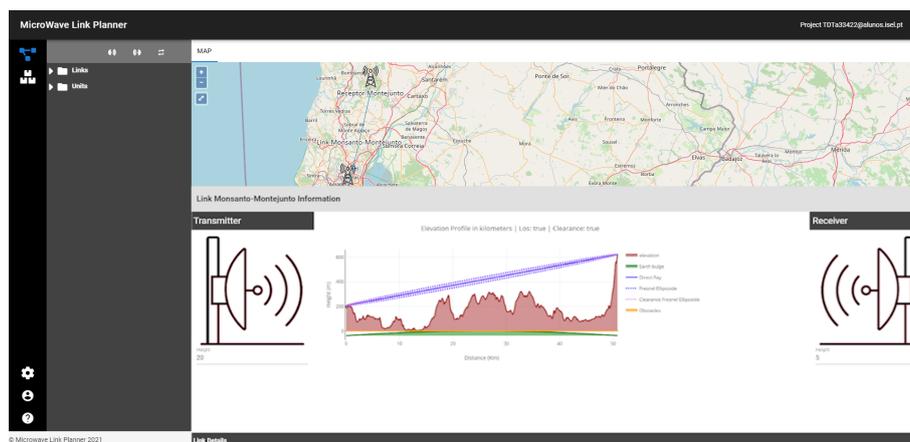




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores



Aplicação para projeto e análise de sistemas de feixes Hertzianos

Milton Jorge Semedo Barbosa

(Licenciado em Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Computadores)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações

Orientador : Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Júri:

Presidente: Prof.Doutor António João Nunes Serrador

Vogais: Prof. Doutor António Luís Campos da Silva Topa
Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Outubro, 2021

*Our greatest weakness lies in giving up. The most certain
way to succeed is always to try just one more time*

Thomas A. Edison

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), local onde me formei não só em engenharia, mas como jovem adulto. Gostaria também de mostrar o meu apreço pelo Instituto Politécnico de Lisboa e em especial aos Serviços de Ação Social (SAS), por permitirem que eu e tantos outros não pudéssemos desistir das nossas formações. Gostaria também de agradecer ao Instituto de Telecomunicações (IT), pelo apoio técnico disponibilizado ao longo desta dissertação, em termos de máquinas e servidores para o teste e desenvolvimento da aplicação. Gostaria também de expressar a minha enorme gratidão ao professor Pedro Pinho por ter aceite este trabalho, nunca ter desistido de mim, ter-me apoiado, puxado por mim sempre ao longo desta jornada atribulada. A ele deixo-lhe um grandessíssimo obrigado.

Aos vários colegas de curso com quem privei ao longo dos anos na Licenciatura e Mestrado, deixo o meu obrigado pela amizade e espírito de camaradagem.

Um agradecimento especial à Patrícia Semedo, porque sem ela definitivamente não teria conseguido. A sua perseverança e encorajamento foram fundamentais e por isso digo-lhe muito obrigado porque esta vitória não é só minha como dela.

À minha família em geral, aos meus irmãos, muito obrigado pelo apoio contínuo e interesse ao longo destes anos.

À minha irmã Marisa Sousa, agradeço o seu apoio constante, palavras de encorajamento e por ser um exemplo a seguir.

Por fim um agradecimentos aos meus pais Domingos Barbosa de Sousa e Maria Rosa Tavares Semedo pelo amor, suporte incondicional e por me terem apoiado sempre, mesmo nos momentos de incerteza.

Resumo

Nos dias que correm, a tecnologia de Feixes Hertzianos (FH), tem vindo a perder preponderância, face a outras de outras maior débito como fibras óticas. Apesar de tudo, os FH continuam a ser utilizados em redes de transporte como *backhaul* e em redes de TV, pelo seu baixo custo e facilidade de integração em diversos tipos de terreno. Os sistemas funcionam, com a premissa de existir um caminho desobstruído entre o emissor e o recetor.

No dimensionamento dum sistema por FH, é necessário fazer um estudo prévio das condições de propagação e do percurso onde a ligação será estabelecida. Muitas vezes o processo torna-se complexo, sendo necessário o auxilio de ferramentas. Muitas das ferramentas disponibilizadas são de acesso profissional e customizadas para definições específicas de fabricantes. Existem outras de utilização aberta, mas estas muitas vezes, não são mantidas de forma regular, tornando-se desatualizadas, face às recomendações do ITU-R(*International Telecommunication Union Radiocommunication*).

Nesse seguimento, ao longo desta dissertação, foi desenvolvida uma ferramenta modular de código-aberto, com uma interface Web implementada com a *framework javascript Vue.js* e um *web service* na linguagem *python*. A ferramenta foi desenvolvida com base nas últimas recomendações ITU-R e nela é possível, analisar o impacto dos fenómenos de propagação na qualidade do sinal recebido. Com base no software desenvolvido, foram apresentados um conjuntos de testes e cenários. Os resultados foram comparados com os dados da ferramenta profissional *Path Loss* de forma a aferir a validade do programa desenvolvido.

Palavras-chave: Projeto, Feixes Hertzianos, ITU-R, Código-aberto, Aplicação Planeamento

Abstract

Nowadays the Microwave radio links technology has lost some preponderance compared to other technologies of high speed such as optical fibers. Despite everything, Microwave radio links, continues to be used in transport networks such as backhaul and television, due to their low cost and its simplicity of integration in different types of terrain. The system work in the context, that there is an unobstructed path between the sender and receiver.

In the design of a Microwave Radio link system, it's necessary to do a prior study of the propagation conditions and the path where the connection will be established. Sometimes the process becomes complex, being required the use of auxiliary tools. Most of the tools available, are for professional use and customized for specific manufacturers. There some free solutions, but those are not maintained, and become outdated compared to International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R).

Having that in mind, during the process of this dissertation development, an open-source tool with a web-based JavaScript interface with the framework Vue.js was implemented with the complement of a python webservice. The tool was created adopting the latest ITU-R recommendations and using it, is possible to evaluate the impact of the propagation phenoms on the quality of the received signal. Using the developed application, some use cases and tests were presented. The results were compared with the professional tool PathLoss to validate the developed software .

Keywords: Project, Microwave radio link, ITU-R, Open-source, Design Application

Índice

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Acrónimos	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Organização da Dissertação	2
1.5 Contribuição Principal	3
2 Projeto de FH	5
2.1 Comunicações sem Fios	5
2.2 Feixes Hertzianos	7
2.2.1 Arquitetura dos Feixes Hertzianos	9
2.3 Planeamento dos Feixes Hertzianos	10
2.3.1 Atenuação em espaço livre	10
2.3.2 Influência da Troposfera na propagação e Refração	11
2.3.2.1 Gradiente de refratividade rádio	13

2.3.2.2	Classificação da propagação na Troposfera	14
2.3.2.3	Ductos	15
2.3.2.4	Encurvamento do raio: Raio efetivo da Terra	15
2.3.3	Elipsóide de <i>Fresnel</i>	17
2.3.4	Atenuação devido à chuva	18
2.3.4.1	Método ITU-R	19
2.3.5	Atenuação devido aos gases atmosféricos (H_2O e O_2)	21
2.3.6	Balanço de Potência	24
2.3.7	Considerações gerais para o planeamento de feixes Hertzianos	26
2.3.7.1	Perfil do terreno e desobstrução	27
2.3.7.2	Topologia das Redes	30
2.4	Aplicações disponíveis	31
2.4.1	<i>Smart Link Planning Tool</i>	31
2.4.2	<i>MlinkPlanner</i>	31
2.4.3	<i>PathLoss</i>	32
2.4.4	<i>Atoll Microwave</i>	32
2.4.5	<i>RadioMobile</i>	32
3	Descrição da Aplicação Proposta	35
3.1	Arquitetura da Solução Proposta	35
3.2	Interface do Utilizador	36
3.2.1	Módulo de Autenticação	37
3.2.2	Módulo de Projeto	38
3.2.3	Módulo Main	39
3.3	Serviços	47
3.3.1	Dados Externos	47
3.3.1.1	OpenWeather	48
3.3.1.2	Opentopodata	48
3.3.2	Base de dados	49

3.3.2.1	<i>User</i>	49
3.3.2.2	<i>Project</i>	49
3.3.2.3	<i>Project User</i>	50
3.3.2.4	<i>Project Object</i>	50
3.3.2.5	<i>Frequency Band</i>	51
3.3.2.6	<i>Manufacturer</i>	51
3.3.2.7	<i>WaveGuide</i>	51
3.3.2.8	<i>Antena</i>	52
3.3.2.9	<i>Unit</i>	52
3.3.2.10	<i>Radio Equipment</i>	53
3.3.2.11	<i>Link</i>	53
3.3.3	Módulo de Cálculo	53
3.3.3.1	Espaço Livre	54
3.3.3.2	Atmosfera	54
3.3.3.3	Analisador de Terreno	56
4	Avaliação da aplicação	57
4.1	Ligação Monsanto - Montejunto	57
4.1.1	Análise de perfil de terreno	58
4.1.2	Cálculo das Atenuações	59
4.2	Ligação Marinha Grande - Figueira da Foz	61
4.2.1	Análise de perfil de terreno	62
4.2.2	Cálculo das atenuações	63
5	Conclusões	67
5.1	Conclusão	67
5.2	Limitações e Trabalhos Futuros	68
	Referências	71
A	Constantes	i

B	Características do equipamento rádio Alcatel MDR-800	vii
C	Características do equipamento rádio Nokia Flexi-Hopper 18	ix
D	Detalhes da ligação Monsanto a Serra de Montejunto <i>Path Loss</i>	xi
E	Detalhes da ligação Marinha Grande Figueira Foz <i>Path Loss</i>	xiii

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de uma ligação por FH, adaptado de [12]	10
2.2	Coeficientes de atenuação dos gases atmosféricos [19]	24
2.3	Diagrama dos vários cálculos envolvidos na implementação de [10] . . .	25
2.4	Exemplo de perfil de percurso representado por modelo fictício da Terra	28
2.5	Tipos de redes existentes que podem ser usadas em ligações de Feixes Hertzianos	30
3.1	Arquitetura da Aplicação.	35
3.2	Autenticação	37
3.3	Vista de projeto	38
3.4	Interface para novo projeto	39
3.5	Vista <i>Main</i>	39
3.6	Interface Mapa	40
3.7	Interface gestão de Links	41
3.8	Formulário novo link	41
3.9	Vista <i>Formulário nova unidade</i>	42
3.10	Formulário nova unidade	43
3.11	Interface de gestão para fabricantes	43
3.12	Formulário para fabricantes	43
3.13	Interface de gestão de bandas de frequência	44

3.14	Formulário de bandas de frequência	44
3.15	Interface de gestão guias de onda	44
3.16	Formulário de gestão guias de onda	45
3.17	Interface de gestão equipamentos de rádio	45
3.18	Formulário de equipamentos de rádio	46
3.19	Interface de gestão de antenas	46
3.20	Formulário de antenas	47
3.21	Comparação de perfil de terreno entre a aplicação desenvolvida e o <i>Path-Loss</i>	49
3.22	Módulo de Cálculo	54
3.23	Perfil de Terreno	56
4.1	Sites e ligação representadas no mapa <i>OpenLayers</i>	58
4.2	Elipsóide de <i>Fresnel</i> e Perfil do Terreno	59
4.3	Sites e ligação representadas no mapa <i>OpenLayers</i>	61
4.4	Elipsóide de <i>Fresnel</i> e Perfil de terreno	62
4.5	Perfil de ligação desobstruído	63
B.1	Características do equipamento rádio Alcatel MDR-800	vii
C.1	Características do equipamento rádio Nokia Flexi-Hopper 18	ix

Lista de Tabelas

2.1	Coeficientes para pressão saturada do vapor de água, e_s	13
2.2	Factor k para diferentes condições de refração [10]	17
3.1	Campos do modelo <i>User</i>	49
3.2	Campos do modelo <i>project</i>	50
3.3	Campos do modelo <i>Project_User</i>	50
3.4	Campos do modelo <i>Project Object</i>	51
3.5	Campos do modelo <i>Frequency Band</i>	51
3.6	Campos do modelo <i>WaveGuide</i>	51
3.7	Campos do modelo <i>Antenna</i>	52
3.8	Campos do modelo <i>Unit</i>	52
3.9	Campos do modelo <i>Radio Equipment</i>	53
3.10	Campos do modelo <i>link</i>	53
4.1	Localização site Monsanto-Montejunto	57
4.2	Balanço de potência ligação Monsanto-Montejunto	61
4.3	Localização dos sites Marinha Grande e Figueira da Foz	62
4.4	Balanço de potência da ligação Marinha-Figueira	65
A.1	Coeficientes horizontais para K_h	i
A.2	Coeficientes verticais para K_v	i

A.3	Coeficientes horizontais para alfa	ii
A.4	Coeficientes verticais para alfa	ii
A.5	Dados espectroscópicos para atenuação por oxigénio	ii
A.6	Dados espectroscópicos para o cálculo da atenuação pelo vapor de água .	iv
D.1	Detalhes da ligação Monsanto Montejunto <i>Path Loss</i>	xi
E.1	Detalhes da ligação Marinha Grande Figueira Foz <i>Path Loss</i>	xiii

Acrónimos

ACM	Codificação e modulação Adaptativa. 9
API	Application Programming Interface. 47, 48, 56
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. 48
DAV	Data Above Voice. 8
DAVID	Data Above Video. 8
DUV	Data Under Voice. 8
EU-DEM	European Digital Elevation Model. 48
FH	Feixes Hertzianos. vii, xi, xv, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 39, 41, 49, 52, 53, 54, 57, 58, 67, 68
GIS	Sistema de Informação Geográfico. 31
GPS	Sistema de Posicionamento Global. 6
HTML	HyperText Markup Language. 1, 67
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication. ix, 1, 2
MIMO	Multiple Input Multiple Output. 9

OEM	Ondas Eletromagnéticas. 1, 2, 5, 18
QAM	Quadrature Amplitude Modulation. 9
SDH	Synchronous Digital Hierarchy. 8
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission. 31, 32, 33, 36, 48
TDT	Televisão Digital Terrestre. 57
XPIX	Cross Polarization Interference Cancellation. 9



Introdução

1.1 Enquadramento

A presente dissertação enquadra-se nas áreas de telecomunicações e informática. Ao longo da dissertação foi realizado um estudo teórico dos fenómenos de propagação associados a propagação de Ondas Eletromagnéticas (OEM) e as recomendações ITU-R necessários para o projeto e análise dum sistema de FH. Para além da temática associada a componente rádio, foi também realizado um estudo de tecnologias da ciências de computação como a linguagem *Python*, *HyperText Markup Language (HTML)*, *Javascript*, as *frameworks* Django e Vue.js, para a implementação da aplicação desenvolvida.

1.2 Motivação

As redes de telecomunicações fazem parte do dia a dia. O projeto, supervisão e expansão das redes é feito maioritariamente através de ferramentas computorizadas.

De modo geral as ferramentas existentes no mercado, tais como *Path Loss* [1], *Atoll Microwave* [2], *Global Mapper* [3], são proprietárias, de acesso profissional e sua documentação restrita. Olhando para o espectro de ferramentas para o projeto e análise de redes de comunicações por FH, verifica-se que a premissa mantém-se. Nesse sentido a motivação da presente dissertação foi a construção de uma ferramenta aberta

para o dimensionamento e análise de redes de comunicações por FH, que permitisse o acesso fácil dos utilizadores independentemente da plataforma que se encontrassem.

1.3 Objetivos

A presente dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de código aberto, que permita fazer o projeto e estudo de redes de comunicação por FH através da análise dos fenómenos associados a propagação de OEM. A aplicação desenvolvida, permitirá fazer uma análise do balanço de potência numa ligação com base nas recomendações ITU-R. Através da aplicação será possível escolher os elementos que compõe uma ligação como antenas, equipamentos rádio e também observar o perfil de terreno numa ligação de forma dinâmica através da alteração das alturas das antenas do emissor e recetor por parte do utilizador. Por fim com base na aplicação, serão realizados cenários de teste e os resultados obtidos serão comparados com a ferramenta de planeamento *PathLoss*.

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos:

- **Capítulo 1: Introdução** - No primeiro capítulo, é feita uma introdução do trabalho realizado, o seu enquadramento, os objetivos que se esperam atingir e a motivação inerente a esta solução. Por fim é apresentada a organização do documento;
- **Capítulo 2: Trabalho Relacionado** - Neste capítulo é feita uma introdução sobre os fatos históricos relacionados com os sistemas de FH. São também abordados, os conceitos necessários a ter em conta, para o balanceamento de uma ligação por FH. No final do Capítulo, são apresentadas, algumas ferramentas utilizadas para o projeto numa ligação de FH, com as suas vantagens e desvantagens;
- **Capítulo 3: Descrição da Solução Proposta** - Neste capítulo é feita uma apresentação da solução proposta, os requerimentos necessários para o seu desenvolvimento e por fim uma descrição da solução implementada e os passos tomados para sua concretização;
- **Capítulo 4: Avaliação** - Neste capítulo é apresentada a avaliação da aplicação implementada, comparando os resultados obtidos com a ferramenta *PathLoss* [1];

- **Capítulo 5 : Conclusão-** Por fim, neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e alguns dos possíveis tópicos a serem abordados futuramente.

1.5 Contribuição Principal

A presente dissertação teve como contribuição principal, o desenvolvimento inicial duma aplicação de código aberto que possibilite o estudo e análise de elementos circundantes a um sistema de comunicações por FH, quer a projetistas a um nível profissional, mas sobretudo a estudantes a um nível académico quer na sua utilização ou possível desenvolvimento de novas funcionalidades.

2

Projeto de FH

O presente capítulo tem como propósito apresentar uma breve resenha histórica ao conceito de comunicações sem fios, termo utilizado no presente trabalho para descrever as comunicações realizadas com recurso a Ondas Eletromagnéticas. Ao longo deste capítulo são descritos os vários tipos de comunicações sem fios, os conceitos de FH e os parâmetros utilizados para o planeamento de sistemas de comunicação por FH. Adicionalmente são apresentadas algumas ferramentas, que podem ser utilizadas durante a etapa de planeamento de uma rede deste tipo.

2.1 Comunicações sem Fios

Nos dias que correm o conceito de comunicação sem fios é algo inerente ao quotidiano estando presente nas mais diversas áreas. O conceito das comunicações sem fios, emergiu por volta do ano de 1873 quando o *James Clerk Maxwell* teorizou equações que previam a existência de Ondas Eletromagnéticas, capazes de se propagar com uma velocidade finita, igual à luz [4]. As primeiras comunicações sem fios, datam de 1896 quando o *Guglielmo Marconi* transmitiu sinais de código Morse, utilizando ondas de rádio sem fios, a uma distância de 2.5 km. No ano de 1903 Marconi, começou a transmissão de serviços de mensagens entre *Poldhu*, Inglaterra e estações construídas pelo mesmo, próximas de *Glace Bay*, Nova Escócia e *South Wellfleet* em *Cape Cod*, Estados Unidos da América [5].

Existem vários tipos de sistemas de comunicações sem fios, utilizados para a transmissão de dados. A lista abaixo indica e descreve sumariamente alguns dos mesmos:

- Comunicações por Radar : As comunicações por Radar, utilizam ondas electro-magnéticas radiadas no espaço, para identificação e localização de obstáculos numa determinada posição geográfica. A identificação dos objetos é feita através da análise, no recetor, dos sinais refletidos;
- Wi-Fi: É um tecnologia que permite a criação de redes de comunicação sem fios, permitindo intercâmbio da informação de dispositivos conetados dentro da rede ou por acesso à internet;
- Difusão Celular : A difusão celular é um tipo de sistema que permite a comunicação com dispositivos moveis numa vasta área. Este tipo de sistemas pode transportar vários tipos de informação, como voz, dados e mensagens de sinalização [6] ;
- Sistema de Posicionamento Global (GPS): O GPS é um sistema de posicionamento baseado em satélites, desenvolvido e gerido pelo departamento de defesa Norte Americano, que permite determinar uma localização na superfície terrestre através da triangulação por satélites. Este meio de comunicação utiliza 24 satélites em órbita sincronizada à volta da Terra, onde os mesmos têm posições diferentes [7]. A arquitetura do sistema, baseia-se na utilização de cada satélite para o envio de sinais para os recetores portáteis sediados na Terra, de forma a que uma posição fixa possa ser estimada com três satélites e os restantes para correção dos erros e aumento de precisão;
- Difusão Rádio: A difusão rádio é a transmissão de ondas de radiofrequência moduladas em amplitude ou frequência para transmissão de sinais de televisão ou rádio;
- *Bluetooth* : É uma tecnologia sem fios usada para transmitir dados entre dispositivos eletrónicos numa curta distância. Os dispositivos eletrónicos podem ser telemóveis, computadores, *tablets* entre outros;
- Comunicações via satélite : São como o nome indica, comunicações realizadas, utilizando satélites, que permitem a comunicação de dispositivos em áreas remotas onde não exista cobertura celular. As frequências usadas situam-se entre os 1 GHz e 10 GHz.

2.2 Feixes Hertzianos

A primeira ligação conduzida por FH, data de 1931 entre *Calais* (França) e *St.Margarets Bay* (Inglaterra) [6]. Esta ligação foi realizada por *André Clavier* e sua equipa sobre a supervisão de *Maurice Deloraine*, todos membros do LCT (*Laboratoire Central des Télécommunications*). A ligação tinha uma capacidade para um canal telefónico e operava a uma frequência de 1700 MHz, em modulação de amplitude, com emissores que tinham uma potência de transmissão de 1 W e antenas parabólicas com 3 m de diâmetro. Após dois anos, foi instalada a primeira ligação permanente entre os aeroportos de *Lymptne* (Inglaterra) e *St.Inglevert* (França) cuja a distância é de 56 km, atravessando o canal da Mancha [4].

Nos anos de 1945-1946 na Alemanha, as forças armadas dos Estados Unidos instalaram *links* de FH à uma distância de 1200 Km, entre *Bremen* e *Munich* utilizando equipamentos modulados entre os 500-600 MHz.

A utilização dos FH tornou-se popular depois da segunda guerra mundial para restabelecer os serviços de redes que foram destruídos durante o período da guerra. Na Europa os equipamentos começaram a ser produzidos e implementados para operar a 2 GHz para transmissão de 24, 60 e 20 canais nos anos 1950. A transmissão por FH, tomou grande preponderância para a transmissão de informação, com o surgimento da televisão na década de 50. As estações de televisão, precisavam de ser conetadas, com os diversos emissores de televisão espalhados pelo mundo. A transmissão dos sinais de vídeo, usava tipicamente uma largura de banda de 4 MHz para sinais preto e branco, 6 MHz para sinais a cores. A transmissão não era possível usando cabos simétricos e os cabos coaxial eram de elevado custo. Tirando partido das frequências das portadoras de sistemas de comunicação por FH possuem uma variação entre os 2 e os 20 GHz, foi possível então, modular sinais de TV a larga escala.

Na década 60 , estabeleceu-se a produção dos equipamentos *all-solid-state*, este desenvolvimento tornou-se tecnicamente possível, com o surgimento dos semicondutores. Os novos equipamentos possibilitaram a redução do consumo , tamanhos dos equipamentos e os custos associados a dimensão das fontes de energia, (geradores, retificadores , baterias). Com esta evolução, a transmissão dos FH passou a ser económica, flexível e segura.

No início da década de 70, o baixo custo dos semi-condutores, possibilitou uma nova era na electrónica, dando início, a mais um avanço no mundo das telecomunicações e computadores. Consequentemente de modo a atender as necessidades das trocas de informação entre computadores e os seus requerimentos de transmissões sem falhas

e ruído, a transmissão começou gradualmente a passar de analógica para digital. A transmissão usando as fibras ópticas ainda não estava disponível e a utilização do cabo coaxial, requeria o uso de repetidores em intervalos extremamente curtos, tornando-se pouco econômica [8]. A transmissão digital tinha a vantagem sobre a analógica, porque o sinal podia ser regenerado na sua forma original, independentemente do ruído até um certo limite. Assim a transmissão digital tornou-se uma solução usada nas redes públicas, privadas, bancos, seguradoras entre outras.

A primeira transmissão digital operacional, começou no ano 1969, no Japão. Os equipamentos operavam a uma largura de banda de 2 GHz em que a capacidade da transmissão tinha o limite de 17 Mbps.

Na década de 1970, a conversão do analógico para digital, pode ser atenuada, pela introdução de equipamentos que adicionavam fluxo de dados digitais à banda base analógica existente. A esses equipamentos foram dados nomes de Data Under Voice (DUV), Data Above Voice (DAV) e Data Above Video (DAVID).

Contudo esses equipamentos, deixaram de ser necessários no anos 80, visto que os equipamentos digitais se tornaram disponíveis. A capacidade da transmissão era 34 e 140 Mbps para a Europa, 45, 90, 135, 180 e 270 Mbps para os Estados Unidos, Canadá e Japão. Desde dessa altura, os sistemas de FH começaram a operar nas bandas 2, 6, 11, 13, 15, 18,23, 38, 42, 50 e 60 GHz mundialmente.

O sucesso da transmissão por meios de fibra óptica na década de 80, o rápido crescimento da capacidade de transmissão e dos intervalos de repetição e especialmente a introdução do Synchronous Digital Hierarchy (SDH), fez com que uma nova era despoletasse para os engenheiros. Estes aceitaram o desafio e desenvolveram novas tecnologias como, a técnica de cancelamento da interferência da polarização cruzada, que permite o uso simultâneo da polarização vertical e horizontal na mesma portadora aumentando a capacidade de transmissão; Esquemas de modulação com frequências altas que podem acomodar capacidade mais altas de uma determinada largura de banda; Transmissão com várias portadoras num determinado emissor/recetor aumentando a capacidade da transmissão para o dobro ou quádruplo.

Como resultado dessas novas tecnologias, os FH foram introduzidos na década de 90, com a transmissão através dos SDH com a velocidade de 155-Mbps, 2x 155-Mbps e 622-Mbps. Desde dessa altura em diante, os esforços no desenvolvimento do sistemas de FH, foram no sentido de aumentar as capacidades de transmissão.

Nos últimos anos, a tecnologia de sistemas de comunicação por FH tem vindo a perder preponderância face a outras tecnologias como fibras óticas. Apesar de tudo os sistemas de comunicação por FH, continuam a ser utilizados em diversas áreas. Uma das

grandes áreas onde os FH são utilizados, são os núcleos das redes moveis celulares conhecidos como *backhauls*. Apesar da fibra ser a primeira escolha de muitos operadores moveis para os *backhaul* 4G e 5G, os operadores ainda dependem muito de soluções baseados em sistemas de microondas nas bandas dos 7GHz a 60GHz, tal como bandas de frequências mais altas como a banda V (60 GHz) e E (70/80 GHz) [9]. Os FH proporcionam uma solução de baixo custo e sistemas com a banda E permitem que ligações possam ser implementadas num espaço de dias com um alcance na ordem dos km. As microondas e tecnologias na banda E, incluem algumas inovações como *Codificação e modulação Adaptativa (ACM)*, *High Order Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*, *Cross Polarization Interference Cancellation (XPIC)*, *Compression accelerators* e *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*. Todas estas inovações tem objetivo primordial aumentar a largura de banda das ligações. Uma breve descrição destas inovações é apresentada abaixo:

- **ACM:** Ajuda a gerir a modulação, codificação e outros parâmetros como o sinal e o protocolo relacionados com as condições das ligações por FH;
- **MIMO:** Permite a utilização de múltiplas antenas no emissor e recetor de forma a melhorar a performance da ligação;
- **XPIC:** O cancelamento de interferência de polarização cruzada possui o potencial para aumentar a capacidade da ligação;
- **Compression Accelerators:** Os aceleradores de compressão permitem aumentar a capacidade das ligações, através da compressão do conteúdo das comunicações quer seja através de hardware ou software. Através desta compressão é possível então transportar mais informação nas ligações aumentando sua capacidade;
- **High Order QAM:** Utilização de modulações superiores como 1024-QAM .

2.2.1 Arquitetura dos Feixes Hertzianos

FH são sistema de comunicações, que utilizam ondas de electromagnéticas na gama das microondas para transmitir informação entre dois pontos fixos sobre a superfície terrestre. As frequências variam dos 30 MHz aos 30 GHz. Uma ligação simples de FH pode ser descrita por duas estações, cada uma nas extremidades do feixe sem que hajam obstáculos na linha de propagação que possam bloquear o sinal ou causar difração do mesmo, usando antenas altamente diretivas [10]. Os sistemas de FH podem ser utilizados na mais variadas aplicações como sistemas de vigilância, campos militares, sistemas de localização, entre outras áreas [11].

A Figura 2.1 é um exemplo de uma estrutura de FH entre dois terminais.

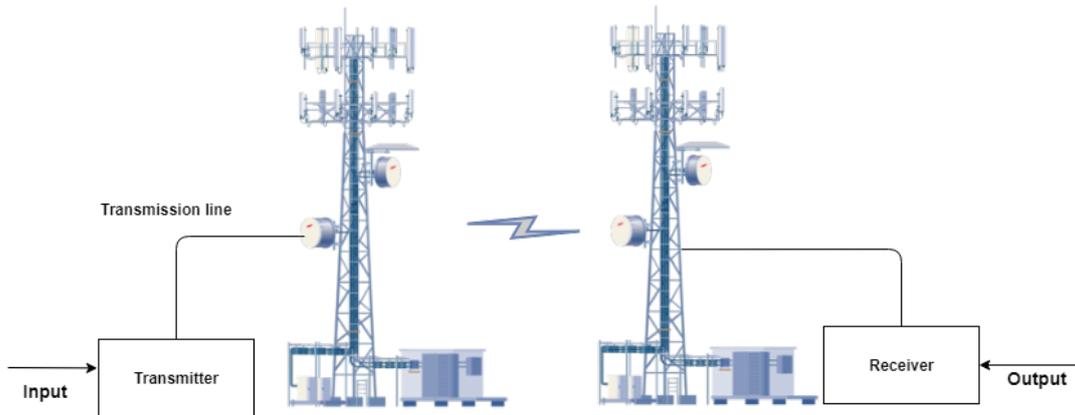


Figura 2.1: Exemplo de uma ligação por FH, adaptado de [12]

Os meios de comunicação por FH possuem algumas vantagens em relação a outros. Os FH apresentam vantagens, tais como o seu baixo custo, fácil implementação e manutenção. Uma das outras vantagens é o fato de serem menos suscetíveis a desastres naturais, razão essa que leva muitas vezes estes sistemas a serem utilizados como salvaguarda para sistemas baseados em fibras ópticas.

2.3 Planeamento dos Feixes Hertzianos

O planeamento dum sistema de comunicação por FH, é um processo exigente e metódico caracterizado por diversas etapas onde inúmeros parâmetros devem ser tidos em conta, desde os fenómenos de propagação, ao hardware escolhido entre outras. O estudo de fenómenos tais como atenuações, desvanecimentos, perfil do terreno, pode tornar-se complexo, sendo muitas vezes indispensável a utilização de ferramentas auxiliares para os diferentes cálculos necessários. Nas próximas secções serão descritos os fenómenos que devem ser considerados no planeamento dum sistema de FH.

2.3.1 Atenuação em espaço livre

Em condições normais de propagação, isto é, na ausência de hidrometeoros, outras condição de refrações anómalas e garantindo que o sistema não tem obstáculos à propagação, as perdas dum sistema são iguais as perdas por propagação em espaço livre, dadas pelo modelo de propagação em espaço livre. Este modelo permite estimar a potência recebida quando o emissor e o recetor tem um caminho livre, completamente

desobstruído entre os mesmos. O modelo de propagação em espaço livre prediz que a potência recebida decai em função da distância entre o recetor e o emissor. A potência recebida pela antena do recetor é dada pela equação 2.1 assente na fórmula de *Friis*,

$$P_R = P_E + G_E + G_R - L_{FS} \quad [dBm] \quad (2.1)$$

onde P_E é a potência emitida, P_R a potência recebida no recetor, G_E ganho da antena emissora dBi, G_R ganho da antena recetora dBi e L_{FS} a atenuação em espaço livre dada pela equação 2.2,

$$L_{FS} = 32.5 + 20 \log d_{[km]} + 20 \log f_{[MHz]} \quad [dB] \quad (2.2)$$

2.3.2 Influência da Troposfera na propagação e Refração

A atmosfera terrestre é composta por diversas camadas, sendo uma delas a troposfera. A troposfera situa-se entre 0 a 10 Km acima da superfície do mar. A sua influência e características têm um grande impacto na propagação e dimensionamento dum sistema de FH.

A troposfera não é um meio homogéneo, ela é formada por camadas, cuja composição, distribuição, altura e a própria duração são variáveis. Tendo em conta a lei de *Snell*, que assume que quando um sinal se propaga ao longo dum meio estratificado irá sofrer refração. É possível verificar que a propagação dum sinal na troposfera não segue uma trajetória linear mas curva, que dependerá da variação da refração entre emissor e o recetor. O efeito de refração é definido pelo índice de refração.

O índice de refração relaciona a velocidade de propagação dum onda electromagnética no vácuo em relação a outro meio, no caso a troposfera. O índice de refração não é constante e possui uma distribuição variável em toda a atmosfera. A variação do índice é muito pequena sendo grande parte dos valores muito próximos da unidade. Sendo o valor absoluto muito próximo de um, as variações do índice de refração diferem entre os 2×10^{-4} a 3×10^{-4} . Pelo facto da variação ser diminuta foi definido um novo parâmetro para cálculos, estatísticas e análises relacionadas como o índice de refração. O novo parâmetro foi definido como índice de refatividade rádio ou refatividade, N . As relações entre o índice de refração e a refatividade são descritas nas equações (2.3) e (2.4) .

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (2.3)$$

$$N = (n - 1)10^6 \quad (2.4)$$

A refratividade rádio, N , pode ser também expressa através das condições atmosférica, como pressão, temperatura e pressão do vapor de água. A recomendação ITU-R P.453-14 [13], descreve como obter a refratividade através da equação (2.5),

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (2.5)$$

onde,

N_{dry} : termo para ambientes secos;

N_{wet} : termo para ambientes húmidos;

P : pressão atmosférica (hPa);

T : temperatura (°K);

e : pressão do vapor de água (hPa).

É possível determinar a pressão do vapor de água, e , em função da humidade relativa do ar utilizando a equação (2.6).

$$e = \frac{He_s}{100} \quad (2.6)$$

onde,

H : humidade relativa (%);

e_s : pressão saturada do vapor de água (hPa) à temperatura t (°C) .

A pressão saturada do vapor de água, e_s , a uma determinada temperatura, é dada pela equação (2.7)

$$e_s = EF \times a \times \exp \left[\frac{\left(b - \frac{t}{d} \right) \times t}{t + c} \right] \quad (2.7)$$

em que,

$$EF = 1 + 10^{-4} [7.2 + P(0.0320 + 5.9 \times 10^{-6} \times t^2)] \quad \text{para água} \quad (2.8)$$

$$EF = 1 + 10^{-4} [2.2 + P(0.0383 + 6.4 \times 10^{-6} \times t^2)] \quad \text{para gelo} \quad (2.9)$$

onde,

t : temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

P : pressão total atmosférica (hPA);

a, b, c, d : coeficientes utilizadas na equação 2.7 indicados na tabela (2.1) .

	Temperatura[$^{\circ}\text{C}$]	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

Tabela 2.1: Coeficientes para pressão saturada do vapor de água, e_s

A densidade do vapor de água, ρ , pode ser obtida através da equação (2.10)

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \quad [\text{hPA}] \quad (2.10)$$

onde p é dado em g/m^3 . Os valores de ρ podem ser encontrados na recomendação ITU-R P.836-6 [14].

2.3.2.1 Gradiente de refratividade rádio

O valor de refratividade rádio num sistema de FH, para uma determinada localização não é essencial, mas sim a variação do mesmo, em função da altura. As influências da refração na propagação dum sinal rádio podem ser estimadas através da variação de refratividade em função da altura, designada por gradiente de refratividade rádio definido pela equação (2.11)

$$\Delta N = \frac{\partial N(h)}{\partial h} \quad (2.11)$$

O gradiente de refratividade rádio varia com a altura em conformidade com as variações da pressão, temperatura e pressão do vapor de água com a altitude. As três grandezas atmosféricas podem ser estimadas em função da altura através dum modelo descrito na recomendação ITU-R P-835-6 [15]. Baseado nesse modelo a recomendação ITU-R P.453-14 [13], contem uma expressão que permite o cálculo da refração rádio em função da altura, utilizando a altura ao nível do mar como referência. A expressão é descrita na equação (2.12).

$$N(h) = N_0 \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) \quad (2.12)$$

onde,

N_0 = valor médio da refratividade atmosférica ao nível do mar;

h_0 = altura para fins de de normalização (m);

h = altura acima do nível do mar (m).

N_0 e h_0 dependem das características climatéricas de cada região. Para fins de referência podem ser utilizados os valores médios de 315 para N_0 e 7.35 Km para h_0 .

2.3.2.2 Classificação da propagação na Troposfera

A propagação troposférica depende de vários fatores entre os quais a refratividade. A refratividade não é uniforme e varia de região para região, como descrito na secção 2.3.2.1 em função da altura. As condições em que propagação rádio, se dá na troposfera podem ser classificadas e definidas através do gradiente de refratividade rádio, ΔN . As condições de propagação rádio na troposfera são denominadas por troposfera normal, troposfera sub-refrativa e super-refrativa.

Troposfera Normal - Considera-se troposfera normal ou standard quando o gradiente refractivo tem um valor de -39 N units/km. Este valor é mediano na Terra, sendo geralmente o valor padrão a ser utilizado no dimensionamento dum sistema de telecomunicações;

Troposfera Sub-refrativa - A designação de troposfera sub-refrativa é feita em situações que os valores da refratividade rádio são próximos de zero ou positivos. A troposfera sub-refrativa está associada a condições climatéricas onde o gradiente da temperatura é negativo ou a pressão do vapor de água é positivo. Esta condição pode ocorrer também se ambas as situações se verificarem. A sub-refração é mais provável em localizações onde a temperatura seja alta e humidade baixa (temperatura $>30^\circ\text{C}$, humidade $<40\%$);

Troposfera Super-refrativa - A troposfera super-refrativa ocorre quando o gradiente de refratividade rádio é menor que -100 N units/km. A super-refração está normalmente associada à inversão da temperatura.

2.3.2.3 Ductos

Um ducto é uma região da troposfera, que devido a valores anómalos de refratividade, mantém a propagação de um sinal confinada entre duas camadas da troposfera ou entre a camada da troposfera e a superfície da Terra. Existem três tipos de ductos, ductos de superfície, superfície elevada e ductos elevados. Os ductos de superfície, originam regiões que confinam a propagação entre a camada baixa da troposfera e a superfície da Terra. Os ductos elevados são estabelecidos entre duas camadas das troposfera, estes ductos costumam-se situar nos primeiros quilómetros da troposfera. Os ductos são gerados em condições de super-refração onde os gradientes da refratividade rádio são menores a -157 N unidades/km. A propagação rádio num ducto é difícil caracterizar sendo a sua quantificação muitas vezes teórica. Uma das abordagens para o estudo da propagação num ducto, são as aplicações de técnicas como multi-raio que tem em conta as diferentes trajetórias num ducto.

A recomendação ITUR-R P.453-14 [13] estabelece um novo parâmetro referido como refratividade rádio modificada (M), para situações onde o gradiente da refratividade rádio é inferior a -157 N units/km. Os ductos são descritos em função de M pela equação (2.13).

$$M(h) = N(h) + 157h \quad (2.13)$$

onde, M é dimensional e h é a altura acima do nível terrestre em quilómetros.

2.3.2.4 Encurvamento do raio: Raio efetivo da Terra

A trajetória efectuada pela frente de onda entre um emissor e um recetor num sistema de FH na troposfera é curva e esta depende directamente do valor de refratividade ao longo do percurso. Em condições de atmosfera standard, onde o gradiente de refratividade rádio é próximo de -39 , a curvatura da frente da onda rádio é superior a trajetória horizontal entre o emissor e o recetor. Na ocorrência de sub-refração, a trajetória da frente de onda é severamente encurvada sendo menor que o raio ótico. Para casos de super-refração a trajetória da frente de onda diverge em relação a curvatura da Terra, sendo que a trajetória da frente de onda tem tendência a fugir da superfície terrestre.

Em termos práticos e de forma a simplificar, é ignorado o facto do gradiente não ser constante no trajeto entre o emissor e o recetor. Em dimensionamento de sistemas de FH é assumido que o sinal segue uma trajetória curva com um raio constante, que

depende do valor médio do gradiente ao longo do percurso entre o emissor e o recetor. O raio pode ser obtido através da aplicação da Lei de *Snell* demonstrada na equação (2.14).

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\cos \varphi}{n} \frac{dn}{dh} \quad (2.14)$$

onde,

ρ = raio da curvatura da trajetória da onda;

n = índice de refração;

dn/dh = gradiente vertical de refratividade;

φ = ângulo medido em relação ao caminho horizontal .

Assumindo que na maioria dos casos, o ângulo de emissão da antena emissora é praticamente zero e o índice de refração é próximo de 1 é possível escrever o raio da trajetória curva pela equação (2.15).

$$\rho = \frac{1}{R} = -\frac{\partial N(h)}{\partial h} \quad (2.15)$$

Apresentando a relação entre a refratividade, N e o índice de refração, n , na equação (2.15), a curvatura pode ser expressa em função da refratividade rádio, como ilustrado na equação(2.16).

$$\Delta N = \frac{\partial N(h)}{\partial h} = -10^6 \frac{1}{R} = -10^6 \rho \quad (2.16)$$

Existem diversos modelos geométricos para representar o percurso da onda e as alturas ao longo da superfície terrestre. Porém o mais utilizado em sistemas de FH é o modelo baseado no raio efetivo da Terra dado pela equação (2.17). Este modelo representa a propagação de uma onda rádio entre um emissor e um recetor como uma linha reta, compensando a curvatura da Terra com a real trajetória de propagação seguida pelo sinal rádio. O raio modificado da Terra é denominado de raio efetivo da Terra, pode ser obtido através do factor k que define um rácio entre o o raio real da Terra, R_0 , e o efetivo, R . O factor k é calculado em função do gradiente de refração rádio e o raio real da Terra, através da equação (2.18).

$$R = k * R_0 \quad (2.17)$$

$$k = \frac{1}{1 + R_0 \Delta N \cdot 10^{-6}} = \frac{157}{157 + \Delta N} \quad (2.18)$$

Desta forma e tendo em consideração as condições de refração descritas nas secções anteriores, a Tabela 2.2 descreve as relações entre o factor k e o gradiente de refratividade.

Condições da Troposfera	ΔN (N units/km)	k
Normal	$0 \leq \Delta N < -39$	$1 \leq k < 4/3$
Subrefração	$\Delta N > 0$	$0 \leq k < 1$
Super-refração	$\Delta N < -39$	$k > 4/3$
Ductos	$\Delta N \leq -157$	$k = \infty$

Tabela 2.2: Factor k para diferentes condições de refração [10]

Em condições de propagação standard o fator k tem o valor $4/3$. Este valor é obtido através da média dos valores ao longo dum grande período de tempo.

2.3.3 Elipsóide de *Fresnel*

Os sistemas de comunicação por FH, são por norma desenhados de forma a terem perfeitas condições de propagação, onde não existam quaisquer perdas por difração causadas pelas irregularidades do terreno. Em condições de propagação normal o feixe que conecta um emissor e um recetor deverá estar bem acima de qualquer obstáculo causado pelo terreno e as perdas por difração devem ser nulas. Como ilustrado na secção 2.3.2 a propagação ao longo da troposfera, não segue uma linha recta e em condições de subrefração, o caminho seguido pela frente de onda pode ser curvado e intersectar com obstáculos no terreno. É considerada a existência de difração, se o elipsóide de *Fresnel* ou zona de *Fresnel* estiverem obstruídos. O elipsóide de *Fresnel* surge do principio de *Huygens*, que 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 . Tendo em conta este principio, *Fresnel* demonstrou que a energia entre um emissor e um recetor é distribuída entre um número infinito de elipsóides. De acordo com o modelo de *Fresnel*, a potência total recebida será estimada, através da influência dos elipsóides constituintes numa ligação, onde alguns irão ter uma influência positiva e outros negativa.

O raio dum elipsóide numa determinada localização entre a ligação entre o emissor e o recetor, depende da frequência e da ordem n do elipsóide. O raio pode ser obtido

através da equação (2.19).

$$R_n = 548 \sqrt{\frac{n \cdot d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} (m) \quad (2.19)$$

onde,

n = ordem do elipsóide;

d_1 = distância até ao emissor [Km] ;

d_2 = distância até ao recetor [Km] ;

d = distância entre o recetor e emissor [Km] ;

f = frequência [MHz] .

O dimensionamento de sistemas de FH é feito, geralmente com base apenas no elipsóide de *Fresnel* de primeira ordem, visto, que grande parte da energia da OEM se concentra no mesmo. Para efeitos de análise da obstrução dos obstáculos é assumido que se 60% ou mais do elipsóide de *Fresnel* estiver desobstruído, é considerado uma ligação em espaço livre.

O horizonte rádio é um factor fulcral para o dimensionamento, dos sistemas de FH, pois consiste na localização duma ligação onde o raio directo entre a antena emissora e recetora, é tangente à superfície terrestre. Através do horizonte rádio é possível, assumindo a não existência de anomalias na atmosfera e uma terra perfeitamente esférica, estabelecer uma distância máxima duma ligação, através da equação 2.20.

$$D = 3.569 \times \sqrt{h_1} + 3.569 \times \sqrt{h_2} (m) \quad (2.20)$$

em que h_1 e h_2 são as alturas efetivas no emissor e recetor respetivamente.

2.3.4 Atenuação devido à chuva

Numa ligação de FH existem vários fatores, que podem provocar a indisponibilidade dos sistemas de comunicação, como hardware, a interferência e o desvanecimento. No desvanecimento, existem as atenuações causadas por precipitação que podem ter uma grande influência na disponibilidade dos FH. A atenuação provocada pela precipitação, fenómeno natural que varia de região para região e de ano para ano, pode ser considerada como um problema, nas frequências acima de 5 GHz ou entre 20-30 GHz, dependendo da distância e das localizações das ligações. Um dos conceitos principais para a análise da atenuação devido à precipitação, é a disponibilidade das ligações, de

modo a perceber qual é a percentagem do tempo que uma ligação tem de estar operacional. Esta disponibilidade é depois usada em conjunto com outros fatores que podem causar a falha de uma ligação. Ao longo do tempo, muitos modelos foram usados para calcular a atenuação devido as precipitação, mas nesta dissertação é descrito o método ITU-R.

2.3.4.1 Método ITU-R

O documento do ITU-R P.530-17 [16] explica os vários passos que devem ser considerados para obter a atenuação da chuva. A atenuação da chuva é caracterizada através do parâmetro R_p que representa o coeficiente de precipitação não excedido durante uma percentagem do tempo. Os passos necessários para obter a atenuação devido à chuva, são descritos abaixo:

1. Obtenção da intensidade da chuva $R_{0,01}(mm/h)$, que excede 0,01% do tempo, com um tempo de integração de 1 minuto. No caso de não termos informação através de fontes locais, é possível obter o valor do mesmo através da fórmula do ITU-R P.837 [17].
2. Cálculo da atenuação específica, de acordo com a intensidade da chuva, $\gamma_R[dB/km]$. A atenuação específica é dada em função da frequência, polarização e a intensidade da chuva demonstrada na equação 2.21, usando a recomendação ITU-R P.838-3 [18].

$$\gamma_R = K * R^\alpha \quad (2.21)$$

O coeficientes K e α , para polarizações horizontais e verticais para uma gama de frequências entre os 1 a 1000 GHz, são estimados de de acordo com a equações 2.22 e 2.23 respetivamente,

$$\log_{10} K = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (2.22)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (2.23)$$

onde,

f = frequência [GHz]

$a, b, c, m,$ = constantes dos coeficiente k e α para polarização horizontal e vertical.

Os valores das constantes para coeficiente k para polarização horizontal (K_H) encontram-se na Tabela A.1 e para polarização vertical (K_V) na Tabela A.2 do apêndice A. Os valores das constantes para coeficiente α para polarização horizontal (α_H) encontram-se na A.3 e para polarização vertical (α_V) na Tabela A.4 do apêndice A.

Os coeficientes k e α para polarizações circulares, podem ser obtidos através da equação 2.24 e 2.25 respectivamente

$$K = \frac{K_H + K_V + (K_H - K_V) \cos^2 \varnothing \cos (2\tau)}{2} \quad (2.24)$$

$$\alpha = \frac{K_H \alpha_H + K_V \alpha_V + \left(K_H \alpha_H - K_V \alpha_V \right) \cos^2 \varnothing \cos (2\tau)}{2k} \quad (2.25)$$

onde,

\varnothing = ângulo de Elevação da ligação [°]

τ = ângulo de polarização em relação à horizontal ou 45 graus polarização na circular.

3. Cálculo do comprimento efetivo do percurso d_{eff} , numa ligação, multiplicando o comprimento real do caminho d pelo factor da distância r .

$$d_{eff} = d.r \quad [km] \quad (2.26)$$

onde r , é representado pela equação 2.27,

$$r = \frac{1}{0.47d^{0.663} R_{001}^{0.073\alpha} f^{0.12} - 10.579(1 - \exp(-0.024d))} \quad (2.27)$$

em que,

f = frequência [GHz];

α = coeficiente calculado a partir da equação 2.25 ou 2.23;

d = distância do percurso [Km]

O valor máximo recomendado para r é 2.5, no caso de o denominador da equação 2.27 for menor que 0.4, deve-se considerar igual a 2.5.

4. A atenuação devido a chuva não excedida 0.01% é obtida a partir da equação 2.28,

$$A_{0.01} = \gamma_R d_{eff} [dB] \quad (2.28)$$

5. A atenuação excedida para outras percentagens do tempo p , entre 0.001% a 1% pode ser deduzida através da equação 2.29,

$$A_p = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} A_{0.01} \quad (2.29)$$

onde as constantes C_1, C_2, C_3 são calculadas através das equações 2.30, 2.31, 2.32 respectivamente,

$$C_1 = (0.07^{C_0}) [0.12^{1-C_0}] \quad (2.30)$$

$$C_2 = 0.855C_0 + 0.546(1 - C_0) \quad (2.31)$$

$$C_3 = 0.139C_0 + 0.043(1 - C_0) \quad (2.32)$$

A constante C_0 é calculada através do sistema,

$$C_0 = \begin{cases} 0.4 \left[\log \left(\frac{f}{10} \right)^{0.8} \right] f + 0.12 \geq 10GHz \\ 0.12 * f < 10GHz \end{cases} \quad (2.33)$$

2.3.5 Atenuação devido aos gases atmosféricos (H_2O e O_2)

A atmosfera é composta por gases, que absorvem energia electromagnética para diferentes frequências. Os gases considerados numa ligação de FH, são o vapor de água e o oxigénio. Os gases atmosféricos como vapor de água e oxigénio, podem provocar atenuações suplementares, dependendo do comprimento e da inclinação das ligações.

A recomendação ITU-R P676-12 [19], descreve uma solução para o cálculo da atenuação pelos gases atmosféricos. Este modelo é válido para frequências acima de 1000 Hz. A atenuação específica, devido aos gases atmosféricos é descrita pela equação 2.34,

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_w = 0.1820f \left[(N''_{oxygen}(f) + N''_{waterVapour}(f)) \right] \quad (2.34)$$

onde,

γ_0 = Coeficiente de atenuação específica devido ao oxigénio [dB/km];

γ_w = Coeficiente de atenuação específica devido ao vapor de água [dB/Km];

f = Frequência [GHz]

As constantes, N''_{oxygen} e $N''_{waterVapour}$ podem ser obtidas através da equação 2.35 e 2.36 respetivamente,

$$N''_{oxygen} = \sum_{i(oxygen)} S_i F_i + N''_D(f) \quad [dB/km] \quad (2.35)$$

$$N''_{waterVapour} = \sum_{i(waterVapour)} S_i F_i \quad [dB/Km] \quad (2.36)$$

Em que S_i é a força na i -ésima linha do oxigénio ou vapor da água. F_i é o factor modelador na i -ésima linha do oxigénio ou vapor da água. N''_D representa o contínuo do Ar seco, devido à pressão induzida pela absorção do nitrogénio e espectro de *Debye*. As constantes $S_i F_i$ podem ser obtidas pela equação 2.37 e 2.38 respetivamente,

$$S_i = a_1 * 10^{-7} * p * \theta^3 * \exp[a_2(1 - \theta)] \quad \text{Para Oxigénio} \quad (2.37)$$

$$S_i = b_1 * 10^{-1} * e * \theta^{3.5} * \exp[b_2(1 - \theta)] \quad \text{Para Vapor de Água} \quad (2.38)$$

onde,

P = Pressão do ar seco [hPa];

e = Pressão parcial do vapor de água [hPa];

θ = 300/Temperatura [K];

T = Temperatura [K] .

No caso dos valores de e, P, T , não estarem disponíveis, os mesmos podem ser obtidos através da recomendação do ITUR-P.835 [15]. A pressão parcial de vapor de água, e , pode ser obtida através da equação 2.39,

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \quad (2.39)$$

onde, ρ é a concentração de vapor de água e T a temperatura.

O fator F_i é o fator da forma de linha, que pode ser calculado através da expressão 2.40,

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta_f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta_f^2} + \frac{\Delta_f - \delta(f_i - f)}{(f_i + f)^2 + \Delta_f^2} \right] \quad (2.40)$$

onde, f_i é a linha da frequência para oxigénio ou para água, Δ_f é a largura da linha que

pode ser obtida pela equação 2.41 e 2.42 respetivamente.

$$\Delta_f = a_3 * 10^{-4} * (p * \theta^{(0.8-0.4)} + 11e\theta) \quad \text{Para Oxigénio} \quad (2.41)$$

$$\Delta_f = b_3 * 10^{-4} * (p * \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) \quad \text{Para Vapor de Água} \quad (2.42)$$

O Δ_f pode ser modificado, para levar em conta os efeitos de *Zeeman* e *Doppler* [19] pela expressão, 2.43 e por 2.44,

$$\Delta_f = \sqrt{\Delta_f^2 + 2.25 * 10^{-6}} \quad \text{Para Oxigénio} \quad (2.43)$$

$$\Delta_f = 0.535\Delta_f + \sqrt{0.217\Delta_f^2 + \frac{2.1316 * 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad \text{Para Vapor de Água} \quad (2.44)$$

O factor de correção, δ , surge por efeitos de interferência causado nas linhas de oxigénio, sendo dada pela equação 2.45, 2.46 respetivamente,

$$\delta = (a_5 + a_6\theta) * 10^{-4}(p + e)\theta^{0.8} \quad \text{Para Oxigénio} \quad (2.45)$$

$$\delta = 0 \quad \text{Para Vapor de Água} \quad (2.46)$$

O contínuo do Ar seco, surge do espectro de *Debye* não ressonante para frequências abaixo de 10 GHz e da pressão induzida pela atenuação do nitrogénio, para frequências acima do 100 GHz sendo representado pela expressão 2.47

$$N_D''(f) = fp\theta^2 \left[\frac{6.14 * 10^{-5}}{d[1 + (\frac{f}{d})^2]} + \frac{1.4 * 10^{-12} p\theta^{1.5}}{1 + 1.9 * 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (2.47)$$

onde d é o parâmetro da largura para espectro de *Debye*, $d = 5.6 * 10^{-4}(p + e)\theta^{0.8}$

A Figura 2.2 representa os coeficientes de atenuação dos gases atmosféricos, calculados para frequências de 0 a 1000 GHz num intervalo de 1 GHz, usando uma pressão atmosférica de 1013.25 [hPa], para uma temperatura de 15 °C, densidades de vapor de água de 7.5g/m³ (standard) e atmosfera seca.

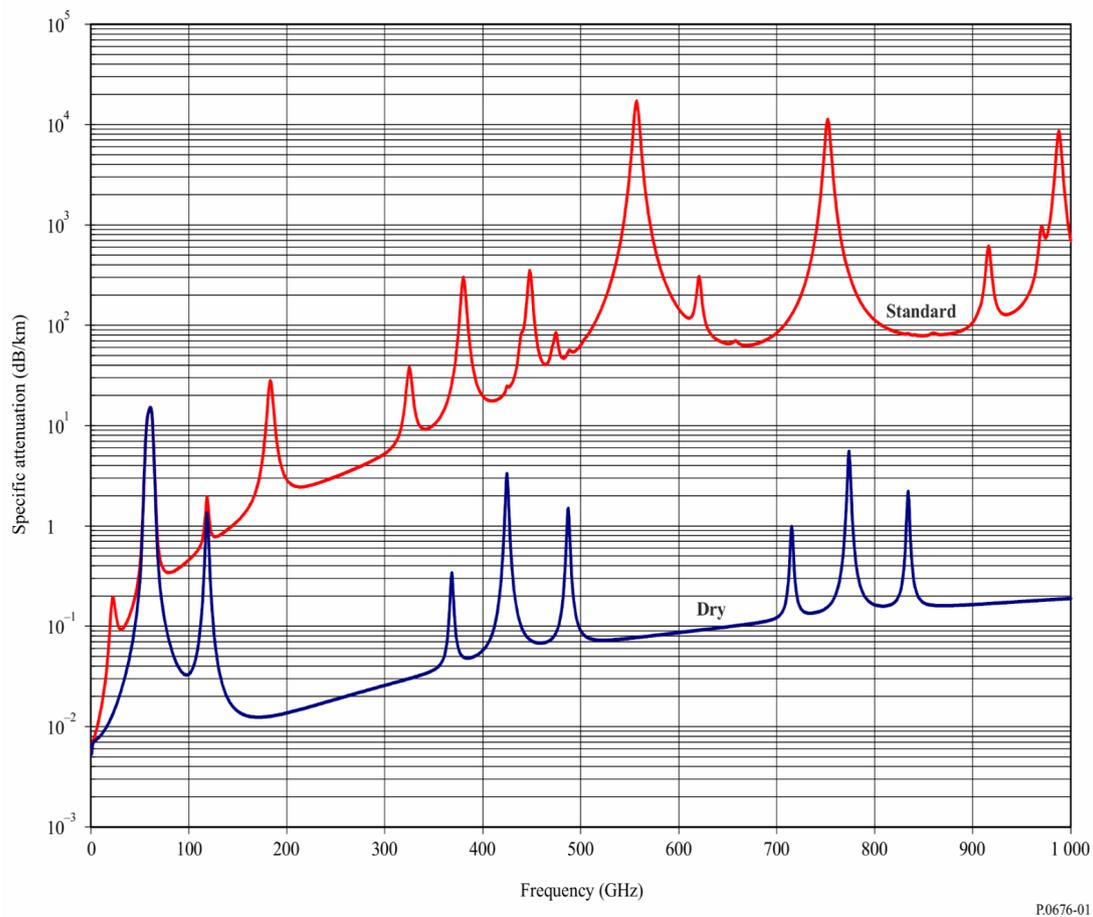


Figura 2.2: Coeficientes de atenuação dos gases atmosféricos [19]

2.3.6 Balanço de Potência

O balanço de potência numa ligação de FH representa o conjunto de cálculos utilizados para estimar a potência disponível no recetor em função da potencia transmitida.

A Figura 2.3 , exemplifica um diagrama de blocos que inclui todos os elementos genéricos de uma rede de telecomunicações, desde do transmissor até ao recetor. O diagrama ilustra os vários cálculos envolvidos na implementação do FH. O diagrama contém um conjunto de elementos associados com o equipamento de transmissão, equipamento transmissor(TX), distribuição de antena e circuitos de acoplamento como, *feeder, mltiplexers*, o circuito de antena, que é responsável por todos os elementos associados com as perdas da antena. Do lado do recetor, existem as antenas com perdas ideais, circuito da antena da receção, circuitos de acoplamento antena recetora e o recetor (RX).

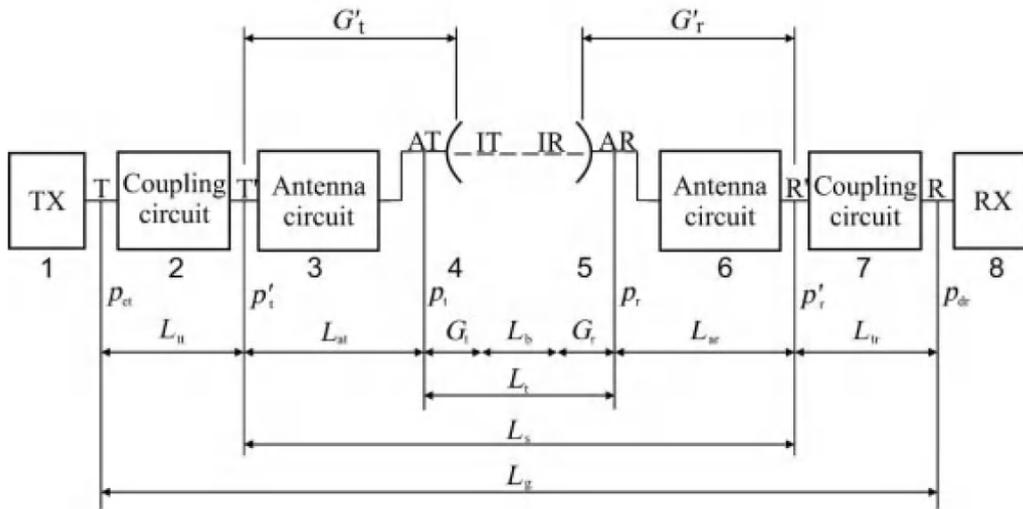


Figura 2.3: Diagrama dos vários cálculos envolvidos na implementação de [10]

Cálculo do Balanço de Potência

A potência recebida em dbm, P_{rx} , é dada pela equação 2.48

$$P_{rx} = P_{tx} - L_{tt} + G_t - L_b + G_r - L_{tr} - L_{bexc} \quad (2.48)$$

onde,

P_{tx} = A potência transmitida [dBm];

L_{tt} = Perdas nos circuitos de acoplamento que conectam a antena (Entre a Interface T' e AT) [dB];

L_{tr} = Perdas nos circuitos de acoplamento que conectam a antena (Entre a interface R' e R);

L_b = Perdas de propagação básica, em função da distancia, frequência e mecanismos de propagação;

G_t = Ganho da antena transmissora [dBi];

G_r = Ganho da antena recetora [dBi].

A atenuação em excesso, L_{bexc} , inclui todas as perdas sofridas durante a propagação do sinal ao longo do percurso, que não podem ser associadas com as perdas no espaço livre. Todas as perdas por excesso serão representadas por variáveis estatísticas que irão depender de como os diferentes fatores associados afectam o sinal. Esses fatores estão associadas a refração, difração, reflexão e espalhamento. Na prática, nem todas as perdas de propagação têm uma variação alta o suficiente que possa ser modelada.

Consequentemente, para fins de projeto de sistema, as perdas por excesso são divididas em, perdas fixas ou constantes e as perdas variáveis. As perdas constantes, estão associadas com a atenuação dos gases atmosféricos referidas na secção 2.3.4. As perdas variáveis, são aquelas que variam ao longo do tempo, relevantes o suficiente para serem incluídas nos cálculos dos links, tais como as perdas provocadas pela difração, pela precipitação, pelas condições anómalas de refração, pelas reflexões e por multi-percurso [10]. A atenuação em excesso é calculada através da equação 2.49.

$$L_{bexc} = L_{bexc f} + L_{bexc v} \quad [dB] \quad (2.49)$$

onde,

$L_{bexc f}$ = perdas fixas;

$L_{bexc v}$ = perdas Variáveis.

As perdas fixas e variáveis, $L_{bexc f}$, $L_{bexc v}$ são calculadas através equações 2.50 e 2.51 respetivamente,

$$L_{bexc f} = L_{gases} + L_{vegetation} \quad [dB] \quad (2.50)$$

$$L_{bexc v} = L_{diffraction} + L_{scintillation} + L_{hydrometeors} + L_{multipath} + L_{XPD} + L_{misalignment} \quad [dB] \quad (2.51)$$

onde,

$L_{diffraction}$: Atenuação devido à difração nos obstáculos;

$L_{scintillation}$: Atenuação devido cintilação troposférica;

$L_{hydrometeors}$: Atenuação devido à precipitação;

$L_{multipath}$: Atenuação devido ao multi-percurso;

L_{XPD} : Atenuação devido à despolarização;

$L_{misalignment}$: Atenuação causada por condições anómalas de refrações.

2.3.7 Considerações gerais para o planeamento de feixes Hertzianos

Esta secção, descreve as considerações gerais que devem ser levados em conta durante o planeamento dos FH. Para o planeamento são consideradas três fases como essenciais [10],

1. O Planeamento inicial e dimensionamento, onde os parâmetros e seus valores padrão das ligações são definidos. Nesta fase são definidos os vários elementos

de redes, tais como, comutação de pacotes, servidores, *gateways*, estações base, transmissão, conexão física entre outros elementos. Os volumes, os tipos, as prioridades de tráfego que é transmitido por cada link, que inclui as rotas de destinos e o tráfego de dados associado são definidos durante esta fase. Usando esses parâmetros como uma referência inicial, a capacidade e a banda da frequência serão definidos, em consequência os equipamentos dos diferentes fabricantes irão ser definidos. A configuração desses equipamentos e antenas irão ser feitas com base, no tipo de proteção, banda da frequência e comprimento dos saltos;

2. Nesta fase, o planeamento é feito a um nível mais detalhado, de modo a garantir a funcionalidade do sistema. Isto inclui todos os algoritmos de design, o que pode implicar, alterações nas considerações iniciais. Esta fase é considerada como a análise do percurso da engenharia, isto significa que é feita uma análise, de todas as alternativas de percurso em linha de vista entre recetor e transmitir, de forma a garantir um critério de desimpedimento alto o suficiente, para evitar difrações, mesmo e condições atmosféricas adversas e garantir a disponibilidade e a qualidade do sinal. As localizações de cada repetidor, o dimensionamento de cada transmissão, os prédios, a sala de equipamentos, acessos, torres e instalação das antenas são determinados nesta fase. A ausência de obstáculos ao longo do percurso é garantida, através de cálculos geométricos. Esses cálculos requerem dados topográficos usado para a extracção dos perfis de terreno. Nesta fase é realizada também a análise de possíveis interferências entre estações, que possam surgir através dos lóbulos laterais das antenas, ou por sinais indirectos espalhados no terreno recebidos através do lóbulo principal da antena. Durante esta fase a disponibilidade do link e o desempenho da rede, garantem que todos os critérios que foram definidos na fase inicial estão a ser cumpridos. Nestes cálculos estão incluídos o balanço de potência e os cálculos dos diferentes fenómenos de desvanecimento;
3. Nesta fase são feitos os testes, optimizações e manutenções dos sistemas. Após a instalação dos *links*, são realizados, os primeiros testes e validações dos sistemas e a optimização dos parâmetros que possam melhorar a performance do dos mesmos.

2.3.7.1 Perfil do terreno e desobstrução

A análise da desobstrução, é feita com base na altura do terreno ao longo do perfil do percurso entre estações, comparada, com o percurso do sinal de rádio do primeiro elipsóide de *Fresnel*. A análise, inclui também, o estudo da reflexão. Através dos mesmos

estudos, são estimadas as altura das antenas, a extracção e visualização do perfil do percurso entre as duas estações. Os perfis de altura do terreno podem ser representados usando diferentes modelos da Terra de acordo com [10]. Os modelos encontram-se descritos aqui,

1. Raio real da Terra : A curvatura real da Terra é representada, usando uma linha de base ou curva de altura zero, de natureza parabólica. O percurso do sinal é representado pelo traçar real do percurso percorrido pelo sinal de radio.
2. Terra Plana : A superfície da Terra é representada por uma linha recta e o percurso do sinal, é desenhado de forma a incluir a curvatura causada pela refração da atmosfera e a correção associada a planificação da superfície terrestre.
3. Terra Fictícia: Neste cenário o percurso do sinal é representado por uma linha reta. Consequentemente, a superfície da Terra é desenhada usando uma linha de base parabólica que inclui a curvatura real da Terra e o factor da refração de modo a compensar o desenho da propagação como uma linha reta. O raio equivalente da Terra é kR_0 .

A Figura 2.4 demonstra um perfil dum percurso representado pelo modelo fictício da Terra.

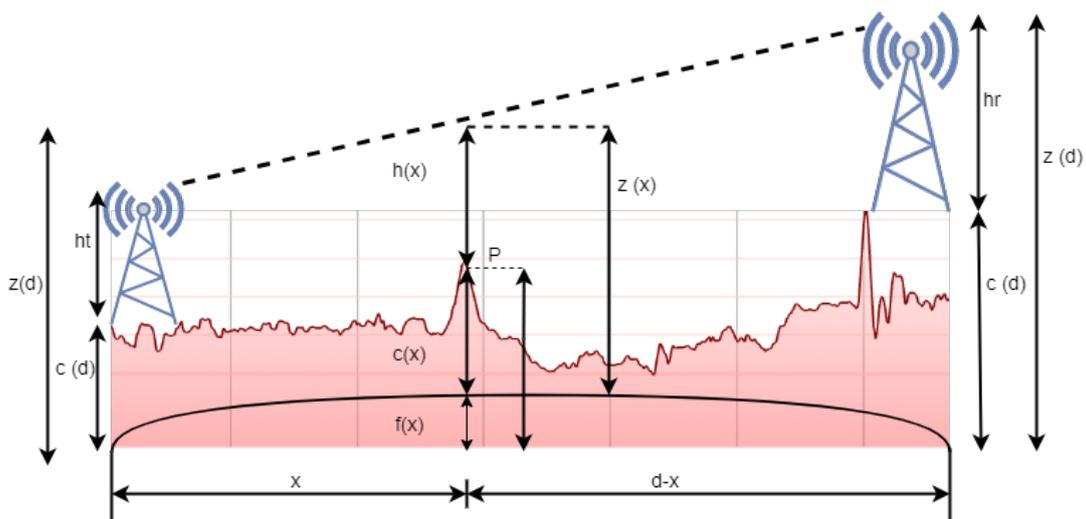


Figura 2.4: Exemplo de perfil de percurso representado por modelo fictício da Terra

A protuberância da Terra $f(x)$ está associado a uma determina localização, P , a uma distância x da estação transmissora e uma distância $d - x$ da estação recetora é dada

pela equação 2.52,

$$f(x) = \frac{x(d-x)}{2kR_0} \quad (2.52)$$

onde todas as distâncias são expressas em metros e R_0 é o raio real da Terra.

A altura efectiva do terreno, $Z(x)$, numa localização P , é a elevação geográfica mais o valor da protuberância expressa na equação 2.52, dada pela fórmula 2.53,

$$Z(x) = C(x) + f(x) \quad (2.53)$$

A partir do modelo de protuberância, a linha recta que conecta o transmissor e o recetor, T-R, é dada pela equação 2.54,

$$Y(x) - Z(0) = \frac{Z(d) - Z(0)}{d}x \quad (2.54)$$

onde,

d , é a distância horizontal entre a antena transmissora e a antena recetora
 $Z(0), Z(d)$, altura das estações a nível do mar pela equações 2.55, 2.56,

$$Z(0) = Y(0) = C(0) + h_t \quad (2.55)$$

$$Z(d) = Y(d) = C(d) + h_r \quad (2.56)$$

onde,

h_t, h_r são as alturas das antenas na torre acima do solo.

$C(0), C(d)$ são alturas do terreno acima do nível médio do mar na estação transmissora e recetora.

O desimpedimento, $h(x)$, numa determinada localização é dada pela equação 2.57. A desobstrução representa o rácio entre o raio directo e os obstáculos no terreno.

$$h(x) = Z(x) - Y(x) \quad (2.57)$$

O sinal da desobstrução pode ser negativo ou positivo. O sinal é negativo quando o raio directo está acima da altura efectiva do terreno. A teoria indica que as perdas por difração devido a um obstáculo, ocorrem se o raio directo, tiver uma margem acima do obstáculo igual ao 60% do primeiro elipsóide de Fresnel.

2.3.7.2 Topologia das Redes

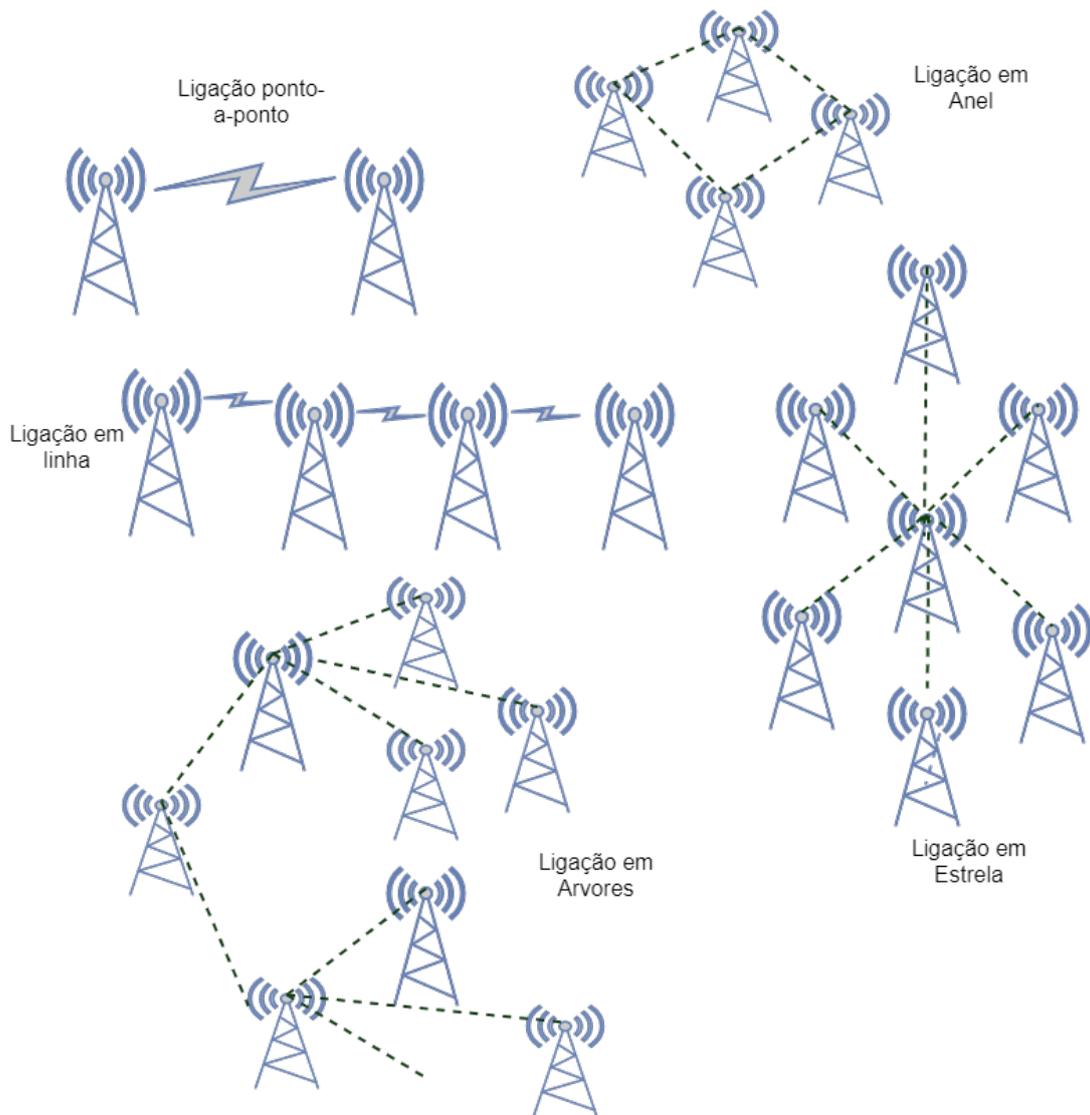


Figura 2.5: Tipos de redes existentes que podem ser usadas em ligações de Feixes Hertzianos

Existem várias topologias, usadas para a implementação de redes de FH, dependendo dos requerimentos imposto pelas entidades responsáveis. As mais comuns, são as ligações ponto-a-ponto, em linha, em árvore, em anel e estrela [10]. Uma ligação ponto-a-ponto, refere-se a uma ligação entre dois terminais, onde o tráfego partilhado pode ser bidireccional ou unidireccional. Numa ligação em linha cada nó é conectado, a mais dois terminais (este e oeste), excepto para os nós que se encontram nas extremidades da linha. A topologia em árvore, é constituída por uma série de terminais interconetados, que se assemelham a uma árvore. Estas topologias são chamadas de nós de agregação, porque concentram o tráfego de todas as ligações conetados a cada

nó, de modo a informação ser transmitida para a próxima ramificação. Numa ligação em anel, os terminais estão conetados em série, formando um circuito fechado. O envio dos pacotes para os respetivos destinos, é feito através de dois percursos, sentido horário e anti-horário. Numa topologia em estrela todos os nós estão conetados a um nó central, onde toda a informação deve passar obrigatoriamente. A Figura 2.5, representa os vários tipos de redes que podem ser usados em ligações FH

2.4 Aplicações disponíveis

Esta secção apresenta algumas das ferramentas existentes para o planeamento dos sistemas de FH.

Existem ferramentas no mercado como, *Smart Link Planning Tool*, *MlinkPlanner*, *Path-Loss*, *Global Mapper*, *Atoll Microwave*, *RadioMobile*, contudo algumas destas possuem um elevado custo monetário, devido às licenças necessárias para a sua utilização.

2.4.1 *Smart Link Planning Tool*

Smart Link Planning Tool [20] é uma ferramenta, que pode ser utilizada para o planeamento das comunicações ponto-a-ponto utilizando os FH. A solução proposta usa Sistema de Informação Geográfico, *Google Maps*, com uma interface simples que facilita a introdução das posições dos emissores recetores, o número de repetidores ao longo do percurso. Esta ferramenta também possibilita, que o utilizador, possa ver em tempo real a evolução dos cálculos e as implicações das decisões dos utilizadores.

2.4.2 *MlinkPlanner*

MlinkPlanner [21] é uma ferramenta poderosa que pode ser usada para dimensionar ligações ponto-a-ponto e ponto-a-multipontos de links de FH. *MlinkPlanner* é uma ferramenta profissional, desenvolvida por um conjunto de engenheiros de rádio. A geração de perfil de terreno desta ferramenta é totalmente automática e inclui as seguintes propriedades: a elevação da superfície terrestre em relação ao nível do mar, altura das árvores e edifícios. As elevações estimadas são baseados nas seguintes fontes de informação [21]:

- *Dataset* global da elevação da superfície terrestre obtido na missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), disponibilizados globalmente no final de 2015 pelo

governo Norte-Americano. Os dados são de domínio aberto e não tem nenhum custo associado aos mesmos. A SRTM [22] foi uma missão levada a cabo pela NASA no ano de 2000, que teve como objetivo a obtenção dum modelo digital do planeta Terra onde, foram mapeadas as diferentes altitudes da superfície terrestre com uma resolução de 30 metros;

- Mapas de alta resolução da floresta publicados pela Departamento de Ciências Geográficas da Universidade de *Maryland* e o Laboratório de Propulsão do Instituto Tecnológico da Califórnia;
- Base de dados global de edifícios obtida através do projeto *OpenStreetMap*.

2.4.3 *PathLoss*

PathLoss [1] é uma ferramenta utilizada para o cálculo de ligações de FH, na qual é possível incluir a elevação do plano sobre a área em que está a ser feito o estudo, visualização dos dados de elevação, através da apresentação duma imagem geográfica como fundo com um esquema de cores relativo as diferentes alturas da superfície terrestre, demonstração dos vetores numa rede, constituição e manipulação de imagens em 3D de uma rede, medição de distancia entre dois pontos, geração dinâmica do perfil de terreno apenas arrastando o rato entre dois pontos da rede.

2.4.4 *Atoll Microwave*

Atoll Microwave [2] é uma ferramenta de planeamento e optimização de ligações ponto-a-ponto e ponto-multiponto de redes de FH. Esta ferramenta permite projetar grandes redes de FH de acordo com as recomendações de ITU-R, assegurando os padrões da industria e as regras estabelecidas pelas operadoras. A ferramenta permite um alto desempenho do GIS, utilização de dados avançados e ferramentas para a gestão dos recursos. A aplicação, conta com módulos que permitem as operadoras modelar e dimensionar topologias da rede baseadas no tráfego da rede móvel.

2.4.5 *RadioMobile*

RadioMobile [23] é uma ferramenta que pode ser utilizada para planeamento de FH, incluindo o percurso, o critério de desobstrução, potência, dimensão das antenas e a

altura da torre. Esta ferramenta é de código aberto, pode ser usada tanto comercialmente ou para motivos educacionais . A ferramenta obtém informação do terreno através dos dados da missão SRTM [22].

Descrição da Aplicação Proposta

Este capítulo descreve a arquitetura proposta para a solução e os passos complementares para o seu desenvolvimento.

3.1 Arquitetura da Solução Proposta

A Figura 3.1 mostra a arquitetura adoptada para a implementação da solução.

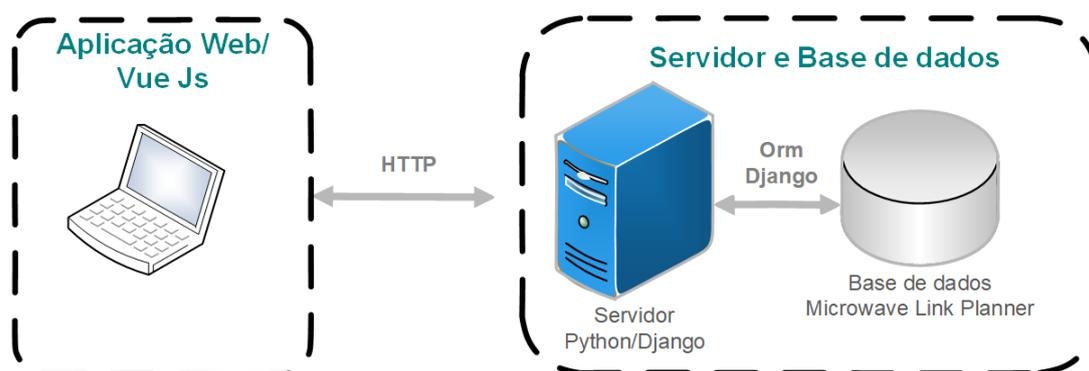


Figura 3.1: Arquitetura da Aplicação.

A aplicação implementada, baseia-se numa arquitectura de micro-serviços. Esta é caracterizada por haver uma distinção entre a interface do utilizador e modelos lógicos associados a aplicação que são designados de serviços.

A aplicação tem uma interface web simples e guia os utilizadores em todos os passos para o planeamento de um sistema de comunicação por meio de FH utilizando os parâmetros necessários. A aplicação utiliza parâmetros como coordenadas geográficas da biblioteca *Openlayers* [24], a elevação do terreno utilizando os dados da SRTM proveniente da NASA com recurso a API *Opentopodata* [25] e a informação meteorológica através da biblioteca *OpenWeatherMap* (taxa de precipitação) [26].

De forma a ter acesso a informação geográfica, foi adicionada a biblioteca de código aberto *OpenLayers* a solução, que face a outras mais conhecidas como Google Maps, MapBox etc, possibilitando a utilização e interação sem custos e limitação de pedidos. Esta biblioteca possui diversas funcionalidades úteis, algumas delas integradas na aplicação atual, desde da visualização de mapas, colocação de marcadores e suas respectivas localizações entre outras. Para o planeamento de uma ligação de FH é necessário obter a localização geográfica das estações base onde os emissores e recetores são instalados, bem como a altura em relação ao nível do mar dessas mesmas localizações. Apesar das suas múltiplas funcionalidades a biblioteca *OpenLayers* não possibilita a obtenção da altitude (cota de terreno) numa determinada localização, sendo que foi necessário utilizar uma fonte externa para a recolha dos dados. Foram analisadas diversas ferramentas como a API de elevação da Google, *Google Elevation API*, mas esta foi descartada por o número de utilizações estar limitado. Outra opção em análise foi a *OpenElevationAPI* mas esta foi desconsiderada por o projeto não ser mantido de forma estável. Após análise de todas opções, optou-se pela utilização da terceira versão dos dados SRTM.

A aplicação desenvolvida é descrita em duas secções distintas. A primeira é dedicada a interface gráfica adoptada para a aplicação. A segunda secção descreve o modelo lógico implementado e as funções ITU-R utilizadas para o planeamento dum sistema de FH.

3.2 Interface do Utilizador

Para a interação com os utilizadores, foi desenvolvida uma interface web, que permite que o acesso à ferramenta, possa ser realizado através de navegadores de Internet, independentemente do sistema operativo. A interface encontra-se optimizada para computadores pessoais.

A interface foi desenvolvida com recurso à *framework* Vue.js versão 2.2, que permite desenvolver páginas web dinâmicas de forma estruturada e acessível. A aplicação desenvolvida é representada por três módulos principais, Autenticação, Projetos e *Main*,

que por sua vez, aglomeram diferentes sub-módulos necessários para a representação e interacção com os dados do servidor.

3.2.1 Módulo de Autenticação

O primeiro menu a ser disponibilizado na utilização da aplicação, é o módulo de autenticação, no qual um utilizador pode aceder a aplicação, através do preenchimento do formulário descrito na Figura 3.2.

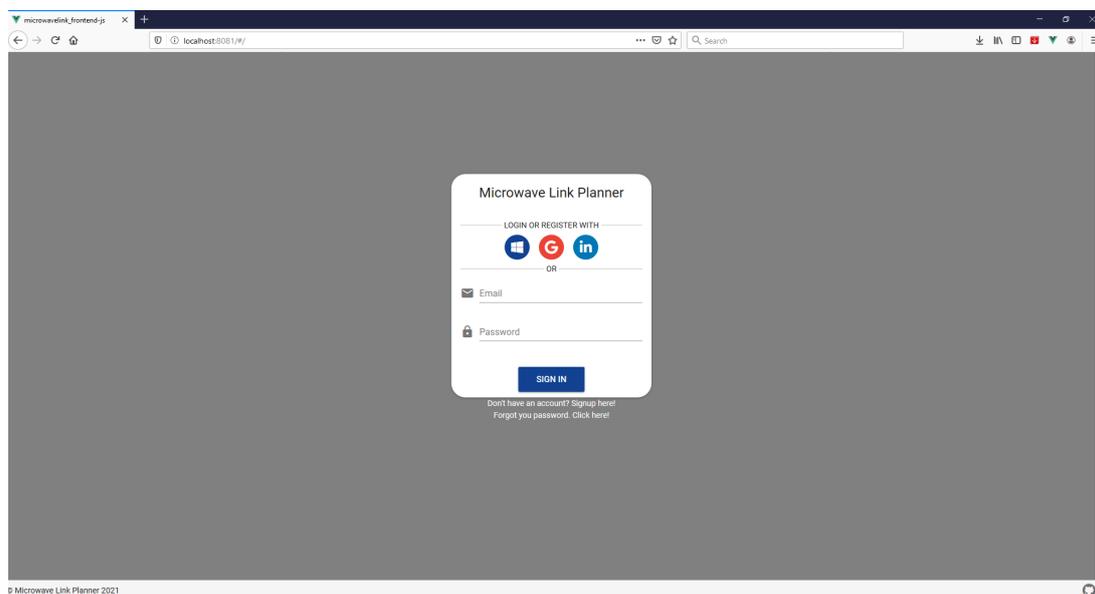


Figura 3.2: Autenticação

Este módulo tem as seguintes funcionalidades:

- Autenticação de utilizadores autorizados;
- Registo de novos utilizadores;
- Recuperação de credenciais caso seja necessário.

Para além das credenciais tradicionais (nome de utilizador e palavra-passe), o módulo disponibiliza uma interface para utilização serviços de autenticação externos através do protocolo *Oauth*, que permite que utilizadores possam se autenticar, usando contas de serviços como Google, Microsoft, LinkedIn entre outros.

3.2.2 Módulo de Projeto

A aplicação foi desenvolvida, de forma que os elementos introduzidos pelos utilizadores, sejam gravados em projetos de forma individual ou partilhada. O módulo projeto (Figura 3.3) é o responsável por garantir a um utilizador, a visualização de seus projetos individuais, partilhados ou outros introduzidos por outros utilizadores no sistema e para os quais tenha acesso.

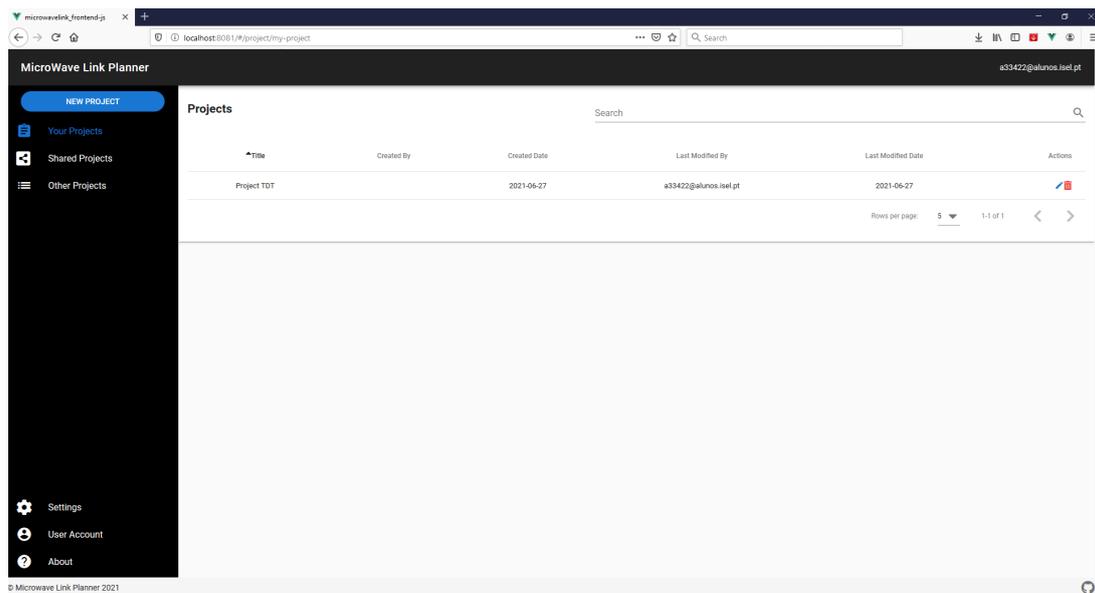


Figura 3.3: Vista de projeto

O módulo conta com as seguintes funcionalidades:

- Geração de novos Projetos;
- Edição de Projetos;
- Remoção de Projetos;
- Partilha de Projetos com outros utilizadores;
- Solicitação de partilha.

O utilizador pode visualizar os projetos através da interface ilustrada na Figura 3.3, onde ao carregar nos separadores presentes na barra lateral esquerda, poderá observar, editar e remover os projetos existentes na base de dados da aplicação. Para a elaboração de novos projetos o utilizador, deve aceder ao botão "New Project" e irá ser

disponibilizado o formulário presente na Figura 3.4, onde deverá ser colocado o nome do projeto a ser desenvolvido.

Figura 3.4: Interface para novo projeto

3.2.3 Módulo Main

O módulo *Main* ilustrado na Figura 3.5, representa a interface responsável por todos os sub-módulos e parametrizações necessárias para o planeamento dum sistema de FH.

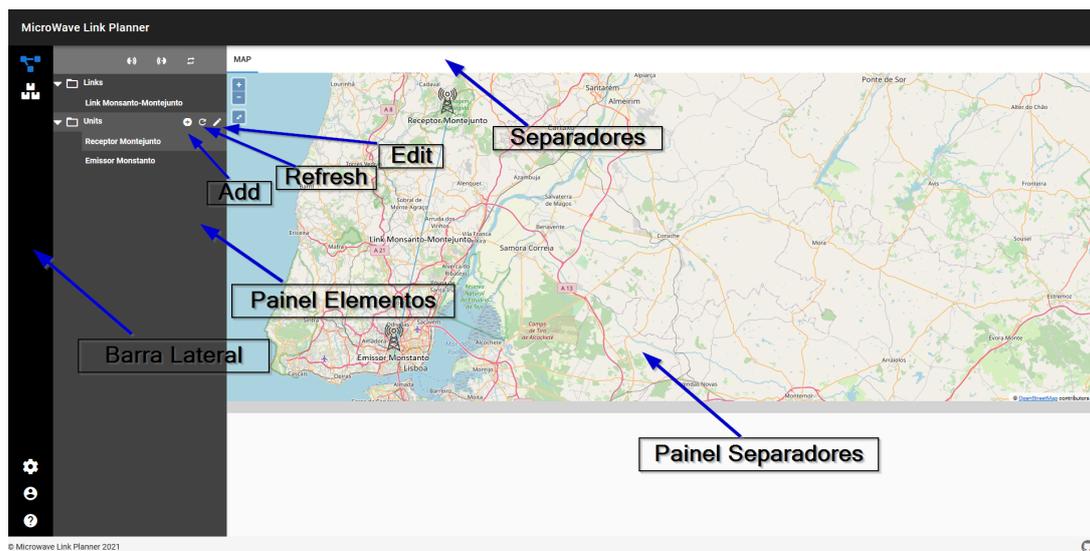


Figura 3.5: Vista *Main*

O módulo *Main* é constituído pelos seguintes painéis:

- Barra Lateral;
- Painel de Elementos;
- Painel de Separadores.

A barra lateral permite alterar o conteúdo do painel de elementos entre os separadores *Network* e *Equipment*. No separador *Network* encontram-se os links e unidades, no

separador *Equipments* encontram-se os elementos *Frequency Band*, *Waveguide*, *Manufacturer*, *Radio Equipment* e *Antenna*. Para cada um dos elementos representados no painel de elementos é possível adicionar, atualizar e editar os elementos presentes na base de dados através dos botões para o devido efeito presentes na Figura 3.5.

O painel de separadores é responsável por apresentar o módulo mapa, juntamente com os elementos disponibilizados nos separadores do painel de elementos.

O modulo Main é constituído por sub-módulos como, módulo mapa, módulo de *links*, módulo de unidades, módulo de bandas de frequência, módulo de guias de onda, módulo de equipamento de radio e módulo de antenas.

1. Modulo Mapa

O módulo mapa (Figura 3.6) foi implementado com recurso a biblioteca *Javascript Openlayers*. A mesma permite o acesso sem nenhum custo associado, à mapas *on-line* da superfícies terrestre e a interação e obtenção de informação dos mesmos. As coordenadas dos pontos selecionados no mapa obtidas na biblioteca *OpenLayers* são extraídas de acordo com a projeção *EPSG:3857* e transformadas para a projecção *EPSG:4326* utilizada na aplicação.

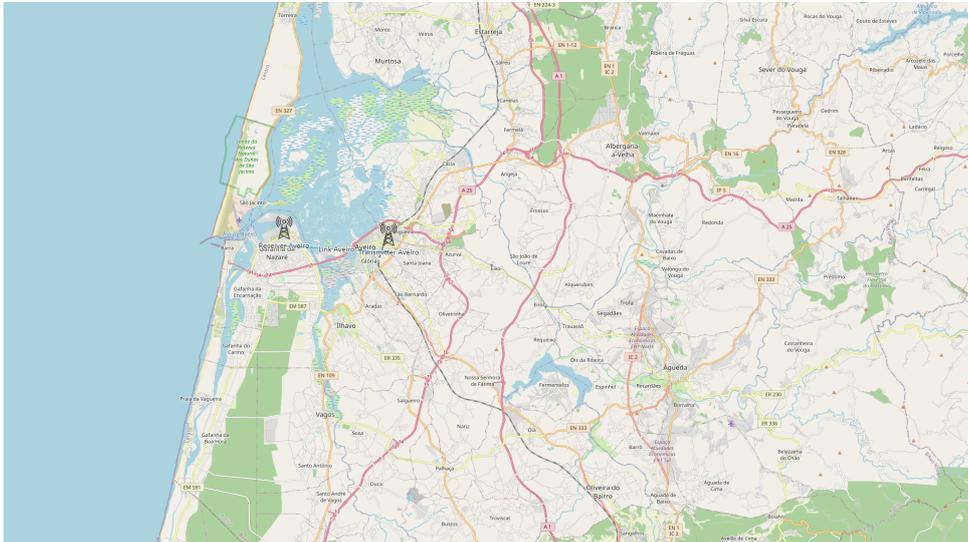


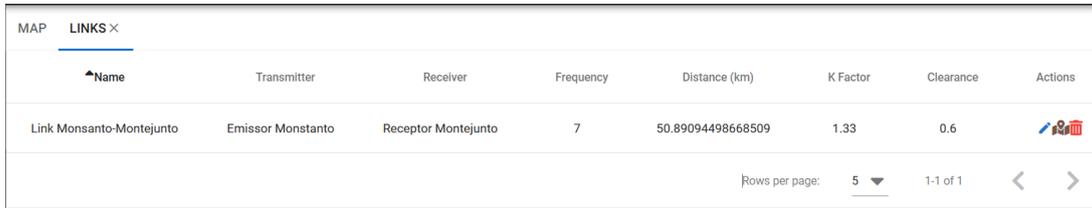
Figura 3.6: Interface Mapa

Para a aplicação desenvolvida no presente trabalho, foram utilizadas as seguintes funcionalidades:

- (a) Escolha de localização de unidades;
- (b) Visualização de unidades no mapa e ligações estabelecidas entre as mesmas.

2. Módulo de Links

A gestão dos links existentes no sistema, é feita através da interface presente na Figura 3.7. Nesta interface constam as unidades que formam a ligação, factor k , critério de desobstrução, a frequência de operação e distância da ligação em km.

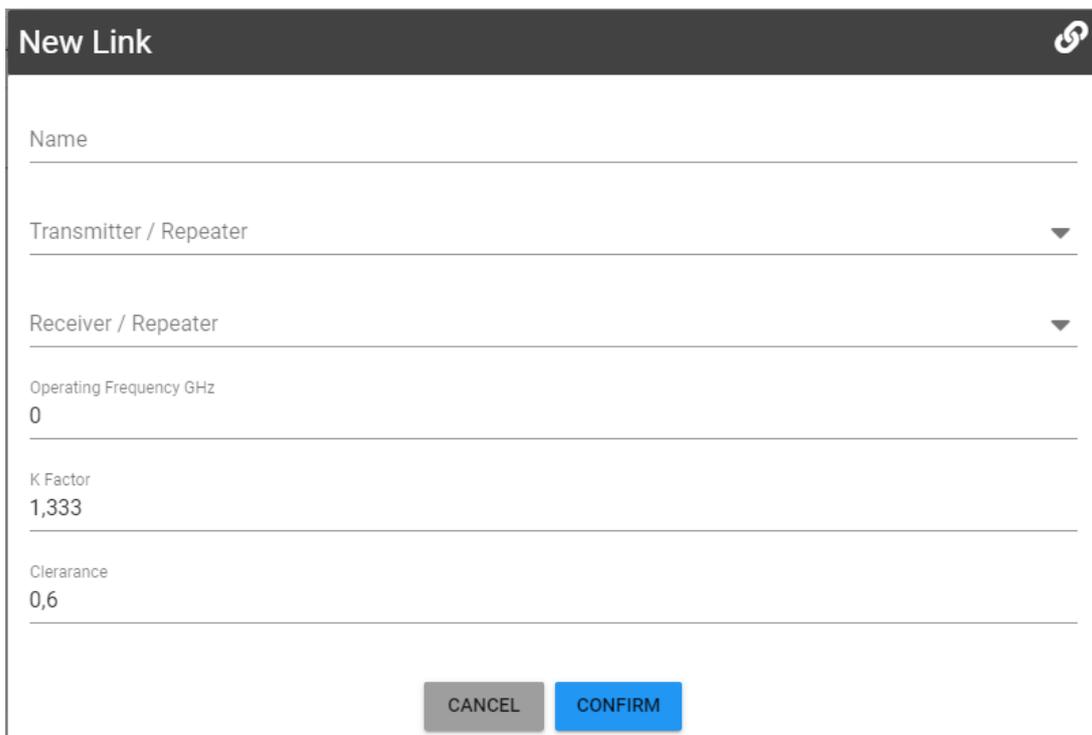


Name	Transmitter	Receiver	Frequency	Distance (km)	K Factor	Clearance	Actions
Link Monsanto-Montejunto	Emissor Monstanto	Receptor Montejunto	7	50.89094498668509	1.33	0.6	 

Rows per page: 5 1-1 of 1

Figura 3.7: Interface gestão de Links

No formulário de novo Link (Figura 3.8) são selecionadas unidades que serão utilizadas na transmissão e receção do FH e a frequência de operação da ligação.



New Link

Name

Transmitter / Repeater

Receiver / Repeater

Operating Frequency GHz
0

K Factor
1,333

Clrarance
0,6

CANCEL CONFIRM

Figura 3.8: Formulário novo link

3. Módulo de Unidades

Considera-se como unidade, os elementos presentes no sistema que representem, emissores, recetores e repetidores. A adição duma unidade é feita com recurso ao botão "add", presente no painel de elementos. A Figura 3.9 contém o formulário com os dados necessários para a adição duma nova unidade.

The image shows a 'New Unit' form with the following fields and values:

- Name: Transmitter1
- Type: Transmitter
- latitude: 0
- longitudo: 0
- height: 0
- Waveguide: Waveguide 1
- Antenna: 80010647
- Equipment: Radio Equipment 1
- Comment: (empty)

Buttons: CANCEL, CONFIRM, Select Location on Map

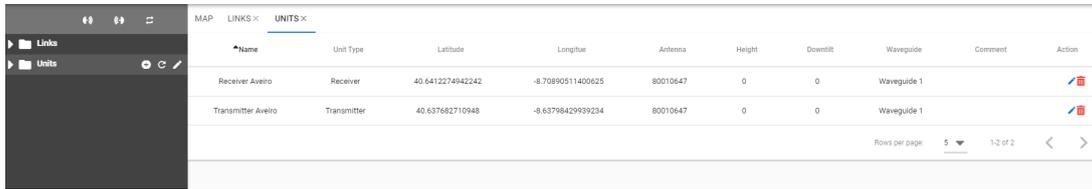
Figura 3.9: Vista *Formulário nova unidade*

Para adicionar novas unidades são necessários os seguintes dados:

- *Name* : Nome da unidade;
- *Type* : tipo de unidade emissora, recetora, ou repetidora;
- *Latitude*: Latitude da estação base em graus;
- *Longitude*: Longitude da estação base em graus;
- *Waveguide*: Guia de Onda;
- *Antenna*: Antena utilizada na unidade emissora ou recetora;
- *Equipment*: Equipamento de rádio de um emissor ou recetor;
- *Comment*: Comentário customizado para adição de informações extra sobre unidade.

A gestão das unidades no projeto é feita com recurso à interface presente na Figura 3.10, onde é possível visualizar unidades presentes no projeto, editar e remover as mesmas. A remoção duma unidade utilizada num link, causa que o link

seja removido automaticamente da base de dados, visto um link ser dependente dum emissor e recetor.



Name	Unit Type	Latitude	Longitude	Antenna	Height	Downlink	Waveguide	Comment	Action
Receiver Aveiro	Receiver	40.6412274942242	-8.70890511400625	80010647	0	0	Waveguide 1		 
Transmitter Aveiro	Transmitter	40.637682710948	-8.63798420939234	80010647	0	0	Waveguide 1		 

Figura 3.10: Formulário nova unidade

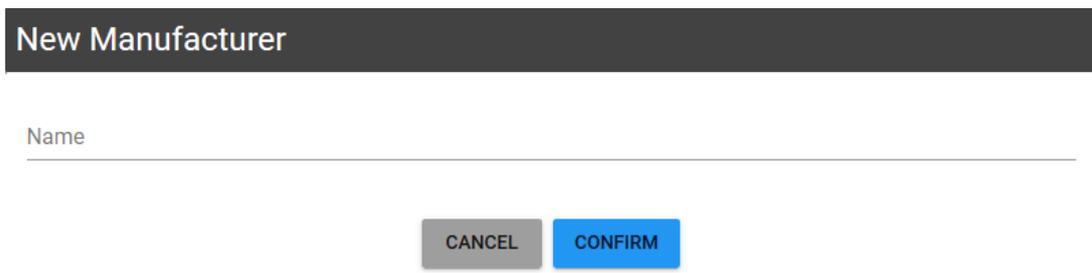
4. Módulo de Fabricantes

O módulo Fabricantes apresentado na Figura 3.11, permite a visualização e edição dos fabricantes dos diferentes equipamentos de radio e antenas presentes no sistema. A inserção dum novo fabricante é feita através do botão "add" presente no painel de elementos. A atualização dos dados dos diferentes fabricantes no projeto são realizadas no formulário descrito pela Figura 3.12



Name	Action
Alcatel-Lucent	 
Khatrin	 

Figura 3.11: Interface de gestão para fabricantes



New Manufacturer

Name

CANCEL
CONFIRM

Figura 3.12: Formulário para fabricantes

5. Módulo de Bandas de Frequência

As bandas de frequências, presentes no sistema podem ser visualizadas, editadas e removidas através da interface disponível na Figura 3.13

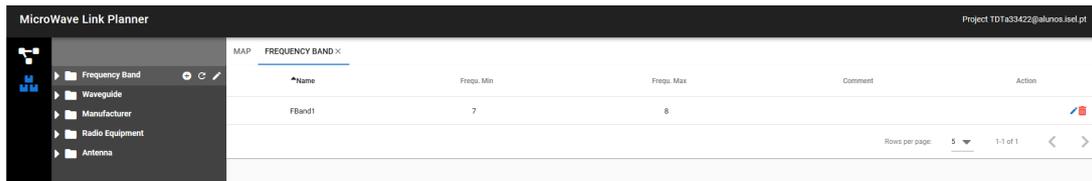


Figura 3.13: Interface de gestão de bandas de frequência

A inserção e edição de bandas de frequência é feita a nível individual através do formulário presente na Figura 3.14.

Figura 3.14: Formulário de bandas de frequência

6. Módulo de Guias de Onda

Os guias de onda presentes no sistema, são disponibilizados através da interface presente na Figura 3.15.

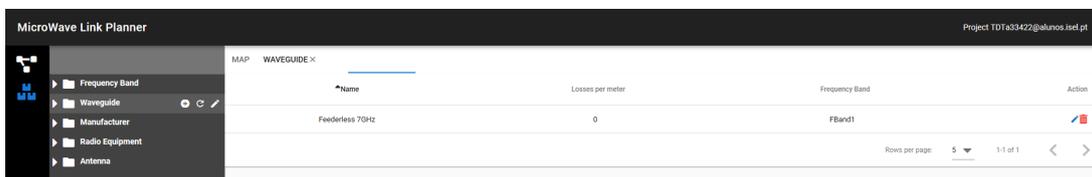
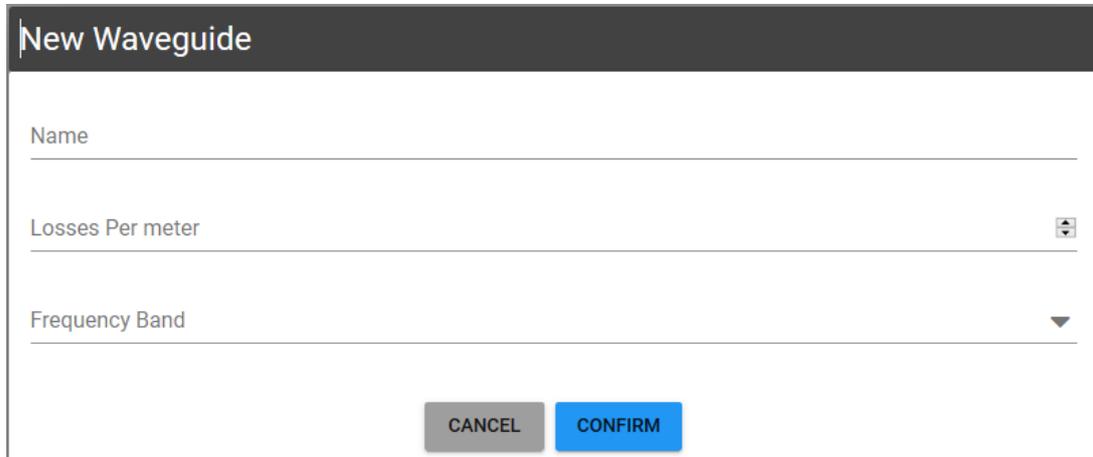


Figura 3.15: Interface de gestão guias de onda

A edição e adição dos guias de onda, é feita através do formulário ilustrado na Figura 3.16 onde são requisitados os seguintes campos:

- *Name*: Nome do guia de onda utilizado no registo;

- *Losses per meter*: Perdas em dB/m;
- *Frequency Band*: Banda de Frequência.



The image shows a web form titled "New Waveguide". It contains three input fields: "Name", "Losses Per meter" (with a small dropdown arrow on the right), and "Frequency Band" (with a small dropdown arrow on the right). Below the fields are two buttons: "CANCEL" (grey) and "CONFIRM" (blue).

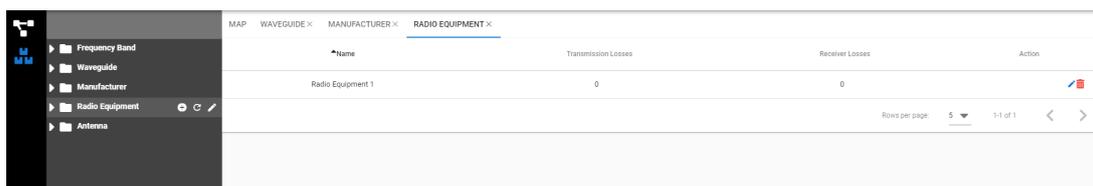
Figura 3.16: Formulário de gestão guias de onda

7. Módulo de Equipamento Rádio

Os equipamentos de rádio são obtidos através da interface presente na Figura 3.17, sendo possível visualizar todos os equipamentos rádios pertencentes a um projeto.

A adição e edição de equipamentos, é feita através do formulário presente na Figura 3.18, onde estão representados os seguintes campos:

- *Name*: nome do equipamento utilizado no registo;
- *Transmitter Losses*: perdas de acoplamento em dB nos equipamentos emissores;
- *Reception Losses*: perdas de acoplamento em dB nos equipamentos recetores.



Name	Transmission Losses	Receiver Losses	Action
Radio Equipment 1	0	0	 

Rows per page: 5 1-1 of 1

Figura 3.17: Interface de gestão equipamentos de rádio

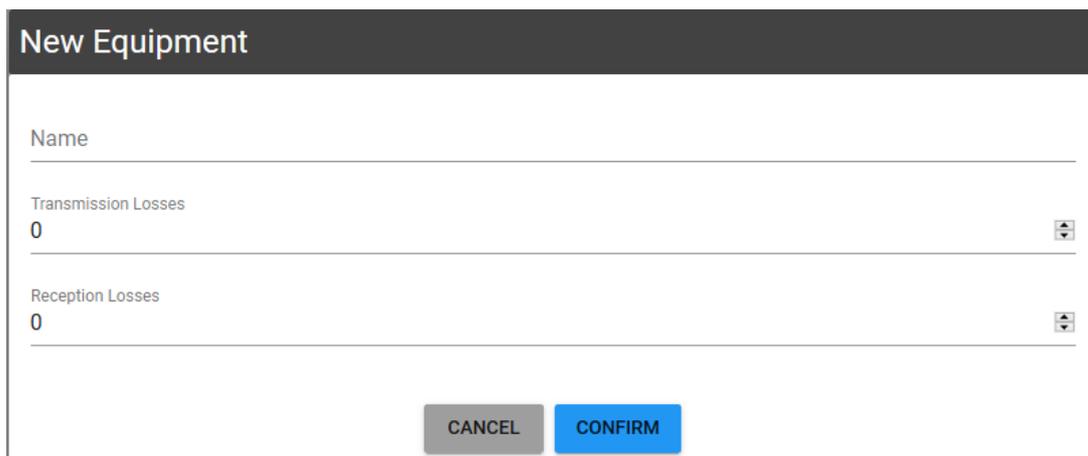
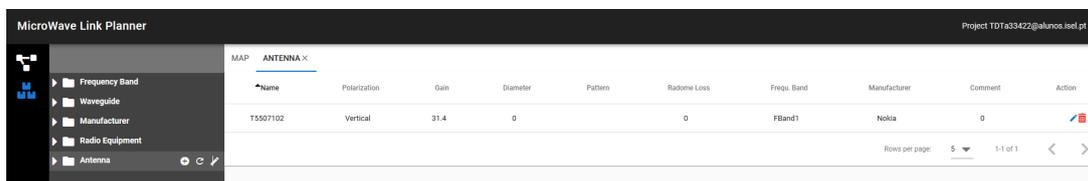


Figura 3.18: Formulário de equipamentos de rádio

8. Módulo de Antenas

As antenas utilizadas pelas unidades emisoras ou recetoras do sistema são disponibilizadas na interface presente na Figura 3.19.

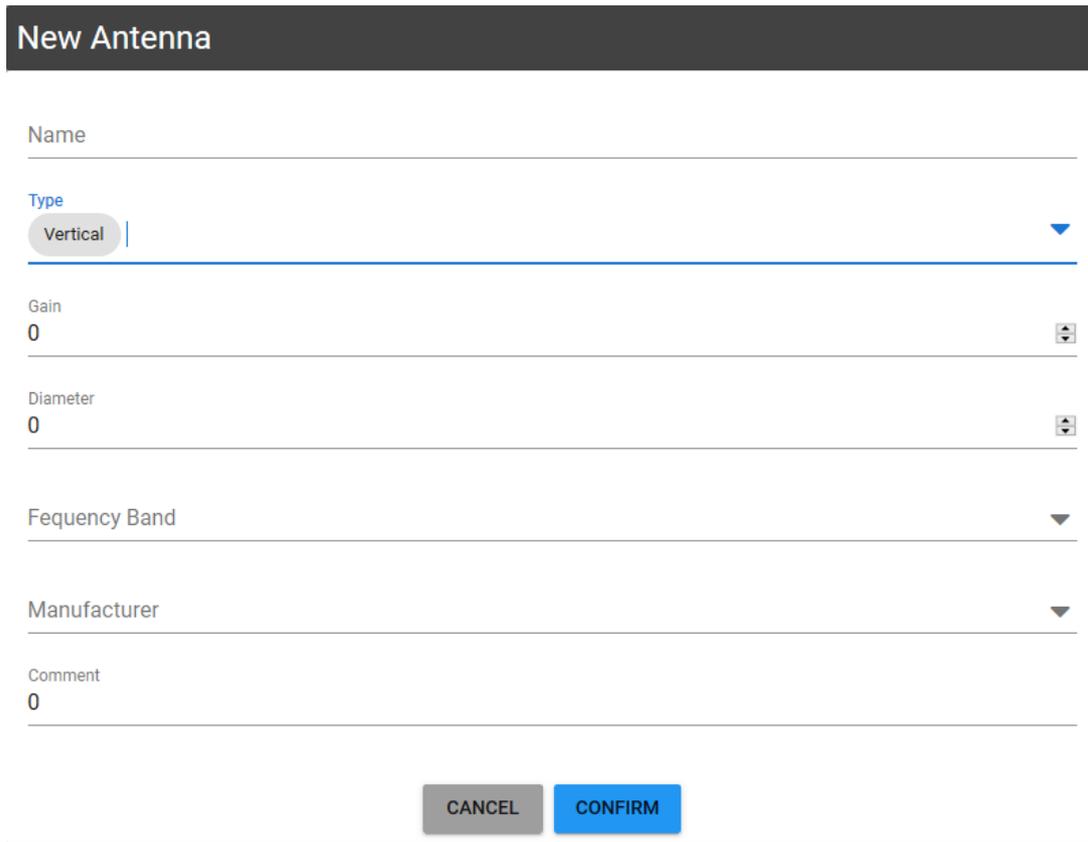


Name	Polarization	Gain	Diameter	Pattern	Radome Loss	Frequ. Band	Manufacturer	Comment	Action
T5007102	Vertical	31.4	0		0	FBand1	Nokia	0	

Figura 3.19: Interface de gestão de antenas

A adição e edição de antenas é feita através de formulário representado na Figura 3.20. O formulário possui os seguintes campos:

- *Name*: Nome da antena;
- *Gain*: Ganho da antena em dBi;
- *Frequency Band*: Banda de frequência da antena;
- *Manufacturer*: Fabricante da antena;
- *Comment*: Comentário.



The image shows a web form titled "New Antenna". The form contains the following fields and controls:

- Name:** A text input field.
- Type:** A dropdown menu with "Vertical" selected.
- Gain:** A numeric input field with the value "0".
- Diameter:** A numeric input field with the value "0".
- Fequency Band:** A dropdown menu.
- Manufacturer:** A dropdown menu.
- Comment:** A text input field with the value "0".

At the bottom of the form, there are two buttons: "CANCEL" (grey) and "CONFIRM" (blue).

Figura 3.20: Formulário de antenas

3.3 Serviços

Considera-se como um micro-serviço, um servidor de arquitectura Restful responsável por disponibilizar recursos a uma aplicação web, no qual cada funcionalidade é implementada por um serviço. Os recursos podem ser desde dados armazenados numa base de dados, como resultados de algoritmos e funções consoante os *inputs* fornecidos pela interface do utilizador.

3.3.1 Dados Externos

Na aplicação foram utilizados dados externos para complementar as funcionalidades da aplicação. A obtenção dos dados externos, meteorológicos e geográficos foi efectuada com recurso a serviços web externos. Os serviços externos utilizados foram as API's *OpenWeather* e *Opentopodata*.

3.3.1.1 OpenWeather

A API *OpenWeather* [26], é um serviço web que possibilita a recolha de dados meteorológicos numa determinada localização. Existem diversos módulos presentes na API *OpenWeather*, alguns deles pagos, mas de forma a seguir a filosofia open-source, sem custos, foi utilizado o módulo gratuito *Current weather data* da API que apenas disponibiliza a informação meteorológica momentânea para uma localização. O módulo gratuito fornece diversos dados, mas para implementação foram recolhidos os seguintes:

- Pressão Atmosférica em (hPA);
- Temperatura em graus;
- Humidade (%);
- Pressão parcial vapor de água (valor estimado através de dados da API).

De forma a facilitar o cálculo da atenuação dos gases atmosféricos, no momento de recolha é estimada a pressão parcial do vapor de água (equação (2.6)) utilizando o valores da pressão atmosférica, temperatura e humidade.

3.3.1.2 Opentopodata

A elevação do terreno foi obtida, através da utilização do serviço web Opentopodata [25], que fornece a elevação acima do nível do mar numa localização em metros, mediante o envio da latitude e longitude. A API disponibiliza os seus recursos através dum serviço público na Internet, ou através de alojamento local. Para a realização do trabalho foi adoptada a hospedagem local, para evitar quaisquer constrangimentos relativos a disponibilidade do serviço. Para a hospedagem local do serviço Opentopodata, foi necessário fornecer informação geográfica para que fossem extrapoladas as elevações do terreno.

O serviço Opentopodata suporta diferentes fontes de informação geográfica, tais como os dados da missão topográfica radar *Shuttle SRTM*, *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)* [27], *European Digital Elevation Model (EU-DEM)* [28], entre outros descritos na documentação. Das várias opções existentes, foi utilizado o *dataset* SRTM que contém os dados de elevação da superfície terrestre com uma resolução de 30 m de forma ter um termo de valores semelhantes como a ferramenta *PathLoss*. A Figura 3.21 mostra as elevações de terreno em m, para um percurso entre a Serra de Monsanto e Montejunto.

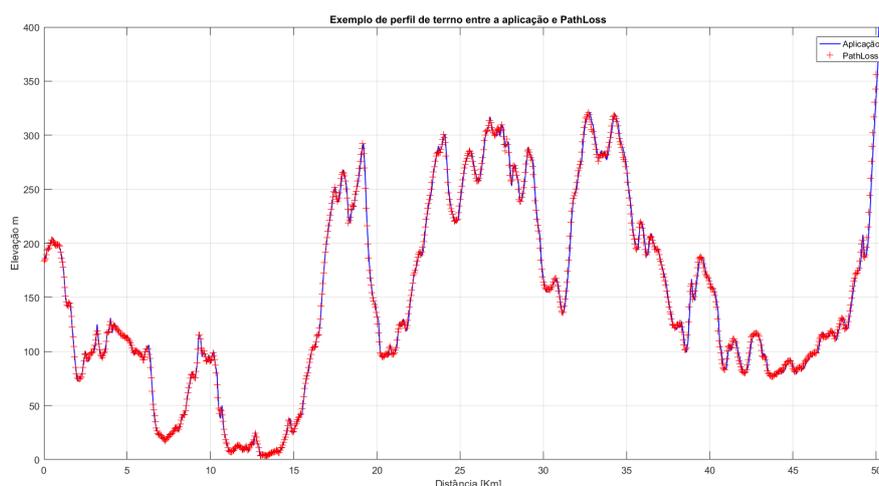


Figura 3.21: Comparação de perfil de terreno entre a aplicação desenvolvida e o *PathLoss*

3.3.2 Base de dados

A aplicação usa uma base de dados, que tem como propósito de guardar a informação de utilizadores presentes no sistema, seus projetos e elementos presentes num projeto. Nas próximas secções são descritas as várias entidades usadas no projeto.

3.3.2.1 User

Foi adicionado um modelo utilizador no sistema, para garantir que apenas acessos autorizados sejam permitidos na aplicação. Para além de facilitar a autorização, o modelo tem como objetivo, garantir que os dados dum utilizador permaneçam na aplicação após a sua utilização. Na tabela 3.1 estão descritas as propriedades dum utilizador.

Propriedades	Tipo	Descrição
email	Texto	Email do utilizador registado
name	Texto	Nome de utilizador
password	Texto	Palavra passe

Tabela 3.1: Campos do modelo *User*

3.3.2.2 Project

O modelo *Project*, foi adicionado com o intuito de agrupar todos os dados referentes a um sistema de FH de forma individualizada. Todos os modelos adicionados no

sistema para além do *User*, estão dependentes dum projeto. A tabela 3.2 mostra as propriedades introduzidas no sistema referentes a um projeto.

Propriedades	Tipo	Descrição
name	Texto	Nome de projeto
is_shared	Booleano	Verificação se projeto é partilhado
is_private	Booleano	Verificação se projeto é privado
created_time	Data	Data de criação de projeto
created_by	Texto	Nome do utilizador responsável pela adição
last_modified	Data	data última modificação
modified_by	Texto	Nome de utilizador responsável pela modificação

Tabela 3.2: Campos do modelo *project*

3.3.2.3 *Project User*

O modelo *Project User* tem como objetivo fazer a ligação entre os utilizadores e os projetos. O modelo faz o mapeamento entre um projeto e um utilizador através da criação duma entrada com os identificadores das duas entidades. A tabela 3.3 mostra as propriedades referentes ao modelo *Project User*.

Propriedades	Tipo	Descrição
user	Elemento	Utilizador
project	Elemento	projeto

Tabela 3.3: Campos do modelo *Project_User*

3.3.2.4 *Project Object*

De forma a evitar a escrita da mesmas propriedades em vários modelos da aplicação, foi implementado o modelo *ProjectObject* que tem por objetivo aglomerar todas as propriedades equivalentes entre os elementos. Os modelos *Frequency Band*, *Manufacturer*, *WaveGuide*, *Antenna*, *Radio Equipment*, *Unit* e *Link*, são baseados no modelo *ProjectUser* e por conseguinte herdam as suas propriedades. O modelo *Project Object*, possui as seguintes propriedades descritas na tabela 3.4.

Propriedades	Tipo	Descrição
project	Elemento	projeto identificador de elemento
name	Texto	projeto

Tabela 3.4: Campos do modelo *Project Object*

3.3.2.5 *Frequency Band*

De forma a limitar a utilização de equipamentos a uma gama de frequências e facilitar a pesquisa por critério de frequência, foi adicionado o modelo *Frequency Band*. O modelo conta com os campos presentes na tabela 3.5.

Propriedades	Tipo	Descrição
comment	Texto	Seção de comentário relativa a banda de frequência
fmax	Número	Frequência máxima da banda de frequência
fmin	Número	Frequência mínima da banda de frequência

Tabela 3.5: Campos do modelo *Frequency Band*

3.3.2.6 *Manufacturer*

O modelo *Manufacturer* foi introduzido com o propósito de atribuir um fabricante as antenas e equipamentos de rádio presentes no sistema. O modelo apenas possui os campos definidos pelo modelo *Project Object* (Secção 3.3.2.3)

3.3.2.7 *WaveGuide*

O modelo *WaveGuide* representa os guias de onda existentes numa estação que fazem a conexão entre o módulo rádio e a antena. As propriedades existentes no modelo *WaveGuide* são descritas na tabela 3.6.

Propriedades	Tipo	Descrição
frequ_band	Elemento	Banda de frequência associado ao guia de onda
loss_per_meter	Número	Perdas por dB/m associados ao guida de onda

Tabela 3.6: Campos do modelo *WaveGuide*

3.3.2.8 Antena

O modelo *Antenna*, representa o elemento radiante numa ligação. As propriedades associadas a cada antena são descritas na tabela 3.7

Propriedades	Tipo	Descrição
gain	Número	Ganho da antena em dBi
diameter	Número	diâmetro da antena em m
pattern	Blob	Informação sobre o diagrama da antena guardada de forma binária
frequ_band	Elemento	Identificador de banda de frequência associada à antena
radome_loss	Número	Perdas da proteção da antena em dB
manufacturer	Elemento	Identificador do fabricante da antena
comment	Texto	Comentário associados à antena

Tabela 3.7: Campos do modelo *Antenna*

3.3.2.9 Unit

As unidades são entidades existentes no sistema, que têm como objetivo a representação dos elementos, de transmissão e receção presentes numa ligação por FH. A tabela 3.8 apresenta as propriedades associadas a uma unidade.

Propriedades	Tipo	Descrição
<i>Unit_type</i>	Número	Tipo de unidade: 1- TRANSMITTER 2-RECEIVER 3-REPEATER 4-REPEATER_PASSIVE
Latitude	Número	Latitude do elemento [°]
Longitude	Número	Longitude do elemento [°]
<i>Height</i>	Número	Altura da unidade em m
<i>Downtilt</i>	Número	Downtilt em graus da antena
<i>Wave_guide</i>	Elemento	Guia de onda associado a unidade
<i>Antenna</i>	Elemento	Antena associada a unidade
<i>Equipment</i>	Elemento	Equipamento associado a unidade
<i>Comment</i>	Text	Comentário
<i>Location</i>	Text	Representação em GeoJson da localização da unidade

Tabela 3.8: Campos do modelo *Unit*

3.3.2.10 *Radio Equipment*

O modelo *Radio Equipment* tem como objetivo a representação dos módulos rádio associados a uma unidade de transmissão/receção. A tabela 3.9 descreve as propriedades existentes num equipamento de rádio.

Propriedades	Tipo	Descrição
tx_losses	Número	Perdas na transmissão em dB
rx_losses	Número	Perdas na receção em dB

Tabela 3.9: Campos do modelo *Radio Equipment*

3.3.2.11 *Link*

O modelo *Link* foi desenvolvido para armazenar os dados referentes aos FH de um determinado projeto. O modelo *Link* possui as propriedades descritas na tabela 3.10.

Propriedades	Tipo	Descrição
Transmitter	Elemento	Unidade emissora associada a link
Receiver	Elemento	Unidade recetora associada a um link
Frequency	Número	Frequência de operação em Hz
Location	Ponto	Par de coordenadas corresponde a latitude e longitude
Distance	Número	Distância em km entre emissor e recetor

Tabela 3.10: Campos do modelo link

3.3.3 Módulo de Cálculo

O módulo de cálculo é responsável por albergar a lógica relacionada com os sistemas de FH da aplicação. O módulo contém as funções e algoritmos utilizados para o dimensionamento duma ligação de FH. O módulo de cálculo é descrito em três blocos, **Atmosfera**, **Espaço Livre**, **Analizador de terreno**. Nas próximas secções serão descritas cada um desses blocos.

Os módulos estão representadas na Figura 3.22. Para validar as funções implementadas, foram preparados testes unitários para cada um dos blocos implementados. Os testes unitários funcionam com a premissa, que são avaliados os resultados estimados pelas diferentes funções e comparados os mesmos com valores conhecidos de forma a analisar a validade das funções implementadas.

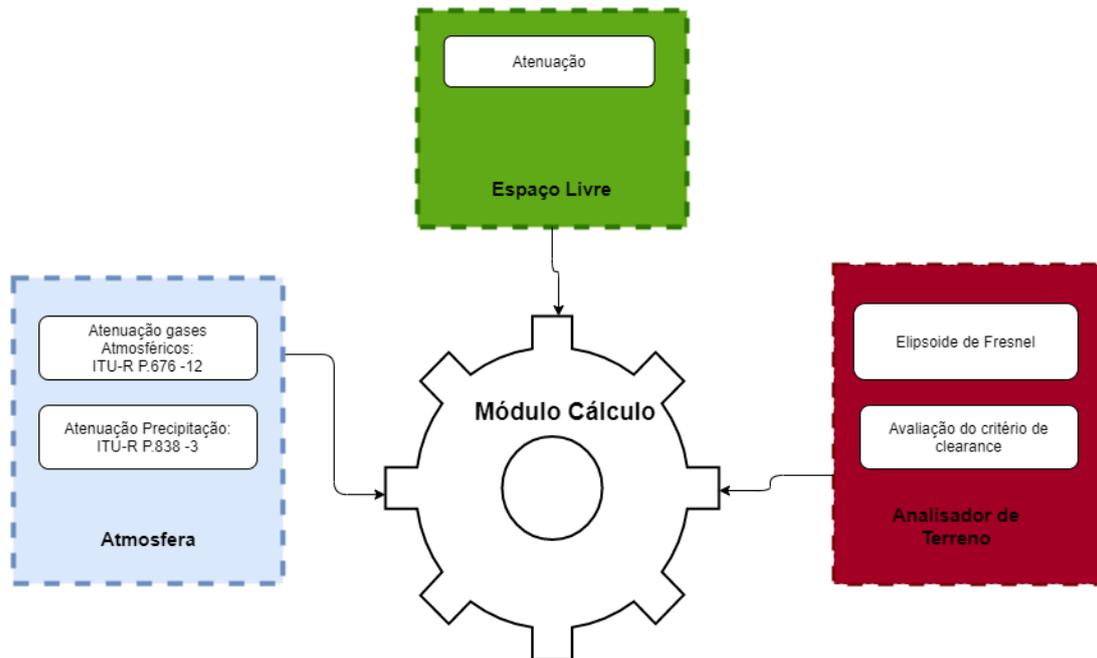


Figura 3.22: Módulo de Cálculo

3.3.3.1 Espaço Livre

Este bloco conta com a função espaço livre, responsável pelo cálculo da atenuação em espaço livre, presente na equação 2.1.

3.3.3.2 Atmosfera

O bloco atmosfera conta as funções responsáveis para o cálculo da atenuação pelos gases atmosféricos e a atenuação causada pela chuva. As funções foram desenvolvidas de acordo com as recomendações ITU-R descritas no capítulo 2.

1. Atenuação causadas por gases atmosféricos

A atenuação causada por gases atmosféricos é dada, pela soma das atenuações do oxigênio e vapor de água. Foram implementadas funções com base na recomendação ITU-R P-676-12 [19] descrita na secção 2.3.4.1, para o cálculo das atenuações. As funções dependem dos parâmetros, frequência, temperatura, pressão atmosférica e polarização das antenas escolhidas para a emissão do FH. Para a implementação das funções foram utilizados os dados atmosféricos da API *OpenWeathers* e os dados espectroscópicos das Tabelas A.5 e A.6 presentes no Anexo A. De forma a testar as funções foram implementados testes com valores padrão para a temperatura de 15 C°, pressão atmosférica de 1013.35 hPa,

densidade do vapor de água *Standart* de 7.5 g/m^3 e Seco de 0. Os valores estimados encontram-se em conformidade com os valores referência apresentados na recomendação ITU-R P-676-12 [19].

2. Atenuação causada pela precipitação

Para o cálculo da atenuação causada pela precipitação foram implementadas funções de acordo com as recomendações ITU-R P.530-17 e P.838.3 descritas seção 2.3.4 do capítulo 2. A taxa de precipitação foi obtida através do ficheiro R001.TXT presente na documentação da recomendação ITU-R P.837-7 [17]. O ficheiro R001.TXT contem o mapa digital da taxa de precipitação média por ano para uma disponibilidade de 99.99%. Para a extracção numa determinada zona foi utilizado um algoritmo de interpolação bilinear descrito na recomendação ITU-R P.1144 que permite obter o valor mais próximo da taxa de precipitação para uma determinada localização geográfica.

3.3.3.3 Analisador de Terreno

O bloco Analisador de Terreno, é responsável pelo cálculo do elipsóide de *Fresnel*, raio directo, curvatura da terra de acordo com o fator k escolhido pelo utilizador e análise do critério de desobstrução da ligação. O perfil de terreno é obtido através da API *Opentopodata* descrita na secção 3.3. Para a obtenção do perfil de terreno ao longo do percurso, são utilizadas as coordenadas do transmissor e recetor através dos dados recebidos pela interface do utilizador. Com as coordenadas é calculada, a distância total entre os pontos, tendo em consideração a curvatura da Terra. Consoante a resolução escolhida pelo utilizador, são estimados múltiplos os pontos entre o emissor e o recetor. Ao mesmo tempo é estimado o raio directo de acordo com a elevação do terreno e o decaimento da Terra. O elipsóide de *Fresnel* é estimado segundo a frequência de operação em GHz adotada na ligação.

A Figura 3.23 mostra um exemplo dum perfil de terreno obtido para um raio efetivo da terra com um fator de $k \simeq 4/3$, através dos dados recolhidos pela API *OpenWeathers*.



Figura 3.23: Perfil de Terreno

4

Avaliação da aplicação

O presente capítulo, tem como propósito a avaliação da aplicação desenvolvida, através do dimensionamento de ligações fictícias e a comparação dos resultados obtidos com o *software Pathloss*. Foram implementados dois cenários de ligações digitais, por FH, para transmissão de canais Televisão Digital Terrestre. Mais detalhes sobre os equipamentos rádio utilizados e ligações utilizados no *Pathloss*, podem ser encontrados nos Anexos B, C, D e E.

4.1 Ligação Monsanto - Montejuento

O primeiro cenário desenvolvido para o teste da aplicação, foi construído com base em localizações de emissores TDT [29]. Para a realização do teste foi considerado o equipamento de rádio MDR-8608-135 do fabricante *Alcatel-Lucent*, cujas características são descritas em detalhe no Anexo B. A localização exacta do emissor e recetor é ilustrada na Tabela 4.1.

Site	Latitude [°]	Longitude [°]
Emissor Monsanto	38.726635	-9.188862
Recetor Montejuento	39.17375	-9.059306

Tabela 4.1: Localização site Monsanto-Montejuento

A representação dos sites e do *link* podem ser vistas na Figura 4.1

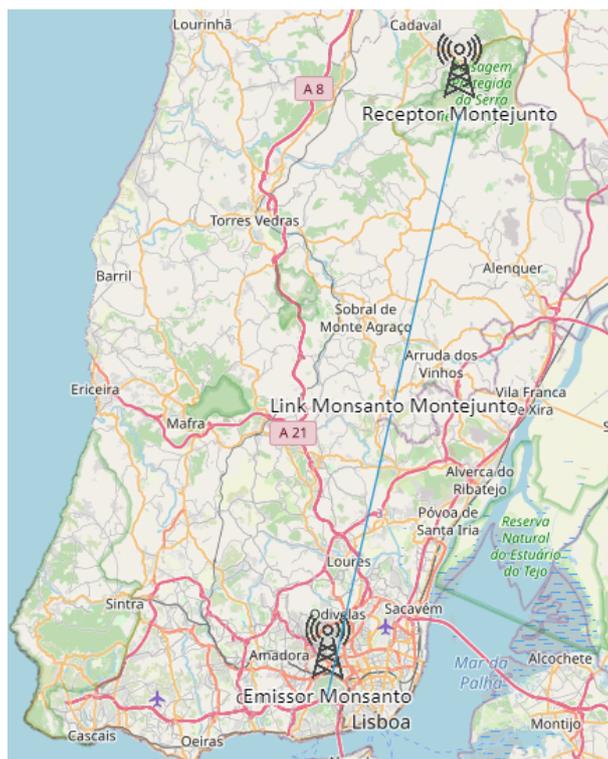


Figura 4.1: Sites e ligação representadas no mapa *OpenLayers*

4.1.1 Análise de perfil de terreno

O perfil de terreno (Figura 4.2) do percurso entre Monsanto e Montejunto é caracterizado por uma superfície bastante irregular, onde a elevação do terreno vai aumentando ao longo da ligação. O ponto de receção sito na Serra de Montejunto encontra-se localizado a uma altitude substancialmente superior face aos vários pontos do percurso. Analisando o perfil de terreno é possível concluir à partida, que é possível dimensionar uma ligação com linha de vista desobstruída entre o ponto de emissão e receção, dada a elevada altitude do ponto de receção de aproximadamente 618 m. De forma a verificar se a ligação se encontra obstruída, foi estimado o primeiro elipsóide *Fresnel* e 60% do mesmo, de acordo com o critério de desobstrução adotado, com uma representação de terra esférica, para um factor k de $4/3$. Através da Figura 4.2 é possível observar que para uma ligação com uma frequência de operação de 7 GHz, o FH entre as duas estações, encontra-se praticamente em linha de vista, prevendo assim, que as torres necessárias para emissão e receção possam ter uma dimensão reduzida.

Após a análise do perfil de terreno foram dimensionadas as alturas mínimas para que a ligação estivesse desobstruída, em termos de raio directo e primeiro elipsóide de *Fresnel*. A Tabela 4.2, demonstra as alturas adoptadas.

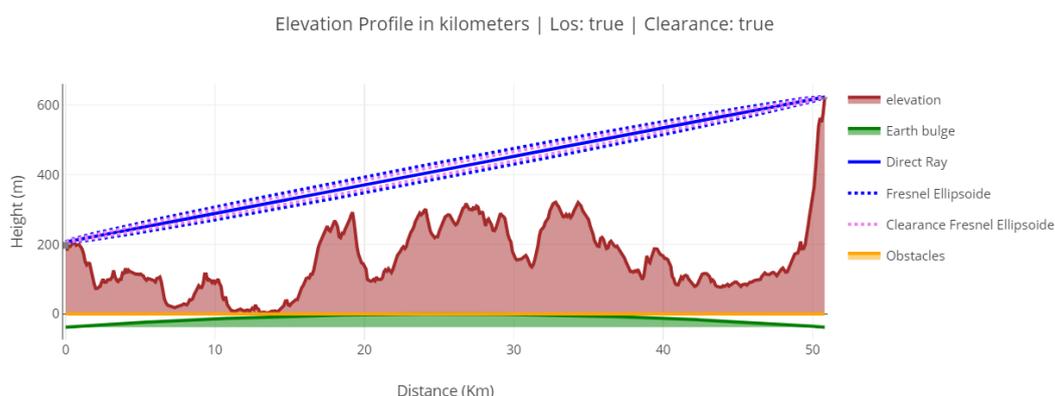


Figura 4.2: Elipsóide de *Fresnel* e Perfil do Terreno

4.1.2 Cálculo das Atenuações

Para o dimensionamento da ligação foram calculadas as atenuações, devido à propagação em espaço livre, gases atmosféricos e precipitação, descritas na secção 2.2.1 do documento. Os dados da ligação são descritos na Tabela 4.2, juntamente com os dados obtidos para o *software Pathloss*. Os dados dos equipamentos rádio são iguais em ambas as ferramentas, visto que os equipamentos foram escolhidos de acordo com informação do *Pathloss*.

Analisando os dados do terreno pode-se observar que as altitudes do perfil de terreno ao longo do percurso possuem valores similares, comparando os valores no início e fim do percurso, a diferença máxima de altitudes é de 30.09 m. A atenuação dos gases atmosféricos obtida pela ferramenta é de 0.63 dB e a do *Pathloss* 0.48 dB. Os dados encontram-se em conformidade apresentando uma diferença mínima de 0.25 dB e são valores esperados dada a frequência utilizada.

Ligação Monsanto-Montejunto		
	Aplicação Desenvolvida	PathLoss
Emissor		
Nome:	Monsanto	Monsanto
Latitude [°]	38.726635	38.726635
Longitude [°]	-9.188862	-9.188862
Altitude [m]	187	183.02
Antena	T5507102	T5507102
Ganho de Antena [dBd]	29.25	29.25
Ganho de Antena [dBi]	31.40	31.40

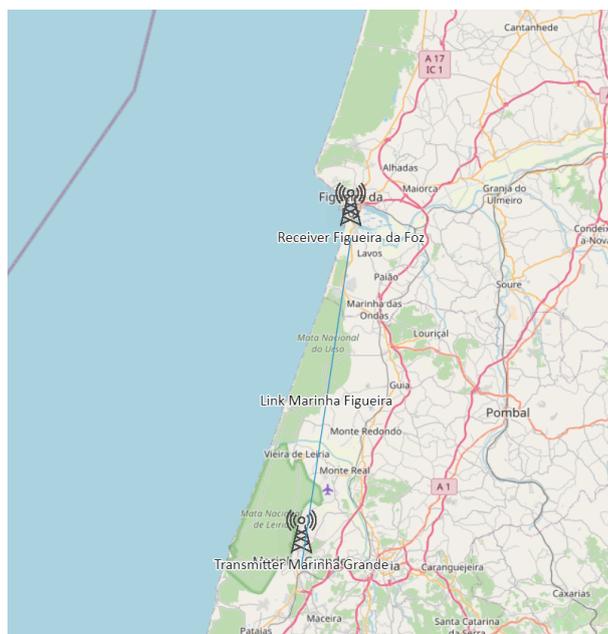
Altura da Antena [m]	20	20
Rádio	MDR-8608-135	MRD-8608-135
Potência Emitida [dBm]	28	28
Sensibilidade [dBm]	-69	-69
Receptor		
Nome:	Montejunto	Montejunto
Latitude [°]	39.17375	39.173575
Longitude [°]	-9.059306	-9.059306
Altitude [m]	618	648.09
Antena	T5507102	T5507102
Ganho de Antena [dBd]	29.25	29.25
Ganho de Antena [dBi]	31.40	31.40
Altura da Antena [m]	5	5
Rádio	MDR-8608-135	MRD-8608-135
Potência Emitida [dBm]	28	28
Sensibilidade [dBm]	-69	-69
Ligação		
Nome	Link Monsanto-Montejunto	Link Monsanto-Montejunto
Distância [km]	50.89	50.90
Frequência [GHz]	7	7
Factor K	4/3	4/3
Obstáculos		
Critério de desobstrução [%]	60	60
1° Elipsóide de <i>Fresnel</i>	Desobstruído	Desobstruído
Elipsóide de <i>Fresnel</i> critério de desobstrução	Desobstruído	Desobstruído
Espaço Livre		
Atenuação [dB]	143.48	143.48
Atmosfera		
Temperatura [°C]	15.97	15.97
Pressão [hPa]	1018	N/D
Pressão parcial do vapor de água [hPa]	16.26	N/D
Humidade [%]	67	N/D

Atenuação devido ao oxigénio [dB]	0.39	N/D
Atenuação devido ao vapor de água [dB]	0.24	N/D
Perdas Absorção dos gases atmosféricos [dB]	0.63	0.48
Atenuação Devido à Precipitação		
Polarização	Vertical	Vertical
Taxa de precipitação 0.01% [mm/hr]	32.74	37.51
Distância Efetiva [Km]	14.50	N/D
Atenuação [dB]	3.94	N/D

Tabela 4.2: Balanço de potência ligação Monsanto-Montejuento

4.2 Ligação Marinha Grande - Figueira da Foz

O segundo cenário proposto para o teste da aplicação realizou-se na região de Leiria (Figura. 4.3) entre as áreas da Marinha Grande e Figueira da Foz. Os sites constituintes da ligação situam-se a uma distância de 41.17 km. A localização das estações base encontra-se descrita na Tabela 4.3.

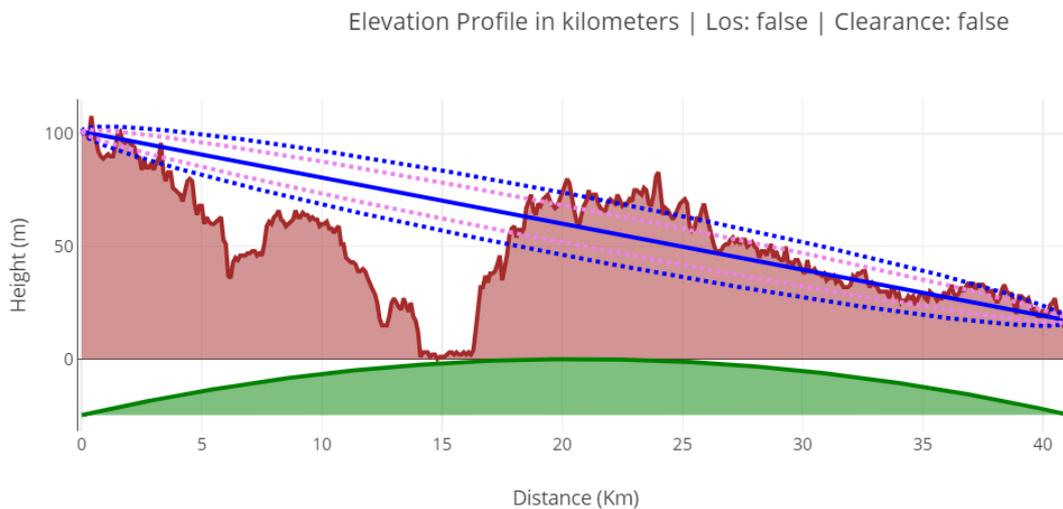
Figura 4.3: Sites e ligação representadas no mapa *OpenLayers*

Site	Latitude [°]	Longitude [°]
Emissor Marinha Grande	39.74	-8.93
Recetor Figueira da Foz	40.11	-8.86

Tabela 4.3: Localização dos sites Marinha Grande e Figueira da Foz

4.2.1 Análise de perfil de terreno

O primeiro passo para o estudo da ligação passou por analisar o perfil de terreno (Figura 4.4). Após a análise visual foi calculado o raio directo entre o emissor e o recetor assumindo uma altura de zero metros para as torres de emissão e recepção. Os resultados são ilustrados na Figura 4.4 sendo possível observar que sem a adição de torres de emissão e recepção a ligação encontra-se obstruída quer em termos de raio directo, 1º elipsóide de *Fresnel* e 60% do mesmo de acordo com o critério de desobstrução adoptado para a ligação.

Figura 4.4: Elipsóide de *Fresnel* e Perfil de terreno

De acordo com a análise, foram estimadas as alturas para que a ligação estivesse desobstruída. A Figura 4.5 mostra que para as alturas de 40 e 50 m no emissor e recetor respetivamente a ligação encontra-se completamente desobstruída.

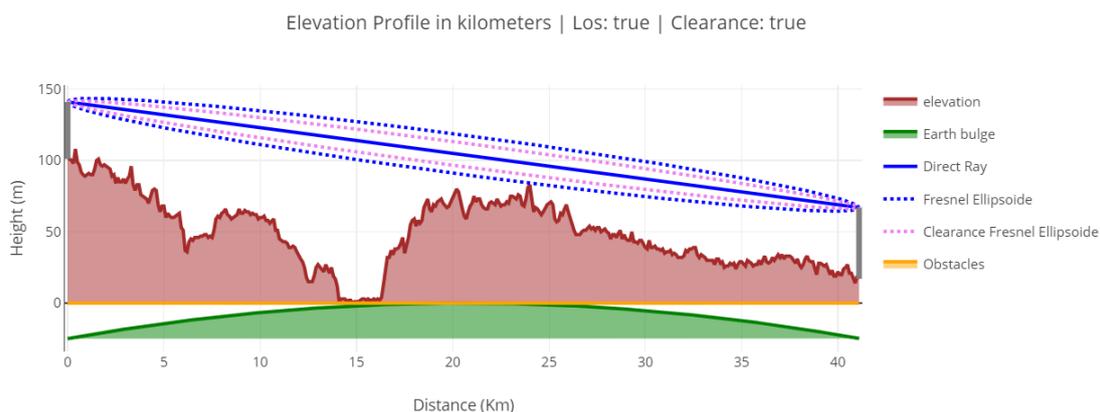


Figura 4.5: Perfil de ligação desobstruído

4.2.2 Cálculo das atenuações

O cálculo do balanço de potência para a ligação Marinha Grande-Figueira, é descrito na Tabela 4.4 . A diferença máxima de altitudes entre a aplicação desenvolvida e o *software Pathloss* é de aproximadamente 4 m. Os dados para atenuação em espaço livre são iguais em ambas, sendo que a ferramenta e apresentam um valor de 143.82 dB.

Comparando os valores das atenuações causadas por gases atmosféricos, existe uma diferença de 1.27 dB. A ferramenta apresenta valores de 2.66 dB e o *Pathloss* 1.39 dB.

A atenuação devido à precipitação para uma indisponibilidade de 0.01%, obtida pela ferramenta desenvolvida é de 34.97 dB .

Ligação Marinha Grande - Figueira da Foz		
	Aplicação Desenvolvida	PathLoss
Emissor		
Nome:	Marinha Grande	Marinha Grande
Latitude [°]	39.74	39.74
Longitude [°]	-8.93	-8.93
Altitude [m]	101	101.24
Antena	T5507401	T5507401
Ganho de Antena [dBd]	37.05	37.05
Ganho de Antena [dBi]	39.2	39.2
Altura da Antena [m]	40	40
Rádio	<i>FlexiHopper18_16s8E1</i>	<i>FlexiHopper18_16s8E1</i>
Potência Emitida [dBm]	16	16
Sensibilidade [dBm]	-86	-86

Receptor		
Nome:	Figueira da Foz	Figueira da Foz
Latitude [°]	40.11	40.11
Longitude [°]	-8.86	-8.86
Altitude [m]	17	13.22
Antena	T5507401	T5507401
Ganho de Antena [dBd]	37.05	37.05
Ganho de Antena [dBi]	39.2	39.2
Altura da Antena [m]	50	50
Rádio	<i>FlexiHopper18_16s8E1</i>	<i>FlexiHopper18_16s8E1</i>
Potência Emitida [dBm]	16	16
Sensibilidade [dBm]	-86	-86
Ligação		
Nome	Link Marinha-Figueira	Link Marinha-Figueira
Distância [km]	41.15	41.15
Frequência [GHz]	16	16
Factor K	4/3	4/3
Obstáculos		
Critério de desobstrução [%]	60	60
1° Elipsóide de <i>Fresnel</i>	Desobstruído	Desobstruído
Elipsóide de <i>Fresnel</i> critério de desobstrução	Desobstruído	Desobstruído
Espaço Livre		
Atenuação [dB]	148.82	148.82
Atmosfera		
Temperatura [°C]	15.73	15.73
Pressão [hPa]	1016	N/D
Pressão parcial vapor de água	19.78	N/D
Humidade [%]	78	N/D
Atenuação devido ao oxigénio [dB]	0.41	N/D
Atenuação devido ao vapor de água [dB]	2.24	N/D

Perdas Absorção dos gases atmosféricos [dB]	2.66	1.39
Atenuação Devido à Precipitação		
Polarização	Vertical	Vertical
Taxa de precipitação 0.01% [mm/hr]	33.21	45.18
Distância Efetiva [Km]	16.22	N/D
Atenuação [dB]	34.97	N/D

Tabela 4.4: Balanço de potência da ligação Marinha-Figueira



Conclusões

5.1 Conclusão

O propósito deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta código aberto que possa ser utilizada pela comunidade académica, para o projeto e análise de sistemas de comunicação por FH. A tarefa inicial foi concretizada e foram deixadas as fundações para que a infraestrutura possa ser expandida num futuro próximo.

A aplicação desenvolvida, foi implementada em dois blocos distintos. O primeiro bloco, o qual os utilizadores tem acesso direto, é o bloco web, responsável pela interface de utilizador. Este bloco foi implementado com a *framework* Vue.js que possui curva de aprendizagem mais baixa, face a outras tecnologias como *Angular* ou *React*. Ainda assim, foi necessário um estudo das tecnologias web como, páginas HTML e sobretudo da linguagem *JavaScript*. Para a representação dos mapas foi necessário utilizar a biblioteca *JavaScript Openlayers*, que permitiu a representação das estações base e obtenção de coordenadas de pontos geográficos das mesmas com a interação do cursor do utilizador sobre a área pretendida. Para além da biblioteca *Openlayers*, foi utilizada a biblioteca *Plotty*, que permite a geração de gráficos dinâmicos em páginas HTML. A utilização da mesma veio-se a revelar como essencial, pela possibilidade de representação de todos os elementos, tais como, terreno, obstáculos, raio directo, elipsóide de *Fresnel* e altura da antena do emissor e recetor, juntamente com a fácil interação com os mesmos por parte do utilizador.

O segundo bloco desenvolvido no âmbito da aplicação, foi o modelo lógico responsável, pela execução das funções descritas nas recomendação ITU-R e persistência dos dados da aplicação, tais como utilizadores, equipamentos rádio, antenas, guias de onda, emissores, receptores e *links*. Para tal foi implementado um servidor na linguagem *Python* com recurso à *framework Django*. A escolha da linguagem *Python* foi fulcral, pelo elevado número de bibliotecas científicas e pela facilidade de implementação de fórmulas matemáticas quer com números reais ou complexos. Ao longo do trabalho deparou-se com a existência duma biblioteca em *Python* [30] que contempla grande parte das recomendações ITU-R, mas esta foi desconsiderada devido à algumas das funções estarem desatualizadas e sua possível utilização não ir ao encontro dum trabalho académico.

Em síntese, o desenvolvimento do presente trabalho, permitiu um estudo rigoroso dos conceitos teóricos envolventes nas ligações por FH. A presente versão da aplicação permite o cálculo de alguns dos fenómenos associadas à propagação do sinal por ondas eletromagnéticas e permite sobretudo estabelecer uma infraestrutura para que futuros estudantes ou engenheiros a possam utilizar, aprimorar caso seja necessário, de forma aberta em comunidade. A ferramenta apresenta resultados satisfatórios, face aos dados obtidos e comparados com o *software* de simulação *PathLoss 5.0*.

5.2 Limitações e Trabalhos Futuros

Ao longo do trabalho foram encontradas, algumas limitações que dificultaram o desenvolvimento da aplicação. Uma limitação da aplicação foi o facto da mesma ter sido implementada em código de aberto e esse facto, impossibilitar a utilização bibliotecas mais conhecidas como o *Google Maps* que integra não só a parte visual, bem como os dados de elevação do terreno. Uma das outras dificuldades encontradas, foi o fato da aplicação estar dividida em dois blocos, o que tornou o processo de implementação mais complexo e lento.

A entrega da presente dissertação não significa o término deste projeto, mas apenas a conclusão da primeira versão da aplicação. A aplicação tem como propósito ser um bloco inicial para o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação de ligações por FH robusta e capaz de competir com outras ferramentas profissionais. Como indicado, o projeto ainda não se encontra concluído, existindo ainda várias temáticas que podem ser abordadas.

De seguida apresentam-se algumas das temáticas mais relevantes a serem implementadas:

- Disponibilização do projeto em repositório *Github* de forma a que o acesso seja público;
- Adição de outros módulos de cálculo tais como, multi-percurso, reflexão, desvanecimento, interferência do canal e qualidade da ligação;
- Melhoramento da interface de utilizador;
- Adaptação da interface de utilizador para dispositivos moveis;
- Publicação de ferramenta em servidor público.

Referências

- [1] Center of Telecommunication Technologies, *Pathloss version 5.1*, Accessed: 03-09-2020. URL: http://www.pathloss.com/p5/docs/pl5_white_paper.pdf.
- [2] Forsk Software Company, *Atoll microwave backhaul planning and optimisation software version 3.4*, Accessed: 03-09-2020. URL: https://www.forsk.com/sites/default/files/atollmicrowave_brochure.pdf.
- [3] Blue Marble Geographics, *Global mapper*, Accessed: 02-09-2021. URL: <https://www.bluemarblegeo.com/global-mapper/>.
- [4] Carlos Salema, *Feixes Hertzianos*. Instituto Superior Técnico, 2002, ISBN: 9789728469214.
- [5] J.D. Kraus & R.J. Marhefka, *Antennas for All Applications*. McGraw-Hill, 2002, ISBN: 9780071232012. URL: <https://books.google.pl/books?id=V6pSPgAACAAJ>.
- [6] Anton A. Huurdeman, *The worldwide history of telecommunications*. J. Wiley, 2003, páginas 337–349, ISBN: 9780471205050,0471205052. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=81BA9EBDA9AB61069F3FA31208103255>.
- [7] Trevor Manning, *Microwave Radio Transmission, Design Guide, Second Edition (Artech House Microwave Library)*, 2^a ed. Artech House Microwave Library, 2009, ISBN: 1596934565,9781596934566. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=2F487161C7E18CE37102D21EDD89437F>.
- [8] A. A. Huurdeman, “Evolution of telecommunications from 1900 to 1950”, em *The Worldwide History of Telecommunications*. IEEE, 2003, páginas 223–228. DOI: 10.1002/0471722243.ch14. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5236721>.

- [9] GSMA, *Mobile backhaul options. spectrum analysis and recommendations*. Accessed: 27-08-2020. URL: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/04/Mobile-Backhaul-Options.pdf>.
- [10] PABLO ANGUEIRA & JUAN ANTONIO ROMO, *Microwave line of sight link engineering*. John Wiley, ago. de 2012, ISBN: 9781118072738.
- [11] Giovanni Bianchi Roberto Sorrentino, *Microwave and RF Engineering*. J. Wiley, 2010, ISBN: 9780470758625. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Microwave+and+RF+Engineering-p-9780470660218>.
- [12] *Outdoor coverage sys*. URL: <http://www.rfcell.com/outdoor-coverage-sys->.
- [13] Recommendation ITU-R P.453-14, *The radio refractive index: Its formula and refractivity data*, Accessed: 28-07-2020. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-14-201908-I!!PDF-E.pdf.
- [14] RECOMMENDATION ITU-R P.836-6, *Water vapour: Surface density and total columnar content*, Accessed: 28-07-2020. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.836-6-201712-I!!PDF-E.pdf.
- [15] RECOMMENDATION ITU-R P.835-6, *Reference standard atmospheres*, Accessed: 28-07-2020. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.835-6-201712-I!!PDF-E.pdf.
- [16] Recommendation ITU-R P.530-17, *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*, Accessed: 28-07-2020. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-I!!PDF-E.pdf.
- [17] RECOMMENDATION ITU-R P.838-3, *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, Accessed: 28-07-2020. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf.
- [18] RECOMMENDATION ITU-R P.837-7, *Characteristics of precipitation for propagation modelling*, Accessed: 28-07-2020. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-7-201706-I!!PDF-E.pdf.
- [19] Recommendation ITU-R P.676-12, *Attenuation by atmospheric gases and related effects*, Accessed: 30-07-2020. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-I!!PDF-E.pdf.

- [20] Marco Damião, Miguel Costa, Francisco Cercas, Pedro Sebastião & José Sanguino, “Modern and optimized planning tool for microwave link design”, em *2014 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems (VITAE)*, 2014, páginas 1–5. DOI: [10.1109/VITAE.2014.6934505](https://doi.org/10.1109/VITAE.2014.6934505).
- [21] Center of Telecommunication Technologies, *Mlinkplanner 2.0*, Accessed: 02-09-2020. URL: <https://www.wireless-planning.com/mlinkplanner-user-manual-part1>.
- [22] *Shuttle radar topography mission*. URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.
- [23] Roger Coudé, *Radiomobile for microwave planning*, Accessed: 03-09-2020. URL: <https://www.microwave-link.com/microwave/radiomobile-for-microwave-planning/>.
- [24] *Openlayers api documentation*. URL: <https://openlayers.org/>.
- [25] *Opentopodata api documentation*. URL: <https://www.opentopodata.org/api/>.
- [26] OpenWeatherMap.org, *Openweather api documentation*. URL: <https://openweathermap.org/current>.
- [27] *Aster global digital elevation map*. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
- [28] *Eu-dem*, 2018. URL: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>.
- [29] Tdt, *Televisão digital terrestre*. URL: <http://tdt.telecom.pt/emissores>.
- [30] Inigo del Portillo, *Itu-rpy: A python implementation of the itu-r p. recommendations to compute atmospheric attenuation in slant and horizontal paths*. <https://github.com/inigodelportillo/ITU-Rpy/>, 2017.



Constantes

Tabela A.1: Coeficientes horizontais para Kh

Coeficientes horizontais para kh					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	0.10008	1.13098		
2	-0.35351	1.26970	0.45400	-0.18961	0.71147
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

Tabela A.2: Coeficientes verticais para Kv

Coeficientes verticais para kv					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061		
2	-3.44965	-0.22911	0.51059	-0.16398	0.63297
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

Tabela A.3: Coeficientes horizontais para alfa

Coeficientes horizontais para α_H					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-0.14318	1.82442	-0.55187		
2	0.29591	0.77564	0.19822	0.67849	-1.95537
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

Tabela A.4: Coeficientes verticais para alfa

Coeficientes verticais para α_V					
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-0.07771	2.33840	-0.76284		
2	0.56727	0.95545	0.54039	-0.053739	0.83433
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Tabela A.5: Dados espectroscópicos para atenuação por oxigénio

Dados espectroscópicos para o cálculo da atenuação pelo oxigénio						
f0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
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

continuação da Tabela

Table A.5 –continua na próxima pagina

f0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
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
368.498246	67.400	0.048	16.400	0.0	0.000	0.000
424.763020	637.700	0.044	16.400	0.0	0.000	0.000
487.249273	237.400	0.049	16.000	0.0	0.000	0.000
715.392902	98.100	0.145	16.000	0.0	0.000	0.000
773.839490	572.300	0.141	16.200	0.0	0.000	0.000

continuação da Tabela

Table A.5 –continua na próxima pagina

f0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
834.145546	183.100	0.145	14.700	0.0	0.000	0.000

Tabela A.6: Dados espectroscópicos para o cálculo da atenuação pelo vapor de água

Dados espectroscópicos para atenuação pelo vapor de água						
f0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
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
continuação da Tabela						

Table A.6 –continua na próxima pagina

f0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
906.205957	.1836	5.110	24.08	.70	4.700	.53
916.171582	8.400	1.441	26.73	.70	5.150	.78
923.112692	.0079	10.293	29.00	.70	5.000	.80
970.315022	9.009	1.919	25.50	.64	4.940	.67
987.926764	134.6	.257	29.85	.68	4.550	.90
1 780.000000	17506.	.952	196.3	2.00	24.15	5.00



Características do equipamento rádio

Alcatel MDR-800

MDR-8X08 – High Capacity

EQUIPMENT IDENTIFIER	MDR-8608-45	MDR-8608-135	MDR-8708s-155
Frequency Band (GHz)	7.125 - 8.5	7.125 - 8.5	7.125 - 8.5
US Dept. of Defense Equipment Identifier		JF12-08001	JF12-07984
RF Channel Bandwidth (MHz)	10	30	30
Capacity per RF Channel	1xDS3	3xDS3	3xSTS-1
DS1 Wayside Line Capacity	1xDS1	3xDS1	3xDS1
Modulation Type	64 QAM	64 QAM	128 TCM
Radio Data Rate (Mb/s)	46.3	138.8	160.2
System Gain (BER = 10 ⁻⁴) @ 32 dBm (dB)*	106.5	101	101
Transmitter Power Output (dBm)	15	15	15
Optional Power Amplifier Outputs (dBm)	28, 30, 32	28, 30, 32	28, 30, 32
Receiver Threshold (BER = 10 ⁻⁴) (dBm)*	-74.5	-69	-69
Maximum RSL for 10 ⁻⁶ BER (dBm)*	-17	-17	-17
Dispersive Fade Margin for 10 ⁻³ BER (dB)	64	50	46
Threshold/Interference			
Cochannel (dB)	34	34	34
Adjacent Channel (dB)	-8	-8	-8

Figura B.1: Características do equipamento rádio Alcatel MDR-800



Características do equipamento rádio Nokia Flexi-Hopper 18

Technical Specifications of Nokia FlexiHopper Radio / Outdoor Unit

General	13	15	18	23	26	38
Frequency range (GHz)	12.76 – 13.24	14.51 – 15.34	17.71 – 19.69	21.23 – 23.60	24.55 – 26.45	37.05 – 39.44
Transmission capacity	2 x 2, 4 x 2, 8 x 2 or 16 x 2 Mbit/s (Software programmable)					
Modulation	$\pi/4$ DQPSK					
Channel spacing (MHz)	3.5/7.0/14.0/28.0		5/7.5/13.75/27.5		3.5/7.0/14.0/28.0	
Power consumption	max 25 W					
Operational temperature	-45 to +50 °C					
Weight and dimensions	5.5 kg		4.6 kg			4.0 kg
	230 x 210 x 210		230 x 210 x 165			230 x 210 x 120
Antenna type	Integrated low profile antenna with vertical/horizontal polarisation					
Antenna gain (dBi)	35.5 – 45.0	32.0 – 46.2	34.4 – 48.2	35.5 – 49.5	36.9 – 46.9	39.6 – 44.3
Transmitter						
	<i>Typical values in dBm</i>					
Output power	20 dBm		18 dBm			16 dBm
Power adjustment range	25 dB					
Receiver Threshold level at antenna port						
	<i>Typical values in dBm BER 10-3 / BER 10-6</i>					
<i>Capacity (Mbit/s)</i>						
2 x 2			-92/-89			-91/-88
4 x 2			-89/-86			-88/-85
8 x 2			-86/-83			-85/-82
16 x 2			-83/-80			-82/-79

Figura C.1: Características do equipamento rádio Nokia Flexi-Hopper 18



Detalhes da ligação Monsanto a Serra de Montejunto *Path Loss*

Tabela D.1: Detalhes da ligação Monsanto Montejunto *Path Loss*

Path Loss Ligação Monsanto-Montejunto		
	Transmitter Monsanto	Receiver Montejunto
Latitude	38 43 35.89 N	39 10 25.50 N
Longitude	009 11 19.90 W	009 03 33.50 W
Easting (m)	483583.4	494877.2
Northing (m)	4286458.6	4336059.8
UTM zone	29N	29N
True azimuth (°)	012 42 30.74	192 47 23.94
Vertical angle (°)	000 19 57.15	000 40 34.48
Elevation (m)	183.02	648.09
Antenna model	T5507102	T5507215
Antenna file name	t5507102_7g2s	t5507215_13g4s
Antenna gain (dBi)	31.4	41.6
Antenna gain (dBd)	29.25	39.45
Antenna height (m)	22.04	5
Miscellaneous loss (dB)	0	0
Circulator branching loss (dB)	0	0

TX switch loss (dB)	0	0
TX filter loss (dB)	0	0
Other TX loss (dB)	0	0
RX hybrid loss (dB)	0	0
RX filter loss (dB)	0	0
Other RX loss (dB)	0	0
Frequency (MHz)	7000	
Polarization	Vertical	
Path length (km)	50.9	
Free space loss (dB)	143.48	
Atmospheric absorption loss (dB)	0.48	
Net path loss (dB)	70.96	70.96
Radio model	MDR-8608-135	MDR-8608-135
Radio file name	8608-135	8608-135
TX power (dBm)	28	28
EIRP (dBm)	59.4	69.6
RX threshold criteria	1E-6 BER	1E-6 BER
RX threshold level (dBm)	-69	-69
Receive signal (dBm)	-42.96	-42.96
Thermal fade margin (dB)	26.04	26.04
Climatic factor	1.5	
Terrain roughness (m)	42.67	
C factor	0.39	
Average annual temperature (°C)	15.97	
Fade occurrence factor (Po)	2.18E-01	
Worst month SES (%)	0.05424	0.05424
Worst month SES (sec)	1425.45	1425.45
Polarization	Vertical	
0.01% rain rate (mm/hr)	37.51	
Flat fade margin - rain (dB)	26.04	26.04
Rain attenuation (dB)	26.04	26.04
Worst month total BBER (ratio)	1.45E+259	
Worst month total ESR (ratio)	1.80E+254	
Annual rain availability (%)	100	100
Annual rain unavailability (min)	0.02	0.02



Detalhes da ligação Marinha Grande Figueira Foz *Path Loss*

Tabela E.1: Detalhes da ligação Marinha Grande Figueira Foz *Path Loss*

Path Loss Ligação Marinha-Figueira		
	Transmitter Marinha	Receiver Figueira
Latitude	39 44 38.95 N	40 06 38.34 N
Longitude	008 55 38.28 W	008 51 20.88 W
Easting (m)	506228.7	512289
Northing (m)	4399364	4440048.4
UTM zone	29N	29N
True azimuth (°)	008 31 08.42	188 33 53.63
Elevation (m)	101.24	13.22
Antenna model	T5507401	T5507401
Antenna file name	t5507401_18g1s	t5507401_18g1s
Antenna gain (dBi)	34.3	34.3
Antenna gain (dBd)	32.15	32.15
Antenna height (m)	0	0
Miscellaneous loss (dB)	0	0
Circulator branching loss (dB)	0	0
TX switch loss (dB)	0	0

TX filter loss (dB)	0	0
Other TX loss (dB)	0	0
RX hybrid loss (dB)	0	0
RX filter loss (dB)	0	0
Other RX loss (dB)	0	0
Frequency (MHz)	16000	
Polarization	Vertical	
Path length (km)	41.15	
Free space loss (dB)	148.82	
Atmospheric absorption loss (dB)	1.39	
Net path loss (dB)	81.61	81.61
Radio model	FlexiHopper18_4s_4E1	FlexiHopper18_4s_4E1
Radio file name	fh18_4s_4e1	fh18_4s_4e1
TX power (dBm)	16	16
Emission designator	7M00G7W	7M00G7W
EIRP (dBm)	50.3	50.3
TX channel assignments	1h 8178V	11 7912V
RX threshold criteria	1E-6 BER	1E-6 BER
RX threshold level (dBm)	-86	-86
Receive signal (dBm)	-65.61	-65.61
Thermal fade margin (dB)	20.39	20.39
Climatic factor	1.5	
Average annual temperature (°C)	15.73	
Fade occurrence factor (Po)		
Polarization	Vertical	
0.01% rain rate (mm/hr)	45.18	
Flat fade margin - rain (dB)	20.39	20.39
Rain attenuation (dB)	20.39	20.39
Worst month total BBER (ratio)	3.03E+244	
Worst month total ESR (ratio)	0.00E+00	
Annual rain availability (%)	99.96376	99.96376
Annual rain unavailability (min)	190.49	190.49