P.837-5, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," Recommendation ITU-R P.837-5, Geneva, 2007.
- [19] G.Kizer, Digital Microwave Communication, , Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [20] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, Chichester, U.K.: Wiley, 1996.
- [21] Deygout, Jacques, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 39, No.8, IEEE, Agosto de 1991.
- [22] G.Kizer, Digital Microwave Communication, , Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [23] ITU-R. P.372-13, "Radio noise," Recommendation ITU-R P.372-13, Geneva, 2016.
- [24] H. Lehpamer, Microwave Transmission Networks – Planning, Design and Deployment, second edition, McGraw-Hill, 2010.
- [25] Microflect Passive Repeater Engineering Manual 161, Microflet Co.Inc., 1989
- [26] ITU-T. P.821, "Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network," Recommendation ITU-T P.821, Geneva, 2002.
- [27] ITU-T. P.826, "End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections," Recommendation ITU-T P.826, Geneva, 2002.
- [28] ITU-T. P.828, "Error performance parameters and objectives for international, constant bit rate synchronous digital paths," Recommendation ITU-T P.828, Geneva, 2000.
- [29] ITU-R. F.594, "Error performance objectives of the hypothetical reference digital path for radio-relay systems providing connections at a bit rate below the primary rate and forming part or all of the highgrade portion of an integrated services digital network," Recommendation ITU-R P.594, Geneva, 2016.
- [30] ITU-R. F.634, "Error performance objectives for real digital radio-relay links forming part of the high-grade portion of international digital connections at a bit rate below the primary rate within an integrated services digital network," Recommendation ITU-R P.634, Geneva, 1997.
- [31] ITU-R. F.696, "Error performance and availability objectives for hypothetical reference digital sections forming part or all of the medium-grade portion of an ISDN connection at a bit rate below the primary rate utilizing digital radio-relay systems," Recommendation ITU-R P.696, Geneva, 1997.
- [32] ITU-R. F.697, "Error performance and availability objectives for the local-grade portion at each end of an ISDN connection at a bit rate below the primary rate utilizing digital radio-relay systems," Recommendation ITU-R P.697, Geneva, 1997.

- [33] ITU-R. F.1668, "Error performance objectives for real digital fixed wireless links used in 27 500 km hypothetical reference paths and connections," Recommendation ITU-R P.1668, Geneva, 2007.
- [34] ITU-T. P.801, Digital transmission models," Recommendation ITU-T P.801, Geneva, 1988.
- [35] ITU-R. F.557, "Availability objective for radio-relay systems over a hypothetical reference digital path," Recommendation ITU-R P.557, Geneva, 2014.
- [36] ITU-R. F.695, "Availability objectives for real digital radio-relay links forming part of a high-grade circuit within an integrated services digital network," Recommendation ITU-R P.695, Geneva, 1990.
- [37] ITU-R. F.696, "Error performance and availability objectives for hypothetical reference digital sections forming part or all of the medium-grade portion of an ISDN connection at a bit rate below the primary rate utilizing digital radio-relay systems," Recommendation ITU-R P.696, Geneva, 1997.
- [38] ITU-R. F.697, "Error performance and availability objectives for the local-grade portion at each end of an ISDN connection at a bit rate below the primary rate utilizing digital radio-relay systems," Recommendation ITU-R P.697, Geneva, 1997.
- [39] ITU-R. F.1703, "Availability objectives for real digital fixed wireless links used in 27 500 km hypothetical reference paths and connections," Recommendation ITU-R P.1703, Geneva, 2005.
- [40] <https://github.com/rterp/GMapsFX>. [Acedido em 20 11 2017]
- [41] <https://github.com/googlemaps/google-maps-services-java>. [Acedido em 20 11 2017]
- [42] Google Maps API, [Online].
<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/elevation?hl=pt-br>
- [43] R.Coudé, "Radio Mobile," [Online]. Available: <http://www.ve2dbe.com/english1.html>. [acedido em 20 08 2017]
- [44] R.Coudé, "Radio Mobile," [Online]. Available:
<http://www.ve2dbe.com/download/download.html>. [acedido em 20 08 2017]
- [45] R.Coudé, "Radio Mobile," [Online]. Available: <http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>. [acedido em 20 08 2017]
- [46] U. Survey, "U.S.Geological Survey," [Online]. Available: <http://www.usgs.gov/>. [Acedido em 20 08 2017]
- [47] <http://pathloss40.blogspot.pt/2009/02/information-about-pathloss-50-price.html> [Acedido em 02 05 2017]
- [48] <http://www.pathloss.com> [Acedido em 02 05 2017]

Anexos

Anexo A. Tabela de dados do ITU-R

Tabela 27 - Dados espectroscópicos para a atenuação devido ao vapor de água [7].

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
*22.235080	.1079	2.144	26.38	.76	5.087	1.00
67.803960	.0011	8.732	28.58	.69	4.930	.82
119.995940	.0007	8.353	29.48	.70	4.780	.79
*183.310087	2.273	.668	29.06	.77	5.022	.85
*321.225630	.0470	6.179	24.04	.67	4.398	.54
*325.152888	1.514	1.541	28.23	.64	4.893	.74
336.227764	.0010	9.825	26.93	.69	4.740	.61
*380.197353	11.67	1.048	28.11	.54	5.063	.89
390.134508	.0045	7.347	21.52	.63	4.810	.55
437.346667	.0632	5.048	18.45	.60	4.230	.48
439.150807	.9098	3.595	20.07	.63	4.483	.52
443.018343	.1920	5.048	15.55	.60	5.083	.50
*448.001085	10.41	1.405	25.64	.66	5.028	.67
470.888999	.3254	3.597	21.34	.66	4.506	.65
474.689092	1.260	2.379	23.20	.65	4.804	.64
488.490108	.2529	2.852	25.86	.69	5.201	.72
503.568532	.0372	6.731	16.12	.61	3.980	.43
504.482692	.0124	6.731	16.12	.61	4.010	.45
547.676440	.9785	.158	26.00	.70	4.500	1.00
552.020960	.1840	.158	26.00	.70	4.500	1.00
*556.935985	497.0	.159	30.86	.69	4.552	1.00
620.700807	5.015	2.391	24.38	.71	4.856	.68
645.766085	.0067	8.633	18.00	.60	4.000	.50
658.005280	.2732	7.816	32.10	.69	4.140	1.00
*752.033113	243.4	.396	30.86	.68	4.352	.84
841.051732	.0134	8.177	15.90	.33	5.760	.45
859.965698	.1325	8.055	30.60	.68	4.090	.84
899.303175	.0547	7.914	29.85	.68	4.530	.90
902.611085	.0386	8.429	28.65	.70	5.100	.95
906.205957	.1836	5.110	24.08	.70	4.700	.53

Tabela 28 - Dados espectroscópicos para a atenuação devido ao oxigénio [7].

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50.474214	0.975	9.651	6.690	0.0	2.566	6.850
50.987745	2.529	8.653	7.170	0.0	2.246	6.800
51.503360	6.193	7.709	7.640	0.0	1.947	6.729
52.021429	14.320	6.819	8.110	0.0	1.667	6.640
52.542418	31.240	5.983	8.580	0.0	1.388	6.526
53.066934	64.290	5.201	9.060	0.0	1.349	6.206
53.595775	124.600	4.474	9.550	0.0	2.227	5.085
54.130025	227.300	3.800	9.960	0.0	3.170	3.750
54.671180	389.700	3.182	10.370	0.0	3.558	2.654
55.221384	627.100	2.618	10.890	0.0	2.560	2.952
55.783815	945.300	2.109	11.340	0.0	-1.172	6.135
56.264774	543.400	0.014	17.030	0.0	3.525	-0.978
56.363399	1331.800	1.654	11.890	0.0	-2.378	6.547
56.968211	1746.600	1.255	12.230	0.0	-3.545	6.451
57.612486	2120.100	0.910	12.620	0.0	-5.416	6.056
58.323877	2363.700	0.621	12.950	0.0	-1.932	0.436
58.446588	1442.100	0.083	14.910	0.0	6.768	-1.273
59.164204	2379.900	0.387	13.530	0.0	-6.561	2.309
59.590983	2090.700	0.207	14.080	0.0	6.957	-0.776
60.306056	2103.400	0.207	14.150	0.0	-6.395	0.699
60.434778	2438.000	0.386	13.390	0.0	6.342	-2.825
61.150562	2479.500	0.621	12.920	0.0	1.014	-0.584
61.800158	2275.900	0.910	12.630	0.0	5.014	-6.619
62.411220	1915.400	1.255	12.170	0.0	3.029	-6.759
62.486253	1503.000	0.083	15.130	0.0	-4.499	0.844
62.997984	1490.200	1.654	11.740	0.0	1.856	-6.675
63.568526	1078.000	2.108	11.340	0.0	0.658	-6.139
64.127775	728.700	2.617	10.880	0.0	-3.036	-2.895
64.678910	461.300	3.181	10.380	0.0	-3.968	-2.590
65.224078	274.000	3.800	9.960	0.0	-3.528	-3.680
65.764779	153.000	4.473	9.550	0.0	-2.548	-5.002
66.302096	80.400	5.200	9.060	0.0	-1.660	-6.091
66.836834	39.800	5.982	8.580	0.0	-1.680	-6.393
67.369601	18.560	6.818	8.110	0.0	-1.956	-6.475
67.900868	8.172	7.708	7.640	0.0	-2.216	-6.545
68.431006	3.397	8.652	7.170	0.0	-2.492	-6.600
68.960312	1.334	9.650	6.690	0.0	-2.773	-6.650
118.750334	940.300	0.010	16.640	0.0	-0.439	0.079

Tabela 29 – Valores das constantes para cálculo dos coeficientes K_H e K_V [10].

Coeficientes para k_K					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		
Coeficientes para k_V					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		
Coeficientes para α_K					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		
Coeficientes para α_K					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Tabela 30 - Valores dos coeficientes de Boersma [13].

n	a	b	c	d
0	+1.595769140	-0.000000033	+0.000000000	+0.199471140
1	-0.000001702	+4.255387524	-0.024933975	+0.000000023
2	-6.808568854	-0.000092810	+0.000003936	-0.009351341
3	-0.000576361	-7.780020400	+0.005770956	+0.000023006
4	+6.920691902	-0.009520895	+0.000689892	+0.004851466
5	-0.016898657	+5.075161298	-0.009497136	+0.001903218
6	-3.050485660	-0.138341947	+0.011948809	-0.017122914
7	-0.075752419	-1.363729124	-0.006748873	+0.029064067
8	+0.850663781	-0.403349276	+0.000246420	-0.027928955
9	-0.025639041	+0.702222016	+0.002102967	+0.016497308
10	-0.150230960	-0.216195929	-0.001217930	-0.005598515
11	+0.034404779	+0.019547031	+0.000233939	+0.000838386

Anexo B. Caraterísticas do equipamento NEC 3000 Series

Item	4 GHz	L6 GHz	7 GHz	8 GHz	Guaranteed
Frequency Plan	ITU-R F.382-7	ITU-R F.383-5	ITU-R F.385-6	ITU-R F.386-5 ANNEX 1	-
Channel Spacing	29 MHz	29.65 MHz	28 MHz	29.65 MHz	-
TX Power *1 (excluding BR CKT Loss) (5W) (dBm) (10W) (dBm)	29.0 32.0	29.0 32.0	29.0 32.0	29.0 32.0	±1.0 dB ±1.0 dB
Noise Figure (dB)	1.5	1.5	2.0	2.0	+1.0 dB
C/N vs. BER 10 ⁻³ (dB) 10 ⁻⁶ (dB)	24.7 27.5	24.7 27.5	24.7 27.5	24.7 27.5	+1.0 dB +2.0 dB
RSL Overload (excluding BR CKT Loss) 10 ⁻³ (dBm)	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0	-5 dB
RSL vs. BER (excluding BR CKT Loss) 10 ⁻³ (dBm) 10 ⁻⁶ (dBm)	-73.7 -70.9	-73.7 -70.9	-73.2 -70.4	-73.2 -70.4	+2.0 dB +3.0 dB
System Gain (excluding BR CKT Loss) (5W) 10 ⁻³ (dB) *1 10 ⁻⁶ (dB) (10W) 10 ⁻³ (dB) *1 10 ⁻⁶ (dB)	102.7 99.9 105.7 102.9	102.7 99.9 105.7 102.9	102.2 99.4 105.2 102.4	102.2 99.4 105.2 102.4	-2.0 dB -3.0 dB -2.0 dB -3.0 dB
R-BER	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²
BR CKT Loss *2 1+0 (dB) 1+1 (dB) 1+2 (dB) 1+3 (dB)	5.0 5.5 5.8 -	4.9 5.3 5.6 6.0	5.8 6.1 6.5 -	6.1 6.5 6.8 7.1	+1.0 dB +1.0 dB +1.0 dB +1.0 dB
BR CKT Loss (Contiguous Type) 1+3 (dB) 1+7 (dB)	6.9 6.9	6.6 6.6	*** ***	*** ***	+1.0 dB +1.0 dB
Tunable Range	Half band				
Waveguide Interface	UDR-40	UDR-58	UDR-70	UDR-84	

*1: Nominal value without ATPC operation. Maximum value with ATPC operation is 2 dB higher than above.

*2: Loss of the BEF used to eliminate RF interference signal between Transmitter and Receiver is not included.

Additional loss of the BR CKT for XPIC is not included.

For BR CKT loss of the SD receiver, add 0.1dB (4GHz) or 0.2dB (L6, 7 and 8GHz).

***: Under consideration.

Figura 78 - Caraterísticas do NEC 3000S: 128-QAM

Anexo C. Caraterísticas da antena Andrew HSX4-74



HSX4-74-D3A/A

1.2 m | 4 ft High Performance, Super High XPD Parabolic Shielded Antenna, dual-polarized, 7.425–7.900 GHz, PDR84, gray antenna, enhanced white radome with flash, standard pack—one-piece reflector

Product Classification

Product Type	Microwave antenna
--------------	-------------------

General Specifications

Antenna Type	HSX - High Performance, Super High XPD Parabolic Shielded Antenna, dual-polarized
Diameter, nominal	1.2 m 4 ft
Packing	Standard pack
Radome Color	White
Radome Material	Enhanced
Reflector Construction	One-piece reflector
Antenna Input	PDR84
Antenna Color	Gray
Antenna Type	HSX - High Performance, Super High XPD Parabolic Shielded Antenna, dual-polarized
Diameter, nominal	1.2 m 4 ft
Flash Included	Yes
Polarization	Dual

Electrical Specifications

Operating Frequency Band	7.425 – 7.900 GHz
Beamwidth, Horizontal	2.3 °
Beamwidth, Vertical	2.3 °
Cross Polarization Discrimination (XPD)	40 dB
Electrical Compliance	ETSI Class 3 US FCC Part 74B
Front-to-Back Ratio	64 dB
Gain, Low Band	36.7 dBi
Gain, Mid Band	37.0 dBi
Gain, Top Band	37.3 dBi
Operating Frequency Band	7.425 – 7.900 GHz
Radiation Pattern Envelope Reference (RPE)	2156 2157
Return Loss	28.3 dB
VSWR	1.08

Figura 79 - Caraterísticas da antena Andrew HSX4-74

Anexo D. Report do percurso 1 obtido no PL.



	Lisboa. ISEL	Malveira
Latitude	38 45 41.43 N	38 54 44.81 N
Longitude	009 07 28.54 W	009 16 27.50 W
True azimuth (°)	322.24	142.15
Vertical angle (°)	0.77	-0.91
Elevation (m)	108.34	407.20
Antenna model	HSX4-74 (TX)	HSX4-74 (RX)
Antenna gain (dBi)	37.00	37.00
Antenna diameter (m)	1.20	1.20
Antenna height (m)	5.00	16.84
TX line loss (dB)	0.50	0.50
Connector loss (dB)	0.50	0.50
TX loss (dB)	3.00	
RX loss (dB)		2.00
Frequency (MHz)	7000.00	
Polarization	Vertical	
Path length (km)	21.21	
Free space loss (dB)	135.90	
Atmospheric absorption loss (dB)	0.20	
Net path loss (dB)		67.10
Radio model	NEC 3000S SDH STM-1	NEC 3000S SDH STM-1
TX power (watts)	1.58	1.58
TX power (dBm)	32.00	32.00
Emission designator	TransIseIAlt1	RecMalAlt1
EIRP (dBm)	66.00	
RX threshold level (dBm)	-73.20	-73.20
Receive signal (dBm)		-35.10
Thermal fade margin (dB)		38.10
Geoclimatic factor	8.178E-005	
Path inclination (mr)	14.65	
Fade occurrence factor (Po)	6.060E-003	
Worst month multipath availability (%)		99.99991
Worst month multipath unavailability (sec)		2.47
Annual multipath availability (%)		99.99999
Annual multipath unavailability (sec)		4.62
Polarization	Vertical	
0.01% rain rate (mm/hr)	42.00	

	Lisboa. ISEL	Malveira
Flat fade margin - rain (dB)	38.10	
Rain attenuation (dB)	38.10	
Annual rain availability (%)	100.00000	
Annual rain unavailability (min)	0.00	

Anexo E. Report do percurso 2 obtido no PL.



	Malveira	Torres Vedras
Latitude	38 54 44.81 N	39 04 44.88 N
Longitude	009 16 27.50 W	009 14 51.46 W
True azimuth (°)	7.11	187.13
Vertical angle (°)	-0.85	0.72
Elevation (m)	407.20	146.18
Antenna model	HSX4-74 (TX)	HSX4-74 (RX)
Antenna gain (dBi)	37.00	37.00
Antenna diameter (m)	1.20	1.20
Antenna height (m)	5.00	10.00
TX line loss (dB)	0.50	0.50
Connector loss (dB)	0.50	0.50
TX loss (dB)	3.00	
RX loss (dB)		3.00
Frequency (MHz)	7000.00	
Polarization	Vertical	
Path length (km)	18.65	
Free space loss (dB)	134.78	
Atmospheric absorption loss (dB)	0.18	
Net path loss (dB)		66.96
Radio model	NEC 3000S SDH STM-1	NEC 3000S SDH STM-1
TX power (watts)	1.58	1.58
TX power (dBm)	32.00	32.00
Emission designator	TransMalve	RecTorrVedras
EIRP (dBm)	66.00	
RX threshold level (dBm)	-73.20	-73.20
Receive signal (dBm)		-34.96
Thermal fade margin (dB)		38.24
Geoclimatic factor	2.070E-004	
Path inclination (mr)	13.73	
Fade occurrence factor (Po)	9.785E-003	
Worst month multipath availability (%)		99.99985
Worst month multipath unavailability (sec)		3.86
Annual multipath availability (%)		99.99998
Annual multipath unavailability (sec)		7.04
Polarization	Vertical	
0.01% rain rate (mm/hr)	42.00	

	Malveira	Torres Vedras
Flat fade margin - rain (dB)	38.24	
Rain attenuation (dB)	38.24	
Annual rain availability (%)	100.00000	
Annual rain unavailability (%)	0.00000	
Annual rain unavailability (min)	0.00	

