

**Projeto de uma Rede de *Backhaul* para Monitorização
de Incêndios Florestais na Ilha da Madeira**

Ricardo Paixão dos Santos Henriques

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. António Luís Campos da Silva Topa

Júri

Presidente: Prof. José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. António Luís Campos da Silva Topa

Vogal: Prof. António José Castelo Branco Rodrigues

Outubro 2020

Declaração

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

Esta dissertação teve como instituição de acolhimento o Instituto de Telecomunicações (IT),
Pólo de Lisboa.

Agradecimentos

É com muita felicidade que apresento esta dissertação, alcançando mais um objetivo e concluindo uma etapa muito importante e complicada na vida académica. Quero começar por agradecer a todas as pessoas presentes durante o período de mestrado, que de alguma forma contribuíram para o meu percurso e adaptação a um ambiente distinto ao que estava habituado.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor António Topa, por ter aceitado este desafio, por todo o acompanhamento ao longo deste processo e pela sua disponibilidade e flexibilidade na comunicação.

Os meus votos de agradecimento ao Engenheiro Nelson Melim da ANACOM Madeira pela forma como me recebeu, pela sua disponibilidade e pelo apoio no fornecimento de dados.

Um especial agradecimento ao Engenheiro da ANACOM, Luís Estevam, por estar sempre disponível no fornecimento de dados relativos aos feixes hertzianos da Madeira e, também, pelo esclarecimento de algumas questões que foram surgindo no decurso da investigação. A sua ajuda foi essencial para o sucesso deste trabalho.

Agradeço à equipa da Divisão de Sistemas de Informação da Câmara Municipal do Funchal, principalmente ao Dr. César Rosa, ao Dr. João Miguel e ao Eng. Paulo Alves, por me terem mostrado a sua rede de comunicações privada e, ainda, fornecido os mapas da rede.

Agradeço, igualmente, ao Eng. Filipe Ferreira da EEM e a toda a sua equipa por me terem recebido e demonstrado interesse em partilhar informações da sua rede privada de comunicações.

Fico muito grato ao Eng. Carlos Neves por me ter recebido e disponibilizado um espaço no LREC para estudar as suas redes de comunicações e ainda pelas suas sugestões.

Ao Instituto das Florestas e Conservação da Natureza, IP-RAM, agradeço pela cedência do *raster* das Cartas de Suscetibilidade à Ocorrência de Incêndios na Madeira.

Agradeço aos meus colegas de curso pela amizade e pelo companheirismo prestado durante a vida universitária e pelas conversas e sugestões sobre este meu projeto. Em especial, um abraço aos meus colegas e amigos, Alexandre e Gonçalo, pela luta em conjunto até o final deste marco.

Uma sentida palavra de carinho à minha namorada, Cláudia, a quem agradeço por ter caminhado ao meu lado sempre com o seu sorriso e suas palavras de incentivo, mesmo nos momentos difíceis. Obrigado por valorizares sempre as minhas capacidades e por me mostrares que eu era capaz de finalizar esta meta.

Por fim, agradeço à minha família e à família da minha namorada por todo o apoio prestado na minha vida académica e por todos os incentivos para o sucesso da conclusão desta etapa.

Resumo

As telecomunicações contam com diversos sistemas de comunicação, entre eles os feixes hertzianos. Embora estes sejam frequentemente menos utilizados, são de rápida implementação apresentando custos de instalação e manutenção reduzidos, mostrando-se ainda mais resilientes perante desastres naturais e condições extremas.

Com esta dissertação pretende-se realizar um levantamento das atuais redes de feixes hertzianos na Região Autónoma da Madeira (RAM), procurando-se depois projetar uma rede de *backhaul* para a monitorização de incêndios florestais na zona Este da região.

Inicialmente, foi feita uma análise cuidada dos feixes hertzianos, tendo, por exemplo, atenção aos modelos de propagação, às atenuações que o sinal pode sofrer, e até mesmo às condições para verificar a disponibilidade de uma ligação. Posto isto, realizou-se um estudo às tendências atuais e futuras na utilização de sistemas por feixes e analisou-se a realidade atual destes na região e como tem sido a evolução ao longo dos últimos anos.

Tendo em vista a aplicação prática destes sistemas na região, propôs-se a implementação de uma rede de *backhaul* por feixes hertzianos para a transmissão de dados. Neste caso, definiu-se que esta rede teria como objetivo assegurar o transporte de dados da monitorização de incêndios na zona Este da região até um *data center*.

Para chegar à solução final proposta, estudaram-se diversas alternativas, recorrendo às bandas não licenciadas bem como às licenciadas, e simularam-se as ligações recorrendo ao *software Feixer*, culminando na escolha da solução mais viável.

Palavras Chave: Feixes Hertzianos, Transmissão de Dados, Tendências Futuras, *Backhaul*, Incêndios Florestais, RAM.

Abstract

Telecommunications have several communication systems, including the microwave radio links. Although these are used less frequently, they are systems of quick implementation with reduced installation and maintenance costs, showing even more resilience in the face of natural disasters and extreme conditions.

With this project it is intended to carry out a survey of the current networks of microwave radio links in the Região Autónoma da Madeira, seeking then to design a backhaul network for the wildfires monitorization in the East zone of the region.

Initially, a careful analysis of the microwave links was made, paying attention to the propagation models, to the attenuations that the signal may suffer, and even to the conditions to check the availability of a connection. That said, a study was carried out on current and future trends in the use of microwave systems and the current reality of these in the region was analysed, as well as the evolution over the last few years.

In view of the practical application of these systems in the region, it was proposed to implement a backhaul network by microwave links for data transmission. In this case, it was defined that this network would aim to ensure the transport of data from the monitorization of fires in the East zone of the region to a data center.

Several alternatives were studied, using the unlicensed bands as well as the licensed ones, and the connections were simulated using the Feixer software, culminating in the choice of the most viable solution.

Keywords: Microwave Radio Link, Data Transmission, Future Trends, Backhaul, Wildfire, RAM.

Índice

Agradecimentos.....	VII
Resumo.....	IX
Abstract.....	XI
Índice.....	XIII
Índice de Figuras.....	XVII
Índice de Tabelas.....	XIX
Índice de Gráficos.....	XXI
Acrónimos.....	XXIII
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura do Relatório.....	3
1.4. Principais Contributos.....	3
2. Estado de Arte.....	5
2.1. Sistema de Feixes Hertzianos.....	5
2.1.1. Equipamento Radioelétrico.....	6
2.1.2. Antenas.....	6
2.1.3. Repetidores.....	8
2.1.4. Linhas de Transmissão.....	9
2.1.5. Torres.....	10
2.1.6. Abrigo e Sistema de Alimentação.....	10
2.2. Feixes Hertzianos Digitais.....	11
2.3. Planeamento da Frequência de Ligação.....	11
2.3.1. Ligação Monocanal.....	12
2.3.2. Ligação Multicanal.....	13
2.4. Modulação.....	14
2.5. Modelos de Propagação.....	16
2.5.1. Modelo em Espaço Livre.....	16

2.5.2.	Modelo <i>Knife-Edge</i>	17
2.5.3.	Modelo de <i>Deygout</i>	18
2.5.4.	Modelo de <i>Weissberger</i>	18
2.5.5.	Modelo ITU-R	18
2.5.6.	Modelo COST 235.....	19
2.6.	Atenuações.....	20
2.6.1.	Atenuação por Gases Atmosféricos	21
2.6.2.	Atenuação por Hidrometeoritos.....	21
2.6.3.	Atenuação por Nuvens e Nevoeiro.....	22
2.7.	Reflexões no Terreno.....	24
2.8.	Desvanecimento	25
2.8.1.	Desvanecimento Rápido	25
2.8.2.	Desvanecimento Uniforme e Seletivo.....	26
2.8.3.	Redução dos Efeitos de Desvanecimento	27
2.9.	Recomendações ITU.....	28
2.10.	Indisponibilidade da Ligação.....	29
2.11.	Margem de Segurança	30
3.	Tendências Atuais e Futuras	31
3.1.	Feixes Hertzianos como <i>Backhaul</i>	31
3.2.	Tendências do Espetro.....	32
3.3.	Eficiência do Espetro e da Capacidade	33
4.	Estudo de Feixes Hertzianos na RAM.....	37
4.1.	Estudo Genérico	37
4.2.	Caso de Estudo – Câmara Municipal do Funchal.....	42
4.3.	Caso de Estudo – Laboratório Regional de Engenharia Civil	45
4.4.	Caso de Estudo – Empresa de Electricidade da Madeira.....	49
5.	Rede de Feixes para Monitorização.....	53
5.1.	Monitorização de Incêndios.....	53
5.2.	Projeto da Rede de Feixes Hertzianos.....	60
5.2.1.	Legislação do Sistema Português	61

5.2.2. Solução na Banda Livre	63
5.2.3. Solução na Banda Licenciada	69
5.2.4. Solução Proposta – Banda Livre com Redundância	72
6. Conclusões	77
6.1. Trabalhos Futuros	79
Referências	81
Anexos	87
Anexo A – Gráficos do Número de Ligações por Empresa	87
Anexo B – Infraestrutura da Rede da CMF	89
Anexo C – Locais Propícios para Estações de Monitorização	90
Anexo D – Mapas de Enquadramento Visual	91
Anexo E – Características das Soluções Estudadas	92

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Esquema de uma ligação por feixes hertzianos com repetidores (adaptado de [1]).	5
Figura 2.2 – Antena: a) parabólica; b) corneta refletora; c) parabólica de tubo; d) Yagi-Uda; e) helicoidal; f) parabólica com proteção.	7
Figura 2.3 – <i>Radiation Pattern Envelope</i> das três classes superiores padronizadas pela ETSI [6].	8
Figura 2.4 – Ligação com plano a duas frequências numa rede com mais de dois saltos (adaptado de [1]).	12
Figura 2.5 – Plano de frequência: a) simples; b) simplesmente alternado; c) duplamente alternado; d) sobreposto (adaptado de [1]).	14
Figura 2.6 – Evolução da capacidade, relação C/I e ganho do sistema em função do índice de modulação [11].	15
Figura 2.7 – Resultado de codificação e modulação adaptativa para uma ligação de 10 GHz [14].	15
Figura 2.8 – Atenuação por difração isolado em lâmina.	17
Figura 2.9 – Curvas de atenuação por vegetação em função da profundidade das folhas.	19
Figura 2.10 – Representação gráfica dos vários tipos de atenuação [1].	20
Figura 2.11 – Atenuação específica devida aos gases atmosféricos a uma pressão atmosférica de 1013 hPa, temperatura a 15°C e a uma concentração de vapor de água de 7,5 g/m ³ [22].	21
Figura 2.12 – Gráficos de: a) Coeficiente de atenuação específica de nuvens e nevoeiro; b) Atenuação específica de nuvens e nevoeiro para $M = 0,5 \text{ g/m}^3$ e $M = 0,05 \text{ g/m}^3$.	23
Figura 2.13 – Gráficos da atenuação total de nuvens para o pior caso de densidade da nuvem na região da Madeira.	23
Figura 2.14 – Exemplo de “blindagem” das antenas à reflexão especular [27].	24
Figura 3.1 – Distribuição de <i>backhaul</i> até 2023 [33].	31
Figura 3.2 – Comparação de soluções <i>backhaul</i> para ligações de 10 Gbit/s na Alemanha [33].	32
Figura 3.3 – Espectro radioelétrico de ondas milimétricas [38].	33
Figura 3.4 – Evolução da faixa de frequência de microondas até 2025 [34].	33
Figura 3.5 – Capacidade MIMO em função do arranjo da antena [37].	34
Figura 3.6 – Reutilização de frequências num sistema <i>Geographical Spectrum Efficiency</i> [38].	35
Figura 4.1 – Instalação de antenas da rede da CMF.	43
Figura 4.2 – Mapeamento da rede de comunicações da CMF [45].	44

Figura 4.3 – Mapeamento da rede do projeto de monitorização de ribeiras [51].....	46
Figura 4.4 – Diagrama de rede do projeto de monitorização de ribeiras [48]......	47
Figura 4.5 – Estação GW0 e GW3 da rede de monitorização de ribeiras, respetivamente.	48
Figura 4.6 – Mapeamento da rede de telecomunicações da EEM, desde 2011 a 2014.....	50
Figura 4.7 – Antenas na estação do Pico do Silva e na estação da Encumeada, respetivamente.	51
Figura 5.1 – Carta de suscetibilidade a incêndios florestais da ilha da Madeira (Cedida pelo Instituto das Florestas e Conservação da Natureza, IP-RAM).....	55
Figura 5.2 – Carta de suscetibilidade para as classes Muito Alta e Alta a incêndios florestais na zona Este.....	56
Figura 5.3 – Torre de vigilância do Pico do Suna [62]......	56
Figura 5.4 – Estação rádio do Pico do Areeiro.....	57
Figura 5.5 – Mapeamento da localização das estações de monitorização.	58
Figura 5.6 – Enquadramento visual a partir das estações de monitorização (verde) e suscetibilidade incendiária (vermelho).....	59
Figura 5.7 – Mapeamento da solução inicial proposta.	64
Figura 5.8 – Mapeamento das soluções com repetidores.	67
Figura 5.9 – Mapeamento da solução proposta com redundância.	73
Figura A.1 – Número de ligações da NOS em função das frequências utilizadas.....	87
Figura A.2 – Número de ligações da NAV em função das frequências utilizadas.	87
Figura A.3 – Número de ligações da NAV em função das frequências utilizadas.	88
Figura A.4 – Número de ligações da ONITelecom em função das frequências utilizadas.....	88
Figura B.1 – Infraestrutura da rede da CMF – Interligação entre Sites.....	89
Figura C.1 – Locais propícios para implementação de estações de monitorização.	90
Figura D.1 – Enquadramento visual a partir da Torre da Boca das Voltas (a verde) e suscetibilidade incendiária (vermelho).....	91
Figura D.2 – Enquadramento visual em 3D a partir das estações de monitorização (verde) e suscetibilidade incendiária (vermelho).....	91

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente C_0 [28].	26
Tabela 2.2 – Valores de SESR, BBER e ESR conforme a Recomendação F.1668-1 da ITU-R [30].	28
Tabela 2.3 – Valores de <i>berSES</i> , <i>N</i> e <i>Nb</i> conforme a Recomendação F.1605-0 da ITU-R [31].	29
Tabela 3.1 – Desempenho das tecnologias futuras em ligações <i>backhaul</i> nas frequências tradicionais [38].	36
Tabela 3.2 – Desempenho das tecnologias futuras em ligações <i>backhaul</i> nas frequências milimétricas [38].	36
Tabela 5.1 – Elevação dos pontos de referência das estações de monitorização para o enquadramento visual.	59
Tabela 5.2 – Bandas isentas de licença aplicáveis à feixes hertzianos [66].	62
Tabela 5.3 – Características da solução inicial utilizando bandas livres.	66
Tabela 5.4 – Dados de localização dos repetidores.	68
Tabela 5.5 – Características da solução inicial utilizando repetidores ativos.	69
Tabela 5.6 – Gama de frequências disponíveis e seus custos associados.	70
Tabela 5.7 – Casos favoráveis à implementação da ligação LREC-EstPicoSilva, utilizando bandas licenciadas.	71
Tabela 5.8 – Características detalhadas da proposta final com redundância.	75
Tabela 5.9 – Características detalhadas da proposta final com redundância (continuação).	76
Tabela E.1 – Características detalhadas da solução inicial utilizando bandas livres.	92
Tabela E.2 – Características detalhadas da solução inicial utilizando bandas livres (continuação).	93
Tabela E.3 – Características detalhadas da solução inicial utilizando repetidores passivos.	94
Tabela E.4 – Características detalhadas da solução inicial utilizando repetidores passivos (continuação).	94
Tabela E.5 – Casos de estudo à análise da ligação LREC-EstPicoSilva, utilizando bandas licenciadas.	95

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 – Número de ligações licenciadas de serviço fixo, entre 2009 e 2019, na RAM.	37
Gráfico 4.2 – Ligações hertzianas existentes em 2009, por empresa.....	38
Gráfico 4.3 – Ligações hertzianas existentes em 2019, por empresa.....	39
Gráfico 4.4 – Número de ligações licenciadas por instituição (parte I).....	39
Gráfico 4.5 – Número de ligações licenciadas por instituição (parte II).....	39
Gráfico 4.6 – Número de ligações da MEO em função das frequências utilizadas.	40
Gráfico 4.7 – Número de ligações da EEM em função das frequências utilizadas.....	40
Gráfico 4.8 – Número de ligações da Vodafone em função das frequências utilizadas.....	41
Gráfico 4.9 – Evolução do número de feixes nas diferentes bandas (parte I).	41
Gráfico 4.10 – Evolução do número de feixes nas diferentes bandas (parte II).	42

Acrónimos

- ACM** – *Adaptive Coding and Modulation*
- AM** – Modulação em Amplitude
- ANACOM** – Autoridade Nacional de Comunicações
- ASK** – *Amplitude Shift Keying*
- AVHRR** – *Advanced Very High Resolution Radiometer*
- BER** – *Bit Error Rate*
- BFWA** – *Broadband Fixed Wireless Access*
- C/I** – *Carrier-Interference*
- C/N** – Portadora-Ruído
- CAPEX** – *Capital Expenditures*
- CCIC** – *Co-Channel Interference Cancellor*
- CMF** – Câmara Municipal do Funchal
- EEM** – Empresa de Electricidade da Madeira
- EIRP** – *Effective Isotropic Radiated Power*
- ETSI** – *European Telecommunications Standards Institute*
- FCC** – *Federal Communications Commission*
- FM** – Modulação em Frequência
- FSK** – *Frequency Shift Keying*
- FWA** – *Fixed Wireless Access*
- GPS** – *Global Positioning System*
- ITU-R** – *International Telecommunication Union - Radiocommunication*
- LREC** – Laboratório Regional de Engenharia Civil
- MIMO** – *Multiple-Input Multiple-Output*
- MODIS** – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
- NAV** – Navegação Aérea de Portugal
- NR** – *New Radio*
- OAM** – *Orbital Angular Momentum*
- OPEX** – *Operational Expenditures*
- OPGW** – *Optical Ground Wire*
- PDH** – Hierarquias Digitais Plesiócronicas
- PH** – Polarização Horizontal
- PM** – Modulação em Fase
- PSK** – *Phase Shift Keying*
- PtMP** – Ligação Ponto-Multiponto
- PtP** – Ligação Ponto-Ponto

PV – Polarização Vertical

QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*

QNAF – Quadro Nacional de Atribuição de Frequências

QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*

RAM – Região Autónoma da Madeira

RLAN – *Radio Local Area Networks*

RPE – *Radiation Pattern Envelope*

RTP – Rádio e Televisão de Portugal

SAARAM – Subsistema de Alerta de Aluviões da RAM

SDIRAM – Subsistema de Detecção de Incêndios da RAM

SFIM – Serviço Fixo por Monovia

SISO – *Single-Input Single-Output System*

SRD – *Short Range Devices*

STL – Ligação Estúdio-Emissor

STM – Módulo Síncrono de Transmissão

TCO – *Total Cost of Ownership*

TDM – Multiplexagem por Divisão no Tempo

TETRA – *Terrestrial Trunked Radio*

TPC – *Transmit Power Control*

UPS – *Uninterruptible Power Supply*

WAS – *Wireless Access Systems*

XPIC – *Cross Polarization Interference Cancellation*

1. Introdução

O Arquipélago da Madeira de origem vulcânica é constituído por quatro ilhas, designadamente, a ilha da Madeira, Porto Santo, Desertas e Selvagens, sendo apenas as duas primeiras povoadas. A ilha da Madeira conta com um clima tropical com temperaturas amenas ao longo do ano, sem grandes variações de temperatura. É uma ilha com uma orografia muito acidentada com muitos vales e montanhas, possuindo alguns dos picos mais altos do país, especificamente o Pico Ruivo a uma altitude de 1 862 m e o Pico do Areeiro a 1 818 m.

A orografia da ilha pode condicionar as comunicações, no entanto existem soluções vantajosas como os sistemas de comunicações por feixes hertzianos que constituem uma boa solução para a implementação de ligações ponto a ponto, podendo utilizar pontos mais altos como uma mais valia conseguindo assim uma ligação em linha de vista e sem fios.

1.1. Motivação

Há muito que os feixes hertzianos são utilizados em ligações ponto-a-ponto, tendo a primeira ligação sido estabelecida por volta de 1931 entre Calais, em França e St. Margarets Bay, em Inglaterra, implementando-se, passados dois anos, a primeira ligação permanente entre os aeroportos de Lympne, Inglaterra e de St. Inglevert, em França [1].

Este tipo de sistemas assume-se vantajoso em situações em que a transmissão é feita para grandes distâncias e aquando da existência de obstáculos como cadeias de montanhas ou rios que dificultam a instalação de suporte físico. A propagação é assim feita em linha de vista sem necessidade de uma conexão por fios, outra vantagem para as mais variadas situações onde é impossível implementar conexões por fio.

Apesar da importância que os feixes hertzianos tiveram no início nas ligações ponto-ponto, com o avanço da tecnologia, as fibras óticas foram assumindo maior destaque e sobrepondo-se aos feixes hertzianos ao longo do tempo, no entanto, os sistemas de comunicação por feixes assumem outra importância na atualidade. Em situações extremas, como é o caso dos mais diversos desastres naturais, os feixes hertzianos constituem uma alternativa fiável, tal como se verificou na aluvião de 20 de Fevereiro de 2010, na Madeira, em que se perderam muitas das comunicações móveis devido à queda das ligações *backhaul*, especificamente as que são constituídas por cabos e fibras óticas. Enquanto que, as operadoras que utilizavam feixes conseguiram manter as comunicações móveis em funcionamento nesta intempérie.

Os incêndios florestais constituem outro fenómeno, no qual, a utilização de feixes hertzianos constitui uma mais valia, podendo estes ser utilizados durante o incêndio e depois do mesmo até que se consigam repor as comunicações pela solução de transmissão principal. Desde que não se esteja perante temperaturas extremamente elevadas e fumo intenso, os feixes constituem uma solução com elevada disponibilidade de serviço [2].

Nos últimos anos tem-se registado em Portugal uma maior frequência de incêndios florestais, atingindo estes cada vez maiores proporções e tendo efeitos mais devastadores. Ao nível das infraestruturas de comunicações são mais de duas centenas os locais de instalações de estações de radiocomunicações afetadas por estes fenómenos obrigando a Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM) a encontrar estratégias e implementar medidas que permitam fazer face a esta situação [3].

Desta forma, reuniram-se grupos de trabalho para diferentes áreas e definiram-se as estratégias e medidas a implementar para cada área. Relativamente às comunicações rádio verificou-se a necessidade dos feixes hertzianos constituírem uma alternativa aos traçados de cabo aéreo, isto porque através dos feixes hertzianos é possível ter uma rede de transmissão pouco suscetível a incêndios e demais desastres naturais. Esta solução é especialmente importante para regiões mais rurais, com reduzida densidade populacional e, essencialmente, em locais de difícil acesso e cuja classe de perigosidade de incêndio florestal é “Alta” ou “Muito Alta”. Esta medida pretende essencialmente expandir a rede sem excluir os traçados que já existem e que estão em funcionamento [3].

No entanto, os feixes, estão limitados na largura de banda pelo que podem não constituir a solução principal de comunicação, podendo apesar disto constituir uma hipótese viável para implementação de redundância. Assim, servem apenas como alternativa e atuam em caso de falha da solução principal de comunicação.

Perante tudo isto, pretende-se estudar os feixes hertzianos existentes na região e tendo em conta as condições da ilha, nomeadamente a orografia e o aumento do número de incêndios ocorrido nos últimos anos, procura-se utilizar os feixes hertzianos para auxiliar a deteção e prevenção de incêndios.

1.2. Objetivos

Nesta investigação tem-se como principais objetivos realizar um levantamento da atual rede de feixes hertzianos na Região Autónoma da Madeira e, posteriormente projetar e simular uma rede independente de feixes hertzianos com o intuito de servir como *backhaul* a um sistema de monitorização de incêndios florestais na zona Este da região.

O cumprimento destes objetivos depende de vários objetivos específicos pelo que no final deste trabalho se deve ter realizado o estudo de todos os componentes constituintes de um sistema de feixes hertzianos e caracterização dos feixes, para além da análise de certos modelos de propagação. Salientar que com este trabalho pretende-se fazer o estudo de acordo com as recomendações mais atualizadas da ITU, sempre que possível.

Pretende-se ainda realizar uma análise de tendências atuais e futuras nos sistemas de feixes hertzianos e uma análise evolutiva anual do número de ligações licenciadas existentes no Arquipélago, particularizada depois tendo em conta a frequência e instituição detentora da ligação, fazendo ainda a

caracterização de redes de feixes atuais em funcionamento, por parte de entidades privadas que não disponibilizam serviço de comunicação.

Por fim, fazer o estudo e simulação no *Feixer* de uma rede hertziana para servir de *backhaul* a um sistema de detecção e monitorização de incêndios, tendo sempre presente que as ligações simuladas poderão ter um resultado final distinto ao ser executado noutro simulador.

1.3. Estrutura do Relatório

O presente relatório encontra-se estruturado em seis capítulos, dispostos da seguinte forma:

No primeiro capítulo é feita uma contextualização do tema e motivação para o desenvolvimento desta dissertação. Apresentam-se ainda os objetivos a cumprir, a estrutura do relatório e os principais contributos desta investigação.

De seguida, no segundo capítulo é feita uma introdução teórica de conceitos relevantes para a compreensão do tema abordado, bem como dos requisitos a ter em conta no planeamento das ligações hertzianas.

No terceiro capítulo investigam-se as tendências atuais e futuras nos sistemas de feixes hertzianos, principalmente o acompanhamento destes com a evolução da tecnologia do 5G, e, ainda, aspetos inovadores que permitem rentabilizar o espectro e a capacidade dos feixes.

Posteriormente, no quarto capítulo, é realizado um estudo profundo das ligações licenciadas existentes no arquipélago, analisando a evolução anual destas durante dez anos, segmentando depois a análise por instituição e frequências de banda. Neste capítulo também se apresentam três casos de estudo de entidades que detêm a sua rede de comunicações privada.

Conhecendo os conceitos teóricos e a realidade dos feixes na região, apresenta-se no quinto capítulo um projeto prático, simulando e procurando construir um sistema de *backhaul*, em feixes hertzianos, que permita suportar uma rede de detecção de incêndios em determinados locais de alto risco.

Por fim, no último capítulo são expostas as conclusões finais da elaboração deste trabalho e são sugeridos trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos.

1.4. Principais Contributos

Esta dissertação contribuiu para o conhecimento da realidade dos feixes hertzianos e sua evolução na RAM. Realizou-se uma análise e sistematização da diversa informação existente relativamente aos feixes hertzianos existentes na região detalhando-a por entidades e frequências, verificando as variações ao longo de dez anos.

A informação recolhida permitiu ainda fomentar o conhecimento e analisar as redes de feixes privadas existentes na ilha, sendo estas ligações utilizadas para diversos fins como para ligar várias

delegações da mesma entidade e para comunicações internas. Este estudo possibilitou ainda conhecer alguns projetos, já desenvolvidos e em desenvolvimento, que utilizam feixes hertzianos na região.

A particularidade da região em análise, especialmente no que toca à sua orografia e clima, permitiu a identificação dos principais aspetos a ter em conta na implementação de um projeto deste género numa região com características semelhantes à ilha da Madeira, podendo constituir uma ferramenta futura.

Por fim, a criação de uma rede de *backhaul* para monitorização de incêndios na zona Este da região, permitiu a identificação dos melhores locais para implementação de uma rede de estações de monitorização, capaz de cobrir as zonas de maior suscetibilidade incendiária. Foi com o estudo de diversas alternativas que foi possível selecionar a solução mais viável para monitorizar os incêndios nesta zona, oferecendo assim uma solução de rede *backhaul* para monitorizar os incêndios na zona Este da região, que até ao momento não dispunha de um sistema deste género.

2. Estado de Arte

Neste capítulo apresentam-se conceitos essenciais para a perceção do tema abordado nesta investigação, bem como os requisitos necessários no planeamento de ligações hertzianas para o território português.

2.1. Sistema de Feixes Hertzianos

Ligações por feixes hertzianos são conhecidas pela transmissão atmosférica de ondas de rádio, na camada da troposfera, com a principal característica da propagação ocorrer em linha de vista entre o emissor e o recetor, sem guia artificial, implicando a utilização de frequências elevadas, por convenção acima dos 1 GHz [4]. Por consequente, para se garantir a linha de vista e o nível de sinal entre as estações terminais pode-se recorrer a repetidores intermédios, sendo necessário a sua utilização em ligações com comprimento superior aos 50 Km [1].

Na Figura 2.1 representam-se os elementos físicos de uma ligação por feixes hertzianos na presença de um repetidor ativo e a planificação de frequências numa ligação com várias secções radioelétricas.

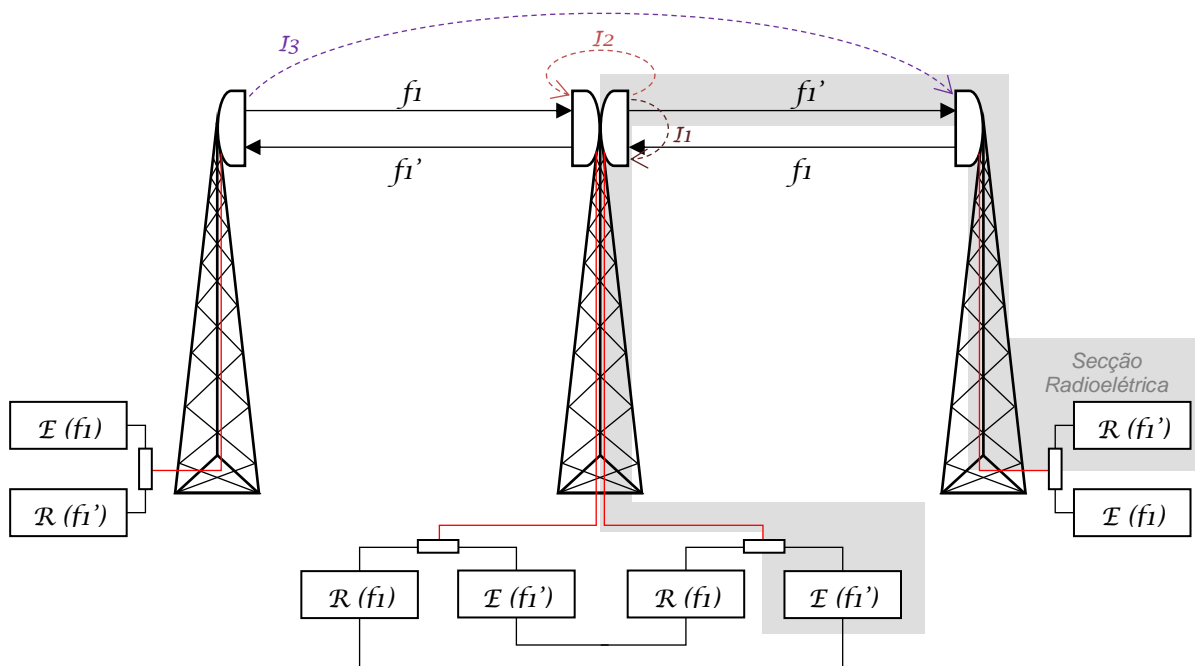


Figura 2.1 – Esquema de uma ligação por feixes hertzianos com repetidores (adaptado de [1]).

Como se pode verificar pela figura anterior, uma ligação de feixes hertzianos é essencialmente constituída por um par de antenas, situada uma em cada terminal da ligação, normalmente sobre uma torre de suporte, e um conjunto de equipamentos radioelétricos, emissores (E) e recetores (R) no caso da ligação ser bidirecional. Caso, a ligação seja unidirecional (só numa direção) e sem repetidores ativos, é somente necessário um emissor e um recetor no sistema.

Normalmente, os equipamentos radioelétricos não são projetados para estarem posicionados junto às antenas, por isso, a utilização de cabos ou guias de onda para integrar a ligação entre estes é suficiente para garantir a transmissão de dados entre as estações terminais.

Na presença de repetidores ativos, o recetor é conectado ao emissor da outra antena e vice-versa, como ilustrado, de forma muito simplificada, nas conexões na Figura 2.1, sem estarem representados outros equipamentos radioelétricos necessários na amplificação do sinal.

Consequentemente, caracteriza-se uma secção radioelétrica pelo conjunto de cada par emissor e recetor de uma ligação unidirecional, incluindo os respetivos cabos e guias de onda, antenas e o próprio meio de propagação entre elas [1].

2.1.1. Equipamento Radioelétrico

O equipamento elétrico é normalmente constituído por um dos seguintes módulos [1]:

- Um emissor e um recetor, incluindo fontes de alimentação;
- Um modulador-desmodulador analógico ou digital;
- Combinador de diversidade e um recetor;
- Agrupamento de um emissor, um recetor, um modulador e um desmodulador.

Este equipamento é montado em bastidores o mais próximo possível às estações e não nos estúdios, podendo ser utilizado outro meio de comunicação (ex. fibra ótica) para interligar os estúdios às estações. Em casos especiais, em sistemas muito sensíveis às perdas e ao ruído, os emissores e recetores poderão ser colocados o mais próximo das antenas, no alto das torres, transmitindo-se em frequência intermédia (tipicamente a 1 GHz) até às instalações da estação através de cabos coaxiais, embora não seja muito praticável pois exige um maior esforço no correto planeamento da torre [5].

Nos sistemas que integram somente dispositivos de estado sólido o valor máximo da potência de emissão (p_E) em sistemas comerciais pode ser estimada em função da frequência, por

$$p_{E[W]} \leq 10 / f_{[GHz]} \quad (2.1)$$

sendo, geralmente inferior a cerca de 10 W [1].

2.1.2. Antenas

Tendo em conta as especificidades destas ligações, especialmente, o facto dos feixes serem muito direccionais, a correta escolha das antenas a utilizar com base na frequência de ligação assume-se fundamental.

As antenas são projetadas conforme a polarização, a largura de banda ou o ganho pretendido, sendo desejável um ganho de antena elevado. Nos sistemas de feixes hertzianos, as antenas devem seguir alguns requisitos essenciais, tal como, ter uma largura de feixe não inferior a um grau, garantindo sinal mesmo que ocorram deslocações e/ou torção das antenas ou dos mastros. Contudo, este requisito fará com que o ganho da antena não seja superior a 45 dB. Salientar ainda outros requisitos como a

necessidade do diagrama de radiação da antena conter lóbulos laterais reduzidos e a relação de ganho frente-trás elevada, minimizando assim as interferências [5].

Na implementação de feixes hertzianos dispõem-se dos seguintes tipos mais comuns de antenas [1]:

- **Parabólica ou Refletor parabólico** – projetada para frequências acima de 1 GHz, com diâmetros entre 0,5 e 4 metros;
- **Corneta refletora** – utilizada acima de 1 GHz e em casos que exijam elevada discriminação em polarizações ortogonais e taxas de onda estacionária muito baixas;
- **Refletor parabólico de tubo ou rede** – útil para frequências inferiores a cerca de 2 GHz. Tem a vantagem de possuir um peso reduzido e não ser tão afetada por ventos em relação a outro refletor;
- **Yagi-Uda ou Helicoidal** – para frequências inferiores a 1 GHz, sendo formadas isoladamente ou em agregados, com ou sem planos refletores, conforme a utilidade desejada.

Na Figura 2.2 é ilustrado uma antena de cada tipo referido anteriormente.

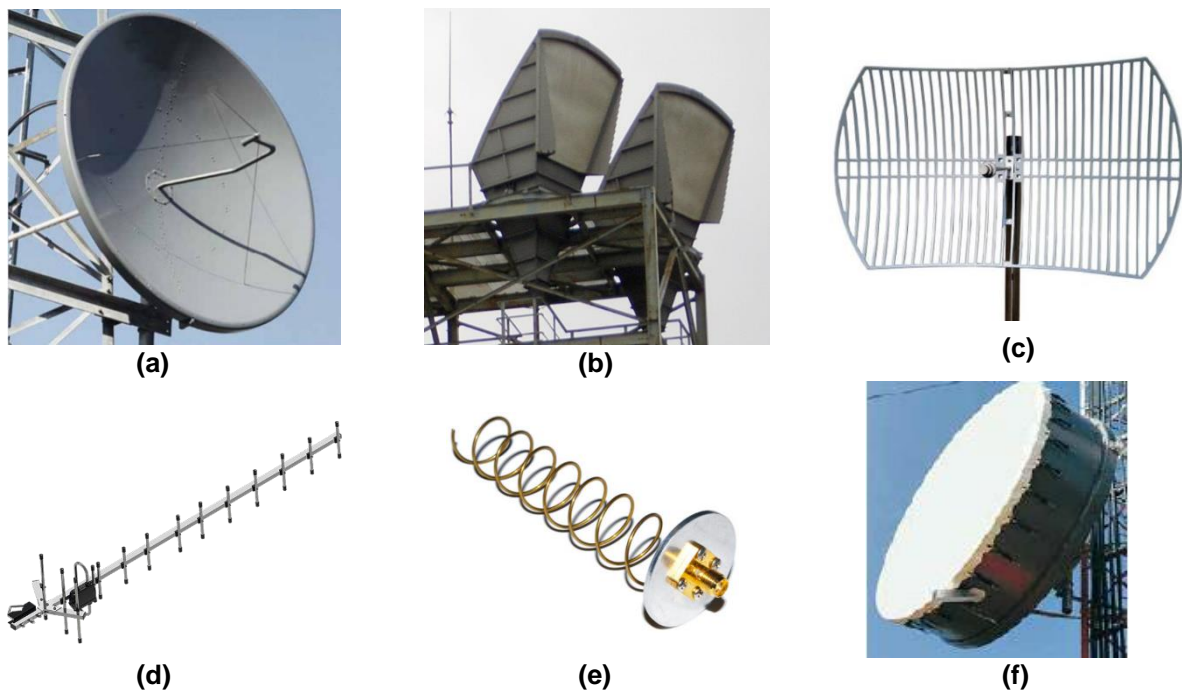


Figura 2.2 – Antena: a) parabólica; b) corneta refletora; c) parabólica de tubo; d) Yagi-Uda; e) helicoidal; f) parabólica com proteção.

Algumas antenas são cobertas na frente por capas protetoras de plástico ou de tecido para proteção contra o tempo (Figura 2.2-f), podendo ter um *design* que permita repelir águas, neve e gelo e ainda minimizar o nível de interferência.

As antenas que exijam requisitos especiais na distribuição da potência radiada, podem custar duas vezes mais em relação às antenas normais e aquelas que têm discriminação de polarização crescem 40 a 50% ao valor das antenas equivalentes com polarização simples [1].

Organismos como o *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) na União Europeia e a *Federal Communications Commission* (FCC) nos Estados Unidos publicam padrões que todas as antenas devem atender a fim de cumprir os requisitos regulamentares. O ETSI classifica quatro padrões diferentes de antena de microondas, a Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4, em ordem crescente de rigor do *Radiation Pattern Envelope* (RPE¹) permitido, sendo considerada a última classe (Classe 4) o topo de gama para fins de serviço fixo. Na Figura 2.3 é apresentada uma sobreposição de três RPEs da classe ETSI, mostrando os lóbulos laterais permitidos de cada um. A Classe 1 não consta na figura uma vez que deixou de ser utilizada [6].

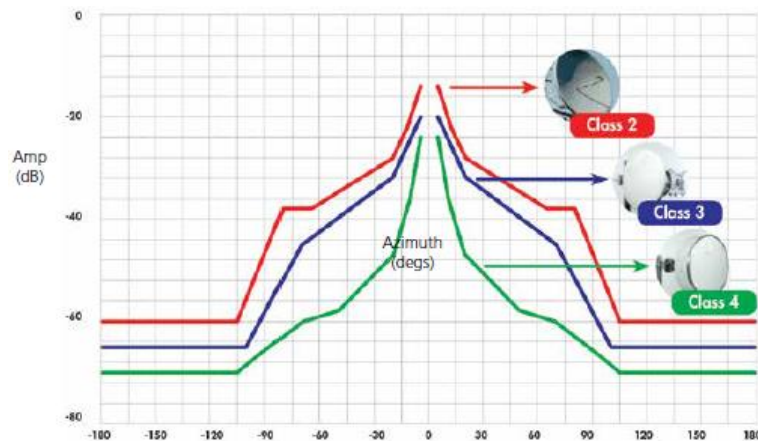


Figura 2.3 – *Radiation Pattern Envelope* das três classes superiores padronizadas pela ETSI [6].

Mesmo em ligações altamente congestionadas, é possível atingir o objetivo de desempenho com recurso a antenas maiores da Classe 3. No entanto, com o crescimento de congestionamento, a solução de Classe 3 pode não ser adequada futuramente [6].

As antenas de Classe 4 fornecem maior imunidade a interferências devido aos seus RPEs muito mais estreitos como é visível na figura anterior, mesmo em ambientes mais congestionados. Consequentemente, com uma menor interferência tem-se um aumento da taxa portadora/interferência, permitindo a utilização de antenas menores com melhor taxa de transmissão, reduzindo também, de certa forma, os custos de montagem, instalação e aluguer da torre. Essa redução de interferência também permite o uso de esquemas de modulação mais altos, aumentando assim a capacidade de dados por antena [7].

2.1.3. Repetidores

Na ausência de ligação em linha de vista, a utilização de repetidores intermédios torna-se solução funcional ao problema. Normalmente, em ligações com comprimento superior a cerca de 50 Km torna-se necessária a utilização de repetidores [1]. Os repetidores podem ser de dois tipos:

- **Passivo** – tem simplesmente como funcionalidade “refletir” o sinal, aplicando o ganho do repetidor ao sinal de transmissão. Torna-se mais benéfico a sua utilização em frequências mais

¹ RPE – representa a máscara em torno do diagrama de radiação, simplificando a reprodução das características de radiação da antena.

elevadas e o mais próximo possível de um dos terminais do sistema. Este é classificado em três tipos [8]:

- **Espelho plano** – espelho com um ganho proporcional à sua área. É normalmente comercializado em espelhos até uma área física de cerca 35 m²;
 - **Associação de espelhos ou Periscópio** – conjunto de dois espelhos planos distribuídos sob a forma de periscópio. O ganho da associação corresponde ao menor ganho dos dois espelhos;
 - **Costas com Costas** – repetidor formado por duas antenas posicionadas costas com costas e interligadas entre si por um troço de guia onda ou cabo coaxial pequeno. O ganho resultante é dado pela soma dos ganhos das antenas, considerando-se a atenuação da linha de interligação.
- **Ativo** – requer equipamento radioelétrico, possibilitando a amplificação e ainda a regeneração do sinal se possível. Este repetidor também tem a vantagem de permitir a inserção e remoção de canais. Uma ligação que recorra a um repetidor ativo, é vista como duas ligações “independentes”, como é observável na Figura 2.1.

2.1.4. Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão permitem a ligação dos emissores e recetores às antenas (“baixada”) e do recetor ao desmodulador quando estes se encontram distantes [5]. As linhas podem ser de dois tipos [5]:

- **Cabo coaxial** – ideais para frequências até cerca de 2 GHz com a vantagem de serem de baixo custo e terem uma fácil instalação, no entanto, com o inconveniente de apresentarem elevadas perdas com o aumento da frequência;
- **Guia de ondas** – ótimo para frequências superiores a 2 GHz, apresentando maior capacidade de potência e melhor característica de atenuação, uma vez que esta decresce com a frequência. Porém, a sua instalação é mais exigente e apresenta um custo mais elevado.

As guias de onda metálicas apresentam diferentes formatos, com as seguintes características [1] [5]:

- **Circular** – menor atenuação e taxa de ondas estacionárias; material rígido; permite a transmissão simultânea de polarizações lineares ortogonais; custo elevado, por isso é aplicado em “baixadas” somente quando é indispensável limitar a atenuação;
- **Retangular** – atenuação e taxa de ondas estacionárias intermédia; material rígido; assegura uma única polarização linear; vulgarmente utilizado para a realização dos circuitos de interligação dos emissores e recetores;
- **Elíptico** – atenuação e taxa de ondas estacionárias mais elevada; material flexível; manuseamento acessível do material, simplificando a instalação, pelo que é adotado este tipo de guia sempre que possível.

Dado que o guia apresenta melhores características de atenuação, a implementação deste torna-se mais atrativa do que a do cabo coaxial, no entanto, devido às elevadas dimensões da secção transversal para baixas frequências, a sua utilização acaba por não constituir uma solução viável.

2.1.5. Torres

Nos feixes hertzianos é comum suportar-se as antenas num dos quatro tipos de torres [1]:

- **Metálica autossuportada de pequena altura** – alturas até cerca de 6 metros;
- **Metálica espiada de média altura** – alturas até cerca de 100 metros;
- **Metálica autossuportada de grande altura** – até cerca de 100 metros;
- **Complexas de metal ou de betão** – alturas entre cerca de 30 e 300 metros.

Na projeção da ligação de feixes hertzianos, a correta escolha da torre não deixa de ser importante, pois a sua altura define a qualidade da linha de vista, contudo, a maior altura pode não representar viabilidade financeira no projeto, dado que, se pode ter um acréscimo quase exponencial no custo de diferentes materiais de construção da torre.

2.1.6. Abrigo e Sistema de Alimentação

Como os sistemas de feixes hertzianos contêm equipamentos radioelétricos junto às estações, é necessário salvaguardá-los em abrigos próprios, possibilitando a proteção, o arrefecimento e o controlo dos mesmos. Os sistemas exigem também um sistema de alimentação que têm normalmente como fonte primária a rede elétrica. Outras fontes primárias poderão ser grupos moto-gerador e/ou a utilização de energia renovável, como por exemplo energia fotovoltaica ou eólica, caso o consumo da estação seja reduzido, na ordem de <1 kW [1].

Normalmente, as estações de feixes hertzianos, principalmente as estações repetidoras, são instaladas em locais remotos não servidos pela rede pública de energia, o que causa dilemas no planeamento energético do sistema [1]. Naturalmente, as estações com repetidores passivos não exigem módulos de abrigo e de alimentação.

O bom funcionamento de um sistema por feixes hertzianos ao longo do ano não só atende às indisponibilidades devido a fatores de propagação, às avarias dos equipamentos e aos erros dos técnicos, mas também à falta de energia para alimentação do equipamento radioelétrico, pelo que, é essencial ter um sistema redundante através da alimentação de energia sem interrupção (*Uninterruptible Power Supply* – UPS). Essa redundância pode ser realizada através da instalação de baterias, com uma autonomia prevista de 12 a 24 horas, ou de um ou mais grupos moto-gerador que entram automaticamente em funcionamento após a interrupção da rede [1].

2.2. Feixes Hertzianos Digitais

Inicialmente os feixes hertzianos trabalhavam com base em sistemas analógicos, no entanto ocorreu uma migração gradual da tecnologia analógica para a digital, permitindo melhorar o desempenho e a capacidade da rede de ligação.

Na necessidade de acompanhar os elevados ritmos binários e, conseqüentemente, não se poder aumentar a largura de banda devido ao custo e à saturação do espectro eletromagnético, os sistemas digitais apresentam-se como a solução utilizada mais frequentemente.

Inicialmente, os feixes hertzianos digitais estiveram limitados a capacidades reduzidas de 24 ou 30 canais telefónicos (1,5 e 2 Mbit/s respetivamente) devido à complexidade de realizar circuitos eletrónicos económicos e fiáveis. A partir meados da década de 70, começaram a ser disponibilizados sistemas por feixes hertzianos digitais com capacidades superiores a 120 e 480 canais telefónicos (8 e 34 Mbit/s). Com a evolução da engenharia, mais recentemente, foi possível comercializar sistemas com a capacidade de transmissão de 140 Mbit/s e 155,52 Mbit/s (respetivamente 1920 e 2349 canais telefónicos). Contudo, em feixes hertzianos de grande capacidade, com ritmos de transmissão superiores (140, 155, 560 e 620 Mbit/s), é necessário recorrer a métodos de modulação complexos, à diversidade de espaço, a igualadores adaptativos e mesmo à diminuição do comprimento da ligação, devido à variação da atenuação e do tempo de propagação com a frequência causado pelo desvanecimento seletivo (desvanecimento por trajetórias múltiplas) [1].

Os feixes hertzianos utilizados em sistemas de telefonia múltipla com multiplexagem por divisão no tempo (TDM), são classificados por níveis conforme a capacidade de transmissão. Esses níveis são designados por Hierarquias Digitais Plesiócronicas (PDH), sendo atribuído a sigla “E” para a série europeia. Contudo, os sistemas PDH têm sido substituídos por outras hierarquias, as Hierarquias Digitais Síncronas (SDH), que são baseadas no Módulo Síncrono de Transmissão de nível 1 (STM-1) [1].

Enquanto que num sistema analógico a variável de controlo é a relação sinal-ruído do sinal de banda base, neste caso, nos feixes hertzianos digitais, a taxa de erros binários (*Bit Error Rate* - BER), ou probabilidade de erro de *bit*, é a principal medida a ter em conta na qualidade da ligação. E embora a transmissão seja feita sob o formato digital, os sinais originais são analógicos e, desta forma, é necessário recorrer à conversão analógica-digital na emissão e à conversão digital-analógica no recetor.

2.3. Planeamento da Frequência de Ligação

O planeamento da frequência é crucial para o correto funcionamento de uma rede de telecomunicações, especialmente quando o meio de propagação é a atmosfera da terra, sendo este partilhado por vários sistemas de telecomunicações e, fatores de propagação como atenuação, difração, desvanecimento, entre outros, que são dependentes da frequência do sinal. A escolha da

faixa de frequências também tem em conta a largura de faixa e ao ritmo de transmissão exigido pelos canais, às polarizações necessárias e ao comprimento médio das ligações ponto a ponto.

Desta forma, descreve-se abaixo pressupostos essenciais de um bom plano de frequências para ligações por saltos, bidirecionais, monocanais e multicanais, admitindo que não existem interferências de outras ligações. Esses pressupostos seguem as recomendações da *International Telecommunication Union - Radiocommunication* (ITU-R) para ligações de serviços fixos internacionais, sendo também adotadas em ligações nacionais.

2.3.1. Ligação Monocanal

Primeiramente, o sinal a transmitir ocupa um canal radioelétrico em cada secção e, numa ligação bidirecional é concedido um canal distinto para cada sinal de ida e de retorno. Os canais de ida e de retorno na mesma antena devem ter uma boa separação, de forma a minimizar a interferência do canal adjacente (I_1 , Figura 2.1).

Já numa ligação que exija repetidores ativos, não se deve utilizar uma única frequência nos vários saltos, isto porque existe a possibilidade de captação de energia radiada da antena emissora pela antena recetora do repetidor, causando assim interferência próxima I_2 , e também para evitar a interferência I_3 entre estações (Figura 2.1). No entanto, pode-se utilizar os mesmos canais caso os canais de ida correspondam aos de retorno das secções adjacentes e vice-versa, daí projetar-se as frequências (f_1 e f_1') conforme a configuração ilustrada na Figura 2.1.

Numa ligação constituída por mais de dois saltos, principalmente se as estações estiverem pouco distanciadas umas das outras, o planeamento só com duas frequências pode não ser ideal, pois o sinal de uma secção pode interferir com o sinal (que se propaga na mesma direcção) da próxima secção com o mesmo canal (interferência co-canal I_4 e I_4'). Esta suposição pode ser facilmente ilustrada pela Figura 2.4.

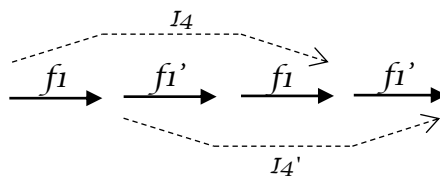


Figura 2.4 – Ligação com plano a duas frequências numa rede com mais de dois saltos (adaptado de [1]).

Como solução ao caso anterior, pode-se recorrer a um maior número de frequências, permitindo distanciar as secções no mesmo canal, sacrificando a capacidade da ligação. Uma possível distribuição dos canais na mesma direcção de propagação, pode ser, por exemplo, a sequência de frequências $f_1 \rightarrow f_1' \rightarrow f_2 \rightarrow f_2' \rightarrow f_1$. Uma outra solução simples é posicionar repetidores de tal forma que as ligações fiquem desalinhadas entre si, não proporcionando ao recetor a captação de energia do lóbulo principal da antena emissora.

Contudo, dado que a capacidade é um critério fundamental na rentabilização do espectro eletromagnético, o plano a duas frequências é o mais requisitado.

2.3.2. Ligação Multicanal

O planeamento de uma ligação hertziana bidirecional com recurso a vários canais segue princípios da recomendação ITU-R F.746. Alguns desses princípios fundamentais são descritos posteriormente, estando presentes na recomendação ITU-R F.746-10 todos os requisitos nos planos de frequência especificamente para cada banda.

A banda de frequências, geralmente centenas de MHz de largura, é dividida em duas semibandas com uma banda de guarda entre elas. Os canais de emissão de cada estação situam-se todos numa semibanda e os canais de receção noutra semibanda.

Cada canal é representado numericamente por um inteiro (índice n para os canais de emissão e n' para os canais de receção) e estes contêm entre si uma banda de guarda. As frequências portadoras (f_n e f'_n) para cada uma das semibandas são relacionadas com a frequência central (f_0) do plano [9].

O espaçamento entre canais é constante em cada semibanda e o espaçamento entre as frequências centrais de emissão e de receção mais próximos é, geralmente, superior ao espaçamento dentro das semibandas [1].

Alguns planos de frequência recorrem a polarizações ortogonais (horizontal e vertical) para permitir diminuir o espaçamento entre canais [1].

Por sua vez, os planos de frequências podem ainda ser classificados de diferentes formas, conforme a polarização e o espaçamento dos canais (Figura 2.5) [1]:

- a) **Plano simples** – usa uma única polarização;
- b) **Plano simplesmente alternado ou entrelaçado** – espaçamento não nulo entre canais, os canais adjacentes são ortogonais e os canais homólogos (ida e retorno) são copolarizados, permitindo usar apenas uma única polarização nas antenas de cada salto;
- c) **Plano duplamente alternado ou entrelaçado** – espaçamento não nulo entre canais, os canais adjacentes são ortogonais entre si e os canais de ida e de retorno usam polarizações ortogonais;
- d) **Plano sobreposto** – os canais ortogonais são sobrepostos em pares, partilhando cada par a mesma frequência central.

Os planos alternados ou entrelaçados permitem um isolamento superior entre canais em relação aos outros planos, dado que usam polarizações ortogonais em canais adjacentes. Já nos planos sobrepostos é necessário efetuar medidas de proteção para evitar a despolarização do sinal ao longo do percurso.

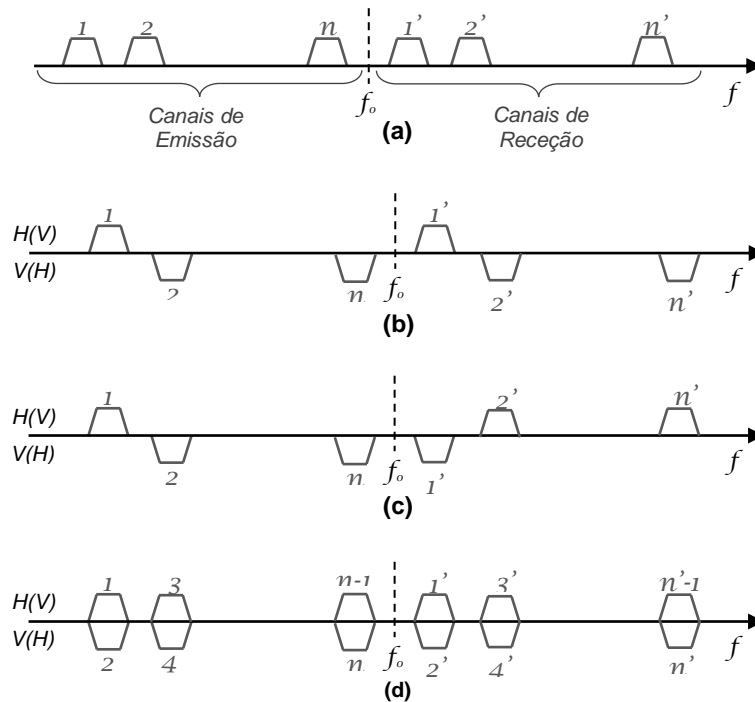


Figura 2.5 – Plano de frequência: a) simples; b) simplesmente alternado; c) duplamente alternado; d) sobreposto (adaptado de [1]).

2.4. Modulação

A modulação assume-se como nada mais que uma técnica que permite transformar mensagens de informação (de banda base) em sinais com um espectro de largura apropriada, em torno de uma frequência central, permitindo assim aumentar o alcance de transmissão do sinal. Numa ligação via rádio, a quantificação da qualidade da modulação é realizada a partir do rácio portadora-ruído c/n , ou C/N em unidades logarítmicas, permitindo calcular a taxa de erros binários a partir desta [1].

A modulação de sinais analógicos pode ser classificada por Modulação em Amplitude (AM), Modulação em Frequência (FM) e Modulação em Fase (PM). Já quando o sinal modulante é digital as suas representações são conhecidas como modulação *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK) e *Phase Shift Keying* (PSK). Estas técnicas de modulação digital são caracterizadas pelos símbolos transmitidos, onde possuem um conjunto discreto de valores m [10].

Nos feixes hertzianos é comum encontrarem-se, modulações m -PSK e modulações *Quadrature Amplitude Modulation* (m -QAM). O 4-QAM é idêntico ao 4-PSK (também designado por *Quadrature Phase Shift Keying* – QPSK), no qual, apresenta o dobro de taxa de transmissão em relação ao *Binary Phase Shift Keying* (ou 2-PSK).

A taxa de transmissão f_b , que indicia a capacidade da ligação, é dependente do índice de modulação e da largura de banda (b_{rf}). Estes três parâmetros estão sempre relacionados pela expressão

$$f_b = b_{rf} * \log_2(m). \quad (2.2)$$

A principal vantagem de se ter um índice de modulação mais elevado é o aumento da capacidade. Contudo, o aumento da capacidade não é linear a cada etapa de modulação mais alta, principalmente para índices de modulação elevados. Por outro lado, faz com que o desempenho da ligação se degrade de acordo com o rácio *Carrier-Interference* (C/I), pois exige uma ligação com uma sensibilidade muito maior à interferência, para além de diminuir o ganho do sistema, tendo implicações no comprimento das ligações e no tamanho das antenas, exigindo antenas maiores (Figura 2.6) [11].

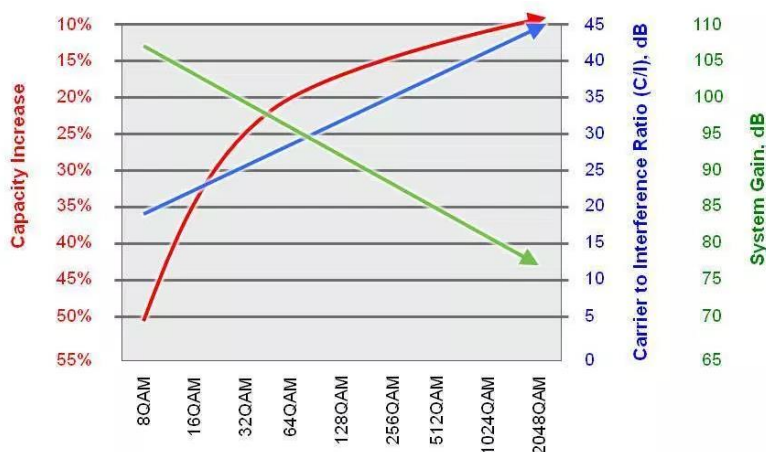


Figura 2.6 – Evolução da capacidade, relação C/I e ganho do sistema em função do índice de modulação [11].

Atualmente, existe uma tecnologia que permite integrar de forma inovadora a utilização das anteriores modulações de acordo com as condições do meio de propagação. Essa tecnologia, desenvolvida a partir de 2008, é designada por Codificação e Modulação Adaptativa, ou na terminologia inglesa como *Adaptive Coding and Modulation* (ACM) [12].

O ACM usa um algoritmo que varia dinamicamente o esquema de modulação e de codificação conforme as condições de propagação momentâneas, sem erros, a fim de maximizar a eficiência operacional da ligação. Desta forma, consegue-se um aumento da capacidade de transmissão, reduzindo a sensibilidade às interferências ambientais, sem sacrificar a distância ou a disponibilidade da ligação e sem exigir antenas maiores [13].

Em suma, um sistema pode operar à taxa máxima de transferência sob condições de céu claro, e diminuir gradualmente com o aparecimento da chuva. A título de exemplo, na Figura 2.7 são demonstrados os resultados obtidos pela empresa CableFree utilizando o método ACM.

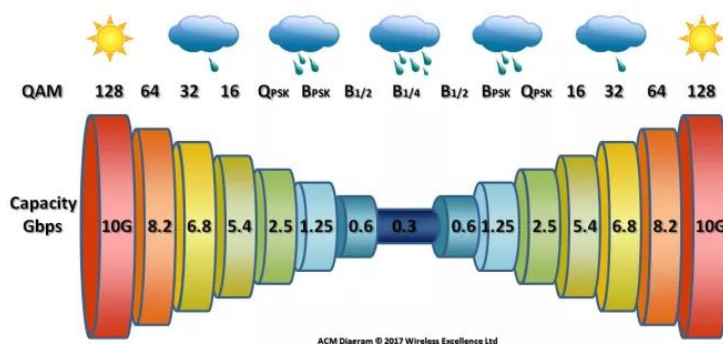


Figura 2.7 – Resultado de codificação e modulação adaptativa para uma ligação de 10 GHz [14].

A introdução desta tecnologia permitiu agilizar o processo de planeamento da ligação na medida em que deixou de ser necessária a projeção para o pior caso, realizada para garantir que a conexão não seja interrompida.

2.5. Modelos de Propagação

Neste tópico pretende-se estudar alguns modelos de propagação das ondas eletromagnéticas, começando pela identificação e caracterização destes, bem como das perdas associadas.

Os modelos de propagação existentes podem ser caracterizados por semi-empíricos ou teóricos. Os semi-empíricos são só adequáveis em situações idênticas às realizadas nas medições, pelo que se tornam mais simples. Os modelos teóricos são mais gerais, no entanto, mais complexos e impraticáveis, exigindo uma grande base de dados com as características ambientais [15].

A propagação normal destas ondas altera-se perante o terreno em causa e as suas características, pelo que se assume como fundamental o estudo de diversos modelos de propagação como os modelos em Espaço Livre, *Knife-Edge* e *Deygout*, passíveis de serem utilizados em terrenos irregulares.

Em situações em que a vegetação está presente utilizam-se modelos como por exemplo o de *Weissberger*, da ITU-R e o COST 235.

2.5.1. Modelo em Espaço Livre

Numa situação em que se verifica a presença de uma antena emissora distante da Terra ou sem obstáculos recorre-se ao modelo de propagação em espaço livre.

A potência recebida é sempre inferior aquela que foi emitida, uma vez que o sinal rádio ao partir de um dispositivo emissor até um dispositivo recetor sofre uma atenuação ao longo da distância, d , dada pela equação de *Friis*:

$$\frac{p_R}{p_E} = g_E g_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.3)$$

onde, P_E e P_R representam a potência da antena emissora e recetora respetivamente. g_E é o ganho da antena emissora, g_R o ganho da antena recetora e λ o comprimento de onda [16].

Consequentemente, a perda por propagação é convenientemente expressa em quantidade positiva, por:

$$A_{P[dB]} = 10 \log_{10}(p_E/p_R) \quad (2.4)$$

Partindo desta, e comparando a atenuação entre antenas isotrópicas, a atenuação por espaço livre é dada por [16]:

$$A_{FS[dB]} = 32,44 + 20 \log_{10} f_{[MHz]} + 20 \log_{10} d_{[km]} \quad (2.5)$$

É, assim possível concluir que a atenuação por espaço livre depende somente de duas variáveis, distância e frequência (f), sendo que a atenuação aumenta com o quadrado da frequência, para além de que a propagação em espaço livre varia inversamente com o quadrado da distância.

2.5.2. Modelo Knife-Edge

Neste modelo de propagação, também conhecido como modelo de difração isolado em lâmina, o sinal é interrompido pela presença de um obstáculo entre o dispositivo emissor e o recetor, originando uma perda.

O obstáculo designa-se por v e é caracterizado pelo parâmetro de difração de *Fresnel-Kirchhoff*. Assumindo que $d_1, d_2 \gg h$, tem-se a aproximação

$$v \approx \pm h \sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (2.6)$$

onde, h é a altura do obstáculo acima (valor positivo) ou abaixo (valor negativo) do raio direto, d_1 e d_2 são as distâncias entre o obstáculo e as antenas e λ é o comprimento de onda [17].

A nível de atenuação é possível escrevê-la em dB da seguinte forma:

$$A_{ke}(v)_{[dB]} = -20 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + C^2(v) - C(v) + S^2(v) - S(v) \right) \right) \quad (2.7)$$

em que, C e S representam a função cosseno e seno integral de *Fresnel*, respetivamente.

Pelo gráfico da Figura 2.8 é possível ver o comportamento desta função, onde é perfeitamente visível a atenuação para diferentes dimensões de obstáculos.

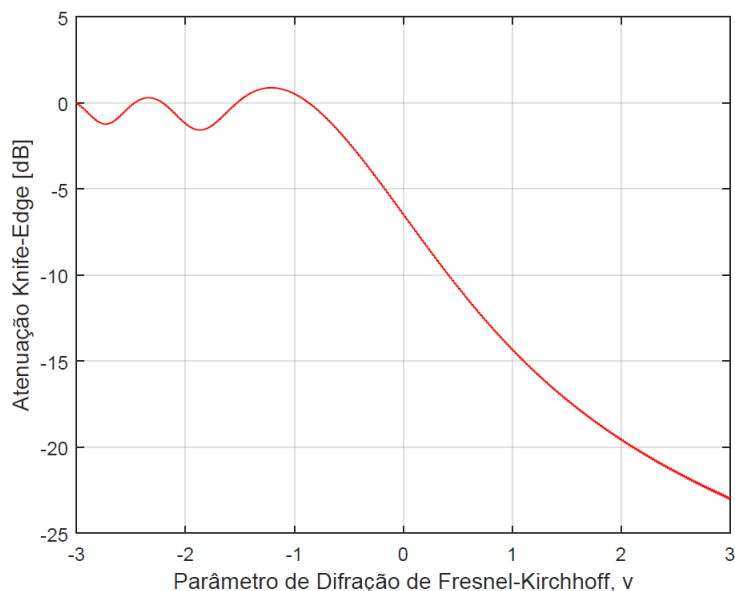


Figura 2.8 – Atenuação por difração isolado em lâmina.

2.5.3. Modelo de Deygout

Uma vez que em determinadas situações se verifica a presença de mais do que um obstáculo, Deygout desenvolveu, posteriormente, um novo modelo com o intuito de ter este fator em conta. A principal característica deste modelo de propagação é assim a existência de diversos obstáculos entre o dispositivo emissor e o receptor. Desta forma, é necessário proceder ao cálculo do parâmetro v para todos os obstáculos como se mais nenhum houvesse.

Após o cálculo, define-se o obstáculo com maior parâmetro v como o obstáculo principal, e uma vez que existem múltiplos obstáculos, a atenuação total é dada pela soma das atenuações individuais determinadas pelo modelo isolado em lâmina. No entanto, há que ter em atenção que em situações de elevada proximidade entre os obstáculos ou de elevado número de obstáculos, a precisão do valor da atenuação pode ser afetada, sendo esta tanto maior, quanto mais clara a dominância do obstáculo principal e quanto menor o número de obstáculos existentes no percurso entre a antena emissora e receptora [16].

Tendo em conta o referido, num modelo com dois obstáculos e perante o cumprimento de duas condições, nomeadamente, quando $v_1 \geq v_2$ e v_1, v_2 e $(v_2 \operatorname{cosec} \alpha - v_1 \cot \alpha) > 1$, é aplicado um fator de correção à atenuação total, dado por [16]

$$A'_{[dB]} = 20 \log_{10}(\operatorname{cosec}^2 \alpha - \frac{v_2}{v_1} \operatorname{cosec} \alpha \cot \alpha) \quad (2.8)$$

2.5.4. Modelo de Weissberger

Em adição à atenuação por espaço livre, este modelo permite conhecer o valor da atenuação causada pela existência de árvores ou folhagem densa no percurso entre a antena emissora e receptora, cobrindo as frequências dos 230 MHz a 95 GHz e densidade de folhagem até 400 metros. É aplicável nas situações em que é provável que a propagação ocorra através das árvores, e não por difração sobre o topo das árvores [18].

Este modelo pode ser descrito por

$$A_{Weissberger [dB]} = \begin{cases} 1,33 f^{0,284} d^{0,588}, & \text{se } 14 < d \leq 400 \\ 0,45 f^{0,284} d, & \text{se } 0 < d \leq 14 \end{cases} \quad (2.9)$$

onde, f é a frequência, em GHz e d é a profundidade, em metros, da folhagem no decurso do percurso de transmissão [18].

2.5.5. Modelo ITU-R

A Recomendação da ITU-R foi desenvolvida a partir de medições realizadas principalmente em UHF e foi modelada para casos em que a antena de emissão ou de receção está próxima a um pequeno bosque de árvores ($d < 400$ m), de modo que a maioria do sinal se propague pelas árvores. A faixa de frequência na qual este modelo é válido é de 200 MHz a 95 GHz:

$$A_{ITU-R} [dB] = 0,2 f^{0,3} d^{0,6} \quad (2.10)$$

com a frequência f definida em MHz e a profundidade das folhas, d , em metros [19].

2.5.6. Modelo COST 235

O modelo COST 235 foi proposto com base em medições feitas em frequências de ondas milimétricas através de pequenos bosques, sendo ainda possível ter em consideração dois momentos distintos pelos quais as árvores passam, nomeadamente, quando estão com e sem folhas. O modelo de atenuação só é válido para $d < 200$ m:

$$A_{COST\ 235} [dB] = \begin{cases} 15,6 f^{-0,009} d^{0,26} & (\text{com folhas}) \\ 26,6 f^{-0,2} d^{0,5} & (\text{sem folhas}) \end{cases} \quad (2.11)$$

com as dimensões das variáveis idênticas ao modelo ITU-R [20].

Na Figura 2.9 é ilustrada a evolução da atenuação em função da profundidade das folhas para os três modelos referidos anteriormente. As curvas foram traçadas para uma frequência de 5 GHz e de 50 GHz, respetivamente.

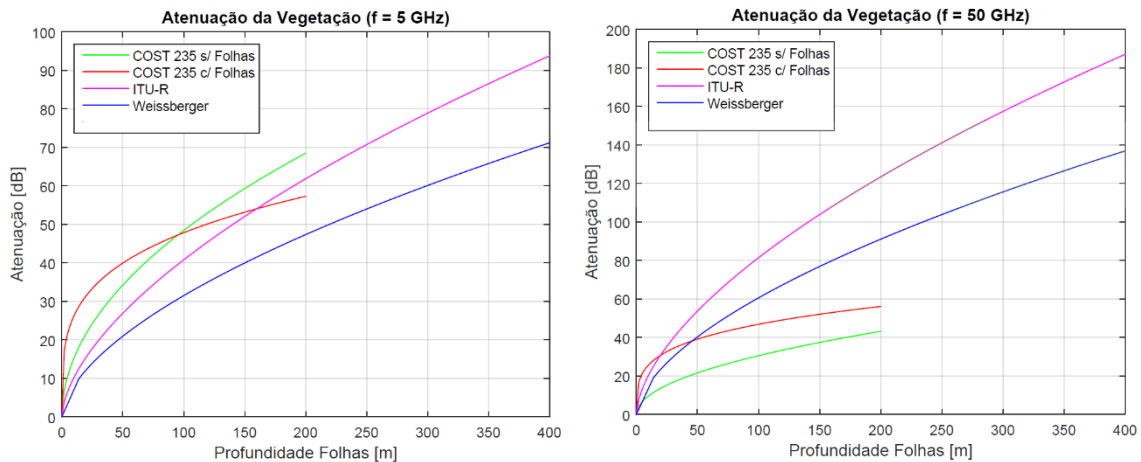


Figura 2.9 – Curvas de atenuação por vegetação em função da profundidade das folhas.

Por observação de ambas as curvas anteriores, pode-se observar que, mesmo para uma frequência baixa das microondas, a atenuação causada pela vegetação tem grande impacto na qualidade do sinal, pois apresentam elevados valores de atenuação mesmo com poucos metros de folhagem.

Consequentemente, pode-se concluir que quanto maior a profundidade da folhagem, maior será a atenuação causada pela vegetação. Na maioria dos modelos, a atenuação aumenta com o aumento da frequência, contudo no caso do modelo COST 235 verifica-se um efeito oposto, como se pode comparar pelas respetivas curvas dos dois gráficos da figura anterior.

2.6. Atenuações

As atenuações de propagação estão presentes em todos os meios de transmissão de dados, verificando-se nos feixes hertzianos, afetando a qualidade do sinal. A Recomendação ITU-R P.341-6 define vários tipos de atenuações que se devem ter em conta num projeto de feixes hertzianos, estando estas representadas em diagrama de blocos na Figura 2.10. De um modo geral, as atenuações serão sempre maiores conforme o aumento de frequência.

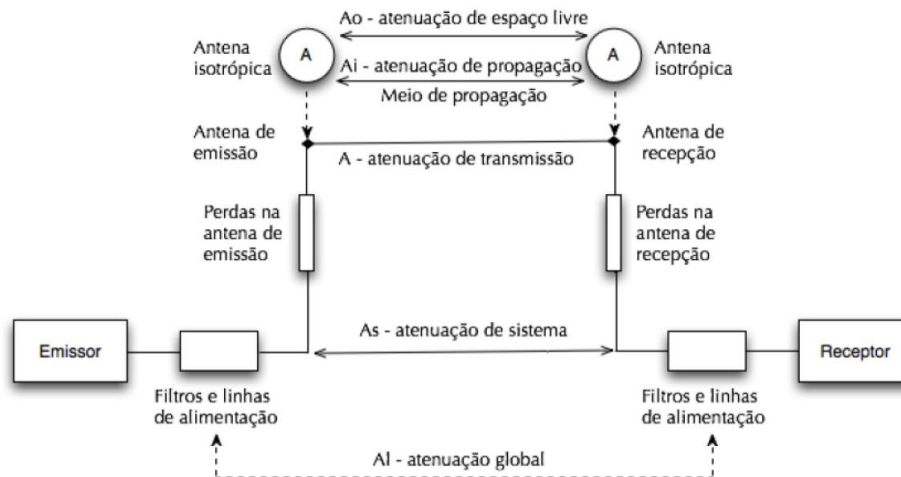


Figura 2.10 – Representação gráfica dos vários tipos de atenuação [1].

A atenuação em espaço livre é uma atenuação que ocorre num meio dielétrico perfeito, homogêneo, isotrópico e ilimitado, qualificando as antenas como isotrópicas. Se a distância d entre as antenas for muito maior que o comprimento de onda λ , a atenuação é dada por [21]

$$A_{0[dB]} = 20 \log_{10} \left(\frac{4 \pi d}{\lambda} \right) \quad (2.12)$$

A atenuação de propagação (A_i) está associada à atenuação de transmissão caso as antenas fossem substituídas por antenas isotrópicas, desprezando os efeitos dos obstáculos próximos das antenas. Já a atenuação de transmissão representa a relação entre a potência radiada pela antena de emissão e a potência disponível na antena recetora [1].

A razão da entrada de potência nos terminais da antena de emissão e da potência disponível aos terminais da antena recetora é definida como atenuação de sistema (A_s). A atenuação global (A_l) é aquela que integra todas as atenuações anteriores, incluindo as perdas das linhas de transmissão, descrevendo-se como a relação entre a potência fornecida pelo emissor e a potência fornecida ao recetor correspondente às condições reais de instalação, propagação e operação [1].

Algumas das causas que originam atenuações em relação ao espaço livre são descritas nos próximos subcapítulos, para além de que a desadaptação das antenas também poderá causar atenuação [1].

2.6.1. Atenuação por Gases Atmosféricos

Os gases atmosféricos, formados essencialmente por oxigénio e vapor de água, provocam uma atenuação suplementar, que é mínima na gama de 1 a cerca de 10 GHz, podendo ser desprezável abaixo de cerca 2 GHz para percursos não muito longos [1].

Em ligações terrestres, a atenuação suplementar devido à presença da atmosfera, pode ser descrita simplificada por

$$A_{a[dB]} = (\gamma_o + \gamma_w) d \quad (2.13)$$

sendo, d o comprimento do percurso em km, γ_o o coeficiente de atenuação devido ao ar seco (maioritariamente oxigénio) e γ_w o coeficiente de atenuação do vapor de água (em dB/km). Por sua vez, os anteriores coeficientes podem seguir uma estimativa aproximada na faixa de frequência de 1-350 GHz, para percursos com altitude até cerca de cinco quilómetros, utilizando as expressões apresentadas no documento da Recomendação ITU-R P.676-4 ou por análise do gráfico da Figura 2.11 para uma concentração de vapor de água de 7,5 g/m³ [1].

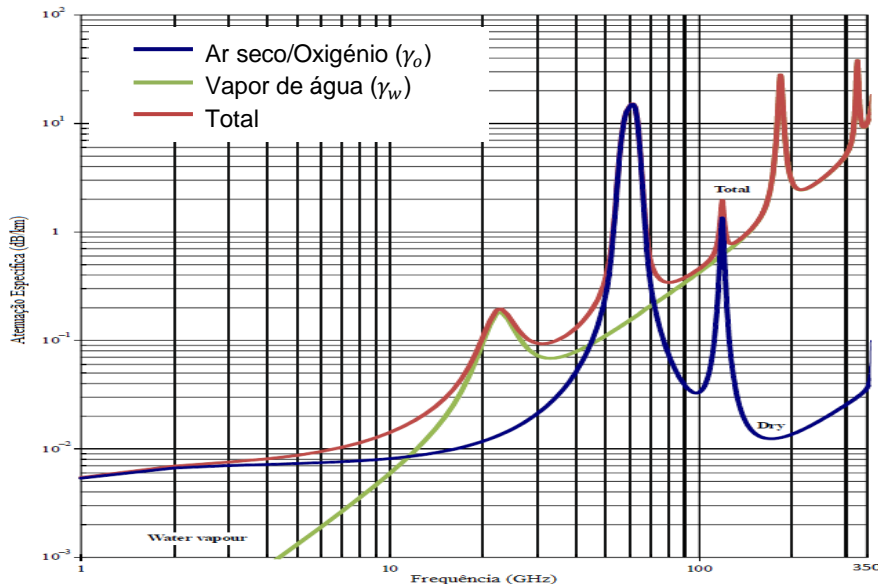


Figura 2.11 – Atenuação específica devida aos gases atmosféricos a uma pressão atmosférica de 1013 hPa, temperatura a 15°C e a uma concentração de vapor de água de 7,5 g/m³ [22].

2.6.2. Atenuação por Hidrometeoritos

A precipitação de chuva provoca absorção, dispersão e alterações na polarização das ondas eletromagnéticas, sendo estes fatores mais relevantes para frequências e precipitações elevadas. Sendo este um fenómeno localizado, esta depende da zona em que o feixe está inserido bem como do tipo de polarização utilizado [1].

A atenuação provocada na transmissão em polarização horizontal (PH) é superior à atenuação provocada pela transmissão em polarização vertical (PV), fazendo com que, nas transmissões em polarizações circulares estas passem a ter polarização elíptica devido à maior diminuição da componente horizontal do campo elétrico em comparação com a componente vertical. Este efeito é

resultante do facto de as gotas da chuva não serem esféricas, mas sim achatadas devido ao efeito de resistência do ar [23].

Tendo em conta este facto, para utilizar ortogonalização de polarização é necessário ter em consideração a atenuação provocada na polarização horizontal, visto que, se com polarização horizontal se consegue cumprir as margens, com polarização vertical o resultado será igual ou melhor.

A atenuação específica por hidrometeoritos, γ_r (dB/km), é obtida a partir da intensidade de precipitação Ri (mm/h) usando a relação de Olsen:

$$\gamma_r = k \cdot Ri^\alpha \quad (2.14)$$

sendo os coeficientes k e α determinados em função da frequência, da temperatura, da forma das gotas e da distribuição estatística das suas dimensões [1]. Os valores dos coeficientes são obtidos pelas expressões apresentadas na Recomendação P.838-3 da ITU-R ou pelos valores tabelados no mesmo documento.

A Recomendação ITU-R P.837-1 define a divisão da Terra em diferentes regiões conforme a distribuição da intensidade de precipitação. O Arquipélago da Madeira está inserido na zona K, na qual, o valor 42 mm/h de intensidade de precipitação é excedido em 0,01% do tempo num ano inteiro ($Ri_{0,01} = 42 \text{ mm/h}$) [24].

Consequentemente, a atenuação devida à chuva não excedida mais de 0,01% do tempo ($A_r^{(0,01)}$) é dependente da atenuação específica, γ_r , e do comprimento eficaz do percurso, d_{ef} , para um comprimento real, d , (até 60 km) e para frequências até 40 GHz [1]:

$$A_{r[dB]}^{(0,01)} = \gamma_r \cdot d_{ef} \quad (2.15)$$

$$d_{ef} = \frac{d}{1 + \frac{d}{35 e^{-0,015 Ri_{0,01}}}} \quad (2.16)$$

2.6.3. Atenuação por Nuvens e Nevoeiro

A Recomendação P.840-8 da ITU-R propõe um método válido até 200 GHz para prever a atenuação devida às nuvens e ao nevoeiro. A atenuação específica das nuvens e nevoeiro, γ_c , é obtida em dB/Km pela expressão

$$\gamma_c = K_l \cdot M \quad (2.17)$$

sendo, K_l o coeficiente de atenuação específica em (dB/km)/(g/m³) e M a densidade de água líquida em g/m³. A densidade de água líquida no nevoeiro é normalmente cerca de 0,05 g/m³ para nevoeiro com intensidade média (visibilidade na ordem de 300 m) e 0,5 g/m³ para nevoeiro com visibilidade na ordem dos 50 m [25].

A Figura 2.12-a) mostra o gráfico do coeficiente de atenuação específico, K_l , em função da frequência para -10°C, 0°C e 20°C. No gráfico b) é apresentado o respetivo resultado da atenuação específica para as diferentes densidades de água. Na respetiva recomendação [25] estão descritas

todas as expressões genéricas para a obtenção do valor exato dos respectivos gráficos. A curva 0°C é usualmente atribuída para as nuvens [26].

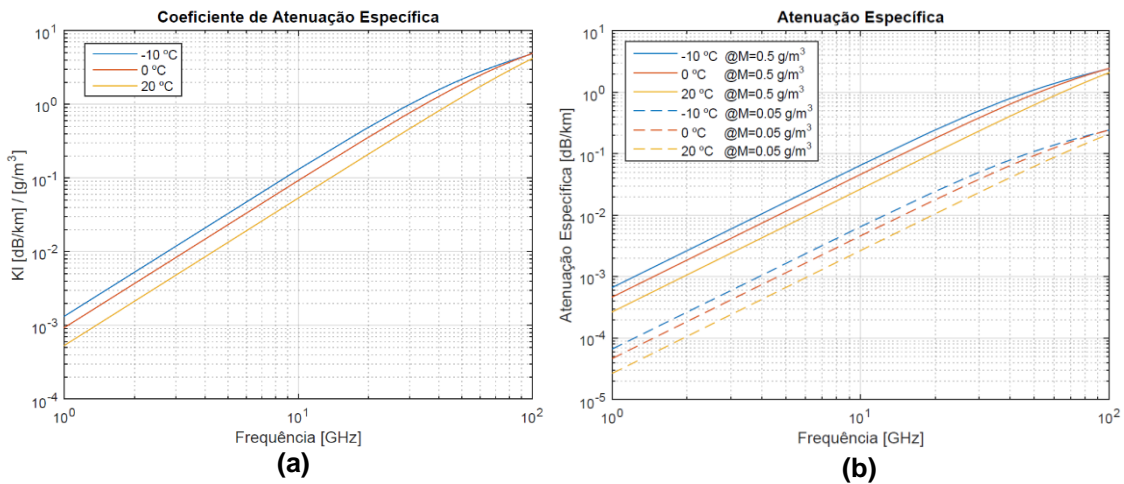


Figura 2.12 – Gráficos de: a) Coeficiente de atenuação específica de nuvens e nevoeiro; b) Atenuação específica de nuvens e nevoeiro para $M = 0,5 \text{ g/m}^3$ e $M = 0,05 \text{ g/m}^3$.

Para os casos em que o ângulo de elevação (θ) da ligação está compreendido entre 5 e 90 graus, e estão disponíveis dados locais do conteúdo reduzido colunar total de água líquida (L_{red} , em kg/m²) para uma temperatura fixa de 0°C, a atenuação total devido às nuvens pode ser determinada por

$$A_{[dB]} = \frac{L_{red} K_l}{\sin \theta} \quad \text{se } 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ. \quad (2.18)$$

Os valores anuais do conteúdo reduzido colunar total de água líquida excedido para os diferentes níveis de probabilidade estão disponíveis na forma de mapas digitais no arquivo suplementar da Recomendação P.840-8 da ITU-R. O pior valor possível de L_{red} , correspondente a um índice excedido em 0,1% do ano, para a região da Madeira é de 2 kg/m² [25]. Para tal, na Figura 2.13 é representada a atenuação total devido às nuvens para diferentes ângulos de elevação.

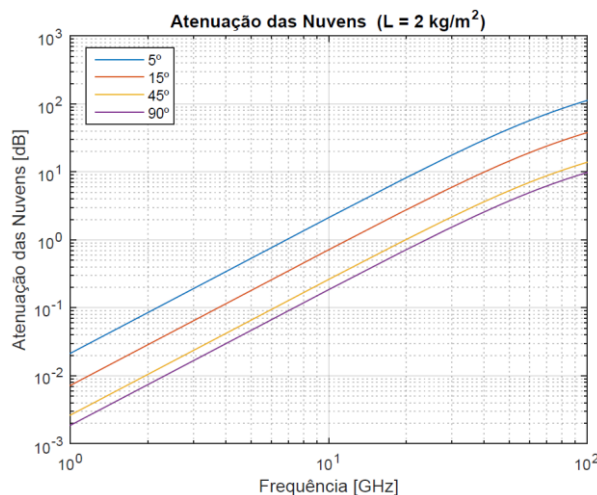


Figura 2.13 – Gráficos da atenuação total de nuvens para o pior caso de densidade da nuvem na região da Madeira.

Observando o gráfico da figura anterior, é visível que acima de 10 GHz é essencial ter em conta a atenuação provocada pelas nuvens [26].

Na presença de uma chuva forte não se verifica nevoeiro, caso contrário, deve-se ter em consideração a atenuação por nevoeiro somente se esta for superior à atenuação provocada pela chuva. Como os modelos de chuva seguem valores empíricos que já têm em ponderação a atenuação das nuvens, normalmente não é necessário considerar no projeto a atenuação das nuvens se a atenuação da chuva for superior, ou vice-versa. No entanto, é preciso ter presente que consoante a zona em estudo, pode haver maior presença de nebulosidade do que chuva e, portanto, não devem ser feitas generalizações [26].

2.7. Reflexões no Terreno

A potência recebida numa ligação em linha de vista está em grande parte associada ao raio direto e ao primeiro elipsóide de *Fresnel*, estando também em parte associada à reflexão ou dispersão pelo terreno. O raio não direto, é normalmente refletido sobre uma área e não sobre um ponto, pelo que pode originar vários raios refletidos, causando o efeito multipercurso [1].

A interferência dos dois campos, correspondente ao raio direto e ao raio refletido, na antena de receção, faz com que hajam profundas variações no nível do sinal recebido, no qual, estas variações dependem da diferença de fase correspondente aos percursos dos dois raios [1].

Para precaver as influências por reflexões por terreno, pode-se recorrer às seguintes técnicas, sem recorrer à diversidade, descritas na Recomendação P.530-17 da ITU-R:

- **Aumento da inclinação do caminho:** as ligações devem ser localizadas de maneira a aumentar a inclinação do caminho, reduzindo a ocorrência de desvanecimento devido a mecanismos atmosféricos;
- **“Blindagem” do ponto refletor:** utilização de obstáculos, como colinas, montanhas ou edifícios, ao longo do caminho para obstruir o raio refletido (Figura 2.14);

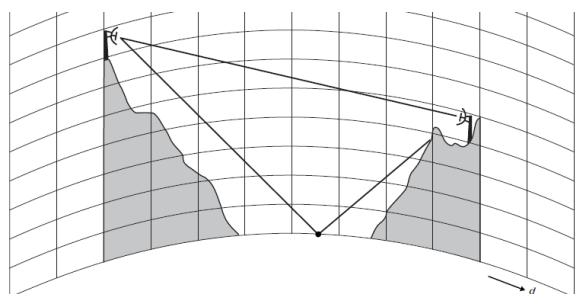


Figura 2.14 – Exemplo de “blindagem” das antenas à reflexão especular [27].

- **Deslocação do ponto de reflexão para uma superfície refletora mais fraca:** através do ajuste da altura das antenas, tentar colocar reflexões em um terreno mais áspero ou superfície vegetativa. O ponto de reflexão move-se em direção à antena que está sendo baixada, e afastada de uma antena que está sendo levantada;

- **Escolha ideal das alturas da antena:** em caminhos suficientemente curtos, o ajuste da altura de uma ou de ambas as antenas podem às vezes permitir que a onda refletida não interfira destrutivamente com a onda direta;
- **Escolha da polarização vertical:** em caminhos sobre a água e a frequências acima de 3 GHz, é vantajoso escolher a polarização vertical em vez da horizontal. Pode-se esperar uma redução na reflexão da superfície de 2 a 17 dB em relação à polarização horizontal [27];
- **Uso de discriminação de antena:** em caminhos suficientemente inclinados, os ângulos entre as ondas direta e refletidas tornam-se suficientemente grandes para tirar proveito do diagrama de radiação de uma ou de ambas as antenas para discriminar as ondas refletidas. Mesmo sem essa vantagem natural, pode ser vantajoso inclinar uma ou ambas as antenas levemente para cima para aumentar a discriminação.

Outra forma de discriminar os raios diretos e refletidos é a utilização de sistemas de diversidade, especialmente diversidade espacial [8].

A análise da reflexão é determinada automaticamente pelo *software* de simulação *Feixer* em função do parâmetro s que caracteriza o nível de rugosidade. Para os pontos em propagação sobre terra o parâmetro s toma o valor de cerca de 0,01 e para pontos em propagação sobre o mar de 0,0001.

A nível de projeto é recomendado que a relação entre a potência refletida, p_s , e a potência direta, p_d , em unidades lineares, siga a seguinte restrição [8]

$$p_s/p_d < -10 \text{ dB}. \quad (2.19)$$

2.8. Desvanecimento

O desvanecimento (ou *fading*) ocorre quando o meio de propagação apresenta características variáveis no tempo, como é o caso da camada baixa da atmosfera, a troposfera, variando com o tempo a potência do sinal recebido, mesmo quando a potência do sinal emitido se mantém constante [1].

Podem-se detetar dois tipos de variações, lentas, com períodos de algumas horas e rápidas, com períodos de segundos e alguns minutos [1]. As variações lentas em feixes hertzianos são geralmente provocadas pelo aparecimento de obstáculos no percurso. Isto deve-se ao facto de variações do índice de refração da atmosfera provocarem uma diminuição do raio efetivo da Terra [1].

2.8.1. Desvanecimento Rápido

O efeito multipercurso, tanto originado por reflexão na superfície terrestre como por refração em camadas da troposfera, embora cause flutuações lentas no sinal, é geralmente associado ao desvanecimento rápido (variações rápidas) e é dependente da frequência e da localização das antenas. Este efeito é designado de desvanecimento por multipercurso (*multipath fading*), que ocorre com regularidade, afetando as ligações com pequena margem de segurança [5]. Podem ainda existir reflexões nas camadas atmosféricas próximas do terreno, em especial quando ocorre neblina ou nevoeiro nas madrugadas sem vento [1].

O desvanecimento por multipercurso influencia significativamente o desempenho dos feixes embora não ocorra permanentemente. Contudo, manifesta-se nomeadamente quando não há vento e quando a atmosfera está bem estratificada, tendendo a ser mais frequente em percursos sobre grandes quantidades de água e em climas tropicais [1].

A Recomendação P.530-17 da ITU-R descreve métodos de previsão que devem ser levados em conta no projeto de ligações fixas digitais, nomeadamente dois métodos para prever o desvanecimento por multipercurso em qualquer local. O primeiro método é adequado para pequenas percentagens de tempo, enquanto que o segundo método é referente a todas as percentagens de tempo. Apesar do conhecimento da atualização da recomendação P.530, o trabalho será avaliado segundo o método da versão P.530-8, uma vez que o *Feixer* está projetado conforme este.

O desvanecimento rápido, k , pode ser previsto para qualquer localização, estando dependente da caracterização do fator geoclimático para o mês mais desfavorável médio. Esse fator é obtido por

$$k = 5 \cdot 10^{-7} * 10^{-0,1(C_0 - C_{Lat} - C_{Long})} * p_L^{1,5} \quad (2.20)$$

onde,

- C_0 relaciona-se com a menor das cotas das antenas terminais em função do tipo de terreno. Os valores podem ser os apresentados na Tabela 2.1;
- $C_{Lat} = 0$ – Valor correspondente a latitudes entre 53° Norte e 53° Sul;
- $C_{Long} = 3$ – Valor atribuído às longitudes na Europa e na África;
- $p_L = 20\%$ – Valor correspondente à percentagem de tempo em que o gradiente médio da refratividade é inferior a -100 N/Km;
- Classificação do percurso: terrestre ou costeiro.

Tabela 2.1 – Valores do coeficiente C_0 [28].

Cota Inferior (m)	Tipo de Terreno	C_0
0 - 400	Planícies	0
	Colinas	3,5
400 - 700	Planícies	2,5
	Colinas	6
> 700	Planícies	5,5
	Colinas	8
	Montanhas	10,5

2.8.2. Desvanecimento Uniforme e Seletivo

Nos feixes digitais, o desvanecimento seletivo é conhecido pelo facto do canal de transmissão deixar de ser linear, aumentando muito a taxa de erros binários por distorção intersimbólica. Já a simples redução da potência do sinal recebido é designada por desvanecimento uniforme, à qual é associada uma margem (margem uniforme - m_u) [1].

Na maior parte dos casos a margem uniforme é superior a cerca de 30-35 dB. Contudo, o desvanecimento seletivo (associado à margem seletiva - m_s) reduz a margem da ligação a valores muito inferiores aos expectáveis considerando somente o desvanecimento uniforme [1].

Consequentemente, a margem da ligação, m , é dada por

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_u} + \frac{1}{m_s}. \quad (2.21)$$

Para o cálculo da margem seletiva, utiliza-se um dos quatro métodos disponíveis na Recomendação F.1093-1 da ITU-R, o método B, pois é o único que apresenta todos os elementos necessários para a sua aplicação e está incluído no simulador *Feixer*. Este método está limitado a índices de modulação compreendidos entre 4 e 64 [29].

A probabilidade de erros ser excedida devida à distorção do sinal provocada pelo desvanecimento seletivo é dada por

$$\mathcal{P}_s = \eta \cdot \mathcal{P}_{s/mp} \quad (2.22)$$

onde, η é um parâmetro relacionado com as condições de propagação dependente do fator de ocorrência do desvanecimento profundo (\mathcal{F}), $\mathcal{P}_{s/mp}$ é a probabilidade da taxa de erros ser excedida durante o desvanecimento multipercurso. Por sua vez, este último é calculado a partir do parâmetro adimensional K_n , do atraso médio do eco, τ_m , e do período de símbolo, T_s . O parâmetro K_n encontra-se tabelado na Recomendação F.1093-1 [29]. Desta forma, tem-se

$$\mathcal{F} = 1,4 \times 10^{-8} \cdot f_{[GHz]} \cdot d_{[km]}^{3,5} \quad (2.23)$$

$$\eta = 1 - e^{-0,2 \mathcal{F}^{3/4}} \quad (2.24)$$

$$\tau_{m[ns]} = 0,7 \left(\frac{d_{[km]}}{50} \right)^n \quad (2.25)$$

em que n está compreendido entre 1,3 e 1,5.

$$T_{s[s]} = \frac{\log_2(m)}{f_{b[Mbit/s]} \times 10^6} \quad (2.26)$$

$$\mathcal{P}_{s/mp} = 2,16 \cdot K_n \cdot \frac{2 \left(\tau_{m[ns]} \times 10^{-9} \right)^2}{T_s^2} \quad (2.27)$$

Assim sendo, o resultado da margem seletiva, segundo o método B, é descrita como

$$m_s = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{P}_s}. \quad (2.28)$$

2.8.3. Redução dos Efeitos de Desvanecimento

Para reduzir os efeitos do desvanecimento, nem sempre é viável ou possível aumentar o valor da potência emitida e/ou os ganhos das antenas, permitindo um *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP) maior. Contudo o aumento do EIRP tem influência num aumento de interferências [5].

Assim sendo, para minimizar os efeitos do desvanecimento seletivo, particularmente graves para os sistemas de maior capacidade, são utilizadas as técnicas de igualação adaptativa e/ou diversidade. A diversidade processa adequadamente, através da combinação, os sinais de diferentes recetores [1].

As diferentes técnicas disponíveis para a redução desses efeitos para ligações fixas são [1]:

- **Igualação adaptativa no domínio da frequência:** uniformiza a amplitude da resposta do canal de transmissão ao nível da frequência intermédia do recetor;
- **Igualação adaptativa no domínio do tempo:** iguala a resposta do canal de transmissão, em amplitude e fase, na frequência intermédia, antes da recuperação da portadora;
- **Associação dos igualadores adaptativos nos domínios da frequência e do tempo;**
- **Diversidade espacial:** os sinais de receção são provenientes de antenas distintas;
- **Diversidade de frequência:** utilização de diferentes frequências no canal de transmissão;
- **Associação da diversidade com igualadores adaptativos:** associa as duas técnicas.

A diversidade é igualmente eficaz no combate ao efeito do desvanecimento seletivo como no uniforme. Já a diversidade de espaço é a mais recomendada, pois apresenta maior aproveitamento do espetro, e conseqüentemente menor custo, exceto se for necessário antenas com elevadas dimensões [1].

2.9. Recomendações ITU

Neste ponto descrevem-se as normas aplicáveis, quando a ligação está disponível, para o cumprimento de todas as recomendações ITU, com base nas normas F.1668-1 e F.1605-0 da ITU-R. Como tal, a Recomendação ITU-T G.826 apresenta três parâmetros que indicam o desempenho de ligações digitais [1]:

- **esr – fração de segundos com erros:** fração de segundos com erros num dado intervalo;
- **sesr – fração de segundos com erros severos:** fração de segundos com erros num dado período;
- **bber – fração de blocos errados de fundo:** fração de blocos errados de fundo num dado período.

Segundo a Recomendação F.1668-1 da ITU-R os objetivos de qualidade para ligações por feixes hertzianos encontram-se descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de SESR, BBER e ESR conforme a Recomendação F.1668-1 da ITU-R [30].

Ritmo binário f_b [Mbit/s]	SESR	BBER	ESR
1,5 - 5	$0,002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$	$0,04 \cdot X$
> 5 - 15	$0,002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$	$0,05 \cdot X$
> 15 - 55	$0,002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$	$0,075 \cdot X$
> 55 - 160	$0,002 \cdot X$	$2 \cdot X \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot X$
> 160 - 400	$0,002 \cdot X$	$1 \cdot X \cdot 10^{-4}$	Não aplicável

Dado que as ligações fixas no Arquipélago da Madeira não estão sobre uma secção de rede de intercâmbio de longo curso, o valor de X toma valores entre 0,075 e 0,085 [30].

A Recomendação F.1605-0 da ITU-R apresenta outro parâmetro, o ber_{SES} , que indica a taxa de erros binários com erros severos. Na Tabela 2.3 encontra-se o número de blocos transmitidos por segundo (N) e o número de bits por bloco (N_b) para vários tipos de percurso e ritmos binários.

Tabela 2.3 – Valores de ber_{SES} , N e N_b conforme a Recomendação F.1605-0 da ITU-R [31].

Tipo percurso	Ritmo binário		N [blocos/s]	N_b [bit/s]
	f_b [Mbit/s]	ber_{SES}		
VC-11	1,5	$5,4 * 10^{-4}$	2 000	832
VC-12	2	$4,0 * 10^{-4}$	2 000	1 120
VC-2	6	$1,3 * 10^{-4}$	2 000	3 424
VC-3	34	$6,5 * 10^{-5}$	8 000	6 120
VC-4	140	$2,1 * 10^{-5}$	8 000	18 792
STM-1	155	$2,3 * 10^{-5}$	8 000	19 940
		$2,33 * 10^{-4}$	192 000	801

2.10. Indisponibilidade da Ligação

A disponibilidade de um sistema de rádio depende de muitos fatores, particularmente da manutenção e credibilidade dos equipamentos e das condições de propagação. Este fator é muito importante para garantir uma boa qualidade de ligação.

A Recomendação F.557-5 da ITU-R considera um sistema de feixes digitais indisponível quando se verifica pelo menos umas das seguintes condições, durante pelo menos 10 segundos consecutivos [1]:

- Sinal interrompido, devido à perda de sincronismo ou de alinhamento de trama;
- Taxa de erros binários superior a 10^{-3} .

As principais causas de indisponibilidade de sistemas digitais por feixes hertzianos, segundo a Recomendação F.557-5 da ITU-R, são [32]:

- **Equipamento:** falha ou degradação do equipamento radioelétrico ou do equipamento auxiliar ou de reserva; falha no equipamento de alimentação de energia; avaria nas antenas ou nas linhas de transmissão;
- **Propagação:** desvanecimento rápido por multipercurso com duração acima de 10 segundos; precipitação de chuva e neve muito intensa; desvanecimento profundo associado a formação de ductos e de atmosfera “sub-standard”;
- **Outras causas:** Interferências; incorreta instalação de torres e antenas, ou até mesmo desvios dos mesmos, causados por desastres naturais; intervenção humana durante manutenções ou erros de exploração.

A contribuição destes fatores é vulgarmente difícil de prever, no entanto, deve-se ter em consideração num projeto de feixes hertzianos.

A Recomendação F.696-2 da ITU-R classifica o serviço fixo em quatro classes de qualidade. Neste trabalho será utilizada a Classe 1, referente à classe que permite maior qualidade de ligação, derivada da menor percentagem de indisponibilidade. A indisponibilidade máxima, I , de uma ligação com d quilómetros de comprimento é dado por

$$I_{[\%]} = 0,3 \cdot \frac{d_{[km]}}{2500} \quad (2.29)$$

sendo atribuído $d = 280 \text{ km}$ correspondente ao comprimento máximo para a Classe 1. Consequentemente, o valor limite de indisponibilidade é então $I = 0,0336\%$ [1].

O total de indisponibilidade da ligação é usualmente distribuída pelas diferentes causas, da seguinte forma, sendo que a principal causa de indisponibilidade devida à propagação é a chuva [1]:

- **Equipamento:** $0,4I \geq I_e \geq 0,3I$
- **Precipitação:** $0,2I \geq I_{ch} \geq 0,1I$
- **Outras causas:** $I_r = 0,5I$

Segundo a Recomendação F.557-5 da ITU-R, a disponibilidade de uma ligação deverá rondar a faixa dos 99,5% a 99,9%. Para se alcançar esses valores de disponibilidade tão elevados é essencial que o projetista tenha em conta fatores mais problemáticos e inconstantes ao longo do ano, como é o exemplo da chuva e do desvanecimento.

2.11. Margem de Segurança

Num projeto, para uma solução ser considerada aceitável, esta deve apresentar uma margem de segurança. Assim, a potência recebida deve ser o dobro da potência necessária para a qualidade ser aceitável, ficando uma margem mínima de 3 dB como segurança sobre eventuais alterações que podem ocorrer no meio e que podem provocar alguma atenuação, vulgarmente chamado “fator de cagaço”:

$$[C/N]_{\text{condições ideais}} - [C/N]_{\text{min por ITU-R}} \geq 3 \text{ dB}. \quad (2.30)$$

3. Tendências Atuais e Futuras

Neste capítulo procura-se retratar a utilidade de ligações microondas no mundo das telecomunicações, bem como alguns aspetos inovadores que permitiram a continuidade da sua utilização e o aperfeiçoamento das mesmas. Analisam-se ainda as alterações que as bandas de microondas sofreram com a entrada da tecnologia 5G no mercado.

3.1. Feixes Hertzianos como *Backhaul*

Os feixes hertzianos são uma ferramenta preciosa para servir como serviço *backhaul* às redes móveis, servindo como ligação entre o núcleo da rede e as estações de rede móvel. Os avanços tecnológicos têm facilitado a transmissão de dados de alta capacidade de forma fidedigna, permitindo que o *backhaul* por redes sem fios se mantenha como uma alternativa competitiva à fibra ótica, em redes de acesso móvel [12].

A Ericsson [33] prevê que até 2023, mesmo com o acréscimo de fibras óticas e o desaparecimento de cabos de cobre, cerca de 40% de estações radioelétricas em todo o mundo serão conectadas por microondas, passando a 65% quando excluirmos países como a China, Taiwan, Coreia do Sul e Japão (Figura 3.1). O mercado do Nordeste da Ásia tem crescido desproporcionalmente registando grandes implementações de LTE e uma alta integração de fibra, condicionando e influenciando de forma significativa o resultado do mercado global.

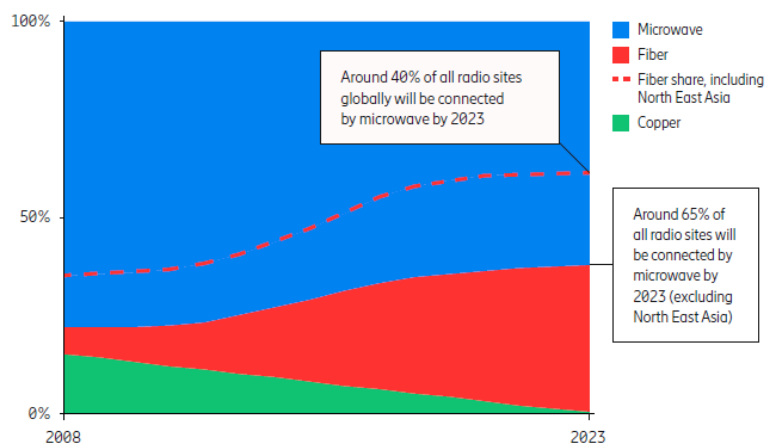


Figura 3.1 – Distribuição de *backhaul* até 2023 [33].

Em regiões desenvolvidas de banda larga móvel, como a Europa Ocidental, existem exemplos de grandes operadoras que já usam até 80% de microondas, que agora planeiam a introdução do 5G usando redes de microondas existentes [34].

A combinação de soluções de fibra e microondas continua a ser uma estratégia de *backhaul* ideal para o desenvolvimento de redes 4G e 5G. Os núcleos das redes e as agregações intercidade são geralmente implementadas com *backhaul* de fibra, enquanto as respectivas ramificações são implementadas usando microondas [33].

Embora existam vários parâmetros na escolha do tipo de *backhaul*, o *Total Cost of Ownership* (TCO) é um parâmetro essencial a considerar. Para uma melhor percepção desse custo total em função da tecnologia, apresenta-se na Figura 3.2 uma comparação do custo de fornecer uma ligação até 10 Gbit/s na Alemanha usando soluções de fibra “self-built”, “dark fiber” e microondas [33].

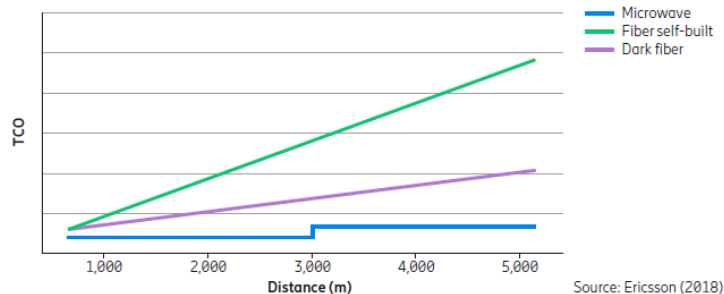


Figura 3.2 – Comparação de soluções *backhaul* para ligações de 10 Gbit/s na Alemanha [33].

É de fácil percepção que as soluções que utilizem fibra são as mais dispendiosas, apresentando um custo proporcional à distância, enquanto que, ligações microondas apresentam um custo bem inferior para a mesma taxa de transmissão. A variação do custo de microondas deve-se, essencialmente, ao tipo de tecnologia utilizada. No entanto, os custos diferem entre os mercados devido aos custos variáveis de alocação de fibra, do arrendamento e do custo de espectro de microondas [33].

3.2. Tendências do Espectro

Maiores requisitos de capacidade estão a impulsionar a introdução do 5G nas bandas de microondas, o que significa que a disponibilidade e o uso do espectro de microondas para serviços fixos sofrerão uma grande transformação nos próximos cinco a dez anos, causando grandes impactos às operadoras [35].

A banda E (71–76 GHz emparelhado com 81–86 GHz) crescerá e assumirá uma grande importância, satisfazendo a procura de altas capacidades nas redes atuais e futuras. Com a introdução do 5G, o interesse na banda E torna-se bastante relevante, uma vez que pode fornecer até 10 Gbit/s, mesmo para locais densamente urbanos, representando 25% de todo o recurso disponível em microondas [36]. Contudo, a longo prazo, será necessário espectro adicional para *backhaul*, de forma a suportar taxas de transmissão até 100 Gbit/s, levando a uma introdução de novas bandas W e D [33] [37].

As especificações da banda W (92–114,25 GHz) e da banda D (130–174,8 GHz) foram padronizadas na Europa entre 2017 e 2018. Estas bandas não são constituídas por um bloco contínuo de espectro, mas por vários blocos, sendo que, a quantidade total de espectro das duas bandas é quase 50 GHz, ou seja, cinco vezes mais do que na banda E, representando um importante objetivo para o futuro (Figura 3.3) [33] [34].

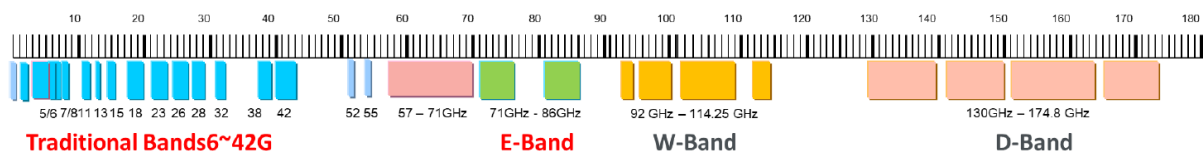


Figura 3.3 – Espectro radioelétrico de ondas milimétricas [38].

As faixas de 24,25 a 29,5 GHz e 37 a 43,5 GHz foram especificadas para o 5G New Radio (NR), pelo que, as ligações microondas tiveram de ser migradas para as bandas E e 32 GHz. As bandas E e 32 GHz foram estudadas e consideradas inadequadas para o 5G NR, tornando-se assim essenciais para o *backhaul* de 5G [37].

Até 2025, o espectro de 15–23 GHz permanecerá como bandas globais de microondas de alto volume. Já a banda E tornar-se-á uma banda global de alto volume por si só e em combinação com a faixa 15–23 GHz, estimando um crescimento de 20% desde o surgimento da mesma. Prevê-se a utilização das bandas W e D a partir de 2020, não apresentando, no entanto um crescimento tão acentuado como a banda E (Figura 3.4) [34].

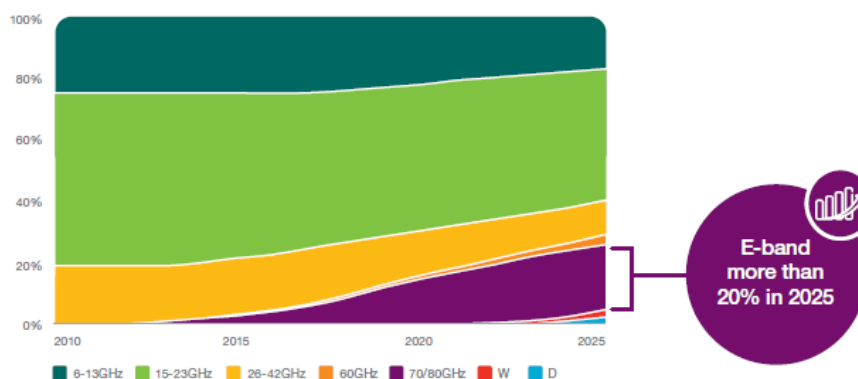


Figura 3.4 – Evolução da faixa de frequência de microondas até 2025 [34].

Para saltos longos e como uma substituição económica à fibra ótica, a banda dos 6 a 13 GHz também se mostra importante, embora na Figura 3.4 se verifique uma diminuição da sua utilização. Devido às suas boas propriedades de propagação em áreas geográficas com elevadas taxas de precipitação, estas frequências baixas continuarão a ser fundamentais para a construção de redes de transporte em determinadas regiões [34].

3.3. Eficiência do Espectro e da Capacidade

Como o espectro é um recurso escasso e não consegue atender à crescente procura por elevadas larguras de banda, é essencial desenvolver soluções para tornar este recurso mais eficiente. Essas soluções de rentabilização de espectro, bem como o aumento de capacidade, poderão ser [39]:

- **Multi-Band:**

A combinação da banda E com uma frequência tradicional na mesma ligação rádio, permite retirar o melhor proveito das duas bandas, aumentando assim a capacidade de ligação. Ao combinar uma banda de frequência mais baixa que possui boas propriedades de propagação com uma que

possui canais mais amplos e mais capacidade (banda de frequência mais alta), é possível obter elevadas capacidades para maiores distâncias com maior disponibilidade. Este conceito é extremamente flexível e pode ser usado para muitas combinações de frequências diferentes [34].

- **Esquemas de Modulação Elevados:**

Como é expectável, o aumento do índice de modulação implica maior capacidade de condensar mais informação, pelo que esta técnica permite aumentar a capacidade de ligação. Porém, acima do 1024 QAM, o ganho da eficiência espectral é menor que 10% em cada degrau. Por exemplo, numa situação de modulação QPSK consegue-se uma eficiência de 2b/s/Hz, enquanto que no 4096 QAM consegue-se obter uma eficiência seis vezes superior [38].

- **Multiple-Input Multiple-Output (MIMO):**

O MIMO é uma tecnologia utilizada para multiplicar a capacidade de ligações, usando várias antenas de transmissão e receção para explorar a propagação de múltiplos caminhos. Sem recursos adicionais de espectro, esta tecnologia pode fornecer até quatro canais numa frequência, fornecendo assim quatro vezes a capacidade de uma única ligação, para além da fiabilidade de um canal MIMO ser maior do que a de uma única ligação, sem qualquer aumento na potência de transmissão da antena, explorando o ganho de diversidade introduzido pelo uso de múltiplas antenas (também conhecido por diversidade espacial) [37] [40].

Nos sistemas MIMO, é possível implementar qualquer número de antenas de transmissão e receção, mas o mais comum é um sistema simétrico, sendo que é necessária uma separação ótima das antenas para alcançar a máxima rentabilidade [37].

Na Figura 3.5 é apresentado um estudo realizado pela Ericsson [37] da capacidade do MIMO (eficiência espectral) em função da separação ótica das antenas conforme o agrupamento das antenas. Este estudo assinalou que a capacidade aumentava à medida que as antenas se aproximavam da separação ótica. No entanto, mesmo com 30 a 50% do espaçamento ideal, há um enorme ganho de capacidade em relação ao sistema *Single-Input Single-Output System* (SISO), conseguindo-se, mesmo assim, para o sistema 4x4 MIMO pelo menos três vezes mais capacidade do sistema SISO.

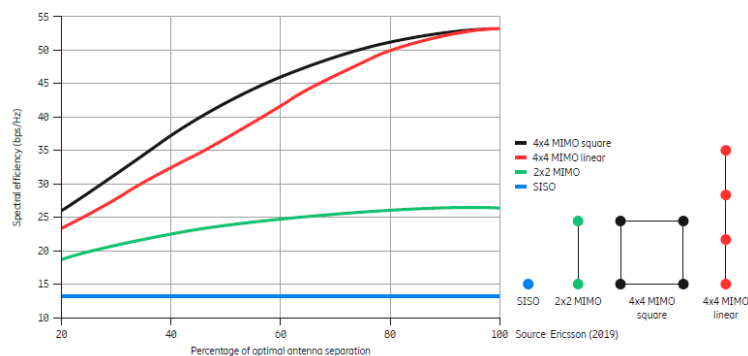


Figura 3.5 – Capacidade MIMO em função do arranjo da antena [37].

- **Cross Polarization Interference Cancellation (XPIC):**

A técnica XPIC segue o conceito de plano sobreposto, atribuindo a mesma frequência à polarização vertical e horizontal na mesma ligação, na qual, se utiliza um algoritmo para suprimir a interferência mútua entre os dois sinais recebidos. Desta forma, consegue-se obter o dobro da eficiência espectral [41].

Esta técnica só é vantajosa, do ponto de vista do *Total Cost of Ownership*, apenas se as taxas de licença forem reduzidas para a segunda polarização, embora só se necessite de uma antena de dupla polarização em cada estação.

- **Geographical Spectrum Efficiency:**

Esta tecnologia consiste na densa reutilização de canais, isto porque não é apenas aconselhável aumentar a eficiência espectral de um canal, mas também a reutilização do canal em uma determinada área, garantindo assim que não haja interferência. Na Figura 3.6 é exemplificada a forma como são reutilizadas as frequências [38].

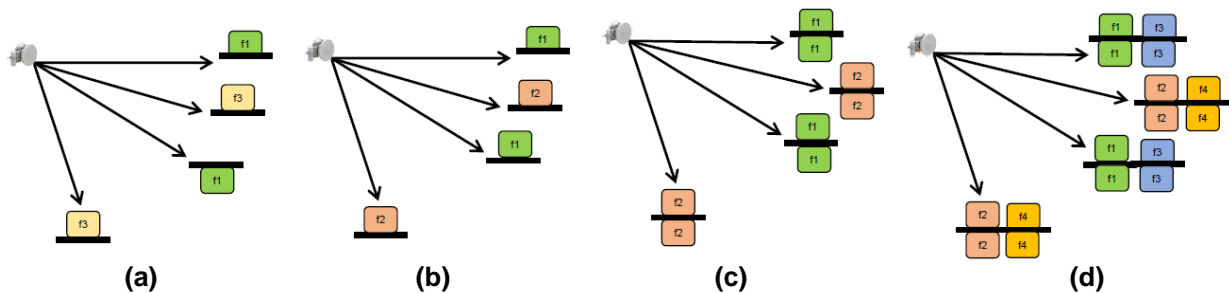


Figura 3.6 – Reutilização de frequências num sistema *Geographical Spectrum Efficiency* [38].

Numa situação normal, caso (a), o canal 3 tem de ser utilizado devido à proximidade ao canal 1 e este último é reutilizado, mas com diferente polarização. Contudo, com a utilização de antenas de melhor classe (ex. ETSI Classe 4), consegue-se reduzir muito o ângulo mínimo entre duas ligações de canais adjacentes, possibilitando a utilização da mesma polarização e de canais mais próximos espectralmente (caso (b)). No caso (c) da Figura 3.6, consegue-se facilmente aumentar a capacidade sem espectro adicional, mas com recurso ao XPIC.

Quando é necessária capacidade extra, devem ser utilizados canais adicionais, entrando em ação a técnica *Co-Channel Interference Canceller* (CCIC), ilustrado pelo último caso da figura anterior. O CCIC permite uma reutilização ideal de canais com a discriminação de ângulo muito estreito [38].

- **Orbital Angular Momentum (OAM):**

Tecnologia que ainda não se encontra no mercado, havendo, no entanto, testes experimentais. É com diferentes antenas que múltiplos sinais OAM, com diferentes modos (ortogonais entre si), são transmitidos, possibilitando transmitir N sinais diferentes em um único canal e numa única polarização [38].

Para verificar a evolução do desempenho de sistemas combinando as técnicas mais recentes, é exposta na Tabela 3.1 a visão geral dos recursos tecnológicos futuros de um estudo apresentado por [38].

Tabela 3.1 – Desempenho das tecnologias futuras em ligações *backhaul* nas frequências tradicionais [38].

MW Backhaul Technology	56 MHz BW	112 MHz BW	224 MHz BW	+XPIC	+ LoS 2x2 MIMO	+ BCA (with higher MW Band)	+ BCA (with mmW Band)
6-15GHz	0.5 Gbps	1 Gbps		2 Gbps		3-4 Gbps	
18-42GHz	0.5 Gbps	1 Gbps	2 Gbps	2-4 Gbps	4-8 Gbps		4-10 Gbps

É de fácil percepção que estas técnicas proporcionam capacidades para além do dobro dos sistemas normais, verificando um grande desempenho de capacidade na utilização de bandas elevadas. Este resultado, pode ainda ser reforçado pelos valores afixados na Tabela 3.2, alcançando-se débitos muito elevados com e sem sistemas auxiliares. É ainda perfeitamente notável que se consegue alcançar a barreira dos 100 Gbit/s utilizando as novas bandas, embora seja necessário intercalar alguma técnica.

Tabela 3.2 – Desempenho das tecnologias futuras em ligações *backhaul* nas frequências milimétricas [38].

mmW Backhaul Technology	500 MHz BW	2 GHz BW	4 GHz BW	+XPIC	+LoS 2x2 MIMO/OAM
V-band (60GHz)		>4 Gbps			
E-band (70/80GHz)	3.2 Gbps	12.8 Gbps		25.6 Gbps	51.2 Gbps
W-band (100GHz)	3.2 Gbps	12.8 Gbps	25.6 Gbps	51.2 Gbps	102.4 Gbps
D-band (150GHz)	3.2 Gbps	12.8 Gbps	25.6 Gbps	51.2 Gbps	102.4 Gbps

Segundo a Ericsson, já se conseguem taxas de transmissão um pouco além dos 100 Gbit/s. Em 2019, estes conseguiram alcançar os 139 Gbit/s numa ligação acima de 1,5 km, com alta disponibilidade (superior a 99,995%) e baixa latência em um canal de 2,5 GHz, pela combinação de rádios da banda E com a tecnologia MIMO [37].

4. Estudo de Feixes Hertzianos na RAM

Neste capítulo estudam-se os feixes hertzianos existentes no Arquipélago da Madeira, inclusive na ilha de Porto Santo, particularizando depois os dados de algumas instituições detentoras de ligações hertzianas.

Inicialmente, realiza-se um estudo genérico de todos os feixes licenciados existentes, com base nos dados fornecidos pela ANACOM, expondo a evolução da sua utilização ao longo dos últimos anos, mais precisamente entre 2009 e 2019.

Posteriormente, descrevem-se três casos particulares que constituem entidades públicas e privadas da RAM, que utilizam ou utilizavam este sistema de telecomunicações, mesmo que não requisitassem bandas licenciadas. Especificando, analisaram-se entidades como a Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM), Câmara Municipal do Funchal (CMF) e Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC).

Não foi possível, no entanto, obter dados mais pormenorizados de empresas de telecomunicações, designadamente, MEO, NOS e Vodafone, bem como da Navegação Aérea de Portugal (NAV), devido à sua confidencialidade.

4.1. Estudo Genérico

Neste sentido, neste subcapítulo são apresentados os dados de feixes hertzianos registados pela ANACOM, nas bandas que necessitam licenciamento. As únicas entidades alocadas na Madeira que necessitam ou necessitavam de licenciamento é/eram a MEO Comunicações, NOS Comunicações, Vodafone, NAV, Rádio e Televisão de Portugal (RTP), EEM e a ONITelecom.

Numa primeira fase, solicitou-se à ANACOM os dados que indicavam a evolução numérica dos feixes ao longo de dez anos, estando estes dados representados no Gráfico 4.1. É importante referir que uma ligação ponto-ponto com mais do que um canal por polarização ou com repetidor passivo, representando dois troços, foi considerado como uma única ligação ponto-ponto. Todas as ligações são bidirecionais com exceção das ligações Estúdio-Emissor (STL) na faixa de frequências 1517-1525 MHz.

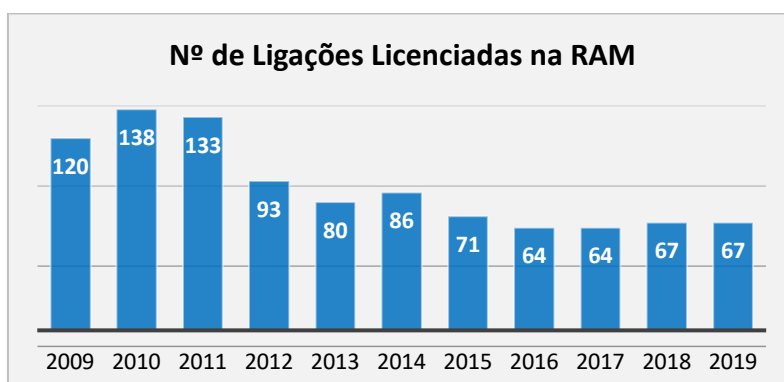


Gráfico 4.1 – Número de ligações licenciadas de serviço fixo, entre 2009 e 2019, na RAM.

Analisando o gráfico anterior, verifica-se que inicialmente, em 2009, existiam, na RAM, 120 ligações hertzianas ponto-ponto, havendo um aumento de 15% no ano seguinte. Já em 2011, houve uma quebra da quantidade de feixes em utilização, sendo essa quebra mais acentuada no ano 2012, havendo um decréscimo de 30% em relação ao ano anterior. Essa variação entre 2011 e 2012 será analisada adiante com mais fundamentos.

Entre 2012 e até ao final do ano de 2019, o gráfico ilustra uma breve diminuição da utilização de feixes hertzianos ao longo dos anos, embora apresente um ligeiro aumento de seis ligações no ano 2014 e três no ano 2018 relativamente aos anos transatos, verificando-se em 2019, a manutenção do número de ligações existentes em 2018. Em suma, obteve-se uma taxa de variação de aproximadamente de -28% entre 2012 e 2019, verificando-se um decréscimo de 44% no número de ligações licenciadas no período integral analisado.

Estas variações merecem uma análise em maior detalhe, pelo que a um nível mais específico, a segmentação das ligações por instituição é essencial para melhor perceção da evolução. Neste caso, em que são particularizados os dados em função das instituições, não foi possível contabilizar as ligações do tipo Estúdio-Emissor por não estarem quantificadas individualmente pelas instituições na base de dados fornecida pela ANACOM.

Numa primeira análise comparativa entre o início do período (2009) e o fim do mesmo (2019) verificam-se grandes alterações no número de ligações por instituição. Através da análise do Gráfico 4.2 é possível verificar que há onze anos a Vodafone detinha mais de metade, 57%, das ligações existentes, seguida pela ONITelecom com apenas 17%.

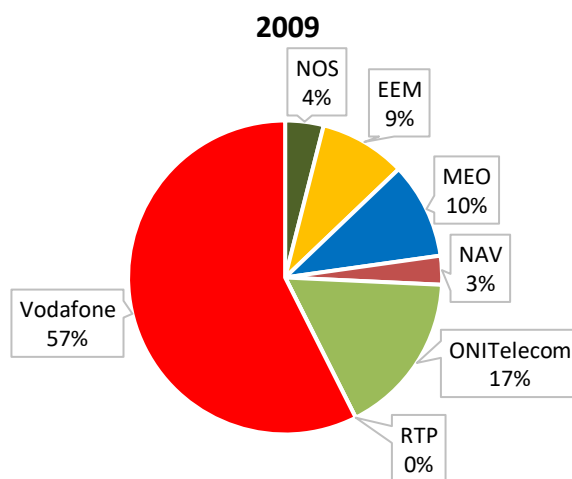


Gráfico 4.2 – Ligações hertzianas existentes em 2009, por empresa.

Dez anos depois, são muitas as diferenças, para além do menor número de feixes em utilização, registou-se também uma grande diminuição nos feixes da operadora Vodafone, passando a ser a MEO a maior detentora de feixes (Gráfico 4.3). Já a NOS e a Vodafone, juntas, são responsáveis, equitativamente, por outros 30% das ligações atuais.

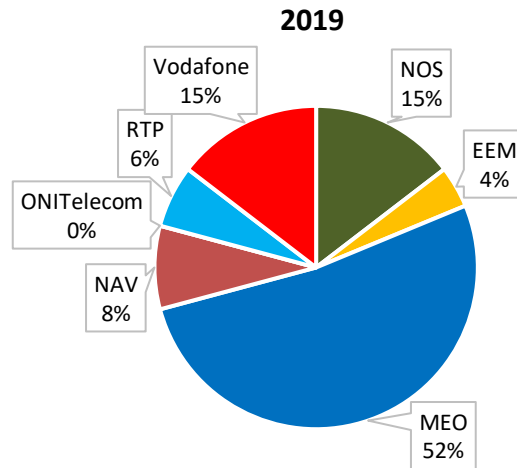


Gráfico 4.3 – Ligações hertzianas existentes em 2019, por empresa

No entanto, esta análise apenas permite perceber o panorama há onze anos e o último ano completo transato ao atual, pelo que agora importa fazer uma análise mais precisa. Desta forma separou-se em dois gráficos (Gráfico 4.4 e Gráfico 4.5) os dados anteriores em função do número de feixes por instituição ao longo do período de tempo analisado.

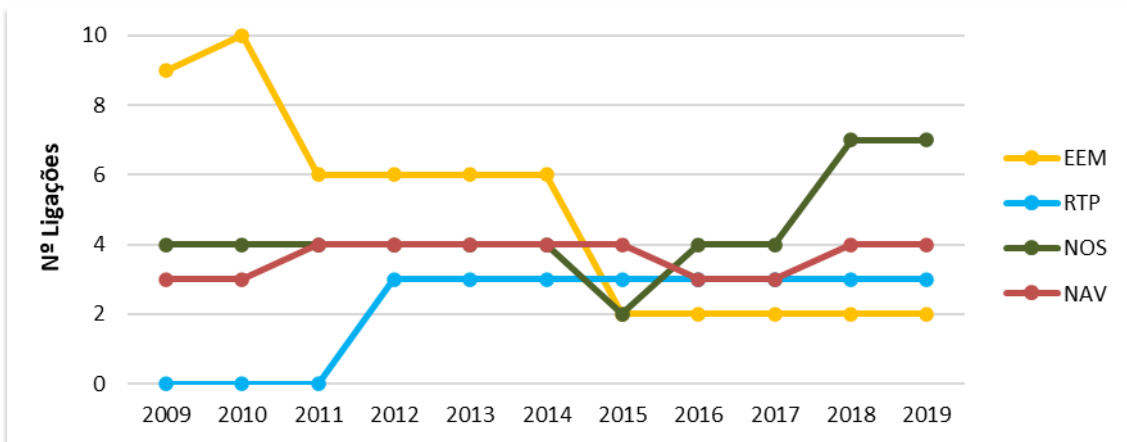


Gráfico 4.4 – Número de ligações licenciadas por instituição (parte I).

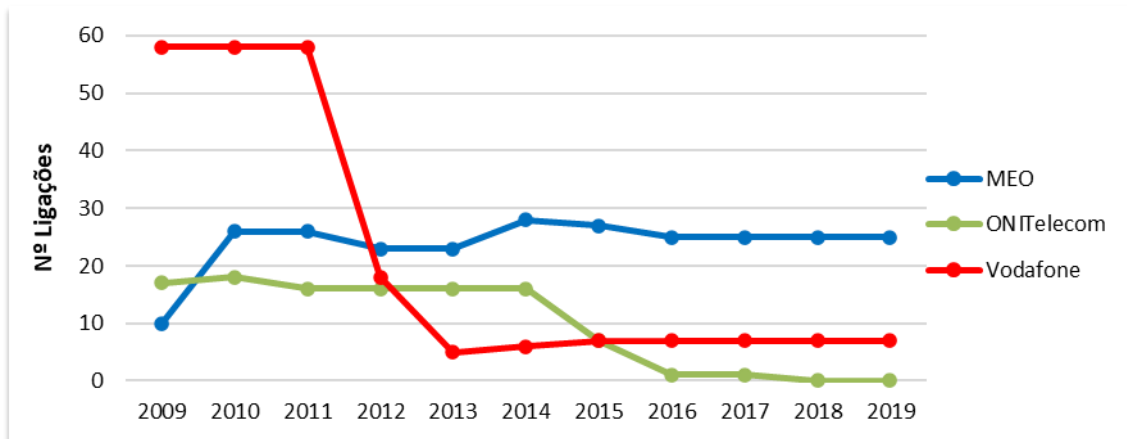


Gráfico 4.5 – Número de ligações licenciadas por instituição (parte II).

Examinando os gráficos, é possível retirar novas conclusões sobre as alterações verificadas anteriormente. Constatase que o incremento de 15%, em 2010, deveu-se essencialmente à aposta pela empresa de telecomunicações MEO na banda dos 11 e 18 GHz (Gráfico 4.6). Relativamente ao decréscimo verificado no ano de 2011 este deveu-se a uma ligeira redução do número de feixes utilizados por parte da EEM, na banda dos 7 e 13 GHz (Gráfico 4.7). Nesse mesmo ano, a ONITelecom também reduziu dois feixes, mantendo-se a quantidade de feixes até 2014.

O decréscimo do número de ligações da EEM, em 2011, deveu-se à chegada de fibra ótica a algumas das suas estações, passando os feixes para segundo plano. Já o decréscimo verificado, em 2015, deveu-se essencialmente a uma alteração da legislação, pela qual, a empresa era obrigada a alterar a banda de algumas ligações, acabando por desativar definitivamente as respetivas ligações hertzianas.

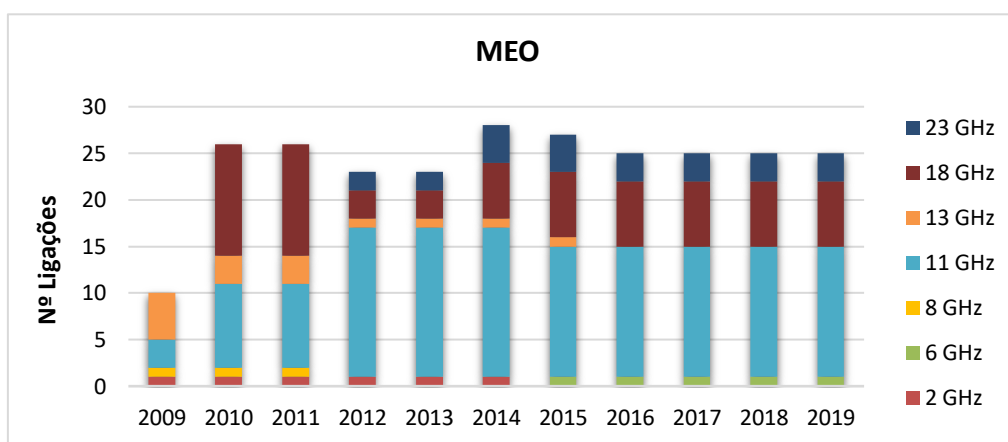


Gráfico 4.6 – Número de ligações da MEO em função das frequências utilizadas.

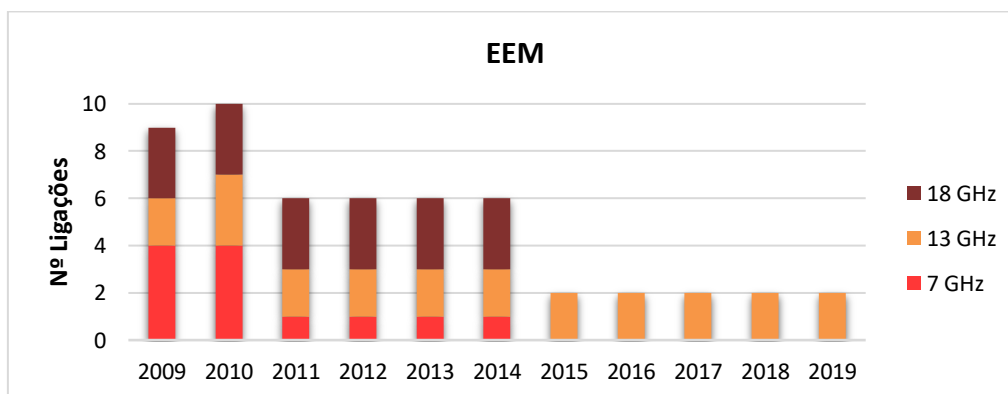


Gráfico 4.7 – Número de ligações da EEM em função das frequências utilizadas.

Já o decréscimo de 30% verificado acima entre 2011 e 2012 deveu-se à brusca diminuição do número de ligações da Vodafone nas bandas de 18, 23 e 38 GHz (Gráfico 4.8). Esta ocorrência é facilmente explicada pelo facto de que, inicialmente, este operador utilizou feixes de várias faixas de frequências com a finalidade de interligar as suas estações base, no entanto, depois passou a partilhar infraestruturas com outro operador, desinstalando uma grande quantidade de feixes, com maior expressão na faixa dos 18, 23 e 38 GHz, registando todas estas faixas decréscimos superiores a 85% numa análise a 10 anos.

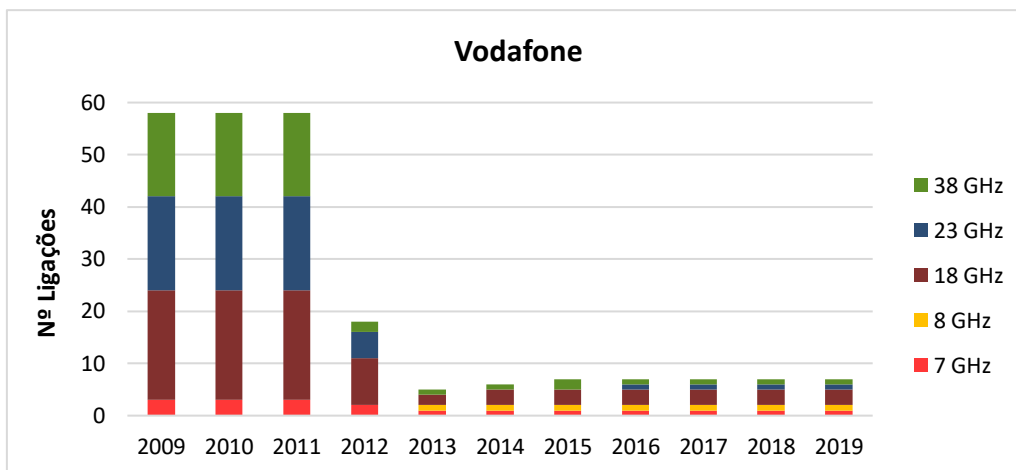


Gráfico 4.8 – Número de ligações da Vodafone em função das frequências utilizadas.

No Anexo A apresentam-se ainda os gráficos que ilustram a utilização das bandas disponíveis conforme os anos para as outras instituições, nomeadamente, NOS Comunicações, NAV, RTP e ONITelecom.

Particularizando ainda mais a análise, representou-se a evolução numérica de cada frequência (Gráfico 4.9 e Gráfico 4.10). Até ao momento, somente 11 frequências que requerem licença são utilizadas no Arquipélago da Madeira.

É possível verificar que, atualmente, existem ainda diversos feixes de diferentes frequências, ainda que tenham sofrido alterações na sua utilização ao longo do período de tempo analisado. Através do Gráfico 4.9 verifica-se que as bandas de 1,5 e 7 GHz estão, atualmente, representadas em menor número comparativa às existentes em 2009. É possível ainda constatar que foi a frequência de 11 GHz que mais ligações ganhou com os anos para além da evidência de que as bandas de 2, 6 e 8 GHz são em todo o período as existentes em menor número.

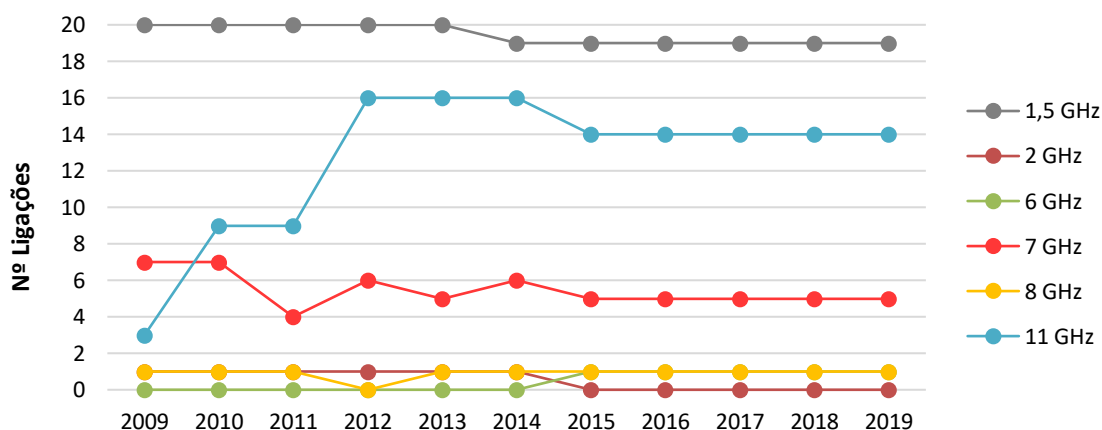


Gráfico 4.9 – Evolução do número de feixes nas diferentes bandas (parte I).

Já nas frequências mais altas, isto é, de 18, 23 e 38 GHz, registaram-se grandes decréscimos, principalmente, a partir de 2011 até 2013, sofrendo depois acréscimos e decréscimos nunca atingindo os valores máximos anteriormente registados, sendo mesmo a banda dos 38 GHz das menos utilizadas

atualmente, à qual se junta também a banda de 13 GHz (Gráfico 4.10). Já as bandas de 2 e 15 GHz deixaram de ser utilizadas por completo desde 2015.

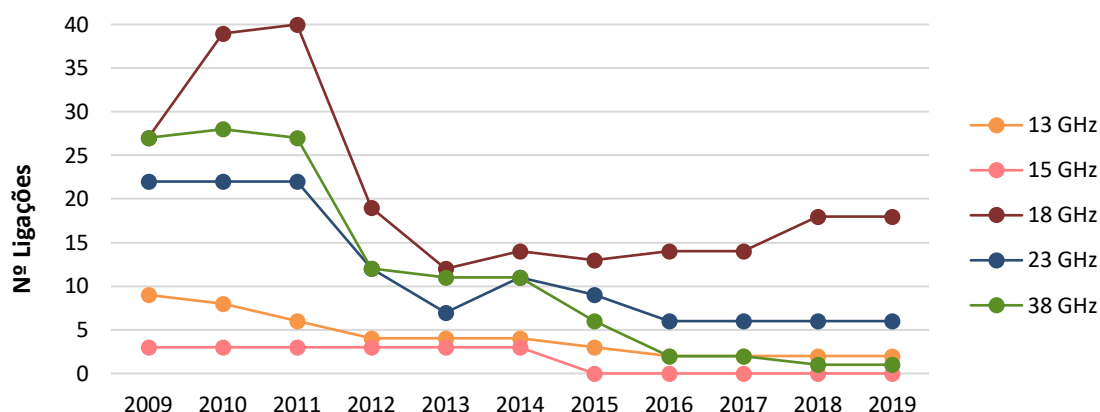


Gráfico 4.10 – Evolução do número de feixes nas diferentes bandas (parte II).

Concluindo, apesar do menor número de ligações em todas as frequências, exceto na banda de 11 GHz, as ligações hertzianas continuam a ser utilizadas nos dias atuais. Estando a terminar o ano de 2020, prevê-se que o número de ligações de serviço fixo na Região Autónoma da Madeira se deverá manter estabilizado em comparação com o ano passado.

4.2. Caso de Estudo – Câmara Municipal do Funchal

A CMF, uma das maiores câmaras da região, é constituída por uma vasta rede de delegações. Na necessidade de interligar as várias delegações, a Câmara possui a sua própria rede privada de comunicação para a transmissão de dados e voz entre as suas delegações.

Inicialmente, a rede da CMF era suportada pelo serviço disponibilizado pelas operadoras de comunicações e por três ligações na banda dos 2,4 GHz, tendo a rede sofrido uma forte reestruturação a partir do ano de 2012, devido à necessidade de reduzir os custos com comunicações, beneficiando ainda do aumento da capacidade de transmissão.

A solução encontrada, foi a implementação, maioritariamente, de novos feixes hertzianos em bandas que não requeriam licenciamento (5 GHz, 17 GHz e 24 GHz), uma vez que não conseguiam implementar por fibras óticas uma rede tão vasta sem necessitarem de um grande prazo de instalação, nem estarem dependentes do aluguer de fibras às operadoras.

A rede conta assim com quatro ligações na banda dos 2,4 GHz, 21 ligações no 5 GHz, quatro ligações na banda dos 17 GHz e duas ligações na banda de frequência dos 24 GHz, totalizando 31 ligações hertzianas ponto-ponto, para as quais se verificou a necessidade de implementar seis repetidores ativos devido à ausência de linha de vista entre o *data center*, situado na sede da Câmara Municipal, e as respetivas delegações.

Atualmente a banda dos 17 GHz deixou de ser “livre” para novas ligações, devido a uma alteração legislativa. Contudo, os clientes que já tinham ligações a 17 GHz antes da alteração legislativa, como é o caso da CMF, podem continuar a utilizá-las sem qualquer tipo de licenciamento.

Saltar que a rede da CMF possui algumas ligações por fibra ótica, sendo apenas cinco ligações às suas delegações, havendo, no entanto, a intenção de aumentar este tipo de ligações, conciliando este processo com as obras de manutenção do município para a passagem de cabo de fibras óticas quando possível e necessário.

A rede é constituída por nove tipos de antenas, sendo mais predominante a utilização das antenas Mimosa B24, SAF FreeMile 17 e RADWIN da gama 2000 e WinLink 1000, tendo alguma destas integrado o sistema 2x2 MIMO e sistemas para combater as interferências. É importante referir que as antenas Mimosa B24 conseguem alcançar débitos até 1 Gbit/s devido à frequência de trabalho (24 GHz) e, ainda, as antenas RADWIN possuem um formato quadrado, o que não é muito comum de se encontrar em feixes hertzianos.

Os *designs* das antenas, as suas instalações e a torre do edifício da CMF onde está localizado o *data center* podem ser visualizados na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Instalação de antenas da rede da CMF.

As antenas Mimosa B24 e RADWIN 2000 têm uma outra característica que torna as ligações ainda mais eficazes, a sincronização por *Global Positioning System* (GPS) [42] [43]. A sincronização por GPS permite que todas as antenas sincronizadas passem a transmitir ou receber os dados exatamente ao mesmo tempo, eliminando a colisão de pacotes e a auto interferência. Esta sincronização é muito útil quando existem zonas com várias antenas próximas umas das outras, pois permite um desempenho melhorado nas redes densas [44].

Na Figura 4.2 é ilustrado o mapeamento da interligação entre sites da rede da CMF, principalmente por feixes hertzianos. Neste mapeamento está presente somente uma ligação por fibra ótica, entre o *data center* e os Bombeiros Sapadores, sendo esta ainda alugada a uma operadora. As restantes ligações podem ser visualizadas no esquema presente no Anexo B, bem como, os débitos e as antenas utilizadas nas diferentes ligações.



Figura 4.2 – Mapeamento da rede de comunicações da CMF [45].

Uma característica interessante a reter nesta rede, observável na análise do esquema do Anexo B, é o recurso a dois tipos de ligações para interligar a filial do Parque Ecológico à sede, servindo a estação do Pico Alto como repetidor, devido à não existência de linha de vista entre os terminais. Desta forma, recorrem no primeiro troço (*data center* – Pico Alto) a feixes hertzianos e, no segundo troço (Pico Alto – Parque Ecológico) recorrem à fibra ótica devido à elevada abundância de árvores.

A nível de indisponibilidade, segundo os engenheiros, não é comum ocorrerem quebras na rede, mesmo na presença de chuva. Contudo, quando alguma antena muda de canal devido à presença de interferências, a respetiva ligação fica indisponível por breves momentos, até que a mudança de canal seja finalizada. Estas interferências ocorrem principalmente nas ligações do 5 GHz por consequência do crescimento de árvores, não tendo causado problemas no início do projeto, ou até mesmo a existência de redes Wi-Fi 5 GHz. A solução encontrada para resolver essas interferências consiste em mudar ao longo do tempo as estações para localizações não tão propícias a interferências.

A principal limitação que esta rede apresenta, é quando há quebra de energia elétrica. Contudo, muitos dos locais estão ligados à rede de emergência elétrica, que consiste na utilização de energia gerada pelos meios dos Bombeiros Municipais. Para além desta redundância energética, todos os postos estão equipados com o sistema UPS.

Em suma, segundo a equipa da Divisão de Sistemas de Informação da CMF, a rede implementada por feixes hertzianos consegue responder às suas necessidades, tanto com os seus débitos como a sua disponibilidade, tornando-se a adoção deste tipo de ligações vantajosa, pois conseguiram amortizar a médio prazo o investimento realizado inicialmente.

4.3. Caso de Estudo – Laboratório Regional de Engenharia Civil

A Região Autónoma da Madeira tem sido fustigada por fenómenos climatéricos adversos como a aluvião de grande intensidade que ocorreu há dez anos, mais especificamente no dia 20 de fevereiro de 2010. A elevada precipitação registada nesse dia originou cheias rápidas e violentas, que transportaram diversos materiais sólidos em elevadas concentrações [46].

Este fenómeno provocou inúmeros e avultados estragos, deixando a população em sobressalto, e obrigando as entidades competentes a analisar o sucedido, tendo em vista uma atuação futura preventiva. Assim, o Governo Regional procurou ter um estudo científico que avaliasse o risco de aluviões na ilha, sendo este desenvolvido por um consórcio composto pelo Instituto Superior Técnico, o LREC e a Universidade da Madeira, que juntos procuraram avaliar e caracterizar os riscos associados a este fenómeno das aluviões [46].

O estudo realizado sugeria que fosse implementado na ilha um sistema de monitorização nas ribeiras de forma a prevenir estes eventos e reduzir ao máximo os danos provocados, nascendo assim o projeto do LREC, intitulado de MonitorizaRibeiras. Este projeto é também designado na região como o Subsistema de Alerta de Aluviões da RAM (SAARAM).

Numa primeira fase, entre inícios de 2013 e finais de 2014, o LREC e a Wavecom conceberam e implementaram um sistema de Telemetria e Vigilância automática nas quatro ribeiras mais afetadas no 20 de fevereiro, designadamente Ribeira de João Gomes, Santa Luzia, São João e Ribeira Brava, permitindo realizar a monitorização em tempo real dos caudais e materiais que vêm pelas ribeiras [47] [48]. Nestas foram instaladas câmaras de vídeo, sensores de nível ultrassónico e radar, bem como udómetros, estando estes equipamentos ligados a equipamentos radioelétricos [49].

Nos locais mais remotos onde não existia energia para alimentar os equipamentos foi necessário implementar sistemas fotovoltaicos, integrando um conjunto de baterias para armazenamento de energia.

Relativamente às comunicações, importa referir que em eventos catastróficos, como foi o caso do 20 de fevereiro, estas ficam vulneráveis às quebras de serviço que, normalmente, acontecem nas telecomunicações. Pelo que no estudo do risco de aluviões, as comunicações mereceram grande atenção, passando por diversos estudos e pela análise de cenários alternativos.

Como as ribeiras estão inseridas em vales muito montanhosos, de difícil acesso e com elevada probabilidade de deslizamentos de terras, a solução mais adequada e robusta para o envio das informações foi a utilização de comunicações via radiofrequência [50].

O facto da utilização deste tipo de comunicações, permite ainda que cada nó da rede de monitorização possa ser facilmente reposicionado noutra local em casos de otimização. Contudo, a solução final passou pela implementação de um modelo híbrido de radiofrequência e de fibra ótica [51]. Isto porque se tornava mais rentável a implementação de fibra ótica em certos nós, devido à não presença de linha de vista desobstruída até ao *data center* situado no edifício do LREC (GW0). O mapeamento desta solução está ilustrado na Figura 4.3.

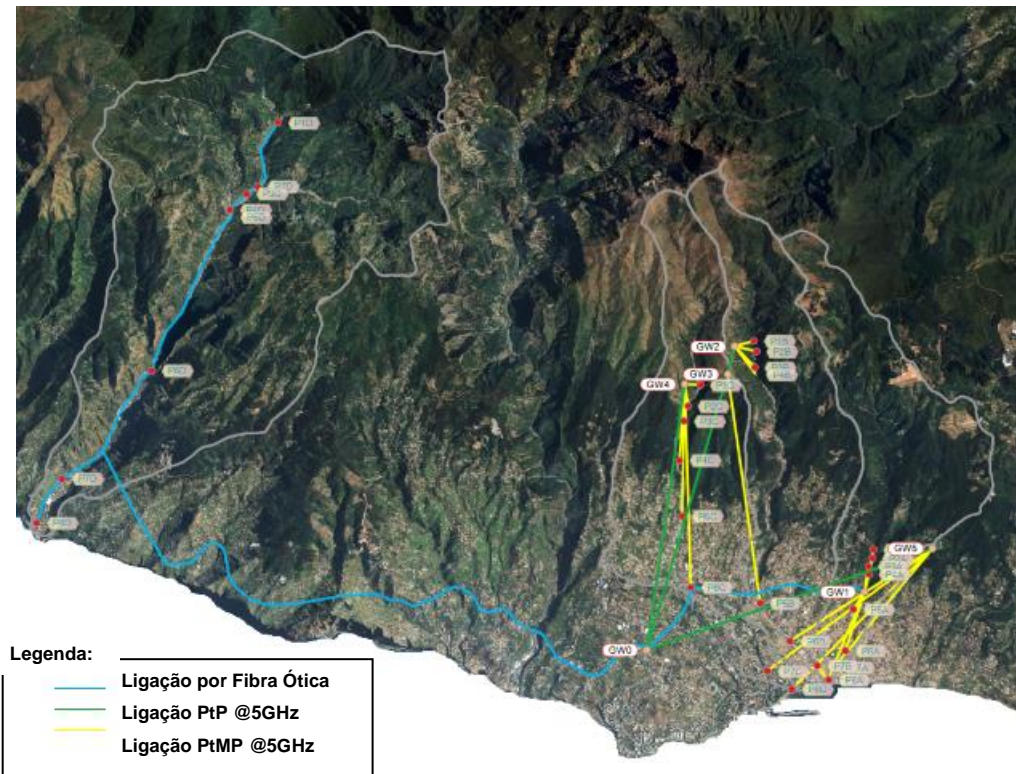


Figura 4.3 – Mapeamento da rede do projeto de monitorização de ribeiras [51].

A rede de monitorização das ribeiras é constituída por cinco *gateways*, junto às três ribeiras do Funchal. Estes *gateways* têm como função a receção dos dados e imagens enviados pelos diferentes pontos de monitorização e, posteriormente, o respetivo encaminhamento até ao *data center*. Contudo, um dos *gateways*, o GW3 - Esteios, tem a simples função de servir como repetidor entre o *gateway* GW2 (Ribeira Santa Luzia) e o *data center*, pois não existe linha de vista até ao LREC. Já o *gateway* na Ponte João Gomes (GW1) é interligado por fibra ótica até à central. Estas ligações, bem como todas as outras ilustradas na figura anterior, estão representadas sob um diagrama de rede (Figura 4.4), tornando-se mais perceptível a visualização da rede.

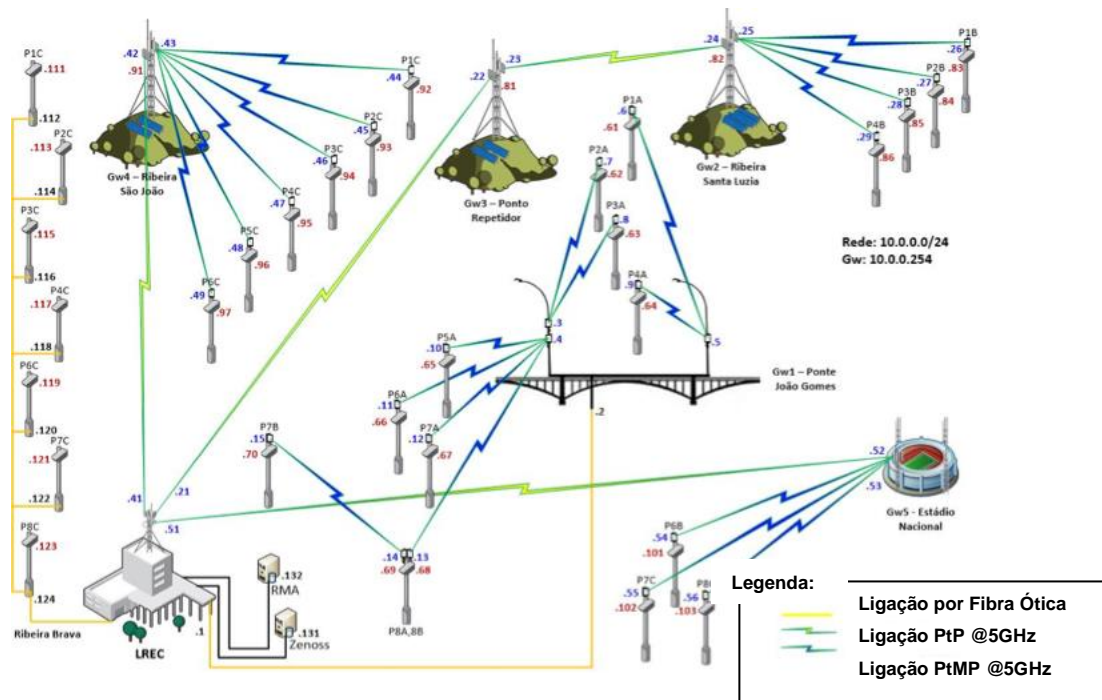


Figura 4.4 – Diagrama de rede do projeto de monitorização de ribeiras [48].

Os pontos de monitorização estão conectados por ligações ponto-multiponto (PtMP) até ao *gateway*. Por sua vez, os *gateways* estão interligados por ligações ponto-ponto (PtP) até ao *data center*. Ambas as ligações via radiofrequência estão implementadas na banda não licenciada dos 5 GHz. Salientar ainda que nestas ligações são utilizadas as duas polarizações ortogonais para combater o desvanecimento.

As ligações de *backhaul* PtP são de um débito garantido de 100 Mbit/s, possibilitando a transmissão em tempo real das imagens e outros dados [48]. Já as ligações ponto-multiponto partilham a largura de banda da estação base. Assim, os 100 Mbit/s são partilhados pelas estações de monitorização, fazendo com que, o equipamento gere a comunicação com transmissão em *slots* de tempo bem definidos. Consoante o tráfego, a ligação poderá ser dinâmica e ser ajustada pela estação base, sendo que, se uma estação de monitorização necessitar de maior largura de banda e outra nem tanto, a janela de transmissão da primeira poderá ser alargada em compensação da diminuição da outra.

Na Ribeira Brava não foi necessário instalar um *gateway*, já que o LREC optou por instalar um cabo de fibra ótica próprio entre as suas instalações e os pontos de monitorização do concelho. Esta escolha, bem como a utilização de fibra na interligação do *gateway* GW1, deveu-se essencialmente à orografia da ilha, não permitindo linha de vista sem recorrer a repetidores, retirando o proveito das condutas de betão das estruturas das vias da Vialitoral e Viaexpresso para a instalação da fibra, que garantem a integridade dos cabos mesmo em casos extremos.

Após a rede estar operacional, a rede teve de ser redesenhada para suportar redundância, permitindo que no caso de uma ligação cair, o sinal seja redirecionado para outra ligação. A solução encontrada pelas duas entidades foi a criação de duas novas ligações ponto-ponto na mesma banda

de frequência. Desta forma, implementaram uma ligação entre os *gateways* GW4 e GW3, para que quando a ligação GW0-GW3 cair a anterior entre em “ação”. Já quando a ligação GW2-GW3 cai é ativada uma ligação implementada desde o *gateway* GW2 ao GW5.

Em suma, a rede a conta com mais de 26 ligações hertzianas e mais de 38 equipamentos rádios Wavesys 1000. A disponibilidade mínima destas ligações é de 99,99%, o que é um resultado bastante agradável [48]. As ligações não ultrapassam os 5,8 km de comprimento, sendo a ligação mais longa atribuída à ligação GW0-GW5, seguindo-se as ligações GW0-GW3 e GW5-GW2 com 5,4 km. A ligação ponto-ponto mais curta (GW3-GW2) tem somente 600 metros, havendo ligações de alcance mais curto, mas correspondem às ligações ponto-multiponto.

As antenas utilizadas nas estações são de formato quadrado, de dupla polarização e direcionais. Um modelo de antena utilizado na rede foi fornecido pela empresa israelita “MARS Antennas and RF Systems”, sob a referência MA-WE56-DP12 e trabalha numa faixa de frequência entre 5,15 e 5,875 GHz. O único problema que os técnicos detetam em relação à utilização destas antenas é que, devido à elevada humidade presente na ilha, elas danificam-se com mais facilidade.

A forma como foram instaladas algumas antenas e o equipamento necessário nos *gateways* remotos, encontra-se ilustrada na Figura 4.5. A imagem à esquerda corresponde ao GW0 localizado na sede do LREC, contendo as respetivas três antenas das ligações ponto-ponto e, à direita, a estação remota GW3. As estações remotas contêm um sistema de alimentação energética que dependem somente da energia proveniente do sol, com recurso a baterias de armazenamento.



Figura 4.5 – Estação GW0 e GW3 da rede de monitorização de ribeiras, respetivamente.

Embora tenham sido precisos vários meses de planeamento da rede inicial de monitorização de ribeiras, a utilização maioritária de ligações hertzianas permitiu instalar os vários equipamentos num prazo muito curto, mais precisamente em menos de duas semanas [48].

Desta forma, a rede está concebida para o envio de dados até o LREC de maneira autónoma e livre de qualquer custo de serviço de telecomunicações, sem estar dependente de eventuais avarias nas redes móveis, tornando-se o mais sustentável possível.

Como a Região Autónoma da Madeira não está somente suscetível a aluviões, o LREC encontra-se desde 2019 a desenvolver um sistema de deteção de incêndios florestais para a zona Oeste da ilha, designado de Subsistema de Deteção de Incêndios da RAM (SDIRAM). O SDIRAM é um projeto que se destinará à deteção automática, por meio de robôs totalmente automatizados, georreferenciação e análise da evolução das frentes de fogo, em tempo real, de incêndios florestais, permitindo depois a orientação dos bombeiros no combate [52].

Embora o SDIRAM tenha um objetivo distinto do SAARAM, estes serão complementares, partilhando dados, plataforma de gestão e a rede de telecomunicação, assegurando de igual forma a transmissão de dados em tempo real [52].

Para o sistema de incêndios, a equipa do LREC encontra-se a estudar ligações ponto-ponto noutra banda para além dos 5 GHz. Contudo, tem sido necessário realizar estudos ao comportamento numa ligação rádio na presença de incêndios, pois estas podem sofrer interferências derivadas da emissão de poluentes provenientes da queima. O aumento de temperatura do ar pode também provocar a mudança da direção da propagação da onda devido à refração das ondas eletromagnéticas, motivando a perda do sinal [53].

Como este último projeto encontra-se ainda em fase de estudo, não foi possível examiná-lo em maior detalhe tal como o projeto de monitorização de ribeiras.

4.4. Caso de Estudo – Empresa de Electricidade da Madeira

A EEM tem como principal função a produção, transporte, distribuição e comercialização de energia na ilha da Madeira e Porto Santo. Para telecomandar as subestações, os postos de corte e seccionamento e os centros electroprodutores ligados à rede de transporte e distribuição, a EEM possui uma rede de telecomunicações para o telecomando [54].

Para além desta rede, a EEM detém uma Rede Rádio Móvel Privativa, *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA), que assegura as comunicações móveis da empresa, nomeadamente as que servem os serviços de ronda na zona do Funchal e nas restantes áreas abrangidas pela rede elétrica no arquipélago [54]. A rede de telecomando e de rádio móvel cobre toda a ilha da Madeira e é atualmente suportada por feixes hertzianos e maioritariamente por um sistema de transmissão por fibra ótica [54].

No passado, estas redes eram suportadas unicamente por feixes hertzianos, tendo havido uma transição gradual para fibra ótica a partir do início de 2011. Contudo, atualmente a rede de rádio móvel continua a ter duas ligações como *backhaul* por feixes hertzianos, uma entre as estações da Achada da Cruz e São Jorge, sendo a única ligação que ainda não tem instalada fibra ótica, e outra entre o Pico do Arco Calheta e Cabo Girão. Esta última ligação está num processo de desmontagem e posterior cancelamento.

A escolha da mudança do tipo de rede para fibra ótica deveu-se essencialmente a questões de segurança e fiabilidade, e não pela capacidade ou custos. Isto porque a ilha da Madeira possui uma orografia bastante acidentada, tendo sido necessário recorrer aos picos altos para a instalação das estações. Consequentemente, as estações estavam muito suscetíveis a descargas atmosféricas em

períodos de mau tempo. Ora, estas descargas implicavam quebras recorrentes nas estações de comunicação, não permitindo os técnicos atuarem remotamente sobre avarias na rede elétrica que tinham sido causadas pelo mau tempo.

Desta forma, a empresa optou por expandir a sua própria rede por fibra ótica, tendo o cuidado de implementar múltiplas redundâncias para garantir a fiabilidade da fibra. Essa execução foi relativamente fácil de implementar pois utilizaram a existente infraestrutura da rede elétrica, por exemplo as linhas de baixa, média ou alta tensão e condutas. No entanto, tiveram um custo acrescido na escolha do tipo de cabo de fibra ótica, pois foi necessário recorrer a cabos com guarda para as linhas de alta tensão. O cabo de guarda com fibra ótica é internacionalmente conhecido pela sigla OPGW (*Optical Ground Wire*) e serve de cabo de terra convencional.

Por outro lado, a implementação de rede por fibra ótica permitiu à EEM criar uma “sub-empresa” que tem como atividade fornecer serviços de fibra ótica como operador neutro na Região Autónoma da Madeira, a EMACOM - Telecomunicações da Madeira [55]. Eles utilizam a capacidade excedentária da rede, tanto do número de fibras como da capacidade, para construir redes de comunicações.

Dado que o objetivo deste trabalho é o estudo dos feixes hertzianos e não de fibra ótica, de seguida expõe-se uma breve análise da antiga rede hertziana da EEM, de forma a que o leitor tenha conhecimento da sua anterior utilização.

A EEM como é a única entidade que fornece e controla a energia elétrica na Madeira tem necessidade de ter várias subestações dispersas pela ilha. Dessa forma, é essencial dispor de uma rede de telecomunicações alargada por toda a região, também para servir a rede móvel TETRA. Embora a rede tenha sido substituída, é ilustrado na Figura 4.6 o mapeamento final da antiga rede da EEM, do ano de 2011 a 2014, por feixe hertziano e por fibra ótica.

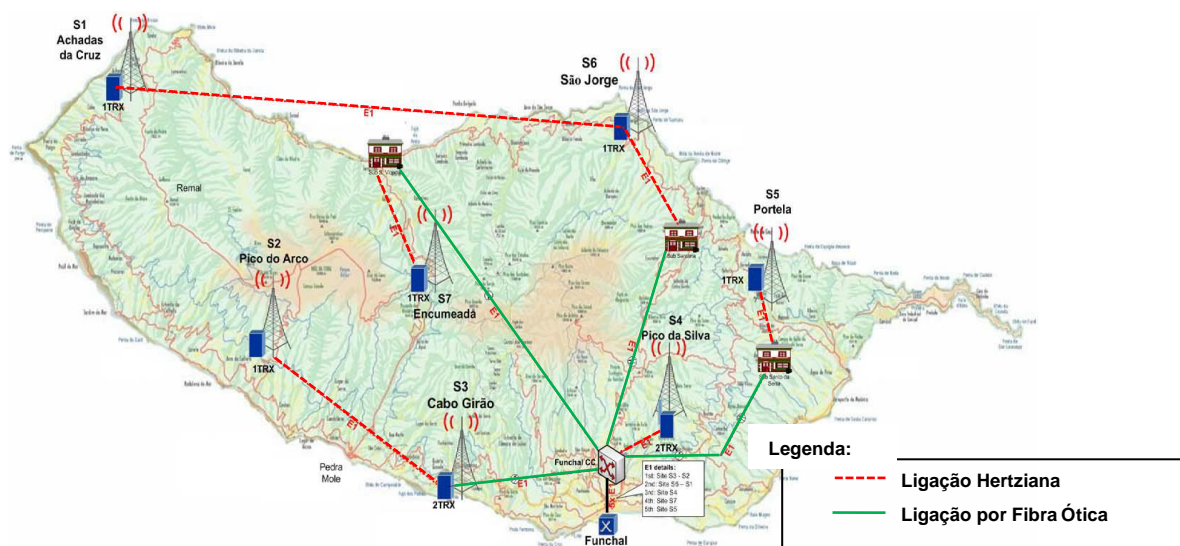


Figura 4.6 – Mapeamento da rede de telecomunicações da EEM, desde 2011 a 2014.

Inicialmente, a rede de telecomunicações da EEM era composta por dez ligações ponto-ponto bidirecionais, todas em bandas licenciadas (7, 13 e 18 GHz), como descrito no Gráfico 4.7, com um débito de 2 Mbit/s. Recorriam a um só tipo de polarização por ligação, mas no sistema geral não se

limitaram a utilizar somente um tipo, recorrendo assim às duas polarizações. Todas as ligações encontravam-se em linha de vista e não tinham implementado nenhum sistema de diversidade.

A maior ligação que a rede possuía era de 23,50 km entre a estação das Achadas da Cruz e a estação do Pico do Arco de São Jorge, na banda dos 13 GHz com polarização vertical. Já a menor ligação era entre a estação da Portela e a subestação do Santo da Serra com um comprimento de 3,62 km, na banda dos 18 GHz com polarização vertical.

As antenas que constituíram as ligações hertzianas correspondiam todas a três modelos parabólicos da marca Andrew, com categorização de Classe 3 pelo ETSI. Para as ligações de 7 GHz era utilizado o modelo de antena VHLP2-71W. O modelo VHLP2-13 era utilizado nas ligações na banda dos 13 GHz, enquanto que na banda dos 18 GHz era utilizado o modelo VHLP2-18.

Por sua vez, as antenas da rede hertziana eram colocadas em torres metálicas ou em postes do tipo Cavan (Figura 4.7), respetivamente, podendo ou não sendo partilhadas por antenas de outras instituições.

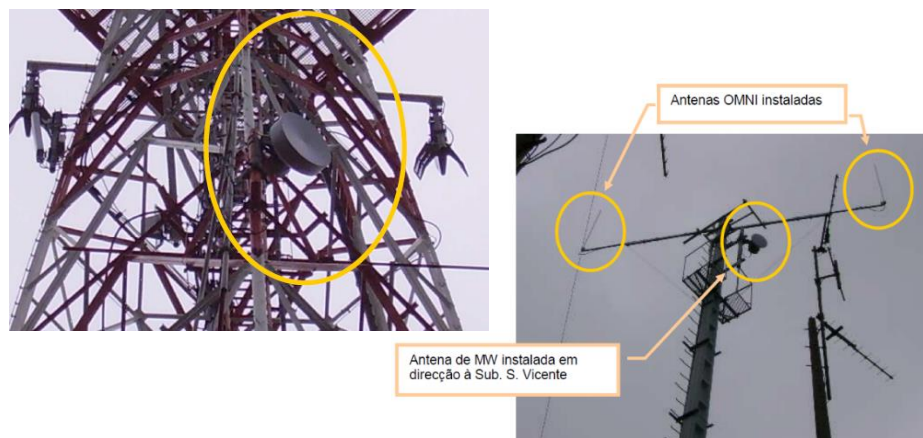


Figura 4.7 – Antenas na estação do Pico do Silva e na estação da Encumeada, respetivamente.

Como é possível visualizar na anterior figura, as antenas da rede TETRA eram instaladas nas mesmas estações da rede de feixes, mas não em todas. A rede TETRA era suportada por duas ou três antenas de painel por estação ou, então, maioritariamente por duas antenas omnidirecionais.

Em suma, a desistência dos feixes hertzianos deveu-se, essencialmente, a problemas de descargas atmosféricas nas estações, comprometendo a fiabilidade da rede de telecomando. A mudança para uma rede de fibras permitiu ainda a poupança de custo no licenciamento das bandas utilizadas, não acarretando custos para a desmontagem de torres, pois a maioria destas torres ainda permanecem utilizadas por outras entidades.

5. Rede de Feixes para Monitorização

Até ao momento foram apresentados dados de redes existentes que estão ou já estiveram em funcionamento na região. Neste capítulo pretende-se realizar um estudo de implementação de uma nova rede de feixes hertzianos, de forma a implementar a maior parte dos processos a ter em conta num dimensionamento de um sistema por feixes hertzianos. Para tal, decidiu-se realizar o estudo de uma rede que poderá trazer utilidade prática à ilha da Madeira.

O LREC encontra-se a desenvolver o sistema de deteção de incêndios somente para a zona Oeste da ilha, pelo que, a zona Este ficará frágil na monitorização deste tipo de ocorrência. Perante isto, aproveitou-se essa falha e procedeu-se ao estudo de uma rede por feixes para complementar a rede de monitorização.

Não se pretende com este estudo realizar uma análise profunda aos efeitos dos incêndios, nem aos equipamentos a utilizar na deteção destes, estando o foco principal na projeção de uma rede hertziana com o intuito de servir de *backhaul* ao sistema de monitorização. Contudo, para projetar as ligações hertzianas é necessário realizar um pré-estudo acerca dos incêndios na zona Este, na qual se inserem os concelhos de Santa Cruz, Machico e Santana, de forma a realizar a escolha mais adequada da localização das estações rádio para fins de monitorização.

5.1. Monitorização de Incêndios

Ao longo dos últimos anos, registou-se no país um grande aumento no número de incêndios, atingindo estes maiores proporções e tendo efeitos mais devastadores, levando as autoridades responsáveis a pensar estrategicamente, tendo em vista o reforço da prevenção destes fenómenos. A prevenção assume-se crucial tendo em conta que, em Portugal, a taxa anual de área ardida é quatro vezes superior à taxa dos países do sul da Europa [56].

Desenvolveram assim o Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PNDFCI) que visa o cumprimento de quatro objetivos principais, designadamente, a redução de área ardida relativamente à superfície florestal, para valores equiparáveis à média dos países da bacia mediterrânica; a eliminação de grandes incêndios; a redução do número de incêndios com área superior a um hectare e ainda a redução do número de reacendimentos [57].

Nesta matéria, atribuem-se diferentes responsabilidades a diferentes entidades, ficando as ações de prevenção ao encargo da Direção Geral de Recursos Florestais e a vigilância, deteção e fiscalização entregues à Guarda Nacional Republicana. Já o combate fica entregue ao Serviço Nacional de Bombeiros e Proteção Civil.

Aliada à prevenção, a deteção precoce de um incêndio é outro fator crucial para a redução do tempo de intervenção e conseqüentemente da área ardida. Havendo uma monitorização das principais áreas de maior risco é possível detetar focos de incêndios antecipadamente, passando o objetivo sempre pela deteção mais rápida possível e posterior comunicação da ocorrência e sua localização

exata às entidades responsáveis pelo combate, de forma que o tempo de reação seja o mínimo possível e se reduza ao máximo os estragos provocados e o custo do fogo [58].

Neste aspeto, a tecnologia e os instrumentos de monitorização desenvolvidos ao longo do tempo constituem uma mais valia na medida em que o sistema tradicional de vigilância de incêndios não consegue detetar todos os possíveis focos de incêndio apenas com as torres de vigilância, tornando assim o processo mais célere.

São inúmeras as formas de deteção e monitorização de sistemas, desde os mais tradicionais, como os observadores em forma de patrulha ou torres de monitorização, a monitorização aérea e por satélite, e, mais recentemente, verifica-se uma grande incidência nos sistemas baseados em sensores óticos e demais sensores de deteção [58]. Especificando, no caso dos sistemas de satélite utilizam-se os satélites em órbita terrestre de forma a observar e detetar incêndios florestais, havendo mesmo dois satélites que foram lançados com este propósito designadamente, *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Estes satélites permitem visualizar imagens de várias regiões, tendo, no entanto, a desvantagem de estas apenas serem disponibilizadas a cada dois dias comprometendo uma atuação rápida [58].

À parte das imagens por satélite a deteção de um incêndio pode ainda ser feita recorrendo a câmaras digitais e sensores térmicos através de vigilância por câmara e por sensores sem fios num sistema de reconhecimento ótico automático, respetivamente. A nível de sensores existe um leque diverso, nomeadamente, sensores de câmara de vídeo; câmaras de imagens térmicas por infravermelhos; espectrómetros de infravermelhos; sistemas de deteção e alcance de luz.

Neste contexto, de forma simplificada, pressupõe-se que em cada estação ter-se-á uma câmara de videovigilância 360°, para permitir uma cobertura omnidirecional do terreno. Escolheu-se a utilização de câmaras pois é a solução mais utilizada pelas entidades, independentemente do tipo de câmara.

Com os anos, a implementação e evolução dos *codecs* permitiram a compactação do formato original do ficheiro, tornando mais praticável o armazenamento e envio de arquivos de multimédia. Para saber, em média, a largura de banda necessária para a transmissão de um vídeo, avaliou-se um dos *codecs* mais avançados, sendo recomendados para todos os serviços de vídeo 3GPP, o *codec* H.264/AVC. Um sistema que utilize o anterior *codec* proporciona a compactação de um vídeo para valores entre 1 e 8 Mbit/s [59]. Consequentemente, para cumprir os requisitos da transmissão em tempo real das imagens captadas pelas câmaras, definiu-se que cada estação terá de transmitir dados a um ritmo “redondo” de aproximadamente 10 Mbit/s.

Numa fase inicial, teve-se necessidade de perceber quais eram as zonas mais suscetíveis a incêndios da zona Este da ilha, para que a escolha da localização das estações de monitorização fosse a mais coerente, permitindo uma maior área de cobertura visual, sem comprometer a segurança das estações na ocorrência de incêndios junto às mesmas. Para tal, solicitou-se ao Instituto das Florestas e Conservação da Natureza, IP-RAM, a carta de suscetibilidade à ocorrência de incêndios na Madeira, que se encontra ilustrada na Figura 5.1.

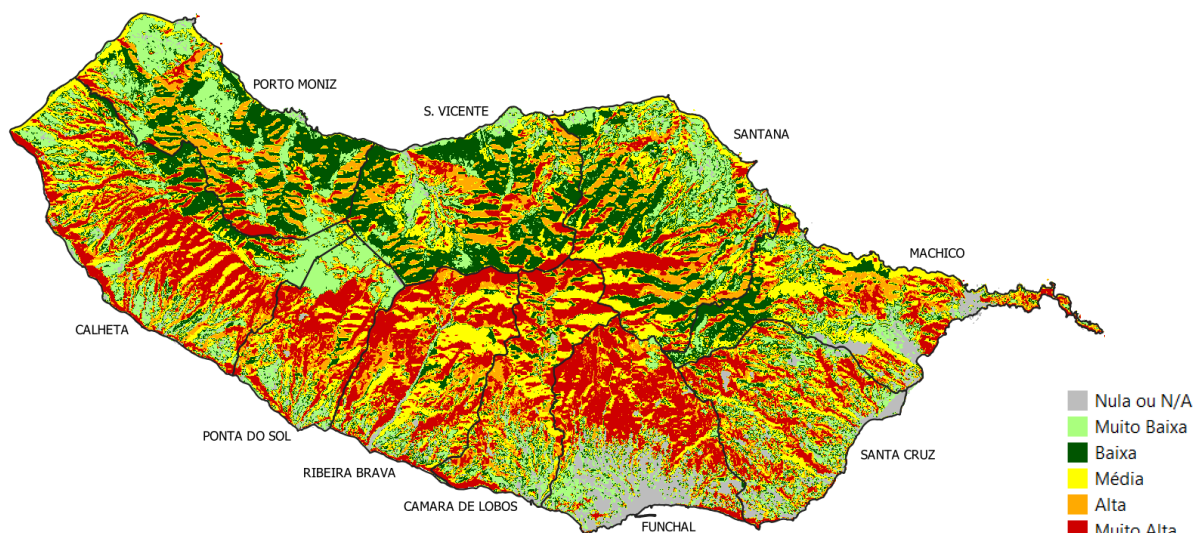


Figura 5.1 – Carta de suscetibilidade a incêndios florestais da ilha da Madeira (Cedida pelo Instituto das Florestas e Conservação da Natureza, IP-RAM).

Esta carta foi obtida no âmbito do Plano Regional de Ordenamento Florestal da Região Autónoma da Madeira realizado no ano de 2015 [60]. A classificação dos níveis de suscetibilidade foi obtida tendo em consideração três fatores, nomeadamente, o tipo de vegetação, declive e exposição solar do terreno.

Para o sistema de monitorização em causa, analisaram-se somente as duas classes de suscetibilidade mais altas, pois considera-se que estas serão suficientes para caraterizar as zonas mais críticas e porque, segundo o grupo de trabalho dos incêndios florestais, a utilização de feixes hertzianos faz sentido onde a classe de perigosidade de incêndio florestal é “Alta” e “Muito Alta” [61].

Com recurso às ferramentas do *software* QGIS, filtrou-se o anterior mapa para apresentar as respetivas duas classes somente nos três concelhos em estudo. Para facilitar a visualização, considerou-se que essas duas classes apresentarão uma só cor (vermelha) no mapa, não se fazendo distinção desses níveis de suscetibilidade incendiária (Figura 5.2).



Figura 5.2 – Carta de suscetibilidade para as classes Muito Alta e Alta a incêndios florestais na zona Este.

O correto estudo da localização das estações de monitorização é um processo essencial, pois deve-se ter em consideração fatores de visibilidade e alcance visual, de forma a minimizar as áreas de sombra.

O Arquipélago da Madeira possui várias infraestruturas de prevenção e combate aos incêndios florestais, sendo que uma das mais essenciais são as torres de vigilância. Desta forma, a integração destas torres na rede de monitorização incendiária que se pretende projetar é um passo primordial. Estas torres localizam-se unicamente na ilha da Madeira, existindo atualmente seis torres operacionais dispersas (Carta n.º 30.A e Tabela 35 do relatório técnico [60]). Elas encontram-se em locais de cotas elevadas, com visibilidade 360º para os espaços florestais, principalmente na encosta Sul que é a zona que apresenta maior frequência de incêndios e mais área ardida. Estas torres têm cerca de 11 metros de altura [60].

Nos concelhos em estudo existem somente duas torres de vigilância, uma no concelho de Machico (Torre de vigilância do Pico do Suna - Figura 5.3), na freguesia do Porto da Cruz, a uma altitude aproximada de 1 028 metros, e outra no concelho de Santana (Torre de vigilância da Boca das Voltas – freguesia de São Jorge) a 834 m.



Figura 5.3 – Torre de vigilância do Pico do Suna [62].

Na impossibilidade destas torres cobrirem visualmente toda a área suscetível a incêndios identificada nos três concelhos, houve a necessidade de estudar localizações adicionais, tendo como parâmetro fundamental na escolha a preferência por picos mais altos dos concelhos. Alguns destes picos são já zonas onde existem estações de rádio ou de telecomunicações, pelo que o aproveitamento destas infraestruturas contribuirá para a diminuição dos custos alocados a equipamentos passivos.

Inicialmente, partiu-se pela análise da cobertura dos picos mais altos da região, o Pico do Areeiro e o Pico Ruivo. O Pico do Areeiro conta com uma altitude de 1 818 metros e é um marco divisório entre o concelho de Câmara de Lobos, Funchal e Santana. Nas imediações deste pico encontra-se a Estação de Radar n.º 4 da Força Aérea Portuguesa e ainda uma estação de rádio (Figura 5.4). Já o Pico Ruivo, constitui o ponto mais alto do Arquipélago da Madeira, a uma altitude de 1 862 metros.

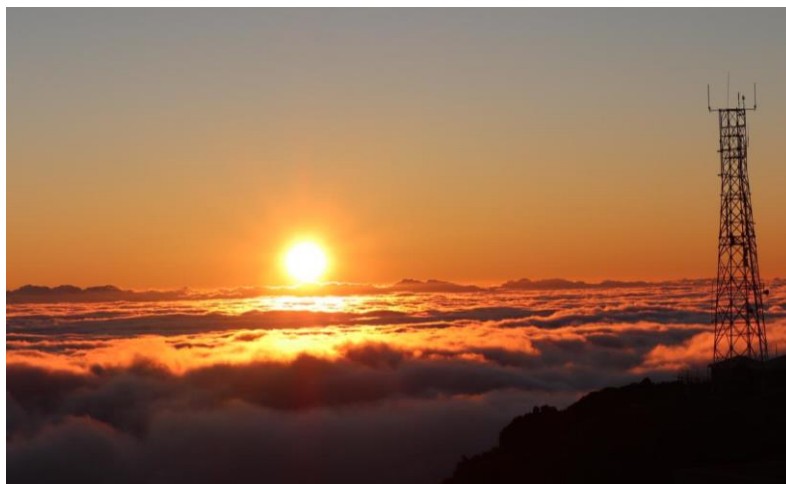


Figura 5.4 – Estação rádio do Pico do Areeiro.

Posteriormente, analisou-se a orografia ao longo da zona Este, com recurso às funcionalidades do *Google Earth*, de forma a detetar tantos outros picos existentes, bem como locais que proporcionassem um bom enquadramento visual em relação às zonas incendiárias de maior suscetibilidade identificadas. Salientar que neste processo de seleção do local teve-se o cuidado de não considerar zonas de classes altas de incêndio, recorrendo por vezes a locais habitáveis. Na Figura C.1 do Anexo C são apresentados os resultados da análise efetuada, tendo-se identificado cerca de duas dezenas de locais que servissem o propósito. Os ícones da figura assinalam as duas torres de vigilância, algumas estações já existentes de rádio ou de telecomunicações e outros locais adequados para a colocação de mais estações de monitorização.

Na inviabilidade de um projeto com inúmeras estações, decidiu-se realizar uma profunda filtragem dessas estações. Para tal, numa primeira fase verificou-se quais os pontos que cobriam uma maior área visual. Depois averiguou-se, entre as anteriores, quais as que apresentavam sobreposição visual entre elas, escolhendo os pontos que mais se adequavam a este projeto, ou seja, que cobriam maior área das zonas vulneráveis de classes mais elevadas. No entanto, e devido à ausência de cobertura de algumas zonas vulneráveis, analisaram-se ainda outras possíveis localizações.

Após várias tentativas à procura das melhores soluções, a melhor alternativa que se conseguiu obter foi optar pela implementação de sete estações para a monitorização de incêndios na costa Este. Das sete estações, três seriam implementadas nas estações rádio já existentes, nomeadamente nas estações do Pico do Silva, do Eirosoes e do Pico do Areiro e três estações teriam de ser totalmente implementadas no sítio do Pico Ruivo, do Santo da Serra e da Ponta de São Lourenço. No fim, acabou-se por recorrer somente à Torre de Vigilância do Pico do Suna, pois a outra torre de vigilância não oferecia um enquadramento visual favorável à deteção de incêndios de classes elevadas na zona de Santana. Essa comparação da cobertura visual da Torre de Vigilância da Boca das Voltas em relação às zonas suscetíveis pode ser visualizada na Figura D.1 do Anexo D.

Na Figura 5.5 é ilustrada a localização das sete estações de monitorização propostas e a localização do *data center*, no LREC, que receberá todas as informações provenientes das estações de monitorização incendiária.



Figura 5.5 – Mapeamento da localização das estações de monitorização.

O enquadramento visual de cada estação foi obtido assumindo que o ponto de visualização se encontrava a uma certa altura, de forma a adotar as semelhanças existentes às funcionalidades de câmaras de videovigilância e outros sensores. A altura das três estações de monitorização que teriam de ser implementadas de raiz foi escolhida de tal forma a exigir uma torre metálica simples, em torno de 5 metros. Como as torres das estações já existentes têm alturas muito superiores, no mínimo 10 metros e até 80 metros no caso da torre mais alta da região (do Pico do Silva), tirou-se partido dessa situação, assumindo alturas mais elevadas, favorecendo significativamente a área coberta. No caso da torre de vigilância, sabe-se que a torre apresenta uma altura de aproximadamente 11 metros, portanto instalar-se-ia uma torre metálica de 3 metros sobre o edifício, perfazendo uma altura total de 14 metros. A localização exata das estações projetadas, bem como a respetiva altura de enquadramento, encontram-se detalhadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Elevação dos pontos de referência das estações de monitorização para o enquadramento visual.

Estação	Localização		Cota [m]	Altura de Enquadramento [m]
	Latitude	Longitude		
Est. Pico Silva	32°41'25.27"N	16°52'27.63"W	1116,0	50
Est. Pico Areeiro	32°44'11.08"N	16°55'33.92"W	1798,2	15
Pico Ruivo	32°45'33.03"N	16°56'34.62"W	1817,2	5
Est. Eiroses	32°41'14.17"N	16°49'59.81"W	760,4	15
Torre Pico Suna	32°44'15.79"N	16°51'13.61"W	1024,8	14
Santo Serra	32°43'35.82"N	16°48'03.08"W	623,9	5
Ponta São Lourenço	32°44'43.87"N	16°42'16.70"W	117,9	5

A partir destes dados, simulou-se a cobertura visual que o conjunto das estações oferecerá, utilizando a função “viewshed - visibility analysis” do QGIS, somente para os concelhos em estudo. Na Figura 5.6 é apresentado o respetivo resultado (a verde translúcido) sobreposto ao mapeamento de suscetibilidade incendiária para poder ser comparável com as áreas de coberturas. Na Figura D.2 do Anexo D encontra-se o mesmo mapa, mas em formato 3D, a fim do utilizador ter perceção das zonas cobertas tendo em conta a orografia da costa Este.

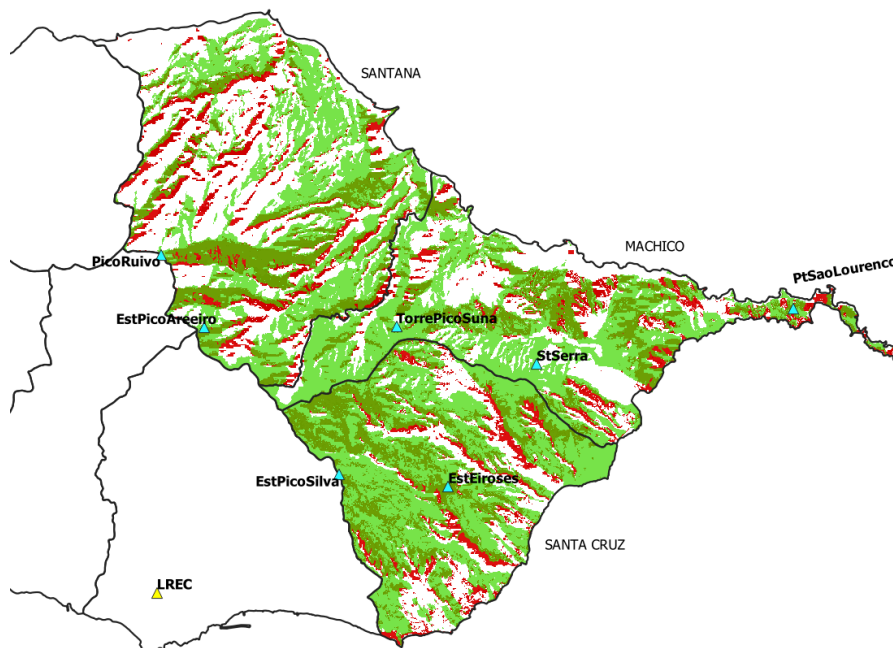


Figura 5.6 – Enquadramento visual a partir das estações de monitorização (verde) e suscetibilidade incendiária (vermelho).

Apesar de uma estação de monitorização não ter visibilidade direta para determinados sítios, não implica que a mesma não possa detetar incêndios desses sítios. Em dias de céu limpo, é possível detetar incêndios sem a visualização direta através da observação de colunas de fumo. Porém, em determinados locais, as colunas de fumo só são visíveis quando estas já têm uma altura notável, o que só acontece quando o incêndio tem algum tempo a deflagrar. Desta forma, embora não se tenha total

cobertura das zonas suscetíveis de classes altas, pode-se assumir que zonas de sombra não estão fora do alcance de monitorização.

Para além do mais, muitas das zonas habitáveis da região permitem a visualização das serras, pelo que a própria população poderá observar estes acontecimentos, emitindo diretamente um alerta às entidades de competentes.

5.2. Projeto da Rede de Feixes Hertzianos

Finalizado o estudo das zonas de maior suscetibilidade a incêndios na região Este e o estudo das localizações adequadas para as respetivas estações de monitorização, procedeu-se à integração de todas as estações numa rede de telecomunicações por feixes hertzianos para o envio dos dados até ao *data center* de monitorização no LREC. Neste aspeto, foram examinadas várias opções para a implementação de ligações de *backhaul* ao sistema, de forma a satisfazer os requisitos necessários, procedendo-se posteriormente à simulação das mesmas.

As simulações foram efetuadas com recurso ao *script* desenvolvido para fins académicos, o *Feixer*, suportado pelo programa *Wolfram Mathematica*. Na existência de tantos outros simuladores de rádio, como o exemplo do *PathLoss* e do *Radio Mobile*, escolheu-se o *Feixer* pela utilidade que este *script* oferece aos alunos que frequentam cadeiras de rádio. Contudo, no caso deste projeto ter uma aplicação prática no futuro, será aconselhável a reformulação de todas as simulações das ligações no *software* que as empresas de antenas disponibilizam, pois poder-se-ão ter resultados distintos de simulador para simulador, isto porque cada fabricante de antenas dispõe do seu próprio simulador que utiliza modelos de propagação mais adequados para o seu sistema, para além de conter as características das suas antenas.

Na ausência do *script* da Google que ajudaria na obtenção das cotas ao longo do percurso, a fim de serem inseridas no *Feixer*, teve-se de recorrer a outras alternativas fáceis e instantâneas na apresentação do traçado do perfil da ligação. Após vários testes em simuladores de diversos fabricantes, o único que permitia a extração de dados do relevo era o *LINKPlanner*, da *Cambium Networks*. Este simulador, para além de permitir a simulação de ligações com base nos seus produtos, oferece a possibilidade da visualização do traçado tendo em conta o tipo de superfície. O simulador permite ainda exportação dos dados do traçado da ligação, após a definição das estações base, para um ficheiro *Excel*. Após os dados estarem no anterior formato do ficheiro, facilmente os dados são trabalhados para a estrutura *.txt* que se deseja, colocando-se as cotas (na segunda coluna, em metros) em função da distância (primeira coluna, em km). Até ao momento, este programa requer apenas um registo do utilizador para possibilitar a visualização do perfil da ligação, não acarretando pagamentos adicionais, nem compra dos seus produtos.

O projetista de ligações deste tipo, para além de reconhecer os melhores percursos e os principais componentes da ligação, deve estar bem familiarizado com os requisitos das frequências de trabalho. A escolha da frequência deve ser cautelosa pois é um dos principais parâmetros que

influenciará o resultado do projeto, tanto a nível de disponibilidade da ligação como a nível de custos financeiros.

5.2.1. Legislação do Sistema Português

Atualmente no sistema português, segundo a entidade reguladora das comunicações em Portugal, a ANACOM, têm-se disponíveis as seguintes gamas de frequência para as comunicações hertzianas [63]:

- **Ponto-ponto ou Ponto-multiponto em faixas de frequências acima de 1 GHz:**

Redes constituídas por ligações unidirecionais e/ou bidirecionais e de serviço ocasional ou de longo prazo. Utilizam canais com espaçamento que variam entre os 250 kHz e os 250 MHz e destinam-se a acomodar redes de feixes hertzianos analógicos ou digitais para transmissão de voz e dados. As faixas de frequências superiores a 1 GHz para este tipo de ligações são detalhadas no documento [64] da ANACOM.

Nesta faixa de frequência inserem-se ainda as duas seguintes redes particulares:

- **Ponto-ponto unidirecional na faixa 1517-1525 MHz (SF/STL):**

Redes de ligações hertzianas estúdio-emissor (STL) planificadas com 300 kHz de espaçamento entre canais, destinadas a acomodar o transporte do sinal de radiodifusão sonoro entre o estúdio e o emissor.

- **Ponto-multiponto na faixa 3400-3800 MHz (FWA):**

Redes de serviço *Fixed Wireless Access* (FWA) que funcionam nas frequências 3400-3800 MHz, com uma arquitetura ponto-multiponto. Esta faixa de frequências é concedida por concurso público a um número limitado de empresas que oferecem redes e serviços de comunicações eletrónicas [63].

Contudo, o Quadro Nacional de Atribuição de Frequências (QNAF) ainda especifica faixas de frequências abaixo de 1 GHz para feixes hertzianos de muito baixa capacidade. Essas faixas são descritas nos seguintes dois pontos:

- **Ponto-ponto ou Ponto-multiponto na faixa 406-430 MHz (SFIM):**

Unidirecionais e/ou bidirecionais, de serviço ocasional ou de longo prazo, que funcionam com espaçamento entre canais de 12,5 kHz ou 25 kHz. É utilizado para a transmissão de um único canal e é designado como Serviço Fixo por Monovia (SFIM) ou Monocanal, sendo as frequências concedidas em regime de partilha e mediante a aprovação do projeto de cada ligação, às estações de redes privadas de telecomunicações [65]. Na utilização das subfaixas (406-410 MHz ou 410-430 MHz) é necessário ter especial atenção à largura de faixa e o modo de aplicação da ligação [9].

- **Ponto-ponto em faixas de frequências inferiores a 30 MHz:**

Existem estações fixas adaptadas para assegurar ligações hertzianas de longo percurso, as quais funcionam na faixa de frequências inferiores a 30 MHz. Têm uma arquitetura

ponto-ponto e podem estabelecer ligações unidirecionais ou bidirecionais com outras estações fixas do território nacional ou exterior. A escolha das frequências para esta faixa de funcionamento depende essencialmente das condições de propagação radioelétrica associadas à ligação.

Nos termos da alínea b) do n.º 1 e do n.º 2 do artigo 9.º do Decreto-lei n.º 151-A/2000, de 20 de julho, estão isentas de licença as estações de pequena potência e curto alcance (*Short Range Devices - SRD*), em várias aplicações e faixas de frequências [66].

As estações SRD só deverão operar sob o regime de “não-interferência e de não-proteção”, não podendo causar interferências prejudiciais em nenhum serviço de radiocomunicações, incluindo serviços licenciados, e não pode ser exigida proteção dos equipamentos contra interferências. Outro regime é o de “não exclusividade e de partilha”.

As faixas de frequências isentas de licença, para fins de ligações ponto a ponto, são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Bandas isentas de licença aplicáveis à feixes hertzianos [66].

Aplicação	Faixas de Frequências	Limites da Potência de Emissão
Transmissão de Dados em Banda Larga	2 400 – 2 483,5 MHz	100 mW p.i.r.e. ²
Sistemas de Acesso Sem Fios / Redes Locais Via Rádio (WAS/RLAN)	5 150 – 5 350 MHz	200 mW p.i.r.e.
	5 470 – 5 725 MHz	1 W p.i.r.e.
Sistemas do Tipo Acesso Fixo de Banda Larga (BFWA)	5 725 – 5 875 MHz	36 dBm p.i.r.e.

A ANACOM informa que, nos sistemas de acesso sem fios ou redes locais via rádio, na faixa dos 5 GHz, devem ser respeitadas as seguintes condições [67]:

- **Faixa 5 150 - 5 350 MHz:** são apenas permitidas utilizações “indoor”. O valor máximo de p.i.r.e. média autorizado é de 200 mW e o valor máximo da densidade de potência para a p.i.r.e. média deve ser limitado a 10 mW/MHz;
- **Faixa 5 470 - 5 725 MHz:** pode ser utilizada tanto em espaços interiores como em espaços exteriores. O p.i.r.e. autorizado é de 1 W, limitado a 50 mW/MHz.

Os sistemas a operar na faixa 5250-5350 MHz e na faixa 5470-5725 MHz devem usar controlo de potência transmitida (TPC), caso contrário, a potência máxima permitida da p.i.r.e. média e o correspondente valor máximo da densidade de potência para a p.i.r.e. média devem ser reduzidos em 3 dB. Os equipamentos, em ambas as faixas, apenas podem ter antenas integrada ou dedicada [67].

² Valor máximo da p.i.r.e. (potência isotrópica radiada equivalente) média – refere-se à p.i.r.e. durante a transmissão do burst que corresponde à maior potência, se for implementado controlo de potência.

A faixa de frequências dos 5725-5875 MHz, conhecida como a faixa dos 5,8 GHz, encontra-se isenta de licenciamento radioelétrico, contudo, está sujeita ao registo prévio das estações junto da ANACOM. As condições técnicas aplicáveis à operação de sistemas BFWA nos 5,8 GHz estão identificadas na Recomendação ECC(06)04 [68].

Segundo a Recomendação ECC(06)04 os equipamentos de BFWA dos 5,8 GHz devem ter implementado sistemas TPC. O TPC tem uma faixa de 12 dB em relação à potência de saída irradiada máxima permitida da estação. O valor médio de p.i.r.e. para esta faixa de frequências depende da arquitetura do sistema, sendo que para sistemas PtP e PtMP o limite é de 36 dBm [69].

5.2.2. Solução na Banda Livre

No seguimento dos projetos desenvolvidos pelo LREC, já anteriormente estudados, tentou-se projetar a rede de *backhaul* por feixes hertzianos sobre bandas não licenciadas, para que o projeto acarrete menos custos anuais, aumentando a sua viabilidade.

Das quatro faixas de frequências presentes na Tabela 5.2, excluiu-se a utilização da faixa dos 2,4 GHz, já que está se encontra numa fase muito congestionada, o que nos iria trazer problemas de interferência na prática. Consequentemente, verificou-se que as faixas de frequências não licenciadas mais atrativas ao projeto, correspondem à faixa dos 5470-5725 MHz e à faixa dos 5725-5875 MHz, pois a potência máxima permitida é muito superior às outras, acomodando as necessidades de ligações de alguns quilómetros. Nas simulações realizadas no *Feixer* ajustou-se as anteriores faixas às frequências 5,4 e 5,8 GHz, respetivamente.

Com as localizações das estações definidas, iniciou-se a verificação dos melhores percursos para interligar as estações de monitorização ao *data center* no LREC. Na impossibilidade de interligar cada estação ao LREC por meio de feixes hertzianos, resolveu-se utilizar as próprias estações de monitorização como *gateway* às ligações, resultando em ligações do tipo ponto-ponto. A escolha pretendia minimizar as distâncias das ligações, verificando-se sempre a desobstrução da linha de vista.

Por conseqüente, a única estação que apresenta linha de vista ao LREC é somente a Estação do Pico do Silva, daí todas as informações terem de passar por esta. Em relação às outras estações, com exceção da estação dos Eiroses, recorreu-se a uma das estações mais elevadas, do Pico do Areeiro, para servir de *gateway*. Assim, a solução inicial requer sete ligações hertzianas para contemplar a rede de monitorização, estando todas as ligações representadas na Figura 5.7.

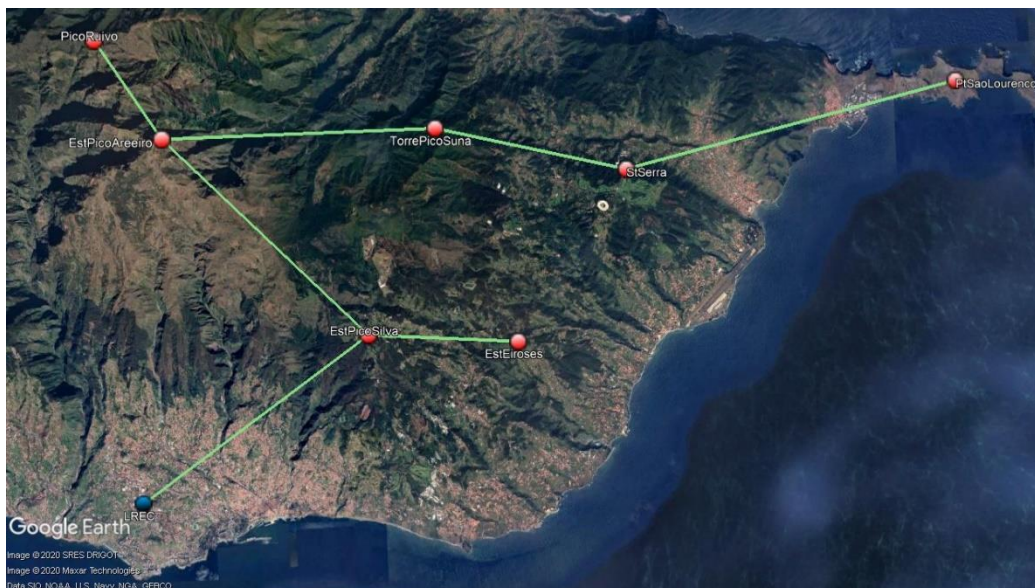


Figura 5.7 – Mapeamento da solução inicial proposta.

Como a maior parte das ligações estão em “série”, a capacidade necessária em cada ligação terá de incrementar a cada salto realizado, de forma a agregar as informações das estações de monitorização. Sendo assim, a ligação ao LREC deverá ter no mínimo uma capacidade de 70 Mbit/s, enquanto que os previstos 10 Mbit/s serão suficientes para a ligação StSerra-PtSaoLourenco ou para EstPicoAreeiro-PicoRuivo ou para EstPicoSilva-EstEiroses. Já a ligação TorrePicoSuna-StSerra requer um débito de 20 Mbit/s para satisfazer a agregação dos dados da estação do Santo da Serra e da Ponta de São Lourenço, e assim sucessivamente para as restantes ligações.

No simulador *Feixer*, a atribuição do ritmo binário da ligação está dependente dos ritmos das hierarquias digitais plesiócronicas e das hierarquias digitais síncronas, que estão presentes na Tabela 2.3. Assim sendo, os ritmos binários que fazem jus às necessidades deste projeto são os 34, 140 e 155 Mbit/s.

Para as ligações LREC-EstPicoSilva e EstPicoSilva-EstPicoAreeiro tentou-se simular as ligações com um canal de 140 Mbit/s enquanto as restantes ligações foram simuladas com um ritmo de 34 Mbit/s. Nas ligações mais curtas da rede optou-se por utilizar a frequência dos 5,4 GHz, enquanto que nas ligações que requerem maior potência, ou seja, as mais longas, utilizou-se a banda dos 5,8 GHz, não utilizando a rede toda na mesma banda, evitando altos níveis de interferência nas estações. Para ajudar a minimizar as interferências de retroalimentação, procurou-se, sempre que possível, não colocar a antena emissora e recetora da estação ao mesmo nível.

Neste projeto, assumiu-se que nas bandas livres, os sistemas terão implementação de TPC, para evitar uma redução da potência de emissão. De forma a minimizar os efeitos de fatores incontroláveis, como é o exemplo de fatores meteorológicos, atribui-se menor percentagem para precipitação. Sendo 50% da indisponibilidade para outras causas, concedeu-se, desta forma, 10% para a indisponibilidade devido à precipitação e os restantes 40% para o equipamento.

No *Feixer* foi possível caracterizar a fiabilidade do equipamento, considerando as avarias por um tempo médio entre acontecimentos. Para tal, a indisponibilidade do equipamento deve cumprir a recomendação da ITU-R. Desta forma, recorreu-se a valores usuais de tempo médios entre avarias do emissor: 120 000 horas (aprox. 14 anos); do desmodulador: 140 000 horas (aprox. 16 anos); do modulador e do recetor: 200 000 horas (aprox. 23 anos). Nestas circunstâncias, definiu-se que o tempo médio para deteção, reparação e reposição de uma avaria demora em média 6 horas.

Nos casos em que a indisponibilidade não cumpria a recomendação do ITU-R, considerando apenas o canal projetado, considerou-se a utilização de um canal de reserva para compensar a falha do outro. A instalação de um canal de reserva implica a existência de um comutador em cada terminal, estando este também vulnerável a avarias. O tempo médio atribuído para este tipo de avaria foi de 90 000 horas.

No eventual caso de não se ter cumprido a recomendação com o canal de reserva, um dos aspetos que ajudaria a cumprir a recomendação, seria a redução do tempo médio de reparação (MTTR), diminuindo o valor das seis horas para, por exemplo, cinco.

O tamanho dos canais utilizados para a simulação na banda dos 5 GHz foi de 20 MHz ou de 40 MHz, seguindo a norma 802.11n, ou até mesmo a norma 802.11.ac. Esta última norma permitia ainda a utilização de canais com maior largura de banda, contudo evitou-se o seu uso para minimizar as interferências entre canais.

A modulação utilizada nas simulações foi maioritariamente sistemas QAM, com recurso a índices de modulação o mais baixo possível, normalmente índices entre 4 e 16, pois índices mais elevados requerem maior qualidade de sinal.

As ligações hertzianas foram simuladas para o pior caso de polarização das ondas eletromagnéticas, a polarização horizontal, pois esta sofre maior atenuação na presença de chuva. Foi escolhido o pior caso, de forma a ser possível a utilização das duas polarizações nesta rede, caso seja necessário.

A nível de atenuação suplementar só se avaliou a atenuação por nuvens ou nevoeiro. Sabe-se que os modelos de atenuação de chuva já têm em conta a atenuação das nuvens. Contudo, devido à grande altitude dos pontos altos da região, verifica-se existência de nuvens abaixo desses pontos, mesmo em dias sem precipitação, como é possível reparar na Figura 5.4. Para além do mais, sendo esta região tropical, ocorre frequentemente o aparecimento de nevoeiro, mesmo sem ser no inverno.

Posto isto, calculou-se ambas as atenuações causadas pelo nevoeiro (Equação 2.17 – a uma temperatura de -10° C) e pelas nuvens (Equação 2.18). Para as ligações acima de cerca de 1 000 metros, onde já ocorre o aparecimento de nuvens, escolheu-se o pior resultado de atenuação entre nuvens e nevoeiro. Abaixo dessa altitude, definiu-se que só existirá o aparecimento de nevoeiro.

Na ausência das condições para se empregar a Equação 2.18 na atenuação causada pelas nuvens, usou-se a expressão associada ao cálculo da atenuação por nevoeiro, tendo o cuidado de definir uma temperatura de zero graus celsius.

Embora se tenha avaliado a atenuação da vegetação, definiu-se que esta não estará presente nas atenuações suplementares, pois esta apresenta altos índices de atenuação mesmo para pequenas distâncias, como é observável na Figura 2.9. Para evitar isso, o processo de escolha da localização e altura das estações, inicialmente realizado, foi sempre atendendo a evitar zonas de florestação dentro do elipsóide de Fresnel da ligação e ao redor das estações. Desta forma, garantiu-se um distanciamento das estações às zonas de vegetação, suscetíveis a incêndios. Caso fossem necessárias outras medidas, a solução passaria por desbastar ou cortar a vegetação.

Consequentemente, os principais parâmetros do projeto a serem cumpridos foram:

- ✓ Respeitar as normas de qualidade e de fiabilidade, conforme as recomendações da ITU-R, procurando o mínimo custo possível;
- ✓ Ritmo de transmissão: 1x34 Mbit/s ou 1x140 Mbit/s;
- ✓ Frequência de transmissão: Banda “5,4 GHz” ou “5,8 GHz”;
- ✓ Potência máxima do emissor: $P_{emax [dBm]} = P.I.R.E_{[dBm]} - G_{antena [dBi]} + A_{cabo [dB]}$;
- ✓ Fator de ruído de recetor: $F_{[dB]} = 7 + 0,1 * f_{[GHz]}$;
- ✓ Margem mínima de segurança mais próxima de 3 dB.

Assim sendo, após várias análises à melhor solução de cada ligação, apresenta-se resumidamente na Tabela 5.3 as características de implementação encontradas, respeitando os parâmetros anteriormente descritos. Na Tabela E.1 e E.2 do Anexo E é complementada a tabela resumo para esta solução com outros dados que caracterizam as ligações.

Tabela 5.3 – Características da solução inicial utilizando bandas livres.

Emissor				Recetor				Frequência [GHz]	Potência Emissão [dBm]	Potência Receção [dBm]	Ritmo Transmissão [Mbit/s]	Largura Banda [MHz]	Modulação	Margem Segurança [dB]
Designação	Antena			Designação	Antena									
	Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]		Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]							
LREC	10	4,5	45,7	EstPicoSilva	16	4,5	45,7	5,8	-10	-46,4	140	40	16 QAM	3,1
EstPicoSilva	30	1,5	36,2	EstPicoAreeiro	12	1,5	36,2	5,8	0,7	-54,8	140	40	16 QAM	2,9
EstPicoSilva	9	0,3	21,6	EstEiросes	3	0,3	21,6	5,4	8,9	-74,7	34	20	4 QAM	3,2
EstPicoAreeiro	10	0,3	21,6	PicoRuivo	3	0,3	21,6	5,4	0	-74,9	34	20	4 QAM	8,8
EstPicoAreeiro	8	0,3	22,2	TorrePicoSuma	13	0,3	22,2	5,8	14	-68,2	34	20	4 QAM	3,2
TorrePicoSuma	13	0,6	27,6	StSerra	3	0,6	27,6	5,4	0	-67,7	34	20	4 QAM	3,8
StSerra	3	1,5	36,2	PtSaoLourenco	3	1,5	36,2	5,8	0	-56,0	34	20	4 QAM	3,2

A ligação StSerra-PtSaoLourenco mesmo com o débito baixo, necessitou de antenas de 5 pés (1,5 metros), pois esta representa a ligação mais comprida da rede, cerca de nove quilómetros. Apesar

deste tamanho das antenas, considerou-se que a implementação destas será válida na rede. Acima deste diâmetro, já se considera irrealizável a utilização destas antenas para os propósitos desta rede, evitando assim, a necessidade de torres reforçadas.

As ligações que requeriam a maior taxa de transmissão foram as que originaram mais problemas, pois para além desse fator, elas eram umas das ligações mais compridas, sendo preciso usar antenas com uma dimensão relativamente grande para este tipo de projeto. Contudo, como é possível observar o assinalado (a vermelho) na anterior tabela, a ligação ao LREC requer antenas de enormes dimensões (4,5 metros). Isto faz com que não se possa aceitar a validade desta ligação com estas características, pois para além de não existir no mercado antenas para estas bandas com esta dimensão, tonar-se-ia impraticável a sua aplicação muito acima do solo.

Deste modo, tentou-se propor outras soluções para a anterior ligação. Inicialmente, recorreu-se à tecnologia de diversidade espacial, com um afastamento entre antenas de cinco metros, contudo, esta solução não nos trouxe benefícios, pois para cumprir as cláusulas e ainda obter uma margem de segurança de 3 dB, ter-se-ia de recorrer a quatro antenas com um diâmetro de 1,8 metros. A tentativa de utilizar diversidade de frequência, com um espaçamento entre canais no máximo de 110 MHz, trouxe-nos piores margens, mesmo utilizando antenas de 1,8 metros. Consequentemente, pode-se concluir que a utilização de diversidade não beneficiará esta ligação.

Posteriormente, na tentativa de solucionar esta mesma ligação, analisaram-se soluções que utilizassem repetidores, tanto passivos como ativos. Após estudar possíveis localizações para a implementação de repetidores entre o LREC e a estação do Pico do Silva, foram encontradas três soluções que ofereciam linha de vista às estações terminais (Figura 5.8). As localizações dos pontos repetidores foram todas determinadas, de forma a não aumentar demasiado a distância das ligações finais.

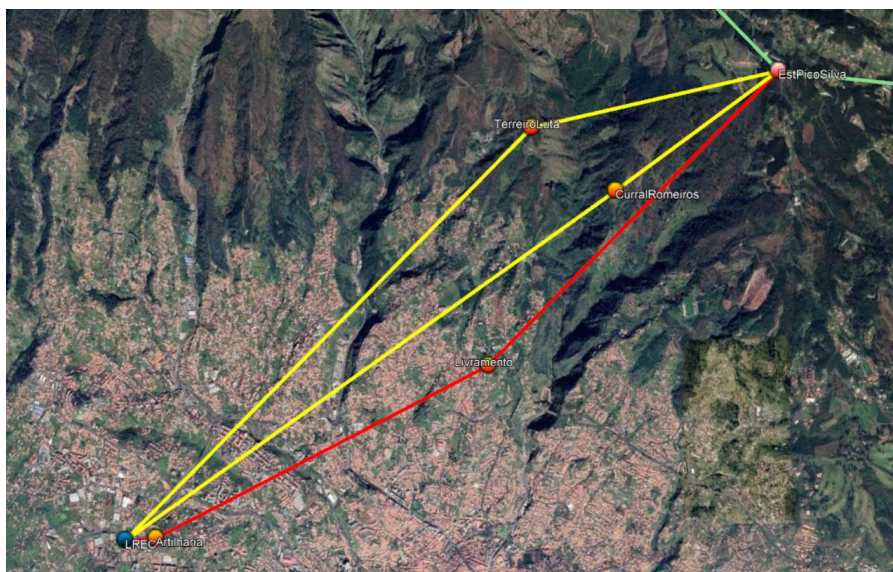


Figura 5.8 – Mapeamento das soluções com repetidores.

Uma dessas soluções, representada a vermelho na anterior figura, requeria ainda um ponto intermédio, localizado no monte da Artilharia do Funchal, para permitir linha de vista com o edifício do

LREC. Nessa ligação, recomendar-se-ia a utilização de um repetidor ativo no Livramento, já que este ponto se encontra quase a meio do trajeto da ligação, e, ainda, um repetidor passivo na Artilharia. Contudo, excluiu-se esta solução, pois tornou-se evidente que seria mais dispendiosa que a solução de diversidade espacial anteriormente mencionada, implicando a utilização de um maior número de antenas e de torres.

Assim, desta forma, estudou-se as outras duas soluções exibidas a amarelo na Figura 5.8, na qual se utilizam pontos no Terreiro da Luta e no Curral dos Romeiros para a alocação de repetidores. Os dados que identificam os quatro pontos repetidores estão mencionados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dados de localização dos repetidores.

Estação	Localização		Cota [m]
	Latitude	Longitude	
Artilharia	32°39'7.20"N	16°56'19.82"W	299,8
Livramento	32°39'58.93"N	16°54'14.90"W	341,6
Curral dos Romeiros	32°40'51.24"N	16°53'26.84"W	805,9
Terreiro da Luta	32°41'10.75"N	16°53'57.59"W	947,3

Numa primeira fase, como estes se encontram mais próximos a uma estação terminal, estudaram-se as respetivas ligações utilizando repetidores passivos. Para tal, implementou-se as mesmas características da respetiva ligação até agora utilizada neste tópico, com antenas de 1,5 m nas estações terminais, definindo o melhor caso possível que um repetidor passivo pode oferecer. Esse caso, corresponde a um repetidor do tipo espelho plano, com uma área efetiva próxima do máximo de área física do espelho – normalmente um espelho plano apresenta um máximo de área física de 35 m² – e com um rendimento de 95%. Porém, a utilização de repetidores passivos não permitiu de forma alguma cumprir as cláusulas, mesmo nas melhores condições.

Consequentemente, definiu-se que os repetidores passariam a ser do tipo ativo, fazendo com que cada salto fosse analisado de forma independente. Nos saltos de menor comprimento das ligações, usou-se a banda dos 5,4 GHz para evitar interferências caso ambos os saltos fossem implementados no 5,8 GHz. Os dados inseridos no *Feixer* para a simulação dos respetivos quatro troços encontram-se detalhados nas Tabela E.3 e E.4 do Anexo E. A Tabela 5.5 apresenta resumidamente algum desses dados mais essenciais que caracterizam cada troço.

Tabela 5.5 – Características da solução inicial utilizando repetidores ativos.

Emissor				Recetor				Frequência [GHz]	Potência Emissão [dBm]	Potência Reção [dBm]	Ritmo Transmissão [Mbit/s]	Largura Banda [MHz]	Modulação	Margem Segurança [dB]
Designação	Antena			Designação	Antena									
	Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]		Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]							
LREC	10	1,5	36,2	TerreiroLuta	4	1,5	36,2	5,8	0,3	-51,4	140	40	16 QAM	3,2
LREC	10	1,5	36,2	CurralRomeiros	10	1,5	36,2	5,8	0,6	-51,8	140	40	16 QAM	2,0
TerreiroLuta	4	0,3	21,6	EstPicoSilva	16	0,3	21,6	5,4	5	-68,2	140	40	16 QAM	3,2
CurralRomeiros	12	0,3	21,6	EstPicoSilva	28	0,3	21,6	5,4	4	-68,2	140	40	16 QAM	3,3

Como se pode verificar pela anterior tabela, a ligação LREC-CurralRomeiros cumpre as cláusulas da ITU-R, mas não permite uma margem de segurança de 3 dB, ao se limitar a utilização de antenas de 1,5 metros, pelo que, se excluiu a possibilidade de utilizar um repetidor no Curral dos Romeiros, e, conseqüentemente, a ligação Curral-EstPicoSilva fica sem efeito.

Desta maneira a única solução possível, com recurso a repetidores, seria a utilização de um repetidor ativo localizado no cume do Terreiro da Luta. Porém, a implementação de um repetidor ativo, originaria um custo acrescido, pois seriam necessários todos os equipamentos passivos, radioelétricos e unidades de alimentação energética, para além de ser necessário um novo abrigo para o equipamento. Desta forma, procedeu-se a um novo estudo, afastando-se, no entanto, do objetivo inicialmente definido, avaliando a ligação em causa com recurso a bandas que requerem licenciamento.

5.2.3. Solução na Banda Licenciada

A gama de frequências utilizada nas ligações hertzianas ponto-ponto, normalmente situa-se entre os 1 e 20 GHz, pelo que se realizou o estudo para as frequências disponíveis pela entidade de autoridade nacional de comunicações nessa faixa. As planificações de frequências disponíveis e respetivos espaçamentos entre canais (b_{orf}) foram extraídos do documento [64] da ANACOM. As planificações na faixa dos 1500 MHz poderão deixar de ser utilizadas após inícios de 2023, pelo que se excluiu essa faixa do estudo [64].

Desta maneira, procedeu-se ao cálculo da largura de banda para cada espaçamento entre canais da respetiva frequência através da equação

$$b_{rf} = \frac{b_{orf}}{(1 + \beta)}, \quad (5.1)$$

com um fator de excesso de banda dos filtros $\beta = 0,1$.

Obtidos os valores das larguras de banda realizou-se o cálculo dos índices de modulação, através da Equação 2.2. Calculado os valores de m , arredondou-se o valor por excesso para as ordens

disponíveis na modulação PSK e modulação QAM. As taxas relativas à utilização de frequências foram determinadas a partir do simulador [70] disponível na página da ANACOM, para uma distância de 7,655 km, correspondente à distância da ligação LREC-EstPicoSilva. No simulador foi definido que se pretendia somente um canal bidirecional cocanal.

O resultado de todos os cálculos anteriormente descritos encontra-se na Tabela 5.6, onde são destacadas as larguras de bandas mais atrativas a nível de taxação. Assim, taxas em torno dos milhares de euros foram assinaladas a violeta claro, já a ciano foram assinaladas as taxas em torno de dois milhares. Devido ao elevado débito requisitado, as planificações com uma largura de banda pequena, necessitavam da utilização de ordens de modulação muito elevadas, acima de 64, pelo que se excluiu essas planificações no estudo, dado que, em ordens de modulação muito elevadas a relação sinal/ruído necessária torna-se muito elevada, embora o seu custo de licenciamento seja inferior. Como a faixa dos 2 GHz só permite a utilização de canais de baixa largura, não foi possível o seu estudo, pela razão mencionada.

Tabela 5.6 – Gama de frequências disponíveis e seus custos associados.

Frequência [GHz]	b_{off} [MHz]	b_{rf} [MHz]	m	Modulação	Taxa Anual [€]
6	29,65	26,95	36,60	64QAM	2 695,65
	59,30	53,91	6,05	16QAM / 8PSK	5 391,29
	30	27,27	35,10	64QAM	2 727,47
	40	36,36	14,42	16QAM / 16PSK	3 636,62
7	28	25,45	45,25	64QAM	2 545,64
	56	50,91	6,73	16QAM / 8PSK	5 091,27
8	28	25,45	45,25	64QAM	2 545,64
	29,65	26,95	36,60	64QAM	2 695,65
	56	50,91	6,73	16QAM / 8PSK	5 091,27
	59,3	53,91	6,05	16QAM / 8PSK	5 391,29
11	28	25,45	45,25	64QAM	2 545,64
	40	36,36	14,42	16QAM / 16PSK	3 636,62
	56	50,91	6,73	16QAM / 8PSK	5 091,27
13	28	25,45	45,25	64QAM	1 181,41
	56	50,91	6,73	16QAM / 8PSK	2 362,82
15	28	25,45	45,25	64QAM	1 181,41
	56	50,91	6,73	16QAM / 8PSK	2 362,82
18	27,5	25	48,50	64QAM	589,67
	55	50	6,96	16QAM / 8PSK	1 179,34
	110	100	2,64	4QAM / 4PSK	2 358,67

O caso de 27,5 MHz na banda dos 18 GHz não foi analisado, mesmo sendo a que apresentava a taxa anual mais inferior, pois previu-se que dificilmente seria possível cumprir as cláusulas, principalmente as cláusulas relacionadas com a chuva, sem requerer antenas de muito maior porte.

Entre a faixa de frequências de 4 e 11 GHz, a taxa anual é o mesmo valor para as larguras de banda semelhantes, pelo que, já se pode concluir à partida que as bandas de 6 ou de 7 GHz trariam mais benefícios na sua utilização que as bandas superiores, pois com o aumento da frequência, a qualidade da ligação ficaria comprometida, de um modo geral, a um aumento de atenuações, a uma menor potência de emissão e um maior ruído no recetor. De qualquer forma, todas essas faixas assinaladas entraram no estudo realizado no *Feixer*.

Após sinalização das bandas que ofereciam as taxas mais baixas, procedeu-se à simulação de vários cenários. Os cenários variaram conforme a frequência, a largura de banda, a dimensão das antenas e a modulação, mas mantiveram-se todos os outros parâmetros da ligação, com exceção da potência emitida e da atenuação suplementar. Esses cenários simulados encontram-se detalhados na Tabela E.5 do Anexo E.

Alguns dos objetivos a serem implementados para a solução que requer licenciamento, passaram a ser:

- ✓ Ritmo de transmissão: 1x140 Mbit/s;
- ✓ Diâmetro máximo das antenas: 1,5 metros;
- ✓ Potência máxima do emissor: $P_{emax} [W] = \frac{6}{f_{[GHz]}^{1,2}}$;
- ✓ Fator de ruído de recetor: $F_{[dB]} = 7 + 0,1 * f_{[GHz]}$.

Depois de se terem todos os resultados das simulações, fez-se uma filtragem, seleccionando os casos que apresentavam a melhor margem de segurança e que ofereciam menor custo de implementação, bem como de taxa anual, para cada banda de frequências. Obtiveram-se assim os seguintes casos descritos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Casos favoráveis à implementação da ligação LREC-EstPicoSilva, utilizando bandas licenciadas.

Frequência [GHz]	Largura Banda [MHz]	Diâmetro Antenas [m]	Ganho Antenas [dBi]	Modulação	Margem Crítica [dB]	Margem Segurança [dB]	Taxa Anual [€]
6	29,65	0,9	32,0	64 QAM	18,6	8,2	2 695,65
7	28	0,9	33,4	64 QAM	17,3	7,6	2 545,64
8	28	0,9	34,5	64 QAM	15,0	6,6	2 545,64
11	28	0,9	37,3	64 QAM	7,1	3,1	2 545,64
13	28	1,2	41,3	64 QAM	14,5	6,4	1 181,41
	56	0,9	38,8	8 PSK	18,9	9,9	2 362,82
15	56	0,9	40,0	8 PSK	10,9	6,7	2 362,82
18	55	1,2	44,1	8 PSK	3,8	3,8	1 179,34

De entre as antenas de 0,9 metros, selecionou-se a banda que apresentava maior margem de segurança, que por sua vez, para além de necessitar de um tipo de modulação mais simples, também apresentava o menor valor de taxa dos dois milhares de euros, obtendo-se a banda de 56 MHz na faixa dos 13 GHz. Contudo, verificou-se que mesmo investindo, inicialmente, no projeto por antenas de maior dimensão, a faixa dos 18 GHz apresentava uma solução que permitia reduzir as taxas anuais a metade do valor.

Desta forma, concluiu-se que a melhor solução alcançada neste estudo de bandas licenciadas corresponde à transferência dos dados numa ligação à frequência de 18 GHz, com uma largura de banda para a transmissão de 55 MHz e utilizando a modulação 8 PSK.

Uma vez que todas as soluções apresentadas até ao momento não constituem a melhor solução possível procedeu-se, de seguida, ao estudo de uma solução realizável, que demonstra acarretar menos custos associados.

5.2.4. Solução Proposta – Banda Livre com Redundância

Uma solução plausível para se cumprirem as cláusulas das ligações, sem requerer bandas licenciadas nem repetidores, passa pela utilização de vários canais de relativamente baixo débito e não pelo uso de só um canal de elevado débito.

Para além do mais, esta solução partiu da reformulação da solução inicial apresentada, onde, o esquema de rede inicialmente sugerido ostentava uma fragilidade de disponibilidade na monitorização. Na falha de uma ligação, todos os dados de monitorização que “passavam” por esta ficavam comprometidos, constituindo um grande risco, pois por exemplo, se a ligação LREC-EstPicoSilva falhasse, toda a rede de monitorização ficaria comprometida.

Dessa forma, propôs-se que na rede de *backhaul* deveria constar redundância nas ligações hertzianas. Devido ao esquema que a solução inicial apresentava, verificou-se que a implementação da rede numa arquitetura em anel seria aquela que seria mais vantajosa e a que mais se adequava, permitindo total redundância em todas as ligações. Essa estrutura em anel da rede é observável na Figura 5.9.

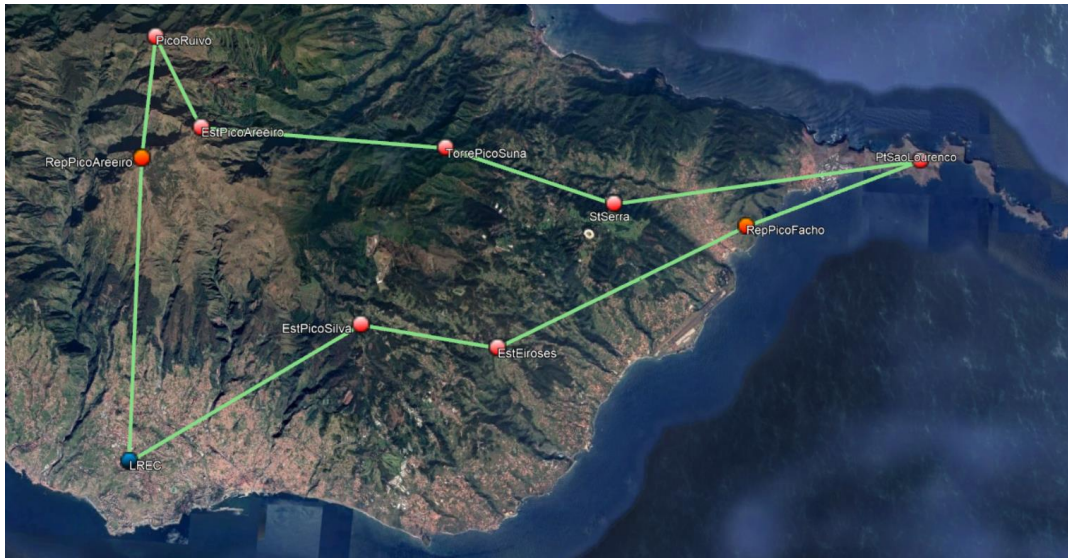


Figura 5.9 – Mapeamento da solução proposta com redundância.

Para alcançar essa redundância foi necessário implementar dois repetidores ativos, um na zona do Pico do Areeiro (RepPicoAreeiro – 32°43'39.29"N, 16°56'34.62"W) e outro entre a estação dos Eiroses e da Ponta de São Lourenço, localizado na estação radioelétrica do Pico do Facho em Machico (RepPicoFacho – 32°43'27.08"N, 16°45'32.44"W).

Embora seja possível obter linha de vista desobstruída entre a estação EstEiroses e PtSaoLourenco, não foi possível utilizar uma ligação direta, devido ao seu comprimento elevado para este tipo de bandas, recorrendo-se então à colocação de um repetidor ativo no Pico do Facho. Neste caso, aproveitou-se a estrutura da estação existente para a colocação do repetidor. A respetiva ligação RepPicoFacho-PtSaoLourenco foi, ao contrário de todas as outras, classificada como percurso costeiro, devido à presença de mar na maior parte da ligação. Já o repetidor no Pico do Areeiro foi colocado, de forma, a obter-se linha direta ao *data center* LREC e, ainda, à estação de monitorização do Pico Ruivo.

Como as ligações da costa norte já podiam transitar pela estação do Pico Ruivo e, posteriormente, pelo repetidor adjacente, a ligação EstPicoSilva-EstPicoAreeiro inicialmente projetada já não faria sentido, daí ter sido retirada nesta solução.

Outra vantagem, ao tornar a rede redundante, foi a possibilidade de “alívio de carga” na ligação LREC-EstPicoSilva, pois poder-se-á definir que os dados de monitorização das estações a Norte dirigem-se nativamente pelo RepPicoAreeiro. Já os dados da costa Sul poderão ser transmitidos diretamente até ao LREC pela ligação LREC-EstPicoSilva, permitindo um equilíbrio na distribuição da informação. Então, no caso de falha de uma ligação, os dados são transmitidos no outro sentido da rede anelar.

Consequentemente, todas as ligações estudadas na solução inicialmente apresentada na banda livre, tiveram de ser reformuladas, isto porque, os dimensionamentos das ligações tiveram de ser realizados tendo em conta a redundância na rede *backhaul*. Assim, as ligações que requeriam os

débitos mais baixos, já tiveram de ser preparadas para suportar um débito muito mais elevado, o respetivo débito máximo (100 Mbit/s) definido para esta rede de monitorização para incêndios.

Desta forma, em substituição do canal de 140 Mbit/s, passou-se à utilização de três canais de 34 Mbit/s, totalizando um débito de cerca 102 Mbit/s, satisfazendo a condição inicial definida de 100 Mbit/s. Como visto na solução inicial, o uso de canais de 34 Mbit/s, satisfaz mais facilmente o cumprimento das cláusulas do que de canais de maior débito.

Assim sendo, os parâmetros finais a serem cumpridos para a solução proposta tornaram a ser:

- ✓ Respeitar as normas de qualidade e de fiabilidade, conforme as recomendações da ITU-R, procurando o mínimo custo possível;
- ✓ Ritmo de transmissão: 3x34 Mbit/s ou 1x140 Mbit/s;
- ✓ Diâmetro máximo das antenas: 1,5 metros;
- ✓ Frequência de transmissão: Banda “5,4 GHz” ou “5,8 GHz”;
- ✓ Potência máxima do emissor: $P_{emax [dBm]} = P.I.R.E_{[dBm]} - G_{antena [dBi]} + A_{cabo [dB]}$;
- ✓ Fator de ruído de recetor: $F_{[dB]} = 7 + 0,1 * f_{[GHz]}$;
- ✓ Margem mínima de segurança mais próxima de 3 dB.

Para as ligações de curto alcance, como é o exemplo da ligação PicoRuivo-EstPicoAreeiro, não foi necessário o uso de canais de 34 Mbit/s, pois, como se pode verificar na Tabela 5.3, esta ligação apresentava uma margem de segurança para além do essencial, mesmo utilizando a menor antena e, ainda, tendo uma potência de emissão inferior à potência de emissão máxima. Assim sendo, a utilização de apenas um canal de 140 Mbit/s permitiria minimizar as interferências com a ligação vizinha que apresenta a mesma banda de frequência, como é o caso da ligação RepPicoAreeiro-PicoRuivo.

Em suma, toda a caracterização das ligações para a solução proposta final da rede que serviria de *backhaul* ao sistema de monitorização de incêndios na costa Este, deve seguir os parâmetros enunciados na Tabela 5.8 e Tabela 5.9. Consequentemente, os respetivos resultados obtidos também estão descritos nas mesmas tabelas.

Tabela 5.8 – Características detalhadas da proposta final com redundância.

Emissor					Recetor					Distância [km]	Coeficiente Co	Frequência [GHz]	Polarização	Aten. Obstáculos [dB]	Aten. Atmosférica [dB]	Aten. Hidrometeoritos [dB]
Designação	Antena			Aten. Cabos [dB]	Designação	Antena			Aten. Cabos [dB]							
	Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]			Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]								
LREC	10	0,9	31,7	0,79	EstPicoSilva	16	0,9	31,7	1,03	7,7	3,5	5,8	H	0	0,09	1,61
EstPicoSilva	9	0,3	21,6	0,80	EstEiroses	3	0,3	21,6	0,54	3,9	8	5,4	H	0	0,04	0,70
EstEiroses	6	1,0	32,7	0,63	RepPicoFacho	6	1,0	32,7	0,63	8,1	3,5	5,8	H	0	0,10	1,67
RepPicoFacho	4	0,9	31,1	0,59	PtSaoLourenco	4	0,9	31,1	0,59	5,6	3,5	5,4	H	0	0,06	0,95
LREC	12	1,2	34,2	0,87	RepPicoAreeiro	4	1,2	34,2	0,55	8,4	3,5	5,8	H	0	0,10	1,72
RepPicoAreeiro	4	0,6	27,6	0,59	PicoRuivo	4	0,6	27,6	0,59	3,5	10,5	5,4	H	0	0,04	0,65
PicoRuivo	3	0,3	21,6	0,54	EstPicoAreeiro	10	0,3	21,6	0,84	3,0	10,5	5,4	H	0	0,03	0,56
EstPicoAreeiro	8	0,3	22,2	0,71	TorrePicoSuma	13	0,3	22,2	0,91	6,8	10,5	5,8	H	0	0,08	1,47
TorrePicoSuma	13	0,6	27,6	0,96	StSerra	4	0,6	27,6	0,59	5,1	6	5,4	H	0	0,06	0,88
StSerra	3	1,5	36,2	0,52	PtSaoLourenco	3	1,5	36,2	0,52	9,3	3,5	5,8	H	0	0,11	1,83

Tabela 5.9 – Características detalhadas da proposta final com redundância (continuação).

Emissor	Recetor													
Designação	Designação	Aten. Nuvens [dB]	Aten. Nevoeiro [dB]	Aten. Suplementar [dB]	Reflexões p_s/p_d [dB]	P.I.R.E [dBm]	Potência Emissão [dBm]	Potência Receção [dBm]	Ritmo Transmissão [Mbit/s]	Largura Banda [MHz]	Modulação	Fator Ruído [dB]	Margem Segurança [dB]	Margem Crítica [dB]
LREC	EstPicoSilva	0,56	0,17	0,56	$-\infty$	36	5	-59,4	34	20	4 QAM	7,58	3,1	7,2
EstPicoSilva	EstEiroses	0,61	0,08	0,61	-11,8	30	8,9	-74,7	34	20	4 QAM	7,54	3,2	7,4
EstEiroses	RepPicoFacho	-	0,18	0,18	$-\infty$	36	3,7	-58,4	34	20	4 QAM	7,58	3,0	7,0
RepPicoFacho	PtSaoLourenco	-	0,11	0,11	$-\infty$	30	-2	-63,2	34	20	4 QAM	7,54	3,7	8,5
LREC	RepPicoAreeiro	0,36	0,19	0,36	-20,5	36	1	-58,1	34	20	4 QAM	7,58	3,3	7,6
RepPicoAreeiro	PicoRuivo	0,05	0,07	0,07	$-\infty$	30	0	-64,1	140	40	16 QAM	7,54	4,5	7,2
PicoRuivo	EstPicoAreeiro	0,04	0,06	0,06	$-\infty$	30	7	-67,9	140	40	16 QAM	7,54	3,1	3,4
EstPicoAreeiro	TorrePicoSuma	0,55	0,15	0,55	-27,0	36	14	-68,2	34	20	4 QAM	7,58	3,2	7,5
TorrePicoSuma	StSerra	0,07	0,10	0,10	-22,7	30	0	-67,7	34	20	4 QAM	7,54	3,8	8,7
StSerra	PtSaoLourenco	-	0,21	0,21	$-\infty$	36	0	-56,0	34	20	4 QAM	7,58	3,2	7,5

6. Conclusões

Os feixes hertzianos há muito que são utilizados nas telecomunicações. Com o avanço da tecnologia e o aparecimento de novas soluções, tornou-se crucial adaptar e aperfeiçoar estes sistemas de forma a dar continuidade à sua utilização.

Atualmente, os feixes constituem, essencialmente, uma alternativa de *backhaul* competitiva face às fibras óticas para as redes móveis. Apesar do crescimento das fibras óticas, as microondas conseguem ter um maior volume de instalação, prevendo-se que, até 2023, 40% das estações de todo o mundo estejam conectadas por microondas. Na escolha da rede *backhaul* é importante considerar diversos fatores, nomeadamente os relacionados com os custos como o *Total Cost of Ownership*, sendo este, geralmente, mais baixo do que o praticado nas fibras óticas, podendo este fator constituir uma grande vantagem em determinadas situações.

A realidade destes sistemas de comunicação varia consoante o país em análise, podendo ser muito utilizados ou não. No Arquipélago da Madeira, existiam, em 2019, pouco mais de metade do número de ligações licenciadas em 2009, havendo um claro desuso destas ligações nos últimos anos. A distribuição destas ligações sofreu grandes alterações entre as entidades que as detinham a partir do momento em que começaram a dar prioridade às fibras óticas, no entanto, existem ainda feixes de diferentes frequências a serem utilizados.

A realidade inicial em que mais de metade das ligações existentes pertenciam à Vodafone, deu lugar, em 2019, a um cenário em que esta apenas detinha uma pequena parte das ligações, uma vez que uma grande parte destes feixes foram desativados, passando a ser a MEO a maior detentora de feixes hertzianos na região.

A diminuição dos feixes hertzianos ocorreu de uma forma generalizada em todas as entidades, salvo exceções da RTP, NAV e NOS, onde, nesta última, se verificou um crescimento mais expressivo. Salientar ainda que os feixes que a ONITelecom detinha, foram desativados na sequência da cessação de serviços por parte desta empresa na região em 2018.

Existem ainda várias entidades que recorrem à utilização dos feixes hertzianos como é o caso da CMF que possui uma rede privada de comunicações entre as suas várias delegações, dispondo de 31 ligações ponto-ponto. A EEM dispõe ainda de uma rede de telecomando e de rádio móvel com cobertura de toda a região que é ainda suportada por feixes hertzianos embora o seja maioritariamente também por fibra ótica. Já o LREC adotou os feixes como uma grande vantagem na implementação de sistemas de monitorização de ribeiras e de zonas suscetíveis a incêndios, conseguindo um baixo custo de manutenção anual ao utilizarem bandas livres.

Tendo em conta a elevada suscetibilidade de alguns tipos de sistemas de telecomunicações a eventos catastróficos, é urgente estudar e propor novas soluções. Ao nível dos incêndios e, tendo em conta, as zonas de maior suscetibilidade incendiária, procurou-se criar uma rede de telecomunicações por feixes hertzianos com o intuito de complementar a falta de monitorização de incêndios na zona Este da ilha, já realizada noutras costas pelo LREC. Desta forma, conseguiu-se desenvolver um sistema,

em feixes hertzianos, que permitisse suportar a transmissão de dados obtidos na detecção de episódios de incêndios florestais, permitindo uma atuação mais rápida e eficaz, na luta pela diminuição das consequências.

Primeiramente, em relação ao pequeno estudo realizado à suscetibilidade incendiária na costa Este, conseguiu-se tirar proveito das estruturas das estações existentes para a definição de bons pontos de monitorização, reduzindo, assim, custos em novas torres metálicas. Consequentemente, verificou-se que a altura das torres, para o enquadramento de visualização, podia ser tanto maior conforme desejada, contudo, um aumento de poucos metros não favorecia significativamente uma maior área de cobertura visual. Já uma altura abaixo da definida, poderia conduzir a muitas mais zonas de sombra.

Tendo em vista o cumprimento do objetivo principal, estudaram-se várias alternativas, procurando projetar uma rede de *backhaul* sobre bandas não licenciadas numa fase inicial. Obteve-se um bom resultado ao testar nessas bandas, cumprindo-se as cláusulas e a margem mínima de segurança, contudo, a implementação de uma ligação não seria viável, sem se ter de recorrer a um custo adicional derivado da necessidade de um repetidor ativo. Além do mais, nem o uso de diversidade espacial ou por frequência permitiria atingir os objetivos inicialmente traçados.

A utilização de bandas não licenciadas fica, no entanto, sempre limitada as imposições que ANACOM decreta, pelo que, a sua utilização em ligações de grande comprimento não era benéfica, principalmente quando se requisitavam grandes débitos de transmissão.

O estudo da ligação em causa sobre bandas que requerem licenciamento foi uma contraproposta à anterior solução. Embora se tenha previsto que as bandas licenciadas mais baixas trariam melhores resultados, devido à menor influência de atenuações, o resultado final que indicava a melhor solução contrapôs essa previsão. Essa contraposição deveu-se ao facto da banda de 18 GHz oferecer uma taxa anual mais reduzida que todas as outras bandas e ainda permitir a utilização de ordem de modulação tão baixa, favorecendo o cumprimento de todas as cláusulas.

A solução com bandas licenciadas tornava viável a sua implementação, porém o cliente estaria sempre dependente de taxas anuais. Assim quis-se descartar essa hipótese para ser possível amortizar o investimento realizado inicialmente em poucos anos.

Consequentemente, no culminar deste trabalho, propôs-se uma solução final ideal para as funcionalidades que o projeto requeria. A solução final partiu assim, essencialmente, da rede hertziana inicialmente projetada, mas com um grande melhoramento na integridade da rede. Isto porque foi possível redesenhar a rede para ter redundância, neste caso em anel, com recurso a dois repetidores ativos. É perceptível que esta solução ficaria mais cara que a solução inicial, contudo, ao menos é salvaguardada a disponibilidade da rede de monitorização em caso de uma ligação ponto-ponto “perder-se”. A redundância foi realizada apenas ao nível da rede *backhaul* hertziana, uma vez que os sistemas de monitorização não foram alvo de estudo nem a sua redundância.

Ao contrário da solução inicial na banda livre, mesmo sendo necessário o mesmo débito em toda a rede redundante, desta vez foi possível obter melhores resultados. Isto verificou-se devido a se

ter recorrido a vários canais de mais baixo débito, em vez de um único canal de débito muito superior, com exceção das duas ligações mais curtas. Em contrapartida, a escolha do equipamento radioelétrico terá em conta o requisito de conseguir a emissão de vários canais.

Em suma, a utilização da banda livre neste projeto, segundo a solução proposta final, permitiu corresponder aos requisitos impostos, e, ainda a longo prazo, traz grandes vantagens ao nível de custos, pelo que é essencial respeitar as limitações impostas pela autoridade controladora, de forma a minimizar as interferências que possam causar, evitando a cessão dessas ligações pela autoridade.

Para finalizar, fazer referência a uma das maiores limitações encontradas no desenvolvimento desta investigação. Tendo em vista o cumprimento do objetivo principal deste trabalho, era essencial conhecer a realidade dos feixes hertzianos na região nos últimos anos, pelo que havia a necessidade de se obterem dados sobre a rede de feixes existente no arquipélago. Surgiu assim a necessidade de deslocação à principal entidade, ANACOM, que dispunha destes dados de forma a pedir o acesso a estes, sendo depois necessária a deslocação às entidades que tinham redes de feixes privadas. Só assim, foi possível reunir o maior número de dados para posterior análise, uma vez que os dados nesta área são muitas vezes confidenciais e não providenciados sem o devido pedido e autorização de cedência dos dados para fins académicos.

6.1. Trabalhos Futuros

Tendo em conta o trabalho realizado, propõe-se as seguintes sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros nesta área, designadamente:

- Analisar se os feixes hertzianos das entidades de telecomunicações estão sempre em utilização, ou se alguma dessas ligações são só usadas para redundância a outro meio de comunicação;
- Realizar estudos utilizando as funcionalidades da modulação adaptativa, tirando proveito da capacidade de transmissão conforme o tempo na região;
- Verificar os resultados utilizando os simuladores dos fabricantes do equipamento, contando com aspetos adicionais, como a influência do sinal na proximidade de construções e vegetação, caso haja implementação real da rede de *backhaul* sugerida;
- Verificar a influência das chamas dos incêndios, ou até mesmo das colunas de fumo, nas ligações de banda livre, verificando os níveis de degradação do sinal;
- Intercalar as redes de feixes de entidades existentes com a rede de monitorização de incêndios. A monitorização constante da qualidade dessas ligações poderá fornecer dados da presença de um incêndio na linha de vista destas, pois, conforme as circunstâncias, poderá haver variação do nível de sinal;
- Realizar a análise de custos iniciais, *Capital Expenditures* (CAPEX), associados à construção do sistema e os custos associados a encargos de exploração ao longo do tempo de vida do projeto, o *Operational Expenditures* (OPEX), da solução proposta.

Referências

- [1] C. Salema, Feixes Hertzianos, 3ª ed., IST Press, 2011.
- [2] ANACOM, “Medidas de Proteção e Resiliência de Infraestruturas de Comunicações Eletrónicas - Relatório do Grupo de Trabalho dos Incêndios Florestais,” 2018.
- [3] ANACOM, “Incêndios Florestais - Medidas de Proteção e Resiliência de Infraestruturas de Comunicações Eletrónicas,” 2017.
- [4] ANACOM, “Serviço fixo. Definições genéricas,” 2012.
- [5] M. J. M. Leitão, “Sistemas por Feixe Hertziano, Sistemas de Telecomunicações II,” FEUP.
- [6] CommScope, “Microwave Communication Basics. The Theory, Practices and Technologies that Link the Wireless Word”.
- [7] CableFree, “Class 4 Microwave Antennas. What is a Class 4 Microwave Antenna?,” Fevereiro 2018. [Online]. Available: <https://www.microwave-link.com/microwave/class-4-microwave-antennas/>. [Acedido em Dezembro 2019].
- [8] P. Queluz e F. Pereira, “Feixes Hertzianos, Sistema de Telecomunicações,” IST.
- [9] ANACOM, “Serviço fixo. Consignação de frequências - faixas de frequências e planificações de frequências,” 2015.
- [10] D. R. Smith, Digital Transmission Systems, 3ª ed., Springer Science+Business Media New York, 2004.
- [11] Microwave Link, “QAM Modulation for Microwave Links,” 2015. [Online]. Available: <https://www.microwave-link.com/microwave/qam-modulation-for-microwave-links/>. [Acedido em Julho 2019].
- [12] J. Donovan, “It’s Time for You to Understand Microwave Backhaul Infrastructure,” CommScope, Outubro 2016. [Online]. Available: <https://www.commscope.com/Blog/Its-Time-for-You-to-Understand-Microwave-Backhaul-Infrastructure/>. [Acedido em Setembro 2019].
- [13] CableFree, “Microwave Technology,” [Online]. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/microwave/>. [Acedido em Agosto 2019].
- [14] CableFree, “MMW: CableFree 10Gbps Wireless Links,” [Online]. Available: <https://www.cablefree.net/cablefree-millimeter-wave-mmw/10g/>. [Acedido em Agosto 2019].

- [15] J. A. Azevedo e F. E. Santos, "Propagação em Ambientes Florestais," Universidade da Madeira, Funchal, 2008.
- [16] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, 2ª ed., John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [17] S. R. Saunders e A. A. Zavala, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2ª ed., John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [18] M. A. Weissberger, An Initial Critical Summary of Models for Predicting the Attenuation of Radio Waves by Trees, Department of Defense Electromagnetic Compatibility Analysis Center, 1982.
- [19] Y. S. Meng, B. C. Ng e Y. H. Lee, "Empirical Near Ground Path Loss Modeling in a Forest at VHF and UHF Bands," Maio 2009.
- [20] COST 235, "Radiowave Propagation Effects on Next Generation Fixed-services Terrestrial Telecommunications Systems," 1996.
- [21] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R P.341-6, The concept of transmission loss for radio links," Genebra, 2016.
- [22] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R P.676-11, Attenuation by atmospheric gases," Genebra, 2016.
- [23] J. Figanier e C. Fernandes, Aspectos de Propagação na Atmosfera, 2003.
- [24] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R PN.837-1, Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling," Genebra, 1994.
- [25] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R P.840-8, Attenuation due to clouds and fog," Genebra, 2019.
- [26] J. S. Seybold, Introduction to RF Propagation, John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [27] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R P.530-17, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," Genebra, 2017.
- [28] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R P.530-8, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," Genebra, 1999.
- [29] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R F.1093-1, Effects of multipath propagation on the design and operation of line-of-sight digital radio-relay systems," Genebra, 1997.

- [30] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R F.1668-1, Error performance objectives for real digital fixed wireless links used in 27 500 km hypothetical reference paths and connections," Genebra, 2007.
- [31] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R F.1605-0, Error performance and availability estimation for synchronous digital hierarchy terrestrial fixed wireless systems," Genebra, 2009.
- [32] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R F.557-5, Availability objective for radio-relay systems over a hypothetical reference digital path," Genebra, 2014.
- [33] Ericsson , "Ericsson Microwave Outlook," Suécia, 2018.
- [34] Ericsson, "Trends And Needs In The Microwave Industry - Ericsson Microwave Outlook," Suécia, 2017.
- [35] Microwave Link, "Current Trends in Microwave Backhaul," Fevereiro 2018. [Online]. Available: <https://www.microwave-link.com/microwave/current-trends-in-microwave-backhaul/>. [Acedido em Setembro 2019].
- [36] Huawei Technologies, "Huawei Microwave & mm-Wave Whitepaper," 2016.
- [37] Ericsson, "Ericsson Microwave Outlook," Suécia, 2019.
- [38] R. Lombardi, N. Zein, M. Frecassetti e P. Agabio, "Evolution of Fixed Services for wireless backhaul of IMT 2020 / 5G," Genebra, 2019.
- [39] P. Nava, "IMT Backhaul (including High Altitude Platform Stations)," São Petersburgo, 2018.
- [40] Huawei Technologies, "Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technology," 2019.
- [41] CableFree, "XPIC – Cross Polarization Interference Cancellation," [Online]. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/microwave/xpic-cross-polarization-interference-cancellation/>. [Acedido em Dezembro 2019].
- [42] Mimoso Networks, "Datasheet Mimoso B24 - Reliable Unlicensed Gigabit Performance B24 Point-to-Point Backhaul".
- [43] RADWIN, "RADWIN 2000 Point-to-Point," [Online]. Available: <https://www.radwin.com/ptp-radwin-2000/>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [44] Ubiquiti Networks, "GPS Sync Design Guide," 2017.
- [45] Divisão de Sistemas de Informação Câmara Municipal do Funchal, *Infraestrutura Wireless da Câmara Municipal do Funchal*, 2019.

- [46] Laboratório Regional de Engenharia Civil, “Projeto MonitorizaRibeiras,” [Online]. Available: <http://www.lrec.pt/?m=5>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [47] Exame Informática, “Madeira estreia em outubro sistema de alerta de enxurradas,” 9 Outubro 2014. [Online]. Available: <https://visao.sapo.pt/exameinformatica/noticias-ei/mercados/2014-10-09-Madeira-estrela-em-outubro-sistema-de-alerta-de-enxurradas/>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [48] Wavecom, “Case Study - Monitorização das Ribeiras da Madeira,” 2015.
- [49] Laboratório Regional de Engenharia Civil, “Resumo do Projeto MonitorizaRibeiras,” [Online]. Available: <http://www.lrec.pt/?m=5&s=1>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [50] P. Pinto, “MonitorizaRibeiras – Monitorização Automática de Ribeiras,” *Empresas Hoje*, 25 Setembro 2014. [Online]. Available: <https://empresashoje.pt/informacao/eventos/projeto-monitorizaribeiras-monitorizacao-automatica-de-ribeiras/>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [51] Laboratório Regional de Engenharia Civil, “Sistema de Comunicações,” [Online]. Available: <http://www.lrec.pt/?m=5&s=1>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [52] F. J. Cardoso, “Sistema de Alerta,” *Diário de Notícias Madeira*, pp. 8-9, 3 Julho 2019.
- [53] Laboratório Regional de Engenharia Civil, “Aspetos Tecnológicos sobre a Prevenção de Riscos Naturais (casos práticos do SAARAM e SDIFRAM),” 2019.
- [54] Empresa da Electricidade da Madeira, “Telecomunicações,” 20 Dezembro 2019. [Online]. Available: <https://www.eem.pt/pt/conteudo/sistema-eletrico/transporte/telecomunicacoes/>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [55] EllaLink, “A EllaLink e a EMACOM formam parceria para trazer a ligação de última geração para a Madeira,” 3 Abril 2019. [Online]. Available: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/04/03/1796028/0/pt/A-EllaLink-e-a-EMACOM-formam-parceria-para-trazer-a-liga%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%BAltima-gera%C3%A7%C3%A3o-para-a-Madeira.html>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [56] Instituto Superior de Agronomia, “Proposta Técnica para o Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios”.
- [57] Instituto Superior de Agronomia, “Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios,” 2006.
- [58] A. A. A. Alkhatib, “A Review on Forest Fire Detection Techniques,” 5 Março 2014.
- [59] F. Pereira, “Multi-application Video Coding: Targeting HD Resolution,” *Audiovisual Communication*, 2019/2020.

- [60] Supreme Number, Lda., “Plano Regional de Ordenamento Florestal da Região Autónoma da Madeira PROF-RAM,” Direção Regional de Florestas e Conservação da Natureza, Funchal, 2015.
- [61] Grupo de Trabalho dos Incêndios Florestais, “Medidas de Proteção e Resiliência de Infraestruturas de Comunicações Eletrónicas,” ANACOM, 2018.
- [62] Geocaching, “GC8J7MH Torre de Vigilância do Pico do Suna,” [Online]. Available: https://www.geocaching.com/geocache/GC8J7MH_torre-de-vigilancia-do-pico-do-suna?guid=d296f247-1bbb-4a24-8950-0fe94a785b4a. [Acedido em Junho 2020].
- [63] ANACOM, “Serviço fixo. Caracterização, estrutura e condições de funcionamento,” 2015.
- [64] ANACOM, “Faixas de frequências superiores a 1 GHz - Redes de Ligações Ponto-Ponto e Redes de Ligações Ponto-Multiponto,” 2019.
- [65] ANACOM, “Detentores de redes privadas de telecomunicações,” 2002.
- [66] ANACOM, “Isenção De Licença De Estação,” 2020.
- [67] ANACOM, “Utilização de sistemas sem fios de banda larga (WAS/RLAN) na faixa dos 5 GHz (5150-5350 MHz e 5470-5725 MHz),” Junho 2015. [Online]. Available: <https://anacom.pt/render.jsp?contentId=1150247>. [Acedido em Maio 2020].
- [68] ANACOM, “Acesso fixo de banda larga (BFWA),” [Online]. Available: <https://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=388853>. [Acedido em Maio 2020].
- [69] Electronic Communications Committee, “ECC RECOMMENDATION (06)04 - USE OF THE BAND 5 725-5 875 MHz FOR BROADBAND FIXED WIRELESS ACCESS (BFWA),” 2006.
- [70] ANACOM, *Simulador Taxa 1.4.1 - SFFH Faixas Superiores a 1GHz - LPP*.
- [71] R. Lombardi, “Microwave and Millimetre-wave for 5G Transport,” ETSI White Paper No. 25, França, 2018.

Anexos

Anexo A – Gráficos do Número de Ligações por Empresa

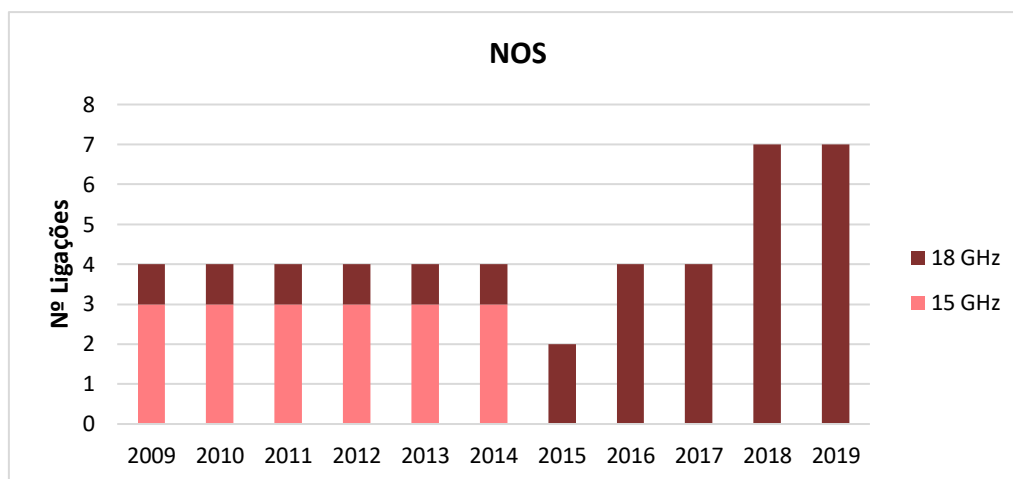


Figura A.1 – Número de ligações da NOS em função das frequências utilizadas.

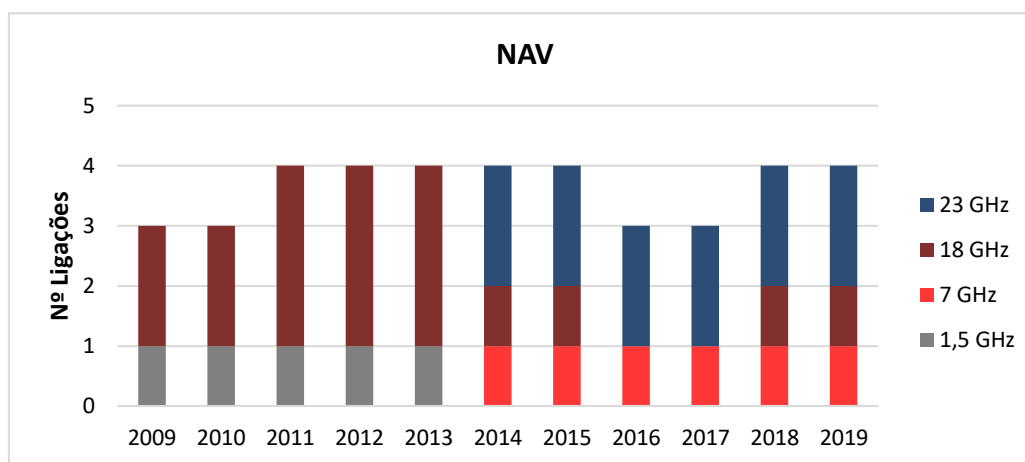


Figura A.2 – Número de ligações da NAV em função das frequências utilizadas.

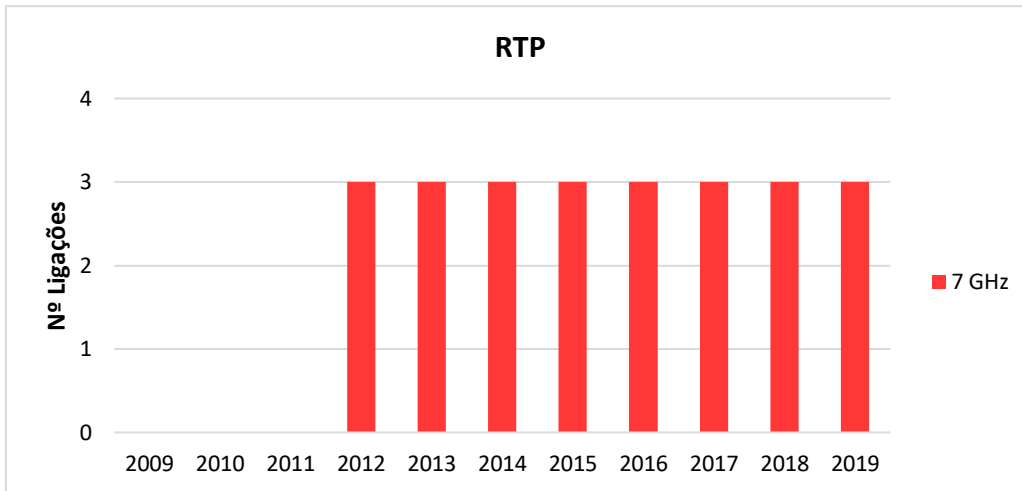


Figura A.3 – Número de ligações da NAV em função das frequências utilizadas.

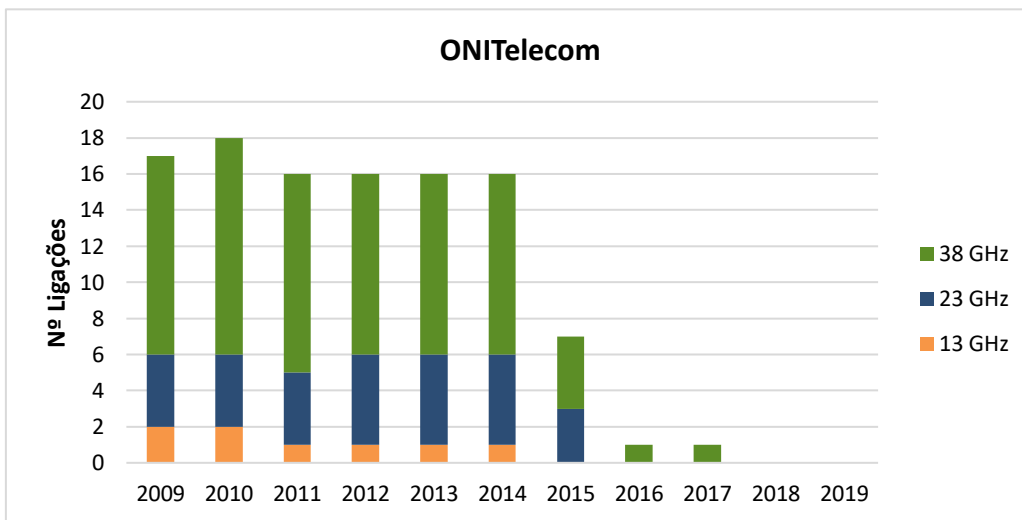
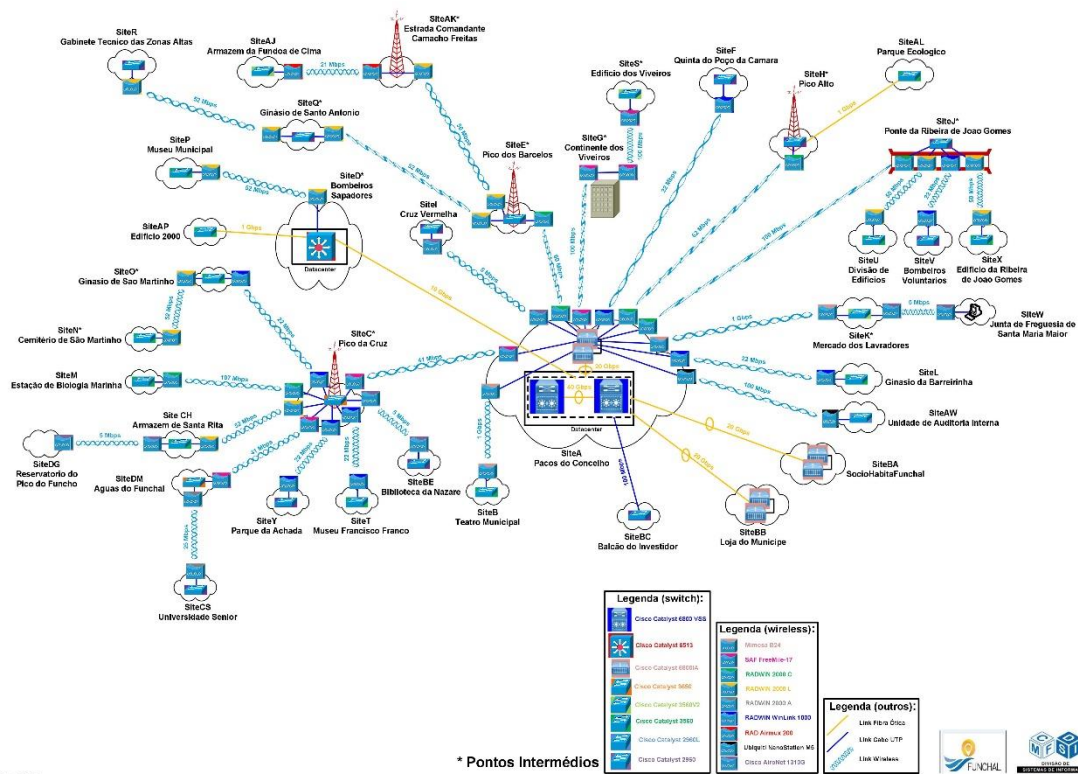


Figura A.4 – Número de ligações da ONITelecom em função das frequências utilizadas.

Anexo B – Infraestrutura da Rede da CMF



Paulo Aires - 02-10-2019 - 2:47:16

Figura B.1 – Infraestrutura da rede da CMF – Interligação entre Sites.

Anexo C – Locais Propícios para Estações de Monitorização

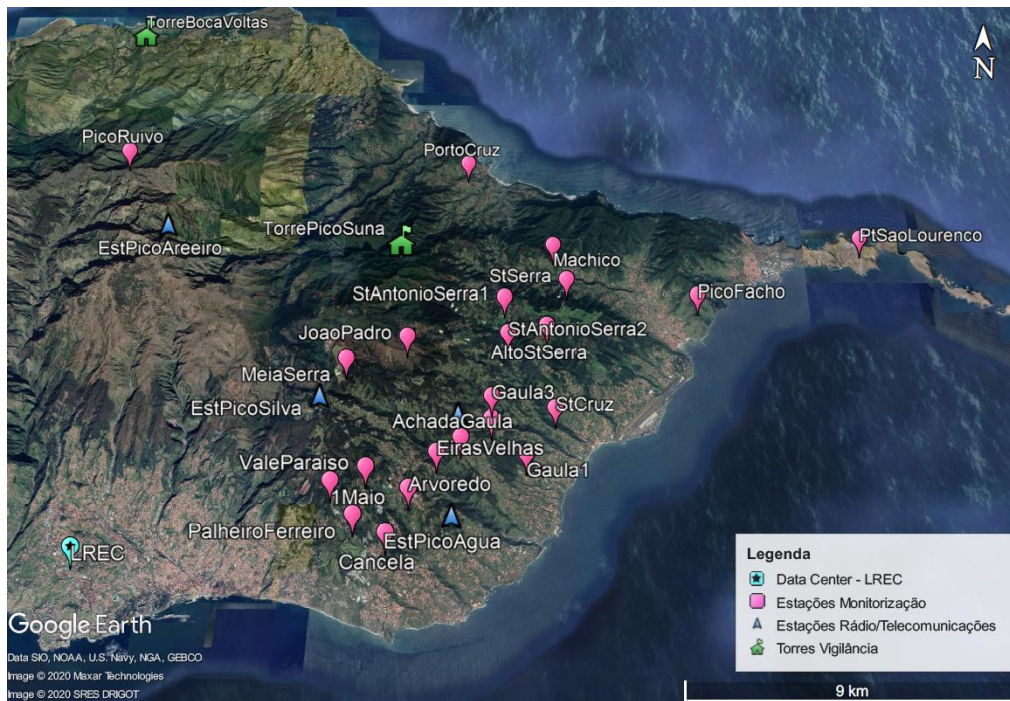


Figura C.1 – Locais propícios para implementação de estações de monitorização.

Anexo D – Mapas de Enquadramento Visual

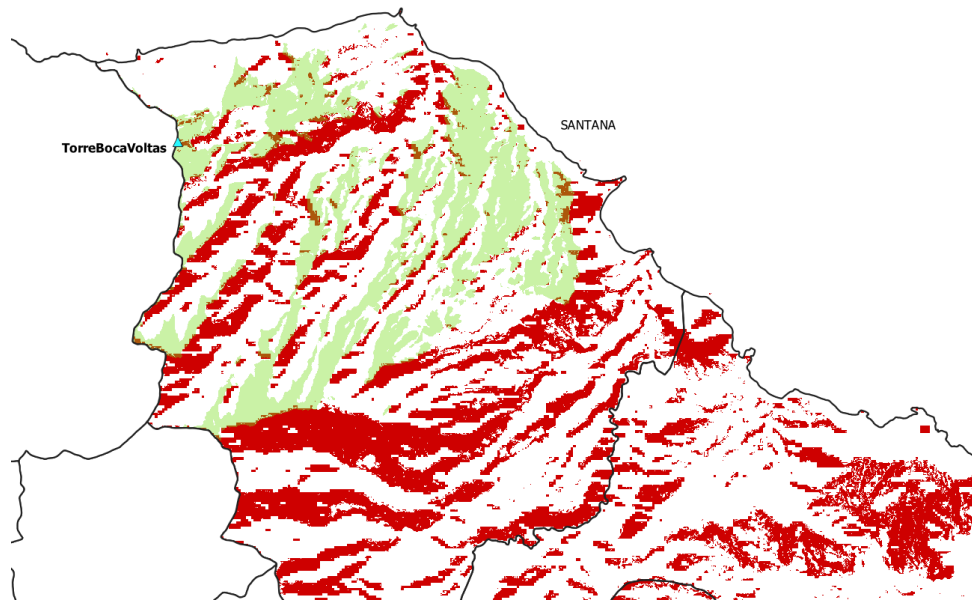


Figura D.1 – Enquadramento visual a partir da Torre da Boca das Voltas (a verde) e suscetibilidade incendiária (vermelho).

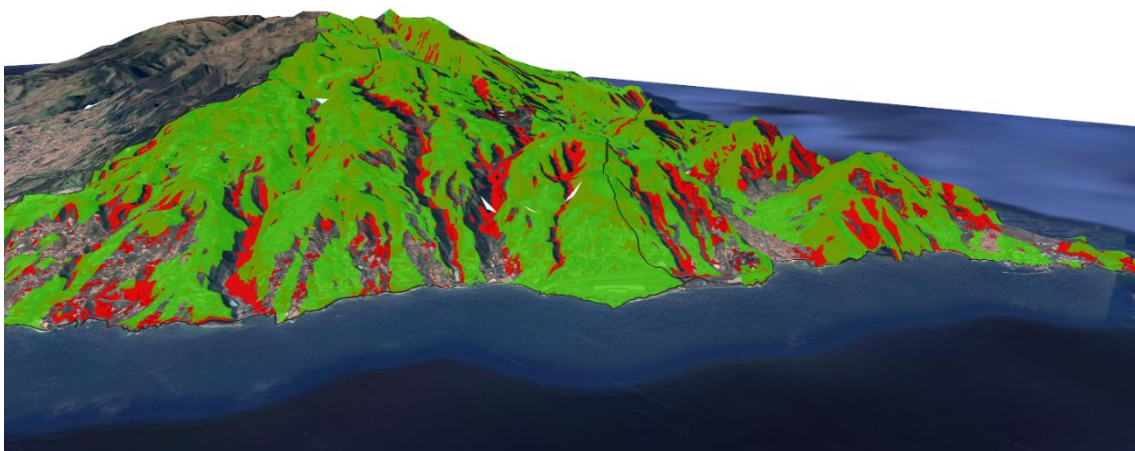


Figura D.2 – Enquadramento visual em 3D a partir das estações de monitorização (verde) e suscetibilidade incendiária (vermelho).

Anexo E – Características das Soluções Estudadas

Tabela E.1 – Características detalhadas da solução inicial utilizando bandas livres.

Emissor					Recetor					Distância [km]	Coeficiente Co	Frequência [GHz]	Polarização	Aten. Obstáculos [dB]	Aten. Atmosférica [dB]	Aten. Hidrometeoritos [dB]
Designação	Antena			Aten. Cabos [dB]	Designação	Antena			Aten. Cabos [dB]							
	Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]			Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]								
LREC	10	4,5	45,7	0,79	EstPicoSilva	16	4,5	45,7	1,03	7,7	3,5	5,8	H	0	0,09	1,61
EstPicoSilva	30	1,5	36,2	1,59	EstPicoAreiro	12	1,5	36,2	0,87	7,0	10,5	5,8	H	0	0,09	1,51
EstPicoSilva	9	0,3	21,6	0,80	EstEiroses	3	0,3	21,6	0,54	3,9	8	5,4	H	0	0,04	0,70
EstPicoAreiro	10	0,3	21,6	0,84	PicoRuivo	3	0,3	21,6	0,54	3,0	10,5	5,4	H	0	0,03	0,56
EstPicoAreiro	8	0,3	22,2	0,71	TorrePicoSuma	13	0,3	22,2	0,91	6,8	10,5	5,8	H	0	0,08	1,47
TorrePicoSuma	13	0,6	27,6	0,96	StSerra	3	0,6	27,6	0,54	5,1	6	5,4	H	0	0,06	0,88
StSerra	2	1,5	36,2	0,48	PtSaoLourenco	3	1,5	36,2	0,52	9,3	3,5	5,8	H	0	0,11	1,83

Tabela E.2 – Características detalhadas da solução inicial utilizando bandas livres (continuação).

Emissor	Recetor													
Designação	Designação	Aten. Nuvens [dB]	Aten. Nevoeiro [dB]	Aten. Suplementar [dB]	Reflexões p_s/p_d [dB]	P.I.R.E [dBm]	Potência Emissão [dBm]	Potência Receção [dBm]	Ritmo Transmissão [Mbit/s]	Largura Banda [MHz]	Modulação	Fator Ruído [dB]	Margem Segurança [dB]	Margem Crítica [dB]
LREC	EstPicoSilva	0,56	0,17	0,56	$-\infty$	36	-10	-46,4	140	40	16 QAM	7,58	3,1	7,2
EstPicoSilva	EstPicoAreeiro	0,65	0,16	0,65	$-\infty$	36	0,7	-54,8	140	40	16 QAM	7,58	2,9	6,8
EstPicoSilva	EstEiroses	0,61	0,08	0,61	-11,8	30	8,9	-74,7	34	20	4 QAM	7,54	3,2	7,4
EstPicoAreeiro	PicoRuivo	0,04	0,06	0,06	$-\infty$	30	0	-74,9	34	20	4 QAM	7,54	8,8	8,8
EstPicoAreeiro	TorrePicoSuma	0,55	0,15	0,55	-27,0	36	14	-68,2	34	20	4 QAM	7,58	3,2	7,5
TorrePicoSuma	StSerra	0,07	0,10	0,10	-22,7	30	0	-67,7	34	20	4 QAM	7,54	3,8	8,7
StSerra	PtSaoLourenco	-	0,21	0,21	$-\infty$	36	0	-56,0	34	20	4 QAM	7,58	3,2	7,5

Tabela E.3 – Características detalhadas da solução inicial utilizando repetidores passivos.

Emissor					Receptor					Distância [km]	Coeficiente Co	Frequência [GHz]	Polarização	Aten. Obstáculos [dB]	Aten. Atmosférica [dB]	Aten. Hidrometeoritos [dB]
Designação	Antena			Aten. Cabos [dB]	Designação	Antena			Aten. Cabos [dB]							
	Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]			Altura [m]	Diâmetro [m]	Ganho [dBi]								
LREC	10	1,5	36,2	0,79	TerreiroLuta	4	1,5	36,2	0,55	5,5	3,5	5,8	H	0	0,07	1,27
LREC	10	1,5	36,2	0,79	CurralRomeiros	10	1,5	36,2	0,79	5,8	3,5	5,8	H	0	0,07	1,31
TerreiroLuta	4	0,3	21,6	0,59	EstPicoSilva	16	0,3	21,6	1,09	2,4	10,5	5,4	H	0	0,03	0,47
CurralRomeiros	12	0,3	21,6	0,92	EstPicoSilva	28	0,3	21,6	1,59	1,9	8	5,4	H	0	0,02	0,37

Tabela E.4 – Características detalhadas da solução inicial utilizando repetidores passivos (continuação).

Emissor	Receptor	Aten. Nuvens [dB]	Aten. Nevoeiro [dB]	Aten. Suplementar [dB]	Reflexões p_s/p_d [dB]	P.I.R.E [dBm]	Potência Emissão [dBm]	Potência Recepção [dBm]	Ritmo Transmissão [Mbit/s]	Largura Banda [MHz]	Modulação	Fator Ruído [dB]	Margem Segurança [dB]	Margem Crítica [dB]
Designação	Designação													
LREC	TerreiroLuta	-	0,12	0,12	$-\infty$	36	0,3	-51,4	140	40	16 QAM	7,58	3,2	7,4
LREC	CurralRomeiros	-	0,13	0,13	$-\infty$	36	0,6	-51,8	140	40	16 QAM	7,58	2,0	4,7
TerreiroLuta	EstPicoSilva	0,03	0,05	0,05	$-\infty$	30	5	-68,2	140	40	16 QAM	7,54	3,2	3,2
CurralRomeiros	EstPicoSilva	0,33	0,04	0,33	$-\infty$	30	4	-68,2	140	40	16 QAM	7,54	3,3	3,3

Tabela E.5 – Casos de estudo à análise da ligação LREC-EstPicoSilva, utilizando bandas licenciadas.

Frequência [GHz]	Potência Emissão Máxima [dBm]	Aten, Suplementar (Nuvens) [dB]	Largura Banda [MHz]	Diâmetro Antenas [m]	Ganho Antenas [dBi]	Modulação	Margem Crítica [dB]	Margem Segurança [dB]	Taxa Anual [€]
6	28,4	0,60	29,65	0,6	28,5	64 QAM	2,6	1,1	2 695,65
				0,9	32,0	64 QAM	18,6	8,2	
7	27,6	0,82	28	0,6	29,9	64 QAM	1,3	0,6	2 545,64
				0,9	33,4	64 QAM	17,3	7,6	
8	26,9	1,06	28	0,6	31,0	64 QAM	-1,1	-0,5	2 545,64
				0,9	34,5	64 QAM	15,0	6,6	
11	25,3	2,00	28	0,6	33,8	64 QAM	-9,1	-3,9	2 545,64
				0,9	37,3	64 QAM	7,1	3,1	
13	24,4	2,78	28	0,9	38,8	64 QAM	3,1	1,4	1 181,41
				1,2	41,3	64 QAM	14,5	6,4	
			56	0,9	38,8	16 QAM	15,8	6,9	2 362,82
						8 PSK	18,9	9,9	
15	23,7	3,68	28	0,9	40,0	64 QAM	-4,2	-1,8	1 181,41
				1,2	42,5	64 QAM	7,3	3,2	
			56	0,9	40,0	16 QAM	7,8	3,7	2 362,82
						8 PSK	10,9	6,7	
18	22,7	5,26	55	1,2	44,1	16 QAM	0,7	0,7	1 179,34
						8 PSK	3,8	3,8	
			110	0,9	41,6	4 QAM	2,0	2,0	2 358,67
						4 PSK	2,0	2,0	
				1,2	44,1	4 QAM	7,0	7,0	
						4 PSK	7,0	7,0	